

# **Industrie 4.0-angepasste Datenverkehrskonzepte für industrielle 5G-TSN-Netzwerke**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von Niklas Ambrosy

geb. am 28.08.1995 in Unna

genehmigt durch die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter/innen:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar

Prof. Dr.-Ing. Carlos Eduardo Pereira

Promotionskolloquium am 07.02.2025

## Vorwort

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Dissertation das generische Maskulinum verwendet. Jegliche Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf alle Geschlechter, sofern nicht anders kenntlich gemacht. In der vorliegenden Dissertation werden häufig englische Begriffe verwendet, für die nicht immer eine geeignete deutsche Übersetzung existiert. Zentrale Begriffe und Konzepte werden im Glossar erläutert. Die Inhalte und Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation gelten ab 5G voraussichtlich auch für alle nachfolgenden künftigen Mobilfunkgenerationen, z. B. 6G, da einmal durch 3GPP standardisierte Funktionalitäten normalerweise bestehen bleiben.

Auszüge der vorliegenden Dissertation wurden als wissenschaftliche Arbeiten auf nationalen sowie internationalen Konferenzen vorgestellt und in Journals veröffentlicht:

Referenz	Konferenz-/Journalpublikation	Kapitel
[Am22a]	Niklas Ambrosy et al.; Self-Navigating Automotive Production: Using 5G for automated driving in car assembly; 2022 IEEE 18 <sup>th</sup> International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). DOI: 10.1109/WFCS53837.2022.9779168	5.3
[Am22b]	Niklas Ambrosy et al.; 5G and DetNet: Towards holistic determinism in industrial networks; 23rd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). DOI: 10.1109/ICIT48603.2022.10002776	6.3
[AU22]	Niklas Ambrosy und Lisa Underberg; Traffic priority mapping for a joint 5G-TSN QoS model; Kommunikation in der Automation: Beiträge des Jahreskolloquiums KomMA 2022. DOI: 10.25644/a4ws-9a49	7
[Am24]	Niklas Ambrosy et al.; 5G QoS model for Time-Sensitive Networking. at – Automatisierungstechnik 4/72, S. 308–319, 2024. DOI: 10.1515/auto-2024-0003	7
[AU23]	Niklas Ambrosy und Lisa Underberg; 5G packet delay considerations for different 5G-TSN communication scenarios; 2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN). DOI: 10.1109/INDIN51400.2023.10218051	8.2
[AAU23]	Niklas Ambrosy, Azarakhsh Abazari und Lisa Underberg; Simulations of the 5G-TSN bridge delay: towards a joint QoS model; Kommunikation in der Automation: Beiträge des Jahreskolloquiums KomMA 2023. DOI: 10.25673/111643	8.3

Zudem entstanden im Zuge der Erarbeitung folgende Patentanmeldungen bzw. Offenlegungen:

Referenz	Patent/Offenlegung
[ABL22]	Ambrosy, Niklas; von Bülow, Friedrich; Lehmann, Lukas. Verfahren zur Kontrolle eines Produktionsprozesses für Kraftfahrzeuge, 2022. DE102022209315A1. Anmelder: Volkswagen AG.
[Am23a]	Ambrosy, Niklas. 5G QoS Parameter für die 5G-TSN-Integration, 2023. WO002024037745A1. Anmelder: Volkswagen AG
[Am23b]	Ambrosy, Niklas. System und Verfahren zur Sicherheits-Fernsteuerung, 2023. DE102023203064B3. Anmelder: Volkswagen AG
[ABL23]	Ambrosy, Niklas; von Bülow, Friedrich; Lehmann, Lukas. Verfahren zur Optimierung eines Prozessschrittes eines Herstellungs-, Reparatur- oder Wartungsprozesses eines Kraftfahrzeugs, 2023. DE102023200018A1. Anmelder: Volkswagen AG
[LAB23]	Lehmann, Lukas; Ambrosy, Niklas; von Bülow, Friedrich. Verfahren zum Orten eines Fahrzeugs durch eine Person, sowie Fahrzeugortungssystem, 2023. DE102023200046A1. Anmelder: Volkswagen AG
[Pu23]	Putter, Roman; Ambrosy, Niklas; Bülow, Friedrich von; Lehmann, Lukas; Sperber, Johannes. Verfahren und Steuergerät für ein Kraftfahrzeug, 2023. DE102023200306A1. Anmelder: Volkswagen AG

**Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.**

## Zusammenfassung

Trends und Weiterentwicklungen von Industrie 4.0 in Richtung einer ständig wandelbaren Fabrik führen zu mehr Mobilität und Flexibilität der einzelnen Teilnehmer in der Fabrikhalle. Dadurch steigen die Anforderungen an die drahtlose Kommunikation. Der entscheidende Faktor ist dabei eine hochzuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz, wie sie z. B. Anwendungsfälle der kooperativen mobilen Robotik fordern.

5G-Mobilfunk bietet der industriellen Automatisierung eine alternative drahtlose Technologie zu Bluetooth und (Industrial) WLAN, bei der industrielle Anforderungen bereits in der Standardisierung berücksichtigt wurden. Time-Sensitive Networking (TSN) umfasst Mechanismen für Echtzeit und Determinismus über Ethernet. Die Kombination beider Technologien soll hybride kabelgebundene und drahtlose Netzwerke für cyber-physische Systeme (CPS) im Sinne von Industrie 4.0 ermöglichen. Um 5G in TSN zu integrieren, spezifizierte die globale Standardisierungsorganisation für Mobilfunk, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), das Modell des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge. Diese enthält TSN-Übersetzungsfunktionen, die Mechanismen zur Zeitsynchronisation und Steuerung der Dienstgüte, engl. Quality of Service (QoS), von TSN auf 5G abbilden.

Allerdings sind 5G und TSN lediglich in Testumgebungen praktisch implementiert, da die Technologiereife bislang nicht für einen produktiven Einsatz ausreicht. Zudem sind viele Aspekte des Integrationskonzepts für 5G und TSN noch ungeklärt. Bislang liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Zeitsynchronisation von TSN über 5G, was eine Grundvoraussetzung für die deterministische Datenübertragung bildet. Fundierte wissenschaftliche Untersuchungen zur Zuordnung der jeweiligen Parameter und Mechanismen für ein gemeinsames QoS-Modell bzw. Datenverkehrskonzept stehen weiterhin aus.

Zur Lösung dieser Problemstellung gilt es die folgenden Fragen zu klären: Wie lassen sich TSN als kabelgebundene und 5G-Mobilfunk als drahtlose Kommunikationsstandards so kombinieren, dass ein für Industrie 4.0 geeignetes Datenverkehrskonzept entsteht? Nach welchen Anforderungen lassen sich Anwendungsfälle für die Integration von 5G in TSN im Kontext von Industrie 4.0 charakterisieren? Welche Faktoren spielen für eine einsatzfähige Lösung einer vollintegrierten industriellen 5G-TSN-Netzwerkarchitektur im Hinblick auf Industrie 4.0 eine Rolle? Wie sieht ein ganzheitliches Datenverkehrskonzept basierend auf den Kommunikationsanforderungen der Applikationen kombiniert mit der Netzwerkarchitektur aus? Inwiefern ist dieses Datenverkehrskonzept umsetzbar?

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit diesen Forschungsfragen aus der dafür notwendigen ganzheitlichen Sicht. Dafür werden einerseits Standards wie IEC/IEEE 60802 (TSN-Profil für die industrielle Automatisierung) sowie das 5G Bridge-Modell und das 5G QoS-Modell aus 3GPP herangezogen. Andererseits werden Informationen über repräsentativen Datenverkehr in industriellen Automatisierungsnetzwerken benötigt. In dieser Dissertation werden die Eigenschaften und Unterschiede von 5G und TSN beim Umgang mit QoS für bestimmten Datenverkehr analysiert und mögliche Lösungen aufgezeigt, um die jeweiligen QoS-Parameter aufeinander abzubilden. Aus der Analyse von Datenverkehrsmodellen wird ein Datenverkehrskonzept entwickelt, welches mehrere Konfigurationen mit unterschiedlicher Komplexität und Flexibilität umfasst. Die Validierung des Datenverkehrskonzepts erfolgt in drei Schritten anhand von Messungen an einem realen Versuchsaufbau, analytischen Berechnungen sowie Simulationen.

Die Ergebnisse dieser Dissertation tragen zur Entwicklung eines 5G QoS-Modells für die Integration in TSN in Industrie 4.0 bei und dienen als Grundlage für die Konkretisierung der TSN-Übersetzungsfunktionen im 5G-System.

## Abstract

Trends and enhancements of Industry 4.0 towards a constantly adaptive factory lead to more mobility and flexibility on the factory floor. Consequently, requirements on wireless communication increase. The decisive factor is the demand for highly reliable communication with low latency, as required by cooperative mobile robotics use cases, for example.

5G mobile radio offers industrial automation an alternative wireless technology to Bluetooth and (Industrial) Wi-Fi, in which industrial requirements have already been taken into account in the standardization process. Time-Sensitive Networking (TSN) includes mechanisms for real-time and determinism via Ethernet. The combination of both technologies should enable hybrid wired and wireless networks for cyber-physical systems (CPS) in the sense of Industry 4.0. In order to integrate 5G into TSN, the global standardization organization for mobile radio communications, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), specified the model of the 5G system as a virtual TSN bridge. This contains TSN translator functions that map mechanisms for time synchronization and Quality of Service (QoS) control from TSN to 5G.

However, 5G and TSN have only been practically implemented in test environments, as the technological maturity is not yet sufficient for productive use. In addition, many aspects of the integration concept for 5G and TSN are still unclear. So far, research has focused on the time synchronization of TSN over 5G, which is a basic requirement for deterministic data transmission. Sound scientific studies on the assignment of the respective parameters and mechanisms for a common QoS model or data traffic concept are still pending.

To solve this problem, the following questions need to be clarified: How can TSN as a wired communication standard and 5G mobile radio as a wireless communication standard be combined to create a data traffic concept suitable for Industry 4.0? What requirements can be used to characterize use cases for the integration of 5G in TSN in the context of Industry 4.0? What factors affect a viable solution for a fully integrated industrial 5G-TSN network architecture with regard to Industry 4.0? What does a holistic data traffic concept based on the communication requirements of the applications combined with the network architecture look like? To what extent can this data traffic concept be implemented?

This doctoral thesis deals with these research questions from the necessary holistic perspective. On the one hand, standards such as IEC/IEEE 60802 (TSN profile for industrial automation) as well as the 3GPP bridge and QoS models for 5G are used. On the other hand, information on representative data traffic in industrial automation networks is required. This doctoral thesis analyzes the characteristics and differences of 5G and TSN when dealing with QoS for specific data traffic and identifies possible solutions to map the individual QoS parameters to each other. Based on the analysis of data traffic models, a data traffic concept is developed, which includes multiple configurations with different complexity and flexibility. The validation of the data traffic concept is carried out in three steps using measurements on a real test setup, analytical calculations and simulations.

The results of this doctoral thesis contribute to the development of a 5G QoS model for integration into TSN in Industry 4.0 and serve as a basis for the concretization of the TSN translator functions in the 5G system.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	2
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung .....	3
1.3 Aufbau der Dissertation .....	3
<b>2 Technische Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Time-Sensitive Networking .....	4
2.1.1 Zeitsynchronisation .....	5
2.1.2 Begrenzte Latenz.....	5
2.1.3 Hohe Zuverlässigkeit .....	7
2.1.4 Ressourcenverwaltung.....	8
2.1.5 Quality of Service in TSN .....	9
2.2 Mobilfunk .....	12
2.2.1 5G und dessen Funktionalitäten .....	12
2.2.2 Abgrenzung zu anderen Funktechnologien .....	15
2.2.3 5G-Betreibermodelle.....	17
2.2.4 5G-Integration in industrielle Ethernet-Netzwerke .....	19
2.2.5 Anbindung von Kommunikationsteilnehmern .....	22
2.2.6 Quality of Service in 5G .....	24
2.3 Deterministic Networking .....	28
<b>3 Stand der Forschung zur Integration von 5G in TSN</b> .....	<b>32</b>
3.1 Eingrenzung des Forschungsschwerpunkts.....	32
3.2 Verwandte Arbeiten zur Netzwerkarchitektur.....	35
3.3 Verwandte Arbeiten zur Zeitsynchronisation .....	37
3.4 Verwandte Arbeiten zur Flow- und Ressourcenverwaltung .....	38
3.4.1 Messungen in realen 5G-Netzwerken.....	38
3.4.2 Analytische Berechnungen.....	41
3.4.3 Simulationen .....	42

<b>4</b>	<b>Forschungsmethodik</b> .....	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Analyse relevanter Anwendungsfälle für 5G und TSN</b> .....	<b>48</b>
5.1	5G-spezifische Anwendungsfälle .....	48
5.2	TSN-spezifische Anwendungsfälle .....	50
5.3	Automobilproduktionsspezifische Anwendungsfälle .....	50
5.3.1	Faktoren für automatisiertes Fahren in der Automobilproduktion .....	52
5.3.2	Umsetzungskonzept .....	54
5.4	Fazit der Anwendungsfälle .....	55
<b>6</b>	<b>Konzeptionierung hybrider Netzwerkarchitekturen</b> .....	<b>57</b>
6.1	Voraussetzungen .....	57
6.2	Architekturkonzept für 5G und TSN .....	60
6.3	Architekturkonzept für 5G und DetNet .....	61
6.4	Fazit der Architekturkonzepte .....	63
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines Datenverkehrskonzepts für 5G und TSN</b> .....	<b>65</b>
7.1	Ansätze für ein QoS-Mapping zwischen 5G und TSN .....	65
7.1.1	Statisches Mapping auf Basis standardisierter 5QIs .....	67
7.1.2	Statisches Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs .....	68
7.1.3	Kombination aus dynamischem und statischem Mapping .....	69
7.2	Vergleich und Bewertung der Mapping-Ansätze .....	72
7.3	Künftige Erweiterung für den kombinierten Mapping-Ansatz .....	73
7.4	Fazit des Datenverkehrskonzepts .....	76
<b>8</b>	<b>Validierung des entwickelten Datenverkehrskonzepts</b> .....	<b>77</b>
8.1	Messungen in Laborversuchen .....	77
8.1.1	Versuchsaufbau und -planung .....	78
8.1.2	Messergebnisse .....	81
8.1.3	Diskussion und Fazit der Messungen .....	85
8.2	Analytische Berechnungen .....	89
8.2.1	Methodik und Herleitung .....	89
8.2.2	Berechnungsergebnisse .....	95
8.2.3	Diskussion und Fazit der analytischen Berechnung .....	96
8.3	Simulationen .....	98
8.3.1	Simulationsmodell .....	98
8.3.2	Simulationsergebnisse .....	100
8.3.3	Diskussion und Fazit der Simulation .....	103
8.4	Beurteilung der Integrationsfähigkeit von 5G in TSN .....	105

<b>9</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>107</b>
9.1	Fazit .....	107
9.2	Ausblick.....	109
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>133</b>
	Industrie 4.0 .....	133
	OSI Schichten-Modell.....	133
	Echtzeit und Determinismus .....	134
	Kommunikationsdienst .....	135
	Dienstgüte (Quality of Service) .....	135
	Datenverkehrsmodell und -konzept .....	136
	PROFINET .....	136
	OPC UA .....	137
	<b>Anhang.....</b>	<b>139</b>
	<b>Ehrenerklärung.....</b>	<b>143</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Modell des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge gemäß 3GPP TS 23.501.....	2
Abbildung 2.1: Prozess der Zeitsynchronisation gemäß IEEE 802.1AS.....	5
Abbildung 2.2: Funktionsweise des Time-Aware Shaper gemäß IEEE 802.1Qbv .....	6
Abbildung 2.3: Prinzip von Frame Preemption gemäß IEEE 802.1Qbu .....	7
Abbildung 2.4: Redundanz durch Frame Replication und Elimination gemäß IEEE 802.1CB .....	7
Abbildung 2.5: Per-Stream Filtering and Policing gemäß IEEE 802.1Qci .....	8
Abbildung 2.6: TSN-Konfigurationsmodelle gemäß IEEE 802.1Qcc.....	8
Abbildung 2.7: Zeitstrahl der 3GPP-Releases.....	12
Abbildung 2.8: 5G-Systemarchitektur.....	13
Abbildung 2.9: Open RAN-Architektur.....	14
Abbildung 2.10: Ziele-Dreieck und zugehörigen Anwendungen .....	14
Abbildung 2.11: Überblick der Funktechnologien nach Datenrate und Reichweite .....	15
Abbildung 2.12: Nicht-öffentliches und öffentliches 5G-Netzwerk.....	18
Abbildung 2.13: Optionen zur Verortung der UPF.....	19
Abbildung 2.14: 5G-Integration in Ethernet als a) Link-Modell und b) Bridge-Modell.....	20
Abbildung 2.15: Modell des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge gemäß 3GPP TS 23.501.....	20
Abbildung 2.16: Alternativen der SPS-Anbindung .....	22
Abbildung 2.17: Anbindung von Kommunikationspartnern .....	23
Abbildung 2.18: 5G QoS-Architektur gemäß 3GPP TS 38.300 .....	24
Abbildung 2.19: Ende-zu-Ende QoS-Verwaltung .....	24
Abbildung 2.20: Konzept des 5G-Systems als virtueller DetNet-Router.....	29
Abbildung 2.21: Integration von TSN in DetNet als a) TSN-Subnetz, b) Layer 2-Tunnel .....	30
Abbildung 3.1: Literaturklassifizierung nach technischem Beitrag, Forschungs- und Beitragstyp.....	33
Abbildung 4.1: Forschungsansatz zur Ableitung von Datenverkehrskonzepten für 5G und TSN.....	47
Abbildung 4.2: Forschungsmethodik und Einbettung eigener Veröffentlichungen .....	47
Abbildung 5.1: Szenarien zur Auslagerung von FTS-Steuerfunktionen .....	49
Abbildung 5.2: Kopplung der TSN-Netzwerke von Produktionsanlage und Fahrzeug über 5G.....	51
Abbildung 5.3: Automobilproduktion mit Montagelinie und Matrixfertigung.....	53
Abbildung 5.4: Prinzip des Rolling Chassis.....	53
Abbildung 5.5: Einordnung von SNAP, AFP und AVP .....	54
Abbildung 6.1: Industrielles Netzwerk mit FTS in zwei Produktionszellen.....	57
Abbildung 6.2: Anbindungsmöglichkeiten verschiedener TSN-Domänen.....	58
Abbildung 6.3: 5G-Integrationskonzept für Layer 2-Datenverkehr .....	60

Abbildung 6.4: Basiskonzept einer industriellen Netzwerkarchitektur mit 5G und TSN .....	60
Abbildung 6.5: 5G-TSN-Netzwerkarchitektur mit Redundanz, hierarchischer CNC und Edge Cloud ...	61
Abbildung 6.6: CPS-Architekturkonzept basierend auf 5G und DetNet .....	63
Abbildung 7.1: Dynamisches 5G-TSN QoS-Mapping.....	70
Abbildung 7.2: Schematische Zuordnung der 64 QoS-Flows auf die Datenverkehrseigenschaften ....	74
Abbildung 8.1: Performance-Testkonzept mit Testsystem und System unter Test .....	78
Abbildung 8.2: Testsystem zur Integrations- und Performance-Analyse inkl. Einflussparameter .....	78
Abbildung 8.3: Versuchsaufbau mit zwei Varianten der 5G-Anbindung .....	79
Abbildung 8.4: TAS-Konfiguration für (a) minimale Latenz und (b) minimalen Jitter .....	81
Abbildung 8.5: Aktualisierungs- und Übertragungszeiten von PROFINET über zwei 5G-Links.....	82
Abbildung 8.6: Aktualisierungs- und Übertragungszeiten von PROFINET über einen 5G-Link .....	82
Abbildung 8.7: CDFs der Übertragungszeiten in a) Szenario 1 und b) Szenario 2 .....	83
Abbildung 8.8: QoS-Differenzierung pro a) UE/Endgerät und b) Flow .....	87
Abbildung 8.9: Bridge Delay und PDB im 5G Bridge-Modell .....	90
Abbildung 8.10: Versuchsaufbau .....	91
Abbildung 8.11: RTT-Messergebnisse für Szenario 1.....	92
Abbildung 8.12: RTT-Messergebnisse für Szenario 2.....	92
Abbildung 8.13: RTT-Messergebnisse für Szenario 3.....	92
Abbildung 8.14: Berechnete OWD-Verhältnisse.....	94
Abbildung 8.15: Berechnete Verhältnisse von OWD zu RTT .....	95
Abbildung 8.16: Schematische Darstellung der Komponenten und Module in OMNeT++ .....	99
Abbildung 8.17: Zwei UEs im DL ohne Priorisierung (Iteration 3) .....	101
Abbildung 8.18: Drei UEs im DL ohne Priorisierung (Iteration 5) .....	101
Abbildung 8.19: Zwei UEs im UL ohne Priorisierung (Iteration 9) .....	102
Abbildung 8.20: Zwei UEs im UL mit Priorisierung (Iteration 10) .....	102
Abbildung 8.21: UE zu UE mit Priorisierung (Iteration 14) .....	102
Abbildung 8.22: Drei UEs (zwei Sender und ein Empfänger) mit Priorisierung (Iteration 16) .....	102
Abbildung 8.23: Mischverkehr mit zwei UEs ohne Priorisierung; a) DL und b) UL (Iteration 19).....	103
Abbildung 8.24: Mischverkehr mit zwei UEs und Priorisierung; a) DL und b) UL (Iteration 20).....	103

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der IEEE TSN-Standards .....	4
Tabelle 2.2: Datenverkehrsmodell-Spezifikation gemäß Industry IoT Consortium .....	9
Tabelle 2.3: Zuordnung von TSN-Datenverkehrstyp, -klasse und -priorität gemäß IEC/IEEE 60802 ....	11
Tabelle 2.4: Übersicht der Mobilfunkgenerationen.....	12
Tabelle 2.5: Vergleich der WLAN-Standards.....	16
Tabelle 2.6: Vergleich zwischen Wi-Fi 6, IWLAN und 5G .....	17
Tabelle 2.7: 5G QoS-Parameter für standardisierte 5QIs gemäß 3GPP TS 23.501 .....	27
Tabelle 2.8: Übersicht der IETF DetNet-Standards .....	28
Tabelle 2.9: Vergleich der Eigenschaften von TSN, DetNet und 5G .....	31
Tabelle 3.1: Übersicht zu thematischen Schwerpunkten in der Literatur .....	34
Tabelle 5.1: AVP-Typen und Aufgabenzuweisung .....	52
Tabelle 7.1: 5G-TSN QoS-Mapping auf Basis standardisierter 5QIs .....	68
Tabelle 7.2: 5G-TSN QoS-Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs.....	69
Tabelle 7.3: 5G-TSN QoS-Mapping mit dynamischen und statischen 5QIs .....	71
Tabelle 7.4: Vergleich und Bewertung der QoS-Mapping-Ansätze .....	72
Tabelle 7.5: Kalkulation zur gerechten Verteilung von QoS-Flows pro Datenverkehrsklasse .....	74
Tabelle 7.6: Tabellarische Zuordnung der 64 QoS-Flows auf die TSN-Eigenschaften .....	75
Tabelle 8.1: Zusammenfassung der Messergebnisse inklusive Zuverlässigkeit.....	84
Tabelle 8.2: Vergleich der Messergebnisse dieser Dissertation mit verwandten Arbeiten .....	86
Tabelle 8.3: Kommunikationsszenarien für den kombinierten Einsatz von 5G und TSN .....	90
Tabelle 8.4: Messergebnisse von PROFINET über 5G .....	93
Tabelle 8.5: $\gamma$ -Werte für verschiedene Aktualisierungszeiten .....	94
Tabelle 8.6: Berechnete PDB-Werte .....	96
Tabelle 8.7: Modifizierte QoS-Mapping-Tabelle für 5G und TSN .....	97
Tabelle 8.8: TSN-Parameterkonfiguration für die Simulation der 5G-Übertragungszeiten.....	99
Tabelle 8.9: Maximale Übertragungszeiten in ms pro Iteration und Datenverkehrsklasse .....	100
Tabelle 8.10: Vergleich der Simulationsergebnisse dieser Dissertation mit verwandten Arbeiten ...	104

## Abkürzungen

1L	Ein 5G-Link
2L	Zwei 5G-Links
3GPP	3rd Generation Partnership Project
5GAA	5G Automotive Association
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation
5QI	5G Quality of Service Identifier
AFIF	Automatisiertes Fahren in der Fabrik
AFP	Automated Factory Parking
APN	Access Point Name
AR	Augmented Reality
AVP	Automated Valet Parking
BD	Bridge Delay
C2C	Controller-to-Controller
C2D	Controller-to-Device
CDF	Cumulative Distribution Function; kumulative Verteilungsfunktion
CNC	Centralized Network Configuration
CPE	Customer Premises Equipment
CPS	Cyber-physisches System
CU	Centralized Unit
CUC	Centralized User Configuration
D2Cmp	Device-to-Compute
D2D	Device-to-Device
DCE	Distributed Computing Environment
DC-GBR	Delay-Critical Guaranteed Bit-Rate
DetNet	Deterministic Networking
DL	Downlink
DNN	Data Network Name
DPVZ	Durchschnittliche Ping-Verarbeitungszeit
DSCP	Differentiated Services Code Point
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DS-TT	Device-Side TSN Translator
DU	Distributed Unit
eCPRI	enhanced Common Public Radio Interface
eMBB	enhanced Mobile Broadband
EzE	Ende-zu-Ende
FRER	Frame Replication and Elimination for Redundancy
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GBR	Guaranteed Bit-Rate

GFBR	Guaranteed Flow Bit-Rate
gNB	Next-Generation Node-B; 5G-Basistation
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IIC	Industry IoT Consortium (ehemals: Industrial Internet Consortium)
(I)IoT	(Industrial) Internet of Things
IP	Internet Protocol
iPCF	Industrial Point Coordination Function
iPRP	Industrial Parallel Redundancy Protocol
(I)RT	(Isochronous) Real-Time
IT	Informationstechnik
IWLAN	Industrial Wireless Local Area Network
LLDP	Link Layer Discovery Protocol
MAC	Media Access Control
MDBV	Maximum Data Burst Volume
MEC	Mobile Edge Computing
MFBR	Maximum Flow Bit-Rate
mMTC	massive Machine Type Communication
MNO	Mobile Network Operator; Mobilfunknetzbetreiber
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MTU	Maximum Transmission Unit
(MU-)MIMO	(Multi-User) Multiple Input Multiple Output
NETCONF	Network Configuration Protocol
NFV	Network Function Virtualization
NW-TT	Network-Side TSN Translator
NWV	Netzwerkverzögerung
OAM	Operation, Administration und Maintenance
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPC UA	Open Platform Communication Unified Architecture
ORAN	Open Radio Access Network
OSI	Open Systems Interconnection
OT	Operational Technology; Automatisierungstechnik
OWD	One-Way Delay; Einwegverzögerung
PCP	Priority Code Point
PDB	Packet Delay Budget
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packet Error Rate
PNI-NPN	Public Network Integrated Non-Public Network
PREOF	Packet Replication, Elimination and Ordering Functions
PSFP	Per-Stream Filtering and Policing

PTP	Precision Time Protocol
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QFI	Quality of Service Flow Identifier
QoE	Quality of Experience; Erlebnisqualität
QoS	Quality of Service; Dienstgüte
RAN	Radio Access Network
RAW	Reliable and Available Wireless
RFC	Request for Comments
RPC	Remote Procedure Call
RTT	Roundtrip Time; Zeit für Hin- und Rückweg
RU	Radio Unit
SDN	Software-Defined Networking
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio
SMF	Session Management Function
SNAP	Self-Navigating Automotive Production
SNPN	Standalone Non-Public Network
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SRP	Stream Reservation Protocol
SUT	System unter Test
TAS	Time-Aware Shaper
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time-Division Duplex
TI	Transferintervall
TSCTS	Time Sensitive Communication Time Synchronization Function
TSN (AF)	Time-Sensitive Networking (Application Function)
UE	User Equipment
UL	Uplink
UNI	User Network Interface
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
V2X	Vehicle-to-Everything
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VPN	Virtual Private Network
VR	Virtual Reality
V(X)LAN	Virtual (eXtensible) Local Area Network
YANG	Yet Another Next Generation
WAN	Wide Area Network
WCM	Wireless Communications for Machines
WLAN	Wireless Local Area Network

# 1 Einleitung

In der industriellen Kommunikation kommen verschiedene Netzwerktechnologien und Protokolle mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz. Industrie 4.0<sup>1</sup> führt zu einer zunehmenden Flexibilisierung von Produktionsprozessen, die eine aufwandsarme Konfigurierbarkeit sowie Mobilität und deshalb künftig mehr echtzeitfähige drahtlose Anwendungen erfordern [Ha21a]. Zudem werden cyber-physische Systeme (CPS), d. h. eine Konvergenz der bislang streng voneinander getrennten Netzwerkdomänen von Informationstechnik (IT) und Automatisierungstechnik, engl. Operational Technology (OT), sowie eine Kombination aus kabelgebundenen und drahtlosen echtzeitfähigen und deterministischen<sup>2</sup> Kommunikationstechnologien notwendig [SWG21], [WSJ17], [Zu20]. Insbesondere für die zeitkritische Maschinenkommunikation ist diese Kombination essenziell. Mögliche Anwendungsfälle sind drahtlose Bedien-Panels mit Not-Halt oder fahrerlose Transportsysteme (FTS), um Sicherheit von Personen in mobilen Anwendungen zu gewährleisten. TSN und 5G-Mobilfunk gelten als geeignete Kandidaten, um die Kommunikationsanforderungen dieser Anwendungsfälle zu erfüllen [Gi21c], [Jo23]. Beide Technologien werden bereits in diversen Architekturkonzepten berücksichtigt [Gu21] und sollen das taktile Internet ermöglichen [Do17].

TSN ist der Oberbegriff für mehrere IEEE 802.1-Substandards, die Echtzeitfunktionen und Determinismus für Ethernet-Netzwerke bereitstellen. Diese ermöglichen die präzise und zuverlässige Datenübertragung für kritische Anwendungen mit strengen zeitlichen Anforderungen. Konkret umfasst TSN Mechanismen für die Zeitsynchronisation, begrenzte Latenz, hohe Zuverlässigkeit und dedizierte Ressourcenverwaltung [IE24d]. Das IEC/IEEE 60802 TSN Industrial Automation Profile zielt darauf ab, den Einsatz von TSN in der industriellen Automatisierung zu standardisieren, befindet sich aber zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation noch im Entwurfsstadium [II24].

5G steht für die fünfte Mobilfunkgeneration und verspricht höhere Datenübertragungsraten, geringere Latenzzeiten und eine größere Dichte von Endgeräten als zuvor. Erstmals werden in der Mobilfunk-Standardisierung auch industrielle Anforderungen berücksichtigt, z. B. für zeitkritische Maschinenkommunikation. Um das volle Potenzial von 5G für die industrielle Automatisierung auszuschöpfen, ist die Integration in TSN-Netzwerke ein entscheidender Aspekt [Ma22d].

Um eine Integration von 5G in TSN zu erreichen, spezifiziert 3GPP TS 23.501 das 5G-System als virtuelle TSN-Bridge [3G22b]. Abbildung 1.1 zeigt das entsprechende Modell, bei dem das 5G-System als TSN-Bridge innerhalb des TSN-Netzwerks erscheint. An den Systemgrenzen, d. h. an den Eingangs- und Ausgangsports, sind die Übersetzungsfunktionen Device-Side TSN Translator (DS-TT), Network-Side TSN Translator (NW-TT) und TSN Application Function (TSN AF) erforderlich. Diese Entitäten dienen zur Integration von QoS<sup>3</sup>-Frameworks, Weiterleitungs- und Topologie-Informationen, mit der industriellen Netzwerkverwaltung und mit dem Synchronisationsframework [RCK20]. Der Aspekt der Zeitsynchronisation ist bereits seit 3GPP Release 16 Teil der Standardisierung (vgl. ältere Versionen von [3G22b]).

---

<sup>1</sup> Weitere Informationen zu Industrie 4.0 im Glossar

<sup>2</sup> Weitere Informationen zu Echtzeit und Determinismus im Glossar

<sup>3</sup> Weitere Informationen zu Dienstgüte (Quality of Service) im Glossar

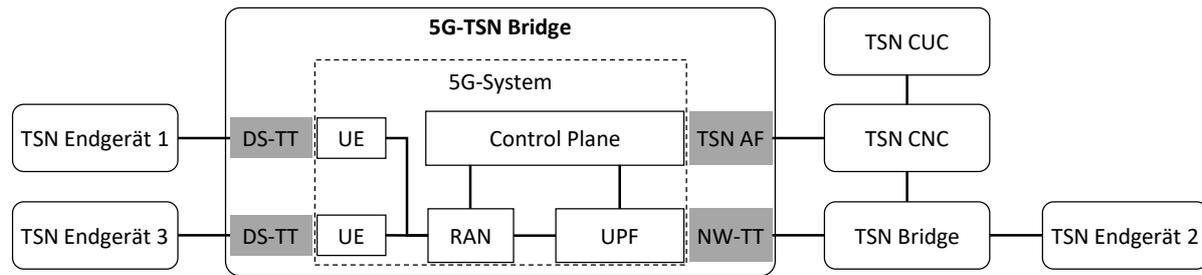


Abbildung 1.1: Modell des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge gemäß 3GPP TS 23.501 [3G22b]

## 1.1 Motivation

Von den zuvor genannten Vorteilen der Kombination aus 5G und TSN können diverse Industriezweige profitieren: Autonome Fahrzeuge, Smart Grids im Energiesektor, das Gesundheitswesen sowie Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR). Autonome Fahrzeuge verlassen sich auf Echtzeitdaten von Sensoren, Kameras und Kommunikationssystemen, um schnelle Entscheidungen für eine sichere und effiziente Navigation zu treffen. 5G und TSN ermöglichen eine performante Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Dies soll dazu beitragen, Unfälle zu reduzieren und den Verkehrsfluss sowie die Transporteffizienz zu optimieren.

Im Energiesektor erfordern Smart Grids eine präzise Steuerung, Koordination und Überwachung dezentraler Energieressourcen, wie z. B. erneuerbarer Energiesysteme und Elektrofahrzeuge, um die Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung zu optimieren. Mittels 5G und TSN lassen sich die Energieeffizienz sowie Netzstabilität erhöhen und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck reduzieren.

Im Gesundheitswesen eröffnet die Echtzeitübertragung von hochauflösenden medizinischen Daten über 5G und TSN Anwendungen der Telemedizin, wie Fernkonsultationen und -überwachung von Patienten sowie die präzise Durchführung komplexer Eingriffe mittels chirurgischer Robotik. Dies kann den Zugang zu Gesundheitsdienstleistungen und die Patientenversorgung verbessern sowie in kritischen Situationen Leben retten.

Im Bereich AR und VR können 5G und TSN eine Echtzeit-Kommunikation mit hoher Datenrate zwischen Geräten, Servern und Cloud-basierten Ressourcen realisieren. Dadurch lässt sich das Benutzererlebnis bei AR/VR-Anwendungen sowohl zu Unterhaltungs- als auch zu Schulungszwecken verbessern.

Nicht zuletzt können 5G und TSN auch die industrielle Automatisierung transformieren, indem sie eine deterministische Echtzeitkommunikation zwischen mobilen und stationären Maschinen, Robotern und sonstigen Geräten ermöglichen. Die schnelle und zuverlässige Übertragung sicherheitskritischer Daten, wie z. B. von Not-Aus-Befehlen oder Messwerten von Sicherheitssensoren, über 5G und TSN reduziert potenzielle Gefahren und das Risiko von Kollisionen. Dies sorgt für eine sichere und effizientere Mensch-Roboter-Kollaboration, was wiederum die Flexibilität, Skalierbarkeit und Produktivität in der Fabrik erhöht. Diese Eigenschaften sind zur Anpassung an sich ändernde Produktionsanforderungen notwendig. Geräte, Maschinen und Prozesse lassen sich mittels 5G und TSN präzise synchronisieren, schnell rekonfigurieren und koordinieren. Dies trägt zu agilen, anpassungsfähigen und optimierten Fertigungsabläufen bei. Die Echtzeit-Überwachung und -Steuerung von Geräten, Maschinen und Prozessen über 5G und TSN bilden die Grundlage für die Ferndiagnose und -wartung, um Probleme oder Fehler vorausschauend zu erkennen und zu beheben (auch bekannt als Predictive Maintenance).

Um eine echtzeitfähige und deterministische Kommunikation sicherzustellen, spielt QoS eine entscheidende Rolle. 5G und TSN bieten Mechanismen zur QoS-Steuerung, die zeitkritischen Datenverkehr wie Steuersignale und Sicherheitsbefehle gegenüber nicht zeitkritischem Datenverkehr wie Datensicherungen oder Video-Streaming priorisieren und dadurch mit minimaler Latenz, Jitter

und Paketverlust übertragen. Bei näherer Untersuchung wird jedoch offensichtlich, dass viele Detailfragestellungen zur 5G-TSN-Integration, insbesondere zur konkreten durchgängigen Umsetzung von QoS, noch ungeklärt sind und interessante Forschungsfragen resultieren.

### 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Den thematischen Schwerpunkt dieser Dissertation bilden Mobilfunktechnologien, aktuell 5G und perspektivisch 6G, sowie IEEE 802.1 TSN im Einsatzfeld der industriellen Automatisierung, d. h. in Produktion und Logistik ohne Beschränkung auf die Automobilindustrie. Dabei liegt der Fokus auf der Integration des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge in einem 5G Standalone-Campusnetz, d. h. ein nicht-öffentliches und geografisch auf eine relativ kleine Fläche (z. B. ein Fabrikgelände) begrenztes 5G-Netzwerk, und in einem vollständig zentralisierten TSN-Konfigurationsmodell.

Ziel dieser Dissertation ist es, auf Grundlage der Fachterminologie, Anwendungsfälle und Normen für die Erweiterung von TSN-Funktionen über drahtlose Netzwerke, Fragestellungen aus identifizierten Forschungslücken zu beantworten. Dies umfasst die Charakterisierung relevanter Anwendungsfälle, die Konzeptionierung geeigneter Netzwerkarchitekturen und die Konkretisierung der TSN-Übersetzungsfunktionen für das 5G-System. Schließlich sollen auf Basis von Datenverkehrsmodellen Datenverkehrskonzepte<sup>4</sup> für Industrie 4.0 mit dem Fokus auf QoS abgeleitet und validiert werden. Die vorliegende Dissertation trägt somit validierte Konzepte für die Übersetzungsfunktionen und den Datenverkehr in industriellen 5G-TSN-Netzwerken bei.

Das öffentliche Mobilfunknetz, die drahtlose Fahrzeugkonnektivität für Vehicle-to-Everything (V2X) und TSN im Fahrzeug-Bordnetz werden lediglich oberflächlich betrachtet, da diese Aspekte unter bestimmten Bedingungen für einen automatisierten Produktionsprozess relevant sein können. Ausdrücklich nicht näher untersucht werden die 5G-Funktionen Edge-Computing, Network Slicing und Handover, weitere TSN-Konfigurationsmodelle, TSN im 5G-Fronthaul oder Backhaul (d. h. innerhalb des 5G-Systems zwischen Core und Radio Units) sowie Security. Die genannten Aspekte bilden aufgrund ihrer Komplexität jeweils eigene Forschungsschwerpunkte.

### 1.3 Aufbau der Dissertation

Kapitel 2 enthält technische Grundlagen mit Fokus auf TSN und 5G sowie eine Betrachtung von Deterministic Networking (DetNet). Kapitel 3 reflektiert den Stand der Forschung zu TSN über 5G, unterteilt in analytische Berechnungen, Simulationen und Messungen. In Kapitel 4 wird die Forschungsmethodik erläutert und werden die Forschungsfragen formuliert. In Kapitel 5 werden relevante 5G-TSN-Anwendungsfälle, ausgehend sowohl von der 5G- als auch von der TSN-Perspektive, analysiert. Kapitel 6 beinhaltet Konzepte für hybride Netzwerke mit 5G und TSN bzw. DetNet unter Berücksichtigung von Systemarchitekturen und Kommunikationsdiensten<sup>5</sup>. In Kapitel 7 wird ein Datenverkehrskonzept für TSN-Datenverkehr über 5G entwickelt, welches auf Datenverkehrsklassen sowie auf vorhandenen Datenverkehrsmodellen aus Sicht von TSN und 5G basiert. Kapitel 8 umfasst die dreistufige Validierung des Konzepts durch Messungen, Berechnungen und Simulationen, einschließlich Vorgehensweisen und Resultaten. Kapitel 9 fasst die Dissertation zusammen und gibt einen Ausblick auf künftige Forschungsrichtungen. Zudem enthält die Dissertation ein Glossar zu relevanten Begriffen und Konzepten sowie einen Anhang mit Performance-Anforderungen der 3GPP.

---

<sup>4</sup> Weitere Informationen zu Datenverkehrsmodell und -konzept im Glossar

<sup>5</sup> Weitere Informationen zum Kommunikationsdienst im Glossar

## 2 Technische Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert technische Grundlagen zu den Technologien TSN, 5G-Mobilfunk und DetNet. Diese dienen als Grundlage, um im weiteren Verlauf der Dissertation den Stand der Forschung zur Integration der zuvor genannten Technologien zu analysieren.

### 2.1 Time-Sensitive Networking

TSN steht als Oberbegriff für eine Reihe von Standards, die von der TSN-Arbeitsgruppe im Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) spezifiziert werden und IEEE 802.1 Ethernet um Fähigkeiten zur deterministischen Datenübertragung auf Layer 2 des Open Systems Interconnection (OSI)-Referenzmodells<sup>6</sup> erweitert. Die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Sub-Standards betreffen die Aspekte Zeitsynchronisation, begrenzte Latenz, hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit sowie dedizierte Ressourcenverwaltung mit dem Ziel, keinen Stauverlust zu verursachen [IE24d]. Ursprünglich wurde TSN für das Audio Video Bridging entwickelt, bevor es auch für andere Einsatzbereiche wie die industrielle Automatisierung relevant wurde. Dafür werden verschiedene Profile entwickelt, darunter das TSN Industrial Automation Profile IEC/IEEE 60802 [I124], auf dessen Basis bestehende Industrial Ethernet-Protokolle TSN-Mechanismen integrieren können.

Tabelle 2.1: Übersicht der IEEE TSN-Standards [IE24d]

Zeitsynchronisation	Begrenzte Latenz	Hohe Zuverlässigkeit	Ressourcenverwaltung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.1AS – Timing and Synchronization (ein Profil von IEEE 1588)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.1Qav – Credit-Based Shaper</li> <li>• 802.1Qbu – Frame Preemption</li> <li>• 802.1Qbv – Scheduled Traffic (Time-Aware Shaper)</li> <li>• 802.1Qch – Cyclic Queuing and Forwarding</li> <li>• 802.1Qcr – Asynchronous Traffic Shaping</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.1CB – Frame Replication and Elimination</li> <li>• 802.1Qca – Path Control and Reservation</li> <li>• 802.1Qci – Per-Stream Filtering and Policing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.1Qat – Stream Reservation Protocol</li> <li>• 802.1CS – Link-local Registration Protocol</li> <li>• 802.1Qcc – TSN Configuration</li> <li>• 802.1Qcp – YANG Data Model</li> <li>• 802.1Qcx – YANG Model for Connectivity Fault Management</li> <li>• 802.1Qcw – YANG for 802.1Qbv/Qbu/Qci</li> <li>• 802.1ABcu – YANG for LLDP</li> <li>• 802.1CBcv – YANG &amp; MIB for FRER</li> <li>• 802.1CBdb – Extended Stream Identification</li> <li>• 802.1ABdh – LLDPv2 for Multiframe Data Units</li> </ul>

In der OT-Domäne bieten konventionelle Switches ohne TSN-Fähigkeit zwar Mechanismen zur QoS-Steuerung, können jedoch Latenz, Jitter und Paketauslieferung nicht garantieren. In der IT-Domäne werden alle Datenpakete ohne QoS-Differenzierung verarbeitet, was Bandbreitenengpässe und somit Staus verursachen kann, welche in einem Maschinennetzwerk nicht entstehen dürfen. In der IT-Domäne ist Determinismus nicht zwingend erforderlich und Latenz-Engpässe können durch eine Erhöhung der Bandbreite kompensiert werden. Ein QoS-Monitoring in großen industriellen Netzwerken ist zudem sehr komplex.

TSN ermöglicht nun die Koexistenz von deterministisch zyklischem und Best Effort-Datenverkehr in derselben physikalischen Netzwerkinfrastruktur [Br18]. Im Gegensatz zu vorherigen Industrial Ethernet-Ansätzen ist TSN nicht für eine bestimmte Übertragungsgeschwindigkeit definiert (z. B.

<sup>6</sup> Weitere Informationen zum OSI Schichten-Modell im Glossar



Next Generation) und NETCONF (Network Configuration Protocol) genutzt werden. YANG liefert in IETF RFC 6020 [Bj10] und RFC 7950 [Bj16] eine Sprache für ein einheitliches Datenmodell. YANG hilft dabei, Attribut-Wert-Paare im Netzwerkkumfeld besser zu organisieren und Konfigurationen einfacher zu validieren. Das Datenmodell allein ermöglicht jedoch noch keine Konfigurationsänderungen. Dafür wird das Network Configuration Protocol (NETCONF) nach IETF RFC 6241 [En11] genutzt.

Die zu sendenden Frames werden entsprechend dem Priority Code Point (PCP) im Virtual Local Area Network (VLAN)-Tag in bis zu acht Ausgangspuffer pro Bridge-Port aufgeteilt. Außerdem ist jedem Ausgangspuffer ein sogenanntes *Transmission Gate* vorangestellt. Die Gates ändern ihren Zustand gemäß dem offline programmierten Schedule, der sogenannten *Gate Control List*. Der TAS kann aktiv steuern, welcher Puffer zu welchem Zeitpunkt Zugang zum Ausgangsport erhält. Zur Übertragung wählt der TAS nur Nachrichten aus Queues mit geöffneten Gates aus. Auf diese Weise können verschiedene TSN-Bridges so aufeinander abgestimmt werden, dass die Frames einer bestimmten Datenverkehrs-kategorie ohne Interferenzen mit anderen Klassen durch das Netzwerk übertragen werden können. Um Störungen am Ausgangsport zu vermeiden, definiert der TAS das *Guard Band* als Schutzintervall vor jedem Zeitschlitz [LS19]. Abbildung 2.2 zeigt das Prinzip des Time-Aware Shaper. Gemäß der Gate Control List ist zum netzwerkweit einheitlichen Zeitpunkt T01 das Gate für die Queue mit PCP = 6 geöffnet, und ihre Frames haben exklusiven Zugang zum Ausgangsport der Bridge.

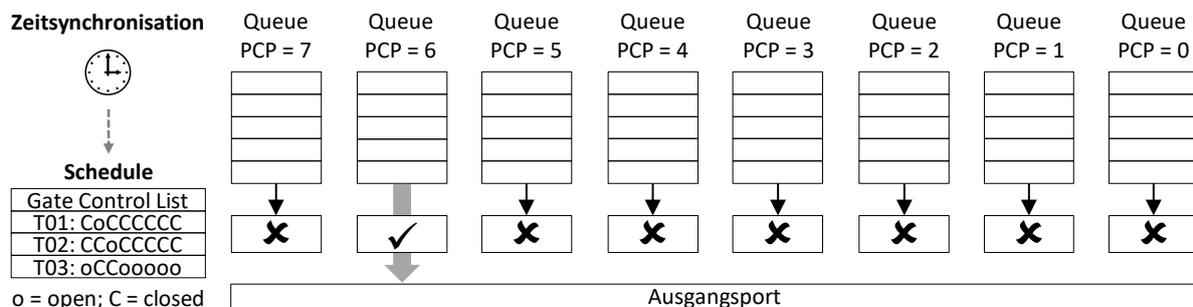


Abbildung 2.2: Funktionsweise des Time-Aware Shaper gemäß IEEE 802.1Qbv (angelehnt an [IE16b])

Der TAS erlaubt eine Koexistenz von synchronisiertem und nicht synchronisiertem Datenverkehr in demselben physikalischen Netzwerk. Die daraus resultierende Komplexität bei der Konfiguration und Optimierung des Scheduling sind weiterhin Gegenstand der Forschung [Cr16]. Ein vollständig beschriebenes Referenzmodell für das Scheduling zeitkritischer Kommunikation gewährleistet die Interoperabilität künftiger Scheduling-Tools und eignet sich somit als Ausgangspunkt für die Standardisierung [SCO18].

### Frame Preemption (IEEE 802.1Qbu)

Preemption bezeichnet die Unterbrechung der Übertragung eines Frame, damit ein oder mehrere Express Frames übertragen werden können, bevor die Übertragung des unterbrochenen Frame wieder aufgenommen wird [IE16a]. Mit IEEE 802.1Qbu kann ein Switch den Sendevorgang eines sich in der Übertragung befindlichen Frames unmittelbar unterbrechen. Stattdessen leitet er einen priorisierten zeitkritischen Frame sofort weiter und setzt die Übertragung des unterbrochenen Frames erst danach fort. Folglich optimiert Preemption, in Kombination mit dem TAS, sowohl die simultane Nutzung des Netzwerks durch Scheduled- und Best Effort-Datenverkehr als auch den Jitter bei zeitkritischen Frames. Abbildung 2.3 veranschaulicht das Prinzip von Frame Preemption.

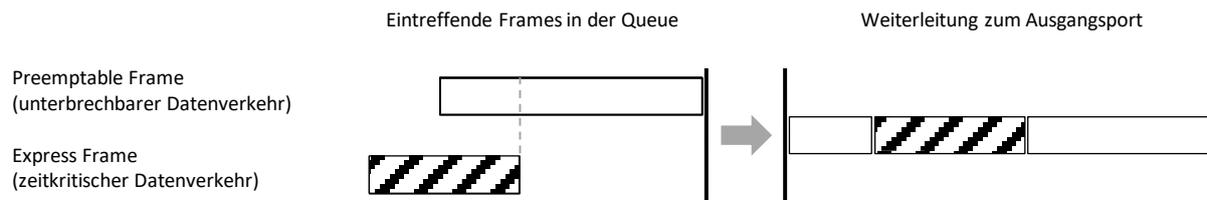


Abbildung 2.3: Prinzip von Frame Preemption gemäß IEEE 802.1Qbu (angelehnt an [IE16a])

### 2.1.3 Hohe Zuverlässigkeit

#### Redundanz (IEEE 802.1CB)

IEEE 802.1CB spezifiziert Verfahren, verwaltete Objekte und Protokolle für Bridges und Endsysteme, welche die Identifizierung und Replikation von Datenpaketen bzw. Frames zur redundanten Übertragung sowie die Identifizierung und Beseitigung doppelter Frames ermöglichen. In einer Ring- oder Maschentopologie lässt sich die Datenverfügbarkeit erhöhen, indem der Sender Duplikate eines Frames über verschiedene Pfade durch das Netzwerk sendet und der Empfänger überflüssige Duplikate verwirft. Der Standard exkludiert die Erstellung der redundanten Pfade, über die die Duplikate übertragen werden. Die Vervielfältigung von Frames, deren Übertragung über separate Pfade und die anschließende Verwendung der Sequenznummer zur Eliminierung von Duplikaten verringert die effektive Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten [IE17a]. Abbildung 2.4 veranschaulicht das Prinzip von Frame Replication and Elimination for Redundancy (FRER).

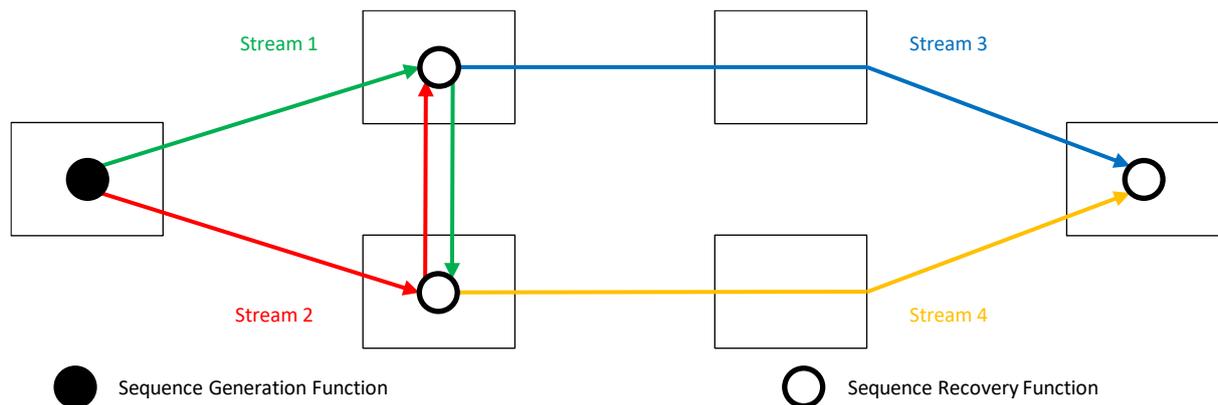


Abbildung 2.4: Redundanz durch Frame Replication und Elimination gemäß IEEE 802.1CB (angelehnt an [IE17a])

#### Stream-Filterung (IEEE 802.1Qci)

IEEE 802.1Qci enthält Erweiterungen des Weiterleitungsprozesses, welche eine Filterung und spezifische Richtlinien pro Stream (Per-Stream Filtering and Policing; PSFP) unterstützen. PSFP-Funktionen ermöglichen Bridges oder Endgeräten Filter-, Richtlinien- und darauffolgende Queuing-Entscheidungen für empfangene Frames individueller Streams zu treffen. PSFP erfordert die Implementierung der in IEEE 802.1CB spezifizierten Stream-Identifizierungsfunktion und basiert auf den Instanzen Stream-Filter, Stream-Gate und Flow-Meter, welche jeweils mehrere Parameter enthalten [IE17b]. Ihre Beziehung ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

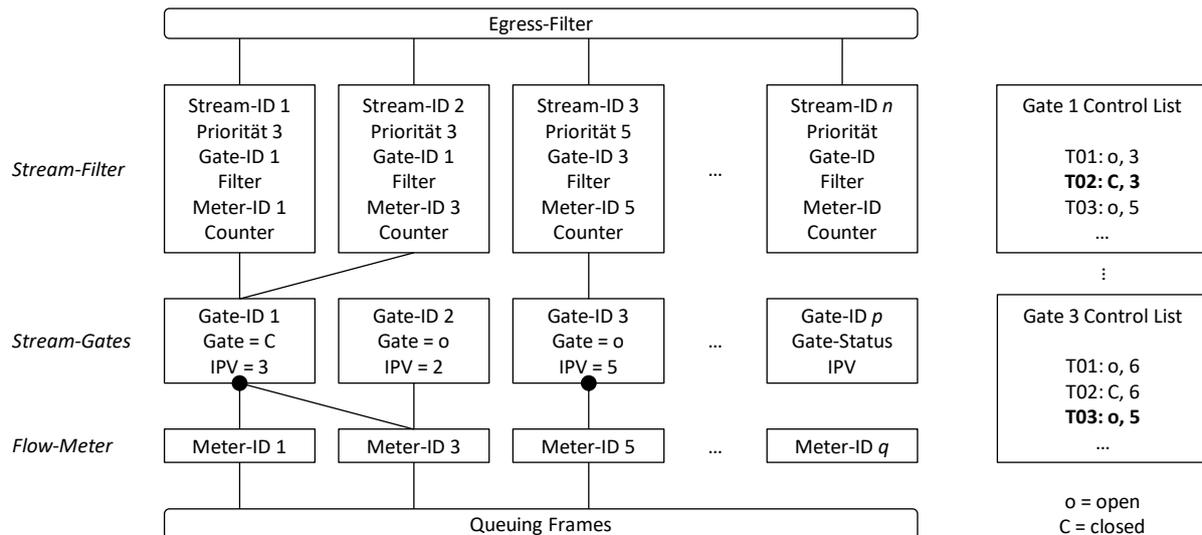


Abbildung 2.5: Per-Stream Filtering and Policing gemäß IEEE 802.1Qci (angelehnt an [IE17b])

### 2.1.4 Ressourcenverwaltung

#### Netzwerkconfiguration (IEEE 802.1Qcc)

IEEE 802.1Qcc definiert Schnittstellen und Protokolle für die TSN-Netzwerkverwaltung [Ci17]. Das User Network Interface (UNI) dient dem Routing und der Reservierung. Das weiterentwickelte Stream Reservation Protocol (SRP) unterstützt eine größere Anzahl von Streams, verbessert die Beschreibung sowie Konfigurierbarkeit von deren Charakteristika anhand von Klassen und integriert Redundanz-Mechanismen direkt in die Stream-Reservierung. TSN bietet drei verschiedene Konfigurationsmodelle [IE18], die in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt sind:

- a) Fully Distributed Model,
- b) Centralized Network / Distributed User Model und
- c) Fully Centralized Model.

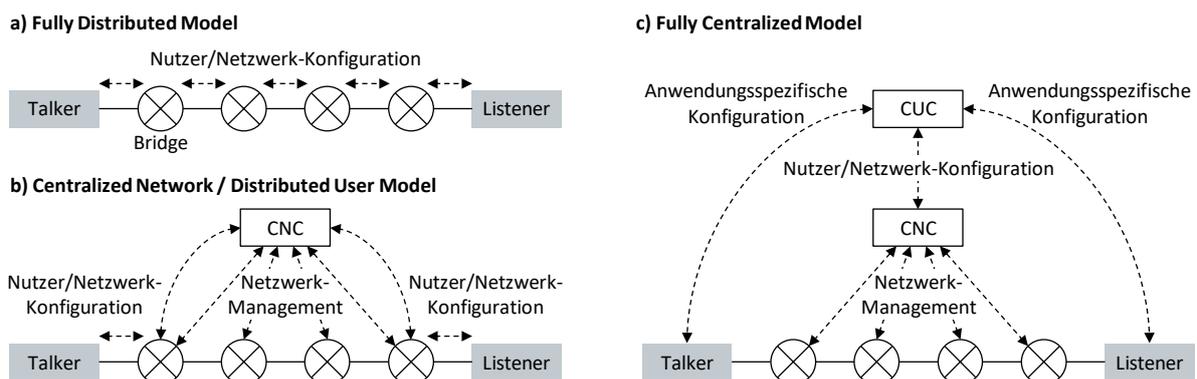


Abbildung 2.6: TSN-Konfigurationsmodelle gemäß IEEE 802.1Qcc (angelehnt an [IE18])

Im vollständig verteilten Modell (engl. Fully Distributed Model) kommunizieren die Endgeräte (d. h. Talker und Listener) die Nutzeranforderungen und Konfigurationsinformationen direkt über die Bridges, deren Ressourcen effektiv lokal verwaltet werden. Dadurch muss einer Bridge nicht notwendigerweise das gesamte Netzwerk bekannt sein, was allerdings den Umfang der in diesem Modell unterstützten TSN-Funktionalitäten einschränkt.

Im Modell des zentralisierten Netzwerks und verteilten Benutzers (engl. Centralized Network / Distributed User Model) verwaltet eine Centralized Network Configuration (CNC) die

Konfigurationsinformationen. Die CNC erfasst die physische Topologie des Netzwerks sowie die Fähigkeiten der einzelnen Bridges und konfiguriert diese. Die CNC kann entweder Teil eines Endgeräts oder Bridge sein. Talker- bzw. Listener-Informationen werden direkt zwischen den Edge-Bridges (d. h. Bridges an einem Endgerät) und der CNC ausgetauscht, anstatt die Informationen in das Innere des Netzwerks weiterzuleiten.

Beim vollständig zentralisierten Modell (engl. Fully Centralized Model) verwaltet eine Centralized User Configuration (CUC) die Endgeräte, deren Fähigkeiten sowie Nutzeranforderungen und konfiguriert deren TSN-Funktionen. Alle Nutzeranforderungen werden zwischen CNC und CUC ausgetauscht.<sup>7</sup>

### 2.1.5 Quality of Service in TSN

Im Folgenden werden Eigenschaften und Parameter zur Unterscheidung der QoS von Datenverkehr sowie industrielle Protokolle beschrieben, die eine Echtzeitkommunikation mit TSN ermöglichen.

Das IIC stellt das umfassendste Datenverkehrsmodell für die Datenverkehrstypen in der industriellen Automatisierung zur Verfügung [In19], vgl. Tabelle 2.2. Datenverkehrstypen fassen Datenverkehr mit gleichen oder zumindest ähnlichen Eigenschaften zusammen und lassen sich wie folgt unterscheiden:

- Isochron,
- Zyklisch synchron / zyklisch asynchron,
- Netzwerksteuerung,
- Events,
- Alarme,
- Konfiguration & Diagnose,
- Audio/Video sowie
- Best Effort.

Tabelle 2.2: Datenverkehrsmodell-Spezifikation gemäß Industry IoT Consortium [In19]

Datenverkehrstyp	Periodizität [ms] (periodisch/sporadisch)	Datenübertragungs-garantie	Datengröße* [Byte] (fix/variabel)	Kritikalität
Isochron	0,1-2	(p) Deadline	30-100 (f)	Hoch
Zyklisch synchron / zyklisch asynchron	0,5-20	(p) Latenz	50-1.000 (f)	Hoch
Netzwerksteuerung	50-1.000	(p) Bandbreite/Datenrate	50-500 (v)	Hoch
Events	10-50	(s) Latenz	100-200 (v)	Hoch
Alarme	2.000	(s) Latenz	100-1.500 (v)	Medium
Konfiguration & Diagnose	n. a.	(s) Bandbreite/Datenrate	500-1.500 (v)	Medium
Audio/Video	A: 40 / V: 10	(p) Bandbreite/Datenrate, Latenz	1.000-1.500 (v)	Niedrig
Best Effort	n. a.	(s) Keine	30-1.500 (v)	Niedrig

\* Die minimale Frame-Länge eines Ethernet-Frames inklusive Ethernet-Header beträgt 64 Byte.

Isochrone Anwendungen sind in jedem Gerät auf eine gemeinsame Zeit synchronisiert, welche stetig ist und streng monoton ansteigt. Die Geräte tasten die Eingänge synchron ab und geben die Ausgänge aus, indem sie Daten in einer immer gleich lange dauernden Zykluszeit periodisch austauschen. Hochpräzise Regelkreise erfordern eine begrenzte Latenz bei minimalem Jitter und tolerieren keine Störungen durch anderen Datenverkehr. Treffen Nachrichten erst nach einer garantierten Frist ein, werden sie für den Zyklus ignoriert oder verworfen, wodurch der Regelkreis möglicherweise beeinträchtigt wird. Bei der zyklisch synchronen Kommunikation gelten weniger strenge zeitliche Anforderungen als bei der isochronen Kommunikation. Die zyklisch asynchrone Kommunikation ist ebenfalls periodisch, jedoch nicht zwischen Geräten synchronisiert. Hierbei muss der Zeitraum der

<sup>7</sup> Für die Integration in 5G spielt bislang nur das Fully Centralized Model eine Rolle.

Datenübertragung nicht zwingend mit dem Abtasten der Eingänge und der zyklischen Ausgabe der Ausgänge durch die Geräte übereinstimmen. Als Beispiel für alle drei Datenverkehrstypen sind IO-Daten für C2C, C2D und D2D zu nennen.

Die Netzwerksteuerung umfasst z. B. die Zeitsynchronisation, Redundanz und Topologie-Erkennung. Events oder Ereignismeldungen werden erzeugt, wenn in einem System Änderungen der Eingangs- oder Ausgangsvariablen auftreten und diese Aufmerksamkeit erfordern, z. B. Bedienerbefehle bei Zustandsänderungen. Alarme markieren kritische Ereignisse und können z. B. Warnungen wegen einer Überschreitung von Schwellenwerten sein. Das Netzwerk muss in der Lage sein, eine bestimmte Anzahl von Events bzw. Alarmen bis zu einer bestimmten Bandbreite verlustfrei zu verarbeiten. Danach können Nachrichten verloren gehen, bis die zulässige Bandbreite wieder erreicht ist.

Die Konfiguration und Diagnose umfasst z. B. die Gerätekonfiguration, Überwachung des Gerätezustands oder Firmware-Downloads und erfolgt in der Regel via TCP/IP. Audio und Video dienen z. B. zur visuellen Überwachung der Produktionsbedingungen durch den Menschen, jedoch nicht zur Steuerung eines Prozesses. Best Effort beschreibt die Standardeinstellung ohne Bandbreiten- oder Zeitgarantien, z. B. für Telemetriedaten. Datenverluste sind möglich und werden toleriert [In19].

Das TSN-Datenverkehrsmodell des IIC als alleinige Grundlage heranzuziehen, wird bekräftigt durch die Studie von Navarro-Ortiz et al. [Na20], die die Datenverkehrsmodelle relevanter Organisationen (u. a. 3GPP und IEEE), regionaler Projekte und Industrie-Allianzen zusammenfassen. Bei ihrer Bewertung der Referenzen nehmen die Autoren allerdings weder Bezug zur industriellen Automatisierung noch zu TSN.

IEEE 802.1Q [IE22] definiert bis zu acht verschiedene Datenverkehrsklassen und Prioritäten, anhand derer unterschiedliche Merkmale und QoS-Anforderungen unterschieden werden können. Eine Datenverkehrsklasse stellt einen numerischen Wert zur Identifizierung des Datenverkehrstyps dar. Die Parameter Priorität, Periodizität und Frame-Länge (Datengröße) werden als quantitative Werte angegeben, während die Datenübertragungsgarantie und die Kritikalität qualitativ sind. Die Priorität wird durch den PCP innerhalb des VLAN-Tag im Ethernet-Header ausgedrückt. Der PCP umfasst 3 Bit, woraus die acht Datenverkehrsklassen mit Priorität 0-7 resultieren, wobei der höchste PCP-Wert die höchste Priorität definiert.

IEC/IEEE 60802 als Gemeinschaftsprojekt von Arbeitsgruppen aus IEC und IEEE soll ein TSN-Profil für die industrielle Automatisierung definieren. Das Hauptziel besteht darin, zu spezifizieren, wie das von der IEEE 802.1 TSN Task Group spezifizierte TSN-Framework branchenkonsistent und herstellerunabhängig verwendet werden kann. IEC/IEEE 60802, welches zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation nur als Entwurf vorliegt, definiert acht Datenverkehrstypen und ihre zugehörigen Eigenschaften für die industrielle Automatisierung [II24]. Es enthält ein Beispiel, das vier Kategorien von Datenverkehr unterscheidet. Die Datenverkehrsklassen 6 und 7 fallen unter *Scheduled Stream* und Klasse 5 unter *Stream*. Die Klassen 2-4 werden der Kategorie *Traffic-Engineered Non-Stream* zugewiesen, d. h. zusätzliche Informationen aus einem Planungstool können zur Optimierung der QoS-Definitionen in der TSN AF verwendet werden. Die Klassen 0 und 1 sind *Non-Streams*, die dem Best Effort-Datenverkehr zugewiesen werden. Während dieses Beispiel auch als Standard für die Zuordnung von Datenverkehrstypen auf Datenverkehrsklassen und Prioritäten angesehen werden kann, ist die freie Zuordnung von Prioritäten zu den Datenverkehrstypen über die Konfiguration der Mapping-Tabelle für Datenverkehrsklasse und Priorität gemäß IEEE 802.1Q möglich [IE22]. Das Beispiel in IEC/IEEE 60802 [II24] unterscheidet sich in den Definitionen der Datenverkehrstypen geringfügig vom IIC-Datenverkehrsmodell in Tabelle 2.2, d. h. Alarme und Events gehören zum gleichen Datenverkehrstyp, während zyklischer synchroner und zyklischer asynchroner Datenverkehr in zwei Typen aufgeteilt werden (vgl. Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Zuordnung von TSN-Datenverkehrstyp, -klasse und -priorität gemäß IEC/IEEE 60802 [II24]

Datenverkehrstyp	Datenverkehrsklasse	Priorität (PCP)	Kategorie
Isochron	7	6	Scheduled Stream
Zyklisch synchron	6	5	
Zyklisch asynchron	5	4	Stream
Netzwerksteuerung	4	7	Traffic-Engineered Non-Stream
Alarmer & Events	3	3	
Konfiguration & Diagnose	2	2	
Best Effort High	1	1	Non-Stream
Best Effort Low	0	0	

Die Priorisierung nach Datenverkehrsklassen bildet zusammen mit der netzweiten Zeitsynchronisation nach IEEE 802.1AS [IE20] die Grundlage für die zuvor erläuterten sowie für weitere TSN-Mechanismen [IE24d]. Obwohl TAS und Frame Preemption je nach Konfiguration die einfache Priorisierung außer Kraft setzen können, sollten beide Mechanismen als zusätzliche Optimierungsoptionen jenseits der Priorisierung betrachtet werden. Zielführend ist ein Ende-zu-Ende-Ansatz für die QoS-Verwaltung in TSN-Netzwerken, welcher Ereignisse zur Rekonfiguration berücksichtigt, z. B. einen Link-Drop [GBB21].

In der Automatisierung spielen auf Industrial Ethernet basierende Protokolle, wie z. B. PROFINET, eine wichtige Rolle. TSN kann beispielsweise die beiden proprietären Echtzeit-Erweiterungen für Layer 2, PROFINET IRT (isochrone Echtzeit, entspricht Datenverkehrsklasse 7) und PROFINET RT (Echtzeit, entspricht Datenverkehrsklasse 6), ersetzen [SJ21].

Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) hält allmählich Einzug in die Automatisierung und kann für die Controller-zu-Controller (C2C)- und Controller-zu-Device (C2D)-Kommunikation eingesetzt werden. Bei der reinen C2C-Kommunikation werden die Klassen 0-4 abgedeckt. Wird zusätzlich C2D, d. h. die Kommunikation auf Feldebene, mittels OPC UA über TSN berücksichtigt, können alle Datenverkehrsklassen betroffen sein [Br19]. Erläuterungen zu PROFINET und OPC UA sind im Glossar zu finden.

## 2.2 Mobilfunk

Den Beginn der Mobilfunk-Technologie markiert die Veröffentlichung des ersten analogen Standards im Jahr 1979. Darauf folgten digitale Generationen in einem Zyklus von ungefähr zehn Jahren. Die steigende Leistungsfähigkeit führt auch zu einer besseren Eignung für die Industrie. Tabelle 2.4 zeigt die Entwicklung der Mobilfunk-Generationen.

Tabelle 2.4: Übersicht der Mobilfunkgenerationen (angelehnt an [Si20])

	1G	2G	3G	4G	5G
<b>Veröffentlichung</b>	1979	1991	2002	2009	2019
<b>Leistungsumfang</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analoge Sprache</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digitale Sprache</li> <li>Verschlüsselte Kommunikation</li> <li>Eingeschränktes Roaming</li> <li>SMS &amp; MMS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mobile Breitbandkommunikation</li> <li>Lokalisierungsdienste</li> <li>Multimedia-Streaming</li> <li>Weltweites Roaming</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schnelles mobiles Internet</li> <li>IP<sup>8</sup>-basiertes Packet-Switching</li> <li>HD Multimedia-Streaming</li> <li>Weltweites Roaming</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht-öffentliche Netzwerke (lokale Frequenzen)</li> <li>(I)IoT</li> <li>mMTC</li> <li>URLLC</li> <li>mmWave</li> </ul>
<b>Datenrate</b>	0,0024 Mbit/s	0,0064 Mbit/s	42 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
<b>Eignung für Industrie</b>	-	0	+	++	+++
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine industriellen Anwendungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fernwirktechnik/Tele-Steuerung</li> <li>SMS von entfernten Maschinen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Remote Zustands-/Videoüberwachung von Maschinen</li> <li>Fernzugriff auf Maschinen (z. B. Fernwartung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mobile Service-Techniker</li> <li>Wartung via Smartphone</li> <li>Wireless Backhaul</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonome Logistik und Maschinen</li> <li>Wireless Backhaul</li> <li>Edge Computing</li> <li>Mobile Ausrüstung</li> </ul>

### 2.2.1 5G und dessen Funktionalitäten

Das Konsortium 3GPP spezifiziert die Mobilfunk-Standards und veröffentlicht diese in Releases mit bestimmten Features in einem zeitlichen Abstand von 1,5-2 Jahren. Somit umfasst eine Mobilfunk-Generation mehrere Releases. In Bezug auf 5G enthält Release 15 die Standards zur Realisierung hoher Datenraten für das Konsumentengeschäft in öffentlichen Netzwerken. Release 16 und folgende zielen auf die für vertikale Industrien ab, darunter auch für die industrielle Automatisierung relevanten Funktionalitäten [5G21a], [Le21]. Erst damit werden die Vorteile von 5G vollumfänglich nutzbar und zeitkritische industrielle Anwendungen können zuverlässig arbeiten. Abbildung 2.7 liefert einen Überblick über die 5G-Releases.

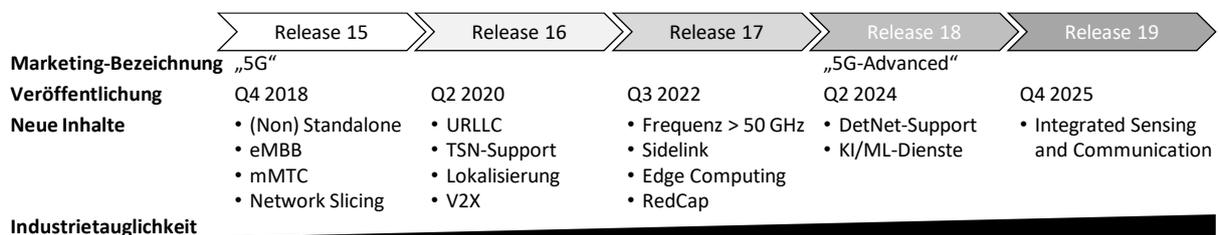


Abbildung 2.7: Zeitstrahl der 3GPP-Releases (angelehnt an [3G24])

### Aufbau eines 5G-Mobilfunknetzwerks

Der Mobilfunkstandard 5G kann als Non-Standalone-Variante auf einem bestehenden 4G-Kernnetz basieren oder als Standalone-Netzwerk eine komplett eigenständige 5G-Infrastruktur besitzen.

<sup>8</sup> Internet Protocol (IP)

Abbildung 2.8 zeigt die Systemarchitektur eines 5G-Mobilfunknetzwerks. Die Basisstation (next-Generation Node-B; gNB) verwaltet die Funkressourcen innerhalb des Funkzugangsnetzwerks (Radio Access Network; RAN) und verbindet ein mobiles Endgerät (User Equipment; UE) mit dem 5G-Core, welches wiederum die Verbindung zu einem Datennetz, z. B. dem Internet oder dem lokalen Fabriknetzwerk, herstellt.

Der 5G-Core lässt sich in eine Steuerungs- und Nutzerebene unterteilen, was einen besser skalierbaren und flexibleren Betrieb ermöglicht. Die Nutzerebene (engl. User Plane) verwaltet den bidirektionalen Datenaustausch zwischen UE und Datennetz. Die Steuerungsebene (engl. Control Plane) kontrolliert zentral das RAN, um das 5G-Netzwerk effizient zu betreiben und eine unterbrechungsfreie Gerätemobilität, Zugangskontrolle sowie Richtlinienanwendung zu realisieren. Dies wird durch die Netzwerkverwaltung (engl. Subscriber Management) unterstützt [5G19c].

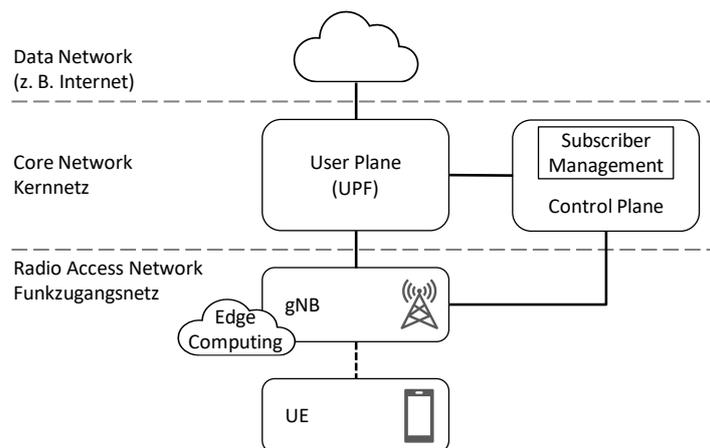


Abbildung 2.8: 5G-Systemarchitektur (angelehnt an [VD20b])

Typischerweise umfasst das RAN mehrere gNBs und erstreckt sich über eine große Fläche. Dadurch erfolgt die Datenverarbeitung in der User Plane und dem Datennetz letztendlich weit entfernt vom tatsächlichen Entstehungsort der Daten am UE. Mithilfe von Mobile Edge Computing (MEC) können zeitkritische Daten in virtuellen Maschinen näher an der Datenquelle verarbeitet werden, ohne dass es zu Unterbrechungen des Netzwerkbetriebs kommt. Einen Überblick zu MEC, dessen Vorteile für potenzielle Anwendungsfällen im Internet of Things (IoT) und Forschungsrichtungen liefern z. B. [Li20b], [Ma20b] und [Ph20]. Eine deterministische Ende-zu-Ende-Kommunikation und Zeitsynchronisation können in Verbindung mit virtualisierten Netzwerk-Funktionen (NFV) realisiert werden [Ga22].

Der Ansatz eines Open RAN (ORAN) disaggregiert die RAN-Funktionen in drei modulare Komponenten, wie in Abbildung 2.9 dargestellt:

- zentrale Einheit (Centralized Unit; CU),
- verteilte Einheit (Distributed Unit; DU) und
- Funkeinheit (Radio Unit; RU).

Die Interoperabilität der modularen RAN-Komponenten ermöglicht eine Vermischung von Hard- und Software, was den Hauptvorteil von ORAN ausmacht. Alle Komponenten sind über standardisierte, offene Schnittstellen und Protokolle miteinander verbunden. Der Software-Defined Networking (SDN)-Controller ermöglicht eine flexible ORAN-Konfiguration und entkoppelt die ORAN-Funktionen von der zugrunde liegenden Hardware, sodass Standard-Hardware von jedem Hersteller verwendet werden kann. Das Transportnetz, einschließlich Fronthaul, Midhaul und Backhaul, wird bislang über

Enhanced Common Public Radio Interface (eCPRI) und Ethernet realisiert, aber auch die Implementierung von TSN wird erwogen [Zo19], [Zo20], [Bh21].

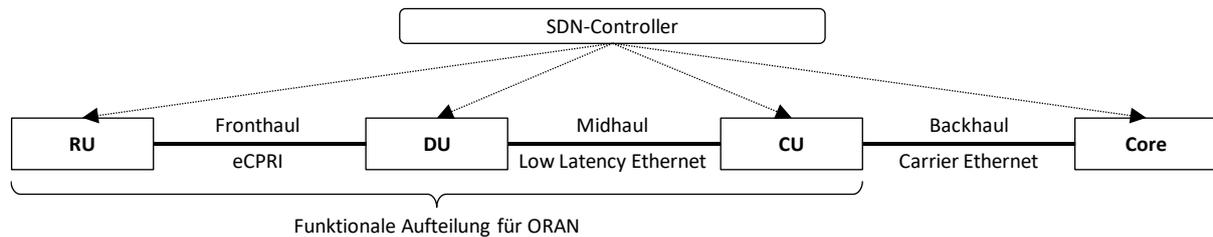


Abbildung 2.9: Open RAN-Architektur (angelehnt an [Mo19])

Im Vergleich zu vorherigen Mobilfunkgenerationen ist 5G deutlich performanter im Hinblick auf die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Datenrate und Latenz. Zudem kann die Ausbreitung des Funksignals mittels Beamforming zielgerichtet und effizient auf einzelne Endgeräte erfolgen und der Energieverbrauch reduziert werden. 5G bietet gemäß Abbildung 2.10 drei übergeordnete wesentliche Ausprägungen:

- Enhanced Mobile Broadband (eMBB),
- Massive Machine-Type Communication (mMTC) und
- Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC).

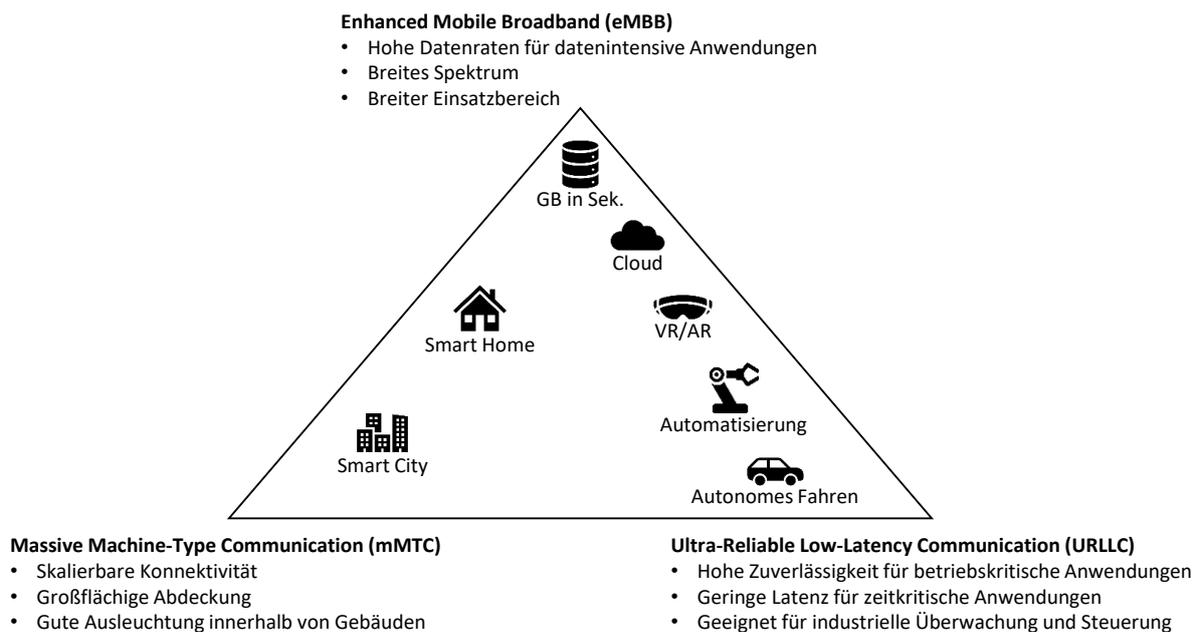


Abbildung 2.10: Ziele-Dreieck und zugehörigen Anwendungen

Diese drei Ausprägungen bilden ein Zieldreieck und stehen in einem Zielkonflikt, weshalb in einem realen Einsatz ein Kompromiss gefunden werden muss. Eine Lösung ist Network Slicing, bei dem mehrere logische Subnetze auf einer gemeinsamen physischen Infrastruktur mit NFV implementiert und von einem SDN-Controller orchestriert werden können [Or17]. Dadurch können unterschiedliche Anwendungsfälle mit divergenten Anforderungen gleichzeitig bedient werden. Basierend auf NFV und SDN werden die verfügbaren Ressourcen prozentual auf die logischen Teilnetze verteilt und diese je nach Bedarf bestimmter Funktionalitäten angepasst. Der Netzbetreiber kann verschiedene Datenverkehrstypen isolieren und dadurch maßgeschneiderte Netzwerke sowie Funktionen für

bestimmte Dienste bereitstellen [5G19f]. Die Latenzoptimierung im Kontext von Network Slicing wird z. B. in [Bh21], [Ch21a], [Gi21d], [Ks18], [MWA20], [NWJ19] und [Ye18] erforscht.

URLLC stellt insbesondere in industriellen Fabrikumgebungen aufgrund von möglichen Signalblockierungen oder Reflexionen durch sich bewegende metallische Objekte eine Herausforderung dar. Ansätze zur Erreichung von URLLC ab 3GPP Release 17 werden unter anderem in [Kh19], [MKB23], [Po18], [Po23], [Sa19], [Sc17] und [ST20] beschrieben. Beispielhaft zu nennen sind eine Verkürzung des *Transmission Time Interval*, Verbesserungen des *Channel Quality Indicator*, die Multiverbindungsfähigkeit und Nutzung der räumlichen Diversität durch *Coordinated Multipoint*-Kommunikation sowie die Einführung präemptiver Scheduling-Techniken.

Lei et al. [Le21] erläutern weitere Aspekte des 5G-Systems. Darunter fallen Schlüsseltechnologien der Bitübertragungsschicht von 5G, Protokolle und Verfahren des RAN, die Integration des 5G-Core in das RAN, die Netzwerkinteraktion durch Virtualisierung, Slicing und Edge-Computing, 5G-Spektrumsfragen, Security und Weiterentwicklungen in 3GPP Release 16. Auf der Netzwerkseite werden die Security sowie die neu standardisierte Steuerung des Zugangsverkehrs, die Funktionen für die Vermittlung und Aufteilung von Nicht-3GPP-Zugängen, die Unterstützung von Nicht-3GPP-Zugangsnetzwerken und nicht-öffentliche Netzwerke beschrieben.

## 2.2.2 Abgrenzung zu anderen Funktechnologien

Verschiedene Funktechnologien wurden für unterschiedliche Einsatzzwecke und Anwendungsfälle entwickelt. Abbildung 2.11 zeigt eine grobe Einordnung diverser Funktechnologien im Hinblick auf erreichbare Datenraten und Reichweiten.

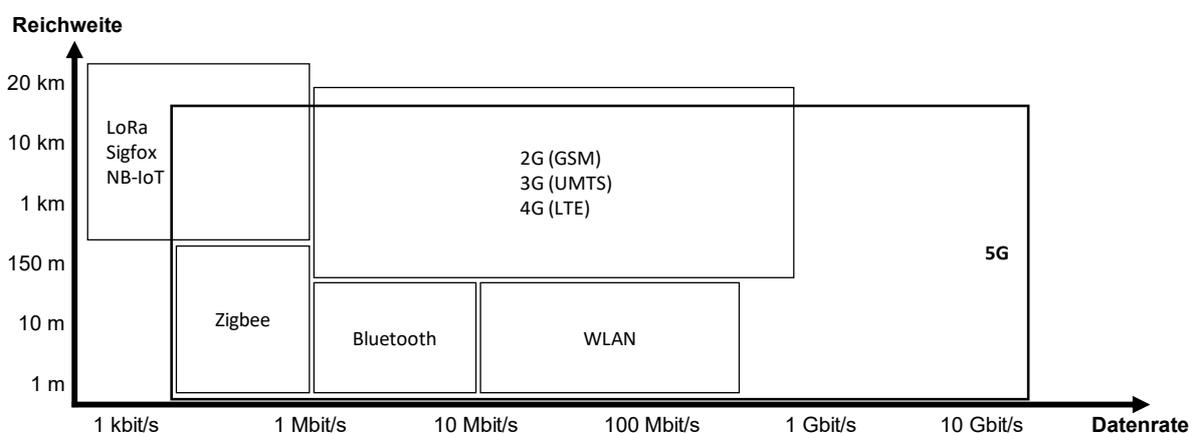


Abbildung 2.11: Überblick der Funktechnologien nach Datenrate und Reichweite [Un21]

Als Wireless Local Area Network (WLAN) werden die Standards für lokale Netzwerke nach IEEE 802.11 bezeichnet. Das zugehörige Industrie-Konsortium zur Hardware-Zertifizierung heißt Wireless Fidelity (Wi-Fi). Die drahtlose Kommunikation über WLAN begann im Jahr 1999 und wird seitdem stetig weiterentwickelt. Aufgrund von kurzen Innovationszyklen mit Techniken zur kontinuierlichen Verbesserung der Performance konnte sich WLAN als lizenzfreier, günstiger und drahtloser Internetzugang gegen andere Systeme durchsetzen. Inzwischen adressiert die WLAN-Standardisierung auch für Industrie 4.0 relevante Themen, z. B. QoS-Optimierung und eine präzise Ortung. Tabelle 2.5 zeigt einen Überblick über die Evolution der jeweils abwärtskompatiblen WLAN-Standards.

Tabelle 2.5: Vergleich der WLAN-Standards (angelehnt an [Ag18])

IEEE-Standard	Marketing-Bezeichnung	Jahr	Durchsatz [Mbit/s]	Frequenz [GHz]	Ordnung (QAM)	Modulation	Bandbreite [MHz]	MIMO
802.11a		1999	54	5	64	OFDM	20	1x1
802.11b		1999	11	2,4	-	DSSS <sup>9</sup>	20	1x1
802.11g		2003	54	2,4	64	OFDM	20	1x1
802.11n	Wi-Fi 4	2009	450	2,4/5	64	OFDM	20, 40	3x3
802.11ac	Wi-Fi 5	2013	3.600	5	256	OFDM	20-160	4x4 DL MU
802.11ax	Wi-Fi 6	2019	8.000	2,4/5	1024	OFDMA	20-160	8x8 DL & UL MU
	Wi-Fi 6E	2021	9.600	zus. 6				
802.11be	Wi-Fi 7	2024	≥ 30.000	2,4/5/6	4096	OFDMA	bis zu 320	16x16 DL & UL MU

Der Standard IEEE 802.11ax, auch bekannt als Wi-Fi 6, wurde quasi zeitgleich zum ersten 5G-Standard veröffentlicht, weshalb die beiden Technologien meistens direkt miteinander verglichen werden. Wi-Fi 6 soll die Netzwerkkapazität und die Übertragungseffizienz im Hinblick auf die Nutzung der Frequenzressourcen und den Mehrnutzerzugriff erhöhen. Wi-Fi 6 steigert den Durchsatz, verspricht eine größere Bandbreite bei hoher Netzwerkteilnehmerdichte und verringerte Latenzzeiten. Zusätzlich bietet Wi-Fi 6 eine höhere Signalreichweite bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauchs. Diese Verbesserungen werden durch folgende Mechanismen erreicht [Hu21]:

- Symbolübertragung mit Long Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM),
- Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA),
- Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO) im Uplink (UL),
- Kodierung der Ordnung 1024-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) sowie
- Energiesparfunktion Target Wake-up Time.

Wi-Fi 6 erlaubt das gleichzeitige Senden und Empfangen, indem es den Mehrfachzugriff in Frequenz (OFDMA) und Raum (MU-MIMO) sowohl in Downlink (DL)- als auch in UL-Richtung ermöglicht [Ag18].

Der Begriff Industrial WLAN (IWLAN) bezeichnet eine proprietäre Weiterentwicklung und Anpassung von Standard-WLAN an industrielle Umgebungseigenschaften, um dessen Einsatzbereich auf echtzeitfähige und hochverfügbare industrielle Anwendungen zu erweitern [Ak17]. Die Industrial Point Coordination Function (iPCF) regelt mittels zyklischer Sende- und Empfangszeiten den Kanalzugriff aller Empfangsstationen und ermöglicht so die Priorisierung von zeitkritischen Daten sowie ein schnelles Roaming in weniger als 50 ms. Darüber hinaus steigert die Erweiterung Industrial Frequency Hopping die Zuverlässigkeit, indem eine Empfangsstation den Funkkanal analysiert, diesen bei einer Störung zeitweilig löscht und mit den verbundenen Endgeräten auf einen störungsfreien Kanal wechselt [VD20b]. Weiterhin wird die Verfügbarkeit durch Redundanz über das Industrial Parallel Redundancy Protocol (iPRP) erhöht [Si24].

<sup>9</sup> Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

### Gegenüberstellung von WLAN und Mobilfunk

Sowohl WLAN als auch Mobilfunk werden weiterhin eine wichtige Rolle spielen, somit koexistieren und gleichzeitig als Konkurrenten und Ergänzungen fungieren. Mobilfunk wird voraussichtlich die bevorzugte Technologie für die flächendeckende Versorgung bleiben, während WLAN dank seiner deutlich niedrigeren Bereitstellungskosten die bevorzugte Technologie für den Einsatz in Innenräumen bleiben wird. Allerdings verwischen zunehmend die traditionellen Grenzen, die frühere Generationen von Mobilfunk und WLAN unterschieden [Ou21]. Die stetige Zunahme an IoT-Geräten kann auch dazu führen, dass der Funkbedarf nur durch beide Technologien gemeinsam gedeckt werden kann. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass Mobilfunk kostenpflichtige lizenzierte Frequenzbänder verwendet, wohingegen WLAN ein unlizenzierendes Spektrum nutzt und damit kostenfreien unlimitierten Datenverkehr bietet. Unbegrenzt 5G-Datenvolumen scheint unter heutigen Bedingungen unwahrscheinlich [Hu21]. Tabelle 2.6 stellt die Eigenschaften von Wi-Fi 6, IWLAN und 5G vergleichend gegenüber.

Tabelle 2.6: Vergleich zwischen Wi-Fi 6, IWLAN und 5G (angelehnt an [Ha21b])

Funktionalität	Wi-Fi 6	IWLAN	5G
Frequenzspektrum	unlizenziiert (2,4 & 5 GHz), deshalb Überlastungen und Verbindungsabbrüche möglich	unlizenziiert (2,4 & 5 GHz), kontinuierliche Kanalüberprüfung	lizenziiert (z. B. 3,7-3,8 GHz in Deutschland [Bu24]), unlizenziiert
Reichweite	gering (räumlich klar eingegrenztes Gebiet)	gering (räumlich klar eingegrenztes Gebiet)	hoch (breite Abdeckung)
Mobilität	langsames Roaming, kurzzeitige Verbindungsabbrüche	schnelles Roaming (durch iPCF)	unterbrechungsfreie Handover
QoS	nicht deterministisch, prioritäts-basiert, limitierte Anzahl an QoS-Profilen	deterministisch	deterministisch, viele QoS-Profile, Network Slicing
Zeitsynchronisation	unpräzise (nur über spezielle Mechanismen)	präzise	präzise
Komplexität	gering (Standalone WLAN, einfache Einrichtung)	mittel (proprietärer Standard)	hoch (Control Plane-Funktionen, RAN, SIM-Karte)
Kosten	vergleichsweise gering	vergleichsweise mittel	vergleichsweise hoch

Insbesondere in einer Fabrik beeinträchtigen Maschinen und metallische Oberflächen das Funksignal. Eine dichte Anordnung verschiedener Objekte verursacht Störstrahlungen oder Abschattungen, da keine direkte Verbindung (engl. Line of Sight) zwischen Sender und Empfänger besteht. Schlechte Ausbreitungseigenschaften kombiniert mit hoher Signalinterferenz, z. B. aufgrund von örtlicher Koexistenz mit anderen Funksystemen, erschweren die Bedingungen für den Einsatz von Funksystemen. Koexistenz-Mechanismen sorgen zwar dafür, dass der Kanalzugriff nur nach Prüfung freier Kapazitäten erfolgt. Dies verursacht allerdings Verzögerungen. Weiterhin kann es trotzdem zu Paketverlusten kommen, weshalb das unlizenziierte Spektrum keine Garantie für den Medienzugriff bieten kann und sich somit nur bedingt für industrielle Anwendungen eignet [Ak17]. Abhilfe kann ein dediziertes Campusnetz mit lizenziertem Spektrum schaffen.

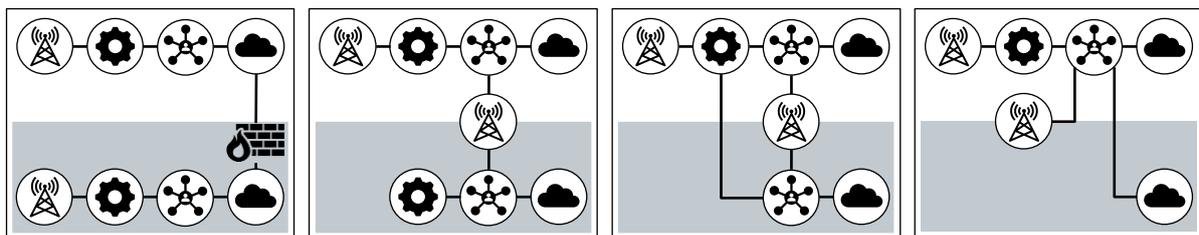
### 2.2.3 5G-Betreibermodelle

Für den Betrieb eines 5G-Campusnetzes kommen verschiedene Betreibermodelle infrage. Diese unterscheiden sich sowohl beim Aufwand für die Implementierung und Integration als auch bei den Vorteilen, z. B. in Bezug auf die Flexibilität und Sicherheit. Abbildung 2.12 stellt die Betreibermodelle mit verschiedenen Integrationstiefen schematisch gegenüber. Im Hinblick auf den Grad der

Interaktion und der gemeinsamen Nutzung der Infrastruktur mit dem öffentlichen Netzwerk lassen sich zwei Kategorien differenzieren, wobei die zweite wiederum drei Konfigurationen umfasst:

1. Eigenständiges und isoliertes nicht-öffentliches Netzwerk (Standalone Non-Public Network; SNPN) oder
2. Nicht-öffentliches Netzwerk integriert in ein öffentliches Netzwerk (Public Network Integrated Non-Public Network; PNI-NPN), darunter
  - a) Gemeinsam genutztes RAN,
  - b) Gemeinsame Nutzung von RAN und Control Plane oder
  - c) Hosting des nicht-öffentlichen Netzwerks im öffentlichen Netzwerk.

1. Isoliertes Netzwerk (SNPN)
2. Nicht-öffentliches Netzwerk integriert in ein öffentliches Netzwerk (PNI-NPN)
  - a) Gemeinsam genutztes RAN
  - b) Gemeinsame Nutzung von RAN & Control Plane
  - c) Hosting



Entscheidungsfreiheit, (QoS-)Konfigurierbarkeit, Datenschutz, benötigtes fachkundiges Betriebspersonal

Legende: Öffentliches Netz Nicht-öffentl. Netz RAN Control Plane User Plane Netzwerkdienste

Abbildung 2.12: Nicht-öffentliches und öffentliches 5G-Netzwerk (angelehnt an [5G19e] und [VD20b])

Im Fokus dieser Dissertation steht Betreibermodell 1 (vgl. Messungen in Abschnitt 8.1). Beim Modell 2a) nutzen das nicht-öffentliche und das öffentliche Netzwerk einen Teil des RAN gemeinsam, während andere Netzwerkfunktionen separiert sind. Sämtlicher nicht-öffentlicher Datenverkehr verbleibt innerhalb des definierten logischen Umkreises. Öffentliche Daten gelangen dagegen ins öffentliche Netz. UEs im nicht-öffentlichen Netzwerk können über eine *Dual Subscription* auch Dienste des öffentlichen Netzwerks nutzen.

In Modell 2b) teilen sich beide Netzwerke das RAN für den Campus, jedoch werden Aufgaben der Netzwerksteuerung stets im öffentlichen Netzwerk durchgeführt. Mittels Network Slicing erfolgt eine Segregation beider Netzwerke.

Im Betreibermodell 2c) liegt die Verantwortung sowohl für den öffentlichen als auch den nicht-öffentlichen Datenverkehr bei einem Mobilfunkanbieter. Mittels Network Slicing und NFV können beide Anteile als völlig unterschiedliche Netzwerke behandelt werden [5G19e].

Eine tiefere Analyse der 5G-Betreibermodelle liefern Muzaffar et al. [Mu23]. Sie bewerten die Alternativen im Hinblick auf reale industrielle Implementierungen und Anwendungsfälle. Dabei untersuchen sie auch das Potenzial von Network Slicing, MEC sowie die 5G-Integration in TSN und OPC UA. Die 5G-ACIA [5G24a] analysiert die 5G-Betreibermodelle im Hinblick auf konkrete Szenarien in industriellen Netzwerken.

## 2.2.4 5G-Integration in industrielle Ethernet-Netzwerke

Für die 5G-Integration in Industrial Ethernet erläutert dieser Abschnitt drei Optionen zur Verortung der User Plane Function (UPF), zwei Integrationsmodelle sowie drei Alternativen zur Anpassung der Kommunikation auf verschiedenen OSI-Schichten.

### Verortung der User Plane Function

Die UPF bildet den logischen und physischen Ankerpunkt für die Nutzdaten zwischen 5G-Netzwerk und IT/OT-Netzwerk. Abbildung 2.13 visualisiert die folgenden drei Einsatzoptionen:

1. UPF im öffentlichen Netzwerk,
2. UPF im OT-Anlagennetzwerk oder
3. UPF im IT-Produktionsnetzwerk.

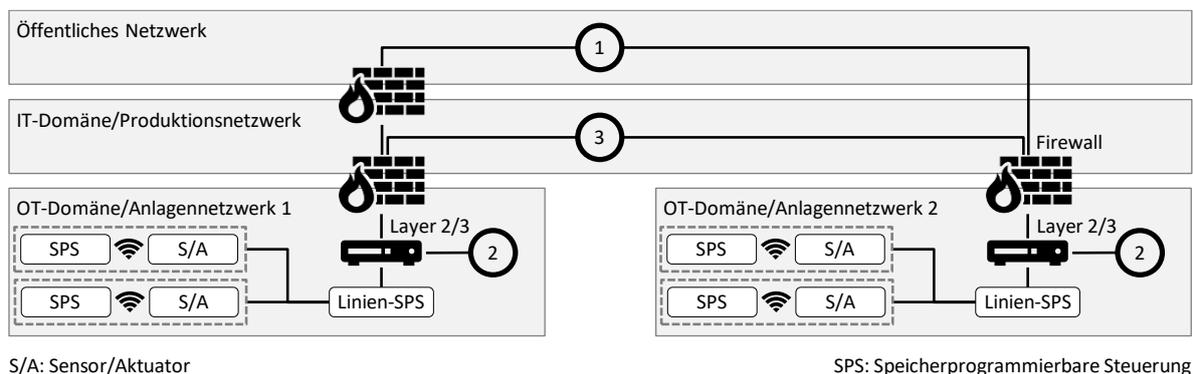


Abbildung 2.13: Optionen zur Verortung der UPF (angelehnt an [5G19c])

Option 1 entspricht dem zuvor beschriebenen Hosting-Szenario. Der Vorteil liegt in den moderaten Kosten und der schnellen Umsetzung, da der Aufwand für die Integration in ein Unternehmens-IT/OT-Netzwerk gering ist. Allerdings muss jeglicher drahtlose Datenverkehr von und zu Geräten der OT-Domäne Firewalls durchlaufen. Dies kann zu Performance-Einbußen führen, sodass folglich lediglich anforderungsarme Anwendungsfälle wie Fernwartung und Zustandsüberwachung von Anlagen unterstützt werden.

Option 2 erfordert eine Integration des 5G-Netzwerks in die bestehende IT/OT-Infrastruktur, bietet jedoch die beste Performance, weil Datenverkehr ohne Firewall in das Anlagennetzwerk gelangt.

Option 3 stellt den Kompromiss aus den ersten beiden Optionen dar und erfordert lediglich eine 5G-Integration in der IT-Ebene. Die Kommunikation muss jedoch über mindestens eine Firewall erfolgen. Während dieser Ansatz für kleinere Unternehmen sinnvoll scheint, ist der Nutzen für größere Unternehmen mit getrennter IT und OT eher geringer.

Alle Alternativen lassen sich auch kombinieren, sodass Anwendungen je nach Anforderungen eine UPF wählen können [5G19c].

### Integrationsmodelle

Für die Integration des 5G-Systems in ein Ethernet-Netzwerk existieren die beiden grundlegenden Modellierungsansätze als Link-Modell oder Bridge-Modell, welche in Abbildung 2.14 dargestellt sind.

Beim Link-Modell fungiert das 5G-System als Ethernet-Netzwerkverbindung bzw. Kabelersatz. Es stellt in Richtung des Ethernet-Netzwerks ein spezifiziertes Medium dar, z. B. mit 1 Gbit/s. Der Kabelersatz muss ein deterministisches Verhalten in Bezug auf Kapazität und Verzögerung garantieren. Allerdings kann die Performance zwischen UEs aufgrund der unterschiedlichen „Kabellänge“ variieren. Ein Switching erfolgt nicht zwischen UEs, sondern außerhalb des 5G-Systems. Beim Link-Modell integriert das 5G-System alle Sensoren, Aktoren und Steuerungen direkt, indem es sie als UE oder netzwerkseitig

mit der UPF verbindet. Pro Ethernet-Port an der UPF kann nur ein UE angebunden werden. Im Hinblick auf die Interoperabilität zwischen 5G-System und Ethernet-Netzwerk ist dieser Ansatz sehr begrenzt. Nachteile sind die inadäquate Modellierbarkeit der QoS, die begrenzte Planbarkeit von Verbindungen, z. B. TSN-Streams, sowie die eingeschränkte Abbildbarkeit der Funkverbindungen einzelner Endgeräte auf das kabelgebundene Ethernet-Netzwerk [5G19c]. Der Ansatz arbeitet auf Layer 3 und integriert 5G als statische Routing-Funktion in ein IP-basiertes Netzwerk. Die Komplexität ist zwar relativ gering, dafür sind harte Echtzeitanforderungen aufgrund der Intransparenz nur begrenzt erfüllbar [Ne20]. Industriekonforme Expositionsschnittstellen dienen der 5G-Netzwerkverwaltung [5G21c].

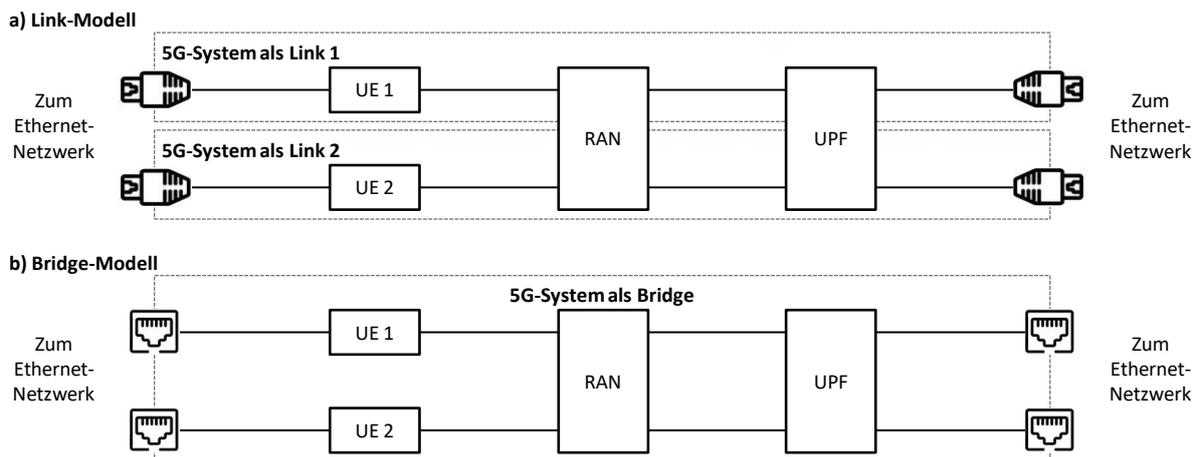


Abbildung 2.14: 5G-Integration in Ethernet als a) Link-Modell und b) Bridge-Modell

Beim Bridge-Modell repräsentiert das 5G-System einen Netzwerkknoten, d. h. eine virtuelle Ethernet- bzw. TSN-Bridge. Das Bridge-Modell ist nur für das vollständig zentralisierte TSN-Konfigurationsmodell (Fully Centralized Model) spezifiziert. Als Bridge unterstützt das 5G-System Mechanismen zur deterministischen Übertragung von zeitkritischem Layer 2-Datenverkehr [5G21c], z. B. eine zentralisierte Konfiguration durch die CNC. Dadurch wird die Interoperabilität mit kabelgebundenen Ethernet-Netzwerken ermöglicht. Das Bridge-Modell ist skalierbar und kann mehrere Bridges pro Network Slice oder VLANs mit unterschiedlichen QoS-Anforderungen unterstützen [5G19c]. Innerhalb des 5G-Systems erfolgt ein Switching zwischen UEs. Für jedes Port-Paar zwischen UPF und unterschiedlichen UEs kann die Performance individuell sein.

Wie in Abbildung 2.15 dargestellt, müssen zur Anpassung von Verfahren und Protokollen an den Systemgrenzen, d. h. an den Eingangs- und Ausgangsports der 5G-Bridge, sogenannte Übersetzungsfunktionen eingeführt werden. Diese umfassen den Device-Side TSN Translator (DS-TT), den Network-Side TSN Translator (NW-TT) sowie die TSN Application Function (TSN AF), abstrahieren die Komplexität des 5G-Systems und lassen es gegenüber der CNC als TSN-Bridge erscheinen. Diese weist dann denselben Parametersatz wie jede andere native TSN-Bridge auf.

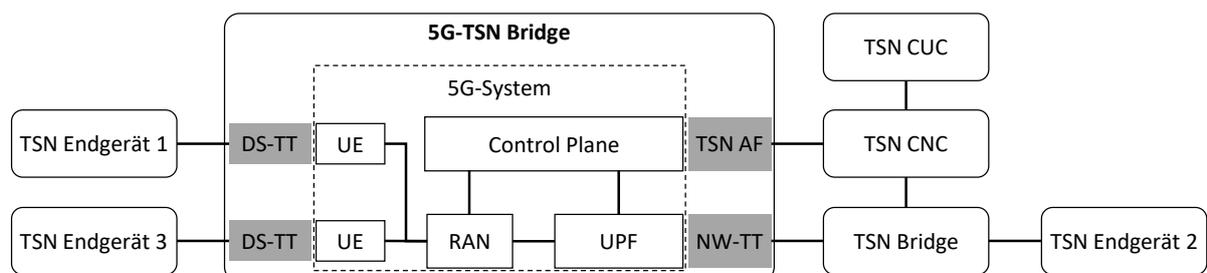


Abbildung 2.15: Modell des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge gemäß 3GPP TS 23.501 [3G22b]

Die Herausforderung beim Bridge-Modell besteht in der Interaktion zwischen Control Plane und User Plane, um eine Ende-zu-Ende Ethernet- bzw. TSN-Kommunikation zu gewährleisten. Die TSN AF innerhalb der Control Plane interagiert im Zuge der Bridge- und Netzwerkverwaltung mit der CNC, um Informationen über die Netzwerktopologie und Performance der Bridges zu erfassen und TSN-Streams im 5G-System zu konfigurieren [5G21c]. Darunter fallen auch die Zeitsynchronisation und die QoS-Steuerung. Die User Plane mit DS-TT und NW-TT ist für die Durchsetzung der QoS-Richtlinien zuständig. Einerseits müssen die TSN-Translatoren die spezifische Schnittstelle (Protokoll und Informations- bzw. Datenmodelle) zu anderen TSN-Entitäten implementieren. Andererseits ist es notwendig, TSN-bezogene Informationen zwischen dem DS-TT und dem NW-TT sowie mit anderen 5G-Funktionen auszutauschen [RCK20].

Das Bridge-Modell bedeutet zwar einen hohen Aufwand bei der Offenlegung und Abbildung von Protokollattributen für die Konfiguration. Indem die interne Komplexität des 5G-Systems gekapselt wird und damit für das Ethernet-Netzwerk unsichtbar ist, wird jedoch auch die Verwaltung vereinfacht und die Konfiguration von Verbindungen ohne spezifische Kenntnisse der Mobilfunktechnologie ermöglicht [NWJ19]. Somit lassen sich QoS-Anforderungen und -Fähigkeiten zwischen 5G-System und Ethernet-bzw. TSN-Netzwerk transparent und effektiv nutzen [5G19c], [Ne20].

Das 5G-System als Bridge ist deutlich komplexer als eine native TSN-Bridge, was sowohl an der Bridging-Distanz als auch an der Bridging-Fabric deutlich wird. Die Bridging-Distanz zwischen Eingangs- und Ausgangsports ist am 5G-UE bzw. DS-TT ortsflexibel und erheblich größer als bei einer nativen TSN-Bridge mit wenigen Zentimetern. In Bezug auf die Bridging-Fabric umfasst das 5G-System als verteilte Bridge ein integriertes Netzwerk mit 3GPP-standardisierten internen Interaktionen zwischen Control Plane und den TSN-Translatoren sowie Regeln an Eingangs- und Ausgangsports. Eine native TSN-Bridge dagegen muss lediglich interne Port-Regeln anwenden.

Die Integration in Netzwerke ohne Bridges gestaltet sich deutlich schwieriger, da ein Mapping von Ring- oder Daisy Chain-Topologien auf ein 5G-Netzwerk nicht direkt möglich ist [5G19c]. Deshalb wird an dieser Stellen nicht näher darauf eingegangen.

### **Anpassung der Kommunikation auf verschiedenen OSI-Schichten**

Brownfield-Anlagen erfordern eine Integrationsstrategie mit geeigneten Schnittstellen und Kompatibilität zu etablierten kabelgebundenen Kommunikationstechnologien wie Industrial Ethernet-Feldbussystemen [5G19f]. Um eine Kompatibilität zu erreichen, müssen die Datenformate, das Protokoll- und insbesondere das Zeitverhalten aufeinander abgestimmt werden. Die physikalischen Grenzen der Funkübertragung und die begrenzte Skalierbarkeit der Übertragungskapazität stellen beim Wechsel von Kabel auf Funk große Herausforderungen dar. Bei der Funkplanung muss die Kapazität sowohl flächendeckend vorgehalten als auch für bestimmte Mobilitätsszenarien mit Handover umverteilt werden, falls sich z. B. alle FTS zeitgleich an einem Batterie-Ladepunkt befinden [Ak17].

Die Industrial Ethernet-Kommunikation, wie z. B. PROFINET, stellt im Vergleich zur IP-Kommunikation spezifische Anforderungen [5G19c]:

- Weiterleitung auf Layer 2 (MAC, Ethertype, VLAN) statt Layer 3 (IP),
- kurze Zykluszeiten und gleichzeitige Zyklen mit abweichender Dauer,
- typischerweise eine große Anzahl von kleinen Ethernet-Frames,
- hochpräzise Zeitsynchronisation und
- Übertragung von Protokollen der funktionalen Sicherheit (PROFIsafe).

Weil Ethernet und 5G auf unterschiedlichen OSI-Schichten arbeiten, müssen die Adressierungs- und Weiterleitungsprinzipien angepasst werden. Dazu bestehen die folgenden drei Alternativen:

- nativ über Layer 3,
- Layer 2-Tunnel über Layer 3 oder
- direkt über Layer 2.

Die Integration über Layer 3 erfordert lediglich eine Koordination des IP-Adressbereichs und ermöglicht den flexibelsten Einsatz des 5G-Netzwerks: Die UPF stellt einen IP-Router dar, der in die bestehende Layer 3-Infrastruktur integriert wird. Mithilfe einer PDU-Session (Protocol Data Unit) vom Typ IP wird IP-Datenverkehr von und zu jedem UE in einen dedizierten 3GPP-nativen Tunnel kanalisiert. Für die Integration in ein Ethernet-Netzwerk ist diese Option jedoch nicht geeignet.

Tunneln dient zur Übertragung von Ethernet-Frames über ein IP-Netzwerk. Ethernet-Frames werden zwischen zwei Endpunkten gekapselt und über eine IP-Verbindung übertragen, wo sie wieder aus dem Tunnel extrahiert werden. Somit wendet das 5G-Netzwerk beim Tunneln keine Layer 2-spezifischen Adressierungs- und Weiterleitungsprinzipien an. Allerdings erzeugt das Tunneln Overhead.

Die Integration über Layer 2 wird mithilfe einer PDU-Session vom Typ Ethernet möglich. Wie bei Layer 3 ist auch der Layer 2-Datenverkehr im UPF-Knoten verankert und wird für jedes UE über eine Ethernet PDU-Session in seinen eigenen nativen 3GPP-Tunnel kanalisiert.

Die Ausgestaltung von PDU-Sessions ist flexibel. Da viele industrielle Anwendungen Datenverkehr über verschiedene Protokolle und Layers sowohl mit als auch ohne Zeitkritikalität umfassen, kann jedes UE mehrere PDU-Sessions für Layer 2 oder 3 mit unterschiedlichen QoS-Attributen parallel aufbauen [5G19c].

### 2.2.5 Anbindung von Kommunikationsteilnehmern

Bei der Anbindung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) und Feldgeräten wie Sensoren und Aktoren an das 5G-Netzwerk kommen unterschiedliche Kommunikationsszenarien infrage. Die Anbindung von Automatisierungsgeräten an das 5G-Netzwerk hängt von deren Eingliederung innerhalb der individuellen Netzwerkachitektur und der Verteilung der logischen Funktionen der UPF ab. 5G-Netzwerke müssen eine flexible Anbindung unterstützen, z. B. weil Steuerungen in Zukunft virtualisiert auf einem zentralen Server realisiert werden sollen. Abbildung 2.16 zeigt die Alternativen.

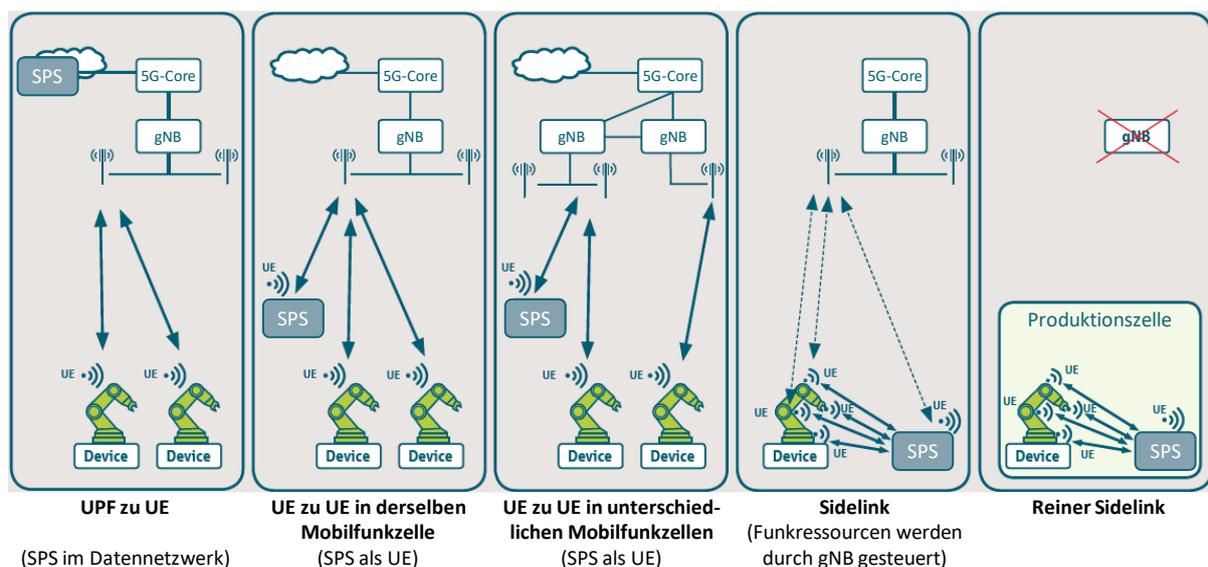
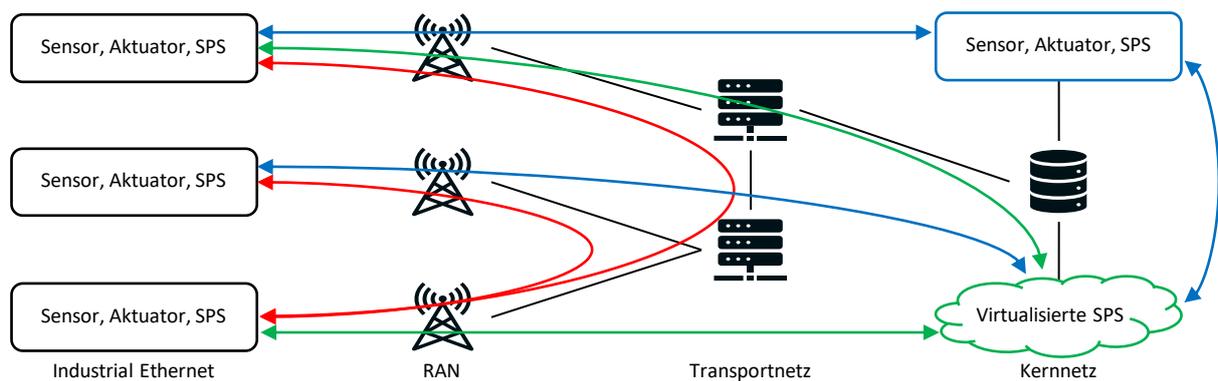


Abbildung 2.16: Alternativen der SPS-Anbindung (angelehnt an [5G19c])

Falls eine Produktionszelle nach außen vollständig vor Radiowellen abgeschirmt ist, lässt sich alternativ der Sidelink nutzen. Dadurch können UEs, die sich in unmittelbarer Nähe befinden, ohne Netzwerkinfrastruktur direkt miteinander kommunizieren. Diese Funktionalität für die industrielle Kommunikation wird ab 3GPP Release 17 mit dem Ziel einer Zuverlässigkeit von 99,999 % und einer maximalen Latenzzeit von 3 ms adressiert [5G19c].

Neumann et al. [Ne18] differenzieren bei der Anbindung noch deutlicher nach der Beteiligung der 5G-Netzwerkkomponenten, deren Verknüpfungen in Abbildung 2.17 dargestellt sind:

1. Vernetzte homogene Inseln (UE zu UE),
2. Virtualisierte Steuerung (UE zu UPF) und
3. Vielseitigkeit mit Virtualisierung und Remote-Standort (UE via UPF zum Datennetzwerk).



Szenario 1: Vernetzte homogene Inseln (UE zu UE)  
 Szenario 2: Virtualisierte Steuerung (UE zu UPF)  
 Szenario 3: Virtualisierung über Remote-Standort (UE zu UPF zu WAN-Datennetz)

Abbildung 2.17: Anbindung von Kommunikationspartnern (angelehnt an [Ne18])

Szenario 1 betrifft nur das RAN und das Transportnetz des 5G-Systems, jedoch nicht den Core. Die QoS-Anforderungen können anspruchsvoll sein, wenn das 5G-System in den geschlossenen Regelkreis eingebunden ist, d. h. wenn eine Steuerung mit Sensoren und Aktoren einer entfernten Insel verbunden ist, oder geringer, wenn nur die Steuerungen untereinander über 5G kommunizieren.

In Szenario 2 ist die virtualisierte Steuerung mit dem 5G-Core verbunden, sodass die gesamte Netzwerktopologie in den Regelkreis einbezogen ist, was zu hohen QoS-Anforderungen führt. Die Sensoren und Aktoren an der Produktionslinie können über Industrial Ethernet oder 5G angebunden werden, während die virtualisierte Steuerung standardmäßig über Ethernet IP kommuniziert.

Szenario 3 erweitert das zweite Szenario um einen entfernten Produktionsstandort, der an den 5G-Core angebunden ist. Die Kommunikationsendpunkte besitzen Schnittstellen für Standard- und Industrial Ethernet-Protokolle sowie für 5G.

Die Unterschiede bei der Anbindung betreffen vor allem die räumliche Ausdehnung bzw. Verteilung der vernetzten Geräte [Ne20]. Entscheidend für alle Szenarien ist, inwieweit sich die Performance des 5G-Systems auf die des gesamten hybriden Netzwerks übertragen lässt [Ne18].

Im UE ist eine interne Schnittstelle des Herstellers des Automatisierungsgeräts erforderlich [5G19a], welche je nach Integrationsgrad als Chipsatz, Modul oder Customer Premises Equipment (CPE) realisiert werden kann. Das CPE mit einem direkt eingebetteten oder in einem Modul enthaltenen Chipsatz verbindet sich als 5G-Router bzw. Gateway mit dem Mobilfunknetz. Eine direkte Integration des Chipsatzes in eine Maschine ist aufwendig und teuer, wohingegen die CPE-Variante den geringsten technischen Aufwand birgt [VD20b].

### 2.2.6 Quality of Service in 5G

In diesem Abschnitt wird das in 3GPP TS 23.501 [3G22b] spezifizierte 5G QoS-Framework erläutert, einschließlich relevanter QoS-Parameter für die Priorisierung von Datenverkehr. In 3GPP TS 22.104 [3G21] werden 5G-Dienste für diverse industrielle Anwendungsfälle definiert. Für die isochrone Bewegungssteuerung werden beispielsweise etwas weniger strenge Anforderungen für das 5G-System im Vergleich zu kabelgebundenen Netzwerken definiert, z. B. wird das Übertragungsintervall auf 500 µs statt der ursprünglich vorgesehenen 100 µs erhöht. Weitere 5G-Datenverkehrsmodelle für die industrielle Automatisierung werden z. B. in [Di17], [UW20] und [5G19b] beschrieben. Die 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA) erläutert in [5G21b] die Nutzung von 5G QoS-Funktionen für die industrielle Automatisierung.

Abbildung 2.18 zeigt die 5G QoS-Architektur. Für 5G-Datenverkehrsflüsse, engl. Flows, kreiert die Session Management Function (SMF) mindestens eine PDU-Session pro UE. Jede PDU-Session enthält wiederum mindestens einen Radio Bearer auf der Luftschnittstelle zwischen UE und gNB. Die Schnittstelle zwischen gNB und UPF bildet der Next Generation User Plane Tunnel. Ein Radio Bearer kann einen oder mehrere QoS-Flows mit einem QoS Flow Identifier (QFI) enthalten. Das UE erhält QoS-Regeln, die gNB ein QoS-Profil und die UPF ein Template für einen Service Data Flow. Eine PDU-Session enthält mindestens einen QoS-Flow. Mittels Paketfiltern erfolgt ein zweistufiges Mapping von IP-Flows zu QoS-Flows und von QoS-Flows zu Radio Bearer.

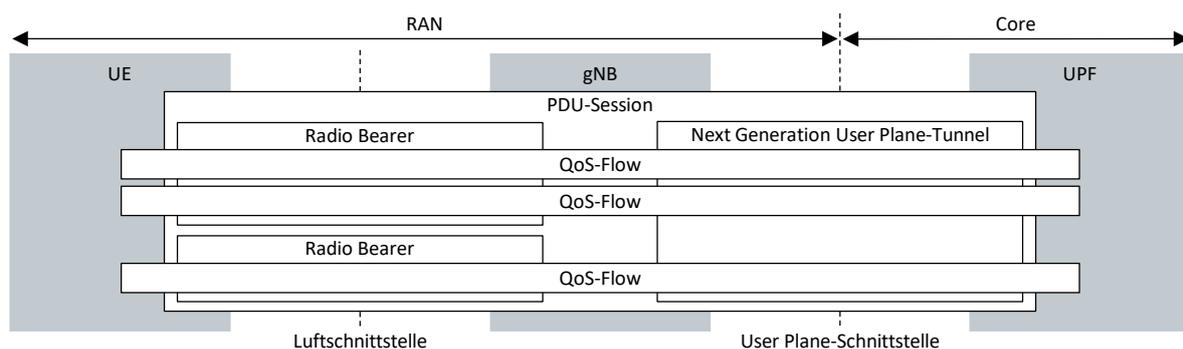


Abbildung 2.18: 5G QoS-Architektur gemäß 3GPP TS 38.300 [3G23]

In Abbildung 2.19 ist der Prozess zur QoS-Verwaltung im 5G-System schematisch aufgezeigt.

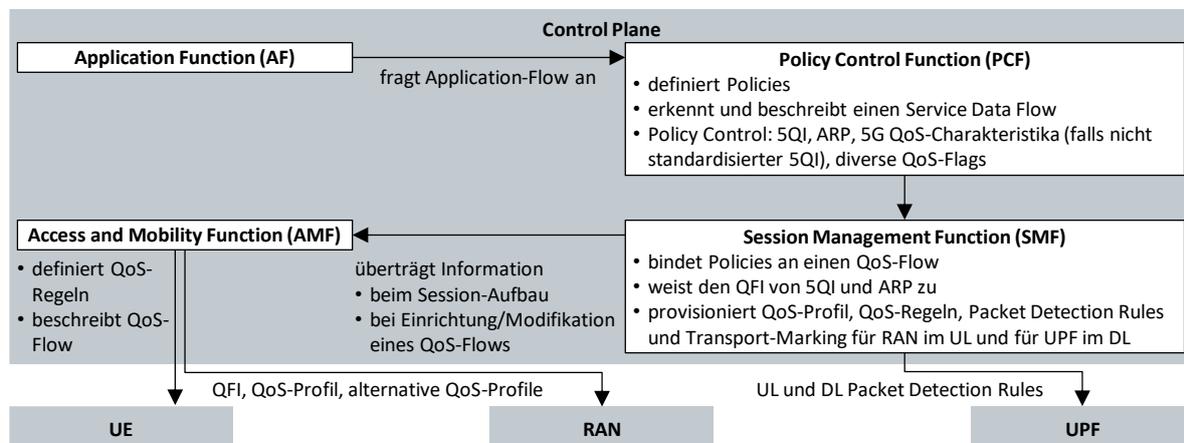


Abbildung 2.19: Ende-zu-Ende QoS-Verwaltung (angelehnt an [5G21g])

Wenn das 5G-System als Ethernet-Bridge fungiert, stellt jeder Port am UE bzw. DS-TT eine drahtlose Verbindung über eine einzelne PDU-Session bereit. Das 5G-System richtet eine PDU-Session ein,

welche eine logische Verbindung für die Übertragung von IP-Paketen oder Ethernet-Frames zwischen der UPF und dem UE oder umgekehrt darstellt. Jede PDU-Session unterstützt bis zu 64 QoS-Flows (63 plus einen Best Effort), die die feinste Granularität der 5G QoS-Differenzierung darstellen. Jeder QoS-Flow verfügt über einen eindeutigen QFI und ist einem QoS-Profil zugeordnet, das aus einer Reihe von QoS-Parametern besteht. Jedes QoS-Profil wird durch einen 5G QoS Identifier (5QI) identifiziert, bei dem es sich um einen Skalar (0-255) handelt, der als Referenz für eine Reihe von QoS-Merkmalen verwendet wird, d. h. für die Performance-Merkmale der Paketweiterleitung, die einem 5G QoS-Flow zur Verfügung gestellt werden soll [5G21b]. Im Folgenden werden die QoS-Parameter erläutert:

- *Resource Type* gibt an, wie streng die Obergrenzen anderer Parameter gehandhabt werden sollen. Die Ressource kann vom Typ Guaranteed Bit-Rate (GBR), Non-GBR oder Delay-Critical GBR (DC-GBR) sein. Die benötigten Bitraten werden permanent zugewiesen.
- *Priority Level* quantifiziert die Priorität eines Flows in Relation zu anderen Flows für die Ressourcenplanung. Im Gegensatz zu TSN entspricht der niedrigste Wert des Priority Level der höchsten Priorität.
- *Packet Delay Budget* (PDB) limitiert die maximale Verzögerung zwischen dem UE und der UPF, bevor das Paket als verloren gewertet wird.
- *Packet Error Rate* (PER) definiert den Grad der Zuverlässigkeit, indem sie eine Obergrenze für die Anzahl der fehlerhaft empfangenen und verlorenen Pakete dividiert durch die Gesamtzahl der empfangenen Pakete festlegt. Je größer das Paket und je niedriger das PDB, desto höher ist die PER.
- *Maximum Data Burst Volume* (MDBV) gibt die Datenmenge an, die innerhalb des PDB gesendet werden kann.
- *Averaging Window* bezieht sich nur auf GBR-Ressourcen und gibt das durchschnittliche Zeitfenster an, in dem die Guaranteed Flow Bit Rate (GFBR) und die Maximum Flow Bit Rate (MFBR) für einen bestimmten Datenverkehrsfluss gelten. Während GFBR für einen QoS-Flow über das Averaging Window erwartet werden kann, definiert MFBR den Maximalwert einer tatsächlichen Bitrate. Daher ist das Averaging Window kein eigenständiges QoS-Merkmal, sondern ein komplementäres Merkmal der QoS-Parameter GFBR und MFBR [5G21b].

Da das 5G PDB im weiteren Verlauf dieser Dissertation Gegenstand näherer Untersuchungen sein wird, erfolgt an dieser Stelle eine umfassendere Erläuterung des Parameters: Das 5G PDB ist in 3GPP TS 23.501 [3G22b] definiert als die obere Zeitgrenze für die Einweg-Paketverzögerung zwischen UPF und der Wide Area Network (WAN)-Schnittstelle des UE, bevor das Paket als verloren gilt. Der PDB-Wert eines 5QI gilt sowohl für den UL als auch den DL. Die tatsächliche Verzögerung ist jedoch in der Regel im UL höher, da das standardmäßige Time-Division Duplex (TDD)-Muster weniger Zeitschlitze für den UL vorsieht, sodass für die Übertragung geplante Pakete auf den nächsten verfügbaren UL-Zeitschlitz warten müssen. Das PDB setzt sich zusammen aus dem 5G Access Network PDB und dem Core Network PDB, für die standardisierte 5QIs einen statischen Wert vorgeben. Für DC-GBR Flows kann stattdessen ein dynamischer Wert für das Core Network PDB pro UL- und DL-Richtung konfiguriert werden. Eine Begrenzung der Paketgröße mittels Fragmentierung kann sich positiv auf die tatsächliche Verzögerung und die Einhaltung des PDB auswirken. Bei DC-GBR Flows wird ein Paket, das länger als das PDB verzögert wird, als verloren und in der PER berücksichtigt. Bei einfachen GBR-Flows dürfen 98 % der Pakete nicht mehr als das definierte PDB verzögert werden. Non-GBR- und einfache GBR-Flows werden in der PER nicht berücksichtigt [3G22b], [AU23].

Die Zuordnung zwischen einem 5QI und den zugehörigen QoS-Merkmalen kann entweder standardisiert, vorkonfiguriert oder dynamisch signalisiert werden, wenn ein QoS-Flow eingerichtet oder geändert wird. 3GPP TS 23.501 enthält 32 standardisierte QoS-Profile mit spezifischen 5QIs und

Parametern, jedoch ist es möglich, insgesamt bis zu 256 Profile zu definieren [3G22b]. 3GPP spezialisierte davon standardisierte 5QIs im Wertebereich von 1-127, um die Signalisierung und Konfiguration für weit verbreitete Anwendungen zu vereinfachen. Standardisierte QoS-Merkmale werden durch den 5QI angezeigt und auf keiner Schnittstelle signalisiert. Es sei denn, bestimmte QoS-Merkmale werden geändert. In diesem Fall werden die geänderten QoS-Merkmale zusammen mit dem 5QI signalisiert und haben Vorrang vor den Default-Werten. Tabelle 2.7 führt konkrete Werte der QoS-Parameter für standardisierte 5QIs auf, welche aus 3GPP TS 23.501 stammen [3G22b].

5QIs zwischen 128 und 254 sind für vorkonfigurierte oder dynamisch zugewiesene 5QIs reserviert. Diese können vom Netzbetreiber festgelegt werden, z. B. für den Einsatz in nicht-öffentlichen 5G-Campusnetzen. Vorkonfigurierte 5QIs erfordern auch keine explizite Signalisierung der entsprechenden QoS-Merkmale.

Dynamisch zugewiesene QoS-Merkmale bieten die höchste Flexibilität, gehen jedoch auf Kosten einer höheren Komplexität, da die QoS-Merkmale einzeln signalisiert werden müssen, anstatt einfach auf einen Eintrag in einer standardisierten oder vorkonfigurierten QoS-Mapping-Tabelle zu verweisen. In kabelgebundenen Ethernet-Netzwerken wird der Datenverkehr auf maximal acht Prioritäten bzw. Datenverkehrsklassen abgebildet, was den vorkonfigurierten 5QIs im 5G-System ähnelt.

Das 5G-System als Ethernet-Bridge kann QoS-Anforderungen für einen TSN-Stream von der CNC über die TSN AF ableiten, z. B. aus der PSFP-Konfiguration [3G22b], vgl. Abschnitt 2.1.3. Basierend auf diesen Informationen richtet das 5G-System einen 5G QoS-Flow mit einem geeigneten QoS-Profil für jeden TSN-Stream ein. Falls die CNC keine PSFP-Konfiguration bereitstellt, verfügt die TSN AF nur über einen statischen Filtereintrag und das 5G-System kann lediglich den PCP-Tag des Ethernet-Frames verwenden, um ihn dem jeweiligen QoS-Flow zuzuordnen. Zu klären ist, wie relevante QoS-Merkmale für Frames der Kategorie Traffic-Engineered Non-Stream abgeleitet werden können, z. B. maximale Frame-Länge und Ankunftszeiten (engl. Arrival Times), welche die CNC nicht zur Verfügung stellt.

Tabelle 2.7: 5G QoS-Parameter für standardisierte 5QIs gemäß 3GPP TS 23.501 [3G22b]

5QI	Resource Type	Priority Level	PDB	PER	MDBV	Averaging Window
1	GBR	20	100 ms	$10^{-2}$	n. a.	2.000 ms
2		40	150 ms	$10^{-3}$	n. a.	2.000 ms
3		30	50 ms	$10^{-3}$	n. a.	2.000 ms
4		50	300 ms	$10^{-6}$	n. a.	2.000 ms
65		7	75 ms	$10^{-2}$	n. a.	2.000 ms
66		20	100 ms	$10^{-2}$	n. a.	2.000 ms
67		15	100 ms	$10^{-3}$	n. a.	2.000 ms
75			Reserviert für künftige Verwendung			
71		56	150 ms	$10^{-6}$	n. a.	2.000 ms
72		56	300 ms	$10^{-4}$	n. a.	2.000 ms
73		56	300 ms	$10^{-8}$	n. a.	2.000 ms
74		56	500 ms	$10^{-8}$	n. a.	2.000 ms
76		56	500 ms	$10^{-4}$	n. a.	2.000 ms
5	Non-GBR	10	100 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
6		60	300 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
7		70	100 ms	$10^{-3}$	n. a.	n. a.
8		80	300 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
9		90	300 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
69		5	60 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
70		55	200 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
79		65	50 ms	$10^{-2}$	n. a.	n. a.
80		68	10 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
10		90	1.100 ms	$10^{-6}$	n. a.	n. a.
82	Delay-critical GBR	19	10 ms	$10^{-4}$	255 Byte	2.000 ms
83		22	10 ms	$10^{-4}$	1.354 Byte	2.000 ms
84		24	30 ms	$10^{-5}$	1.354 Byte	2.000 ms
85		21	5 ms	$10^{-5}$	255 Byte	2.000 ms
86		18	5 ms	$10^{-4}$	1.354 Byte	2.000 ms
87		25	5 ms	$10^{-3}$	500 Byte	2.000 ms
88		25	10 ms	$10^{-3}$	1.125 Byte	2.000 ms
89		25	15 ms	$10^{-4}$	17.000 Byte	2.000 ms
90		25	20 ms	$10^{-4}$	63.000 Byte	2.000 ms

## 2.3 Deterministic Networking

Die Arbeitsgruppe für Deterministic Networking (DetNet) in der Internet Engineering Task Force (IETF) verfolgt die deterministische Datenübertragung auf OSI Layer 3, welche die Latenz, den Jitter und den Paketverlust begrenzen sowie eine hohe Zuverlässigkeit bieten können. Die Arbeitsgruppe ist verantwortlich für die gesamte DetNet-Architektur, für Spezifikationen zur Zeitsynchronisation und Sicherheitsaspekten sowie für die folgenden Bereiche:

- Data Plane,
- Controller Plane,
- Flow-Informationsmodell und
- YANG-Datenmodelle.

Die Data Plane definiert, wie IP und damit verbundene Operation, Administration und Maintenance (OAM) für die Flow-Identifikation und Paketweiterleitung über Layer 3 verwendet werden. Die Controller Plane aggregiert die Control und Management Planes. Einige Funktionen der Controller Plane zur Unterstützung von DetNet sind noch nicht standardisiert. Das Flow-Informationsmodell wird von Reservierungsprotokollen und YANG-Datenmodellen verwendet, um Flows einzurichten und zu steuern. YANG-Datenmodelle beschreiben die Funktionen und Ressourcen von Geräten und Verbindungen (z. B. Puffer, Bandbreite) für die Verwendung in der Gerätekonfiguration und Statusberichterstellung. Tabelle 2.8 zeigt eine Übersicht zu den DetNet-Standards, bezeichnet als Request for Comments (RFC), und zu den Entwürfen.

Tabelle 2.8: Übersicht der IETF DetNet-Standards [IE24b]

Übergreifende Standards	Data Plane-Standards	Entwürfe (Stand: Juli 2024)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• RFC 8557: Det Net Problem Statement</li> <li>• RFC 8578: Det Net Use Cases</li> <li>• RFC 8655: Det Net Architecture</li> <li>• RFC 9016: Flow and Service Information Model for DetNet</li> <li>• RFC 9055: DetNet Security Considerations</li> <li>• RFC 9320: DetNet Bounded Latency</li> <li>• RFC 9550: DetNet Packet Ordering Function</li> <li>• RFC 9551: Framework of Operations, Administration and Maintenance (OAM) for DetNet</li> <li>• RFC 9566: DetNet Packet Replication, Elimination, and Ordering Functions (PREOF) via MPLS over UDP/IP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RFC 8938: DetNet Data Plane Framework</li> <li>• RFC 8939: DetNet Data Plane: IP</li> <li>• RFC 8964: DetNet Data Plane: MPLS</li> <li>• RFC 9023: DetNet Data Plane: IP over IEEE 802.1 TSN</li> <li>• RFC 9024: DetNet Data Plane: IEEE 802.1 TSN over MPLS</li> <li>• RFC 9025: DetNet Data Plane: MPLS over UDP/IP</li> <li>• RFC 9037: DetNet Data Plane: MPLS over IEEE 802.1 TSN</li> <li>• RFC 9546: Operations, Administration and Maintenance (OAM) for DetNet with MPLS Data Plane</li> <li>• RFC 9056: DetNet Data Plane: IP over MPLS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reliable and Available Wireless Technologies</li> <li>• Requirements for Scaling Deterministic Networks</li> <li>• Requirements for Reliable Wireless Industrial Services</li> <li>• Operations, Administration and Maintenance (OAM) for DetNet with IP Data Plane</li> <li>• DetNet PREOF via MPLS over UDP/IP</li> <li>• DetNet YANG Model</li> <li>• Reliable and Available Wireless Architecture</li> </ul> <p>Abgelaufen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DetNet Controller Plane Framework</li> <li>• Reliable and Available Wireless Framework</li> <li>• DetNet Topology YANG Model</li> </ul>

Die Standardisierungsarbeit umfasst die Charakterisierung von Flows für eine angemessene Ressourcenreservierung und Wiederverwendung freigegebener Ressourcen, die Einkapselung von Layer 2-Frames und das erforderliche Weiterleitungsverhalten für Pfade über mehrere Hops. Der Fokus liegt auf Lösungen für Netzwerke unter einer einzigen oder innerhalb einer geschlossenen Gruppe administrativer Kontrolle, z. B. Campusnetze oder private WANs. Lösungen für große Gruppen von Domänen wie das Internet, Modifikationen von Transportprotokollen, Layer 3-Weiterleitung und Einkapselung werden nicht berücksichtigt.

Die DetNet-Arbeitsgruppe arbeitet mit weiteren IETF-Arbeitsgruppen zusammen, z. B. IEEE 802.1 TSN und Reliable and Available Wireless (RAW), um eine gemeinsame Architektur für Layer 2 und 3 zu definieren. Die Prinzipien und Ziele von DetNet und TSN sind sehr ähnlich [Fi17], weshalb DetNet bestimmte TSN-Mechanismen übernimmt. Bisher mangelt es an Implementierungen, da DetNet noch keinen ausreichenden Reifegrad erreicht hat [IE24b].

DetNet fehlt in bisherigen hybriden Netzwerkarchitekturen mit 5G, jedoch liefert RAW einen Ansatz für die Integration von 5G in DetNet. 5G wird als eine von mehreren geeigneten Funktechnologien für einen RAW-Standard angesehen. Dieser befindet sich im Juli 2024 noch im Entwurfsstadium [IE24b], [IE24c]. Die 5G-ACIA und 3GPP arbeiten an der Integration von 5G in DetNet [5G22b], [Er21], welche für 3GPP Release 18 angestrebt wird. Die Interoperabilität von 5G und DetNet auf Layer 3 ist für hybride deterministische Netzwerke künftig entscheidend. Abbildung 2.20 zeigt das Modell des 5G-Systems als virtuellen DetNet-Router bzw. Transit-Node. Darin bildet, analog zur TSN AF, die *Time Sensitive Communication Time Synchronization Function* (TSCTSf) die Schnittstelle zwischen dem zentralen DetNet-Controller und dem 5G-System, um Parameter zwischen beiden Systemen zu übersetzen. Bestehende 3GPP-Routing-Mechanismen können vollständig für DetNet übernommen werden und das TSC-Framework für deterministische QoS- und Zeitsynchronisationsdienste im Zuge von 3GPP Release 17 wiederverwendet werden. Nur IP-basiertes DetNet soll berücksichtigt werden. Multi-Protocol Label Switching (MPLS), Multicast und DetNet Edge-Funktionen sind exkludiert [Er21]. QoS für DetNet umfasst die Ressourcenallokation, den Schutz von Diensten und explizite Routen [YSH19].

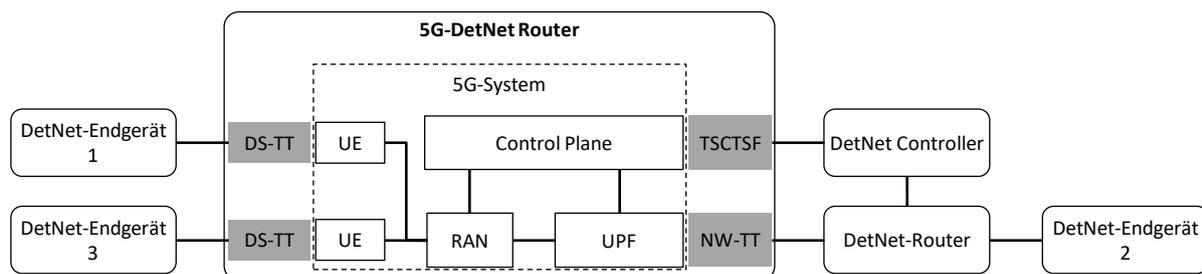


Abbildung 2.20: Konzept des 5G-Systems als virtueller DetNet-Router (angelehnt an [Er21])

### Vergleich von DetNet und TSN

Nachfolgend werden DetNet und TSN detailliert verglichen, um ihre Anwendbarkeit in Kombination mit 5G zu überprüfen. Daraus werden fehlende Elemente in 5G und DetNet für eine ganzheitliche deterministische industrielle Netzwerkarchitektur abgeleitet. TSN und DetNet stehen vor drei großen gemeinsamen Herausforderungen:

- die Verbindung mit großen externen Netzwerken wie WANs und die Rolle von SDN bei deren Handhabung,
- die Integration in 5G, insbesondere die Unterstützung von DetNet im 5G-Backhaul und von TSN im 5G-Fronthaul sowie
- die Ressourcenreservierung im Sinne einer kontinuierlichen und flexiblen Flow- bzw. Stream-Verwaltung [Na19], welches in TSN deutlich komplexer ist, da es sich um ein hochkomplexes architektonisches und technologisches Optimierungsproblem handelt [He20].

DetNet-Erweiterungen konzentrieren sich auf die Verwaltung der Controller Plane sowie auf Architektur- und Protokollverbesserungen. Um Determinismus auf Layer 3 zu erreichen, stützt sich DetNet auf Layer 2-Funktionen zur Synchronisation und Steuerung von Flows. Deshalb erfordert

DetNet eine strenge Ressourcenplanung, z. B. auf Basis von Stream-Identifikationsfunktionen, um einen DetNet-Flow einem TSN-Stream zuzuordnen.

DetNet und TSN ergänzen sich z. B. in größeren Industrieanlagen, in denen DetNet zur Kommunikation über mehrere lokal eingesetzte TSN-Domänen verwendet werden kann. Abbildung 2.21 zeigt, dass a) eine TSN-Domäne als Subnetz für ein DetNet-Netzwerk dienen kann oder b) Geräte aus zwei TSN-Domänen über einen Layer 2-Tunnel als Virtual Private Network (VPN) kommunizieren können. Damit ist 5G bereits fähig, DetNet-Dienste zu unterstützen, da die Integration in TSN bereits von 3GPP spezifiziert ist und das 5G-System somit ein TSN-Subnetz gemäß Option a) realisieren kann [5G22b].

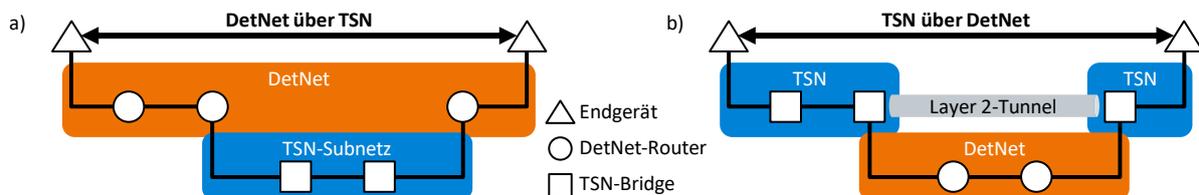


Abbildung 2.21: Integration von TSN in DetNet als a) TSN-Subnetz, b) Layer 2-Tunnel (angelehnt an [5G22b] und [Fa23])

Paketreplikation und -fragmentierung, die sogenannten Packet Replication, Elimination and Ordering Functions (PREOF), erfordern keine Timing-Informationen und können unabhängig von Layer 2 implementiert werden. Mittels SDN und NFV kann eine Unabhängigkeit von Layer 2 erreicht werden. Mit NFV können Ressourcenreservierungen basierend auf den Flow-Anforderungen dynamisch skaliert werden. Solche NFV-Mechanismen würden jedoch die Verwaltung von Hypervisor und Control Plane erfordern. NFV bietet auch eine Plattform für die zentrale Verwaltung der Control Plane über das SDN-Framework [Na19].

Der Hauptvorteil von DetNet liegt in der Erweiterung des Determinismus auf Layer 3 und höher. Obwohl die Latenz im Vergleich zu TSN höher ist, verspricht DetNet, die Anforderungen vieler industrieller Anwendungsfälle zu erfüllen und einen begrenzten Jitter bereitzustellen. Im Vergleich zu TSN zielt DetNet auf größere Netzwerke ab. DetNet definiert obere und untere Latenzgrenzen, während TSN nur eine obere Grenze definiert [YSH19]. Darüber hinaus ermöglicht DetNet die Echtzeitkommunikation zwischen Subnetzen, bietet eine einfache Netzwerkkonfiguration und eine Interoperabilität mit der bestehenden IP-basierten Netzwerkinfrastruktur [MS20]. DetNet-Netzwerke lassen sich einfacher skalieren, da die Rechenzeiten für die Ablaufplanung derselben Anzahl von Flows deutlich effizienter sind [He20]. Mit Mikrosegmentierung innerhalb von DetNet kann ein höheres Maß an IT-Sicherheit erreicht werden. Tabelle 2.9 gibt einen Überblick über die Technologien TSN, DetNet und 5G. Aufgrund der technologischen Ähnlichkeiten von 5G und DetNet ist die Integration von DetNet nicht nur für ein 5G-systemexternes Datennetz, sondern auch direkt innerhalb des 5G-Systems, einschließlich Fronthaul, Midhaul und Backhaul, sinnvoll.

Tabelle 2.9: Vergleich der Eigenschaften von TSN, DetNet und 5G (angelehnt an [Am22b])

	TSN	DetNet	5G
<b>Standardisierungsorganisation</b>	IEEE 802.1 TSN Task Group	IETF DetNet Working Group	3GPP
<b>Reifegrad</b>	Industrial Automation Profil im Entwurf	Funktionalitäten der Controller Plane teilweise noch im Entwurf	Industrierelevante Funktionalitäten noch nicht verfügbar
<b>OSI-Layer</b>	2	3	3/2
<b>Anwendungsbereich</b>	OT	IT/OT	IT/OT
<b>Anwendbarkeit in CPS</b>	nein	ja	ja
<b>Latenz</b>	nur obere Grenze vorgegeben, niedriger als DetNet	obere und untere Grenzen zur Jitter-Minimierung, höher als TSN	begrenzt in URLLC, hängt von der Ausbreitung des Funksignals ab
<b>Jitter</b>	fehlende minimale Latenz führt zu höherem Jitter	begrenzt, unabhängig von der Anzahl der Hops	begrenzt in URLLC, hängt von der Ausbreitung des Funksignals ab
<b>Skalierbarkeit: Restriktionen bei der Flow-Planung</b>	Bandbreite, Ende-zu-Ende-Latenz, Zykluskapazität; Slot-Alignment mit Nachbarn begrenzt Skalierbarkeit; NP-hard-Problem mit mehr Beschränkungen als DetNet	Bandbreite, Ende-zu-Ende-Latenz, Zykluskapazität; bessere Skalierbarkeit durch Flow-Aggregation, geringere Anzahl von Beschränkungen im Vergleich zu TSN	5QIs bieten Mechanismen zur QoS-Steuerung; ihre Interdependenz mit mMTC und Network Slicing ist zu untersuchen
<b>Data Plane</b>	Beschränkt auf Layer 2	Knoten können sich mit anderen Teilnetzen verbinden, darunter MPLS Traffic Engineering, TSN und optischen Transportnetzen; künftig können DetNet-Systeme mit mehreren Schichten aufgebaut werden	Unterstützung der PDU-Typen IP für Layer 3 und Ethernet für Layer 2; UPF in jedem Bereich implementierbar
<b>Inhärente Security</b>	nein	mehr Aufmerksamkeit, da eine höhere OSI-Layer zu höherer Wahrscheinlichkeit von Cyberangriffen führt	isolierte SNPN, aber offene Schnittstellen in ORAN riskant
<b>Netzwerksegmentierung</b>	VLANs	Mikrosegmentierung	Network Slicing

Das gemeinsame Routing- und Scheduling-Problem in großen deterministischen Netzwerken ist weiterhin Gegenstand der Forschung, darunter z. B. die Maximierung der Datenverkehrsakzeptanz für die Netzwerkplanung und die Online-Flow-Zulassung [Kr21]. Insbesondere stellt die TSN-domänenübergreifende Kommunikation eine Herausforderung dar. Die Forschung adressiert unter anderem eine deterministische Lösung für die Bildung und Planung von Queues, welche die Auswirkungen fehlerhafter Streams einschränkt [AI20], ein Modell zur Berechnung von Latenzen im Optimal- und Extremfall für die zeitkritische Kommunikation zwischen TSN-Subnetzen über DetNet [Wü22] sowie ein hierarchisches, SDN-basiertes Architekturkonzept und skalierbares Framework für die Control Plane zur Orchestrierung und Verwaltung eines TSN-Netzwerks mit multiplen Domänen, einschließlich relevanter Datenmodelle und Signalisierungsschemata für die Einrichtung von TSN-Streams [BAB23].

### 3 Stand der Forschung zur Integration von 5G in TSN

Dieses Kapitel analysiert den Stand der Forschung zur Integration von 5G in TSN. Dabei wird in Abschnitt 3.1 auf Basis der Erkenntnisse aus drei bereits veröffentlichten Literaturanalysen zunächst der Forschungsschwerpunkt eingegrenzt. In Abschnitt 3.2 folgt der Aspekt Netzwerkarchitektur, dann in Abschnitt 3.3 die Zeitsynchronisation und abschließend in Abschnitt 3.4 die Flow- und Ressourcenverwaltung, die auch den Fokus der vorliegenden Dissertation darstellt.

#### 3.1 Eingrenzung des Forschungsschwerpunkts

Zur Eingrenzung des Forschungsschwerpunkts dieser Dissertation werden drei bereits veröffentlichte Literaturanalysen herangezogen:

1. Nasrallah et al.: "Ultra-Low Latency (ULL) Networks. The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research" [Na19],
2. Satka et al.: "A comprehensive systematic review of integration of time sensitive networking and 5G communication" [Sa23a] sowie
3. Sasiain et al.: "Towards the Integration and Convergence Between 5G and TSN Technologies and Architectures for Industrial Communications: A Survey" [Sa24].

Nasrallah et al. [Na19] untersuchen Standards und Forschungsarbeiten zu TSN und DetNet, untergliedert in die Kategorien Flow-Konzept, -Synchronisation, -Verwaltung, -Steuerung und Flow-Integrität. Sie analysieren Netzwerkmechanismen für extrem niedrige Latenzen in 5G-Netzwerken mit Fokus auf die Aspekte Fronthaul, Backhaul und Netzwerkverwaltung. Dabei zeigen sie die Einschränkungen bestehender Standards und der Forschungsarbeiten auf, welche als Grundlage für künftige Verbesserungen dienen. Sie untersuchen Performance-Merkmale, Einschränkungen und Lücken bestehender Echtzeit-Mechanismen für TSN und DetNet aus der Perspektive der allgemeinen Kommunikationskette zwischen UE und 5G-Core. Die Konfiguration und Kooperation der verschiedenen Echtzeit-Mechanismen bewerten sie als entscheidend für die Bereitstellung effektiver Echtzeit-Dienste. Der geringe Reifegrad von DetNet bietet einen großen Spielraum für künftige Forschung zur Verbesserung der Architektur und von Protokollen. Bislang wurden die Aspekte Flow-Steuerung beim Scheduling und die Flow-Integrität durch Replikation untersucht. Zu den wichtigsten künftigen Forschungsaufgaben gehören die Verwaltung der Controller Plane, die Virtualisierung und die Interaktion mit externen Netzwerken. Insgesamt liegt der Fokus von Nasrallah et al. eher auf TSN fürs Fronthaul- und DetNet fürs Backhaul innerhalb eines 5G-Systems. Sie stellen die folgenden Hauptanforderungen an die TSN-Forschung:

- Konnektivität zwischen mehreren geschlossenen TSN-Architekturen bzw. -Domänen,
- Unterstützung von zeitkritischen und verzögerungstoleranten Anwendungen mit Scheduling-Möglichkeit auf Flow-Ebene,
- flexible und dynamische Prioritätszuweisungen zur Gewährleistung einer begrenzten Ende-zu-Ende-Latenz auch für Datenverkehr mit geringerer Priorität,
- optimierte Zeitsynchronisation durch einen effizienten Austausch von Timing-Informationen und ein präzises Uhren-Design,
- Einführung von SDN für die zentralisierte Verwaltung von TSN-Funktionen mit einer globalen Netzwerkperspektive sowie
- rechnergestützte effiziente Hardware- und Softwareentwürfe.

In der zweiten Literaturanalyse untersuchen Satka et al. [Sa23a] insgesamt 82 Forschungsarbeiten zur Integration von 5G in TSN. Sie stellen fest, dass sich 73 % der Arbeiten mit der Zeitsynchronisation befassen, wobei sich die Ansätze in ihren erreichten Genauigkeiten unterscheiden. Die meisten Arbeiten zielen auf eine Latenz-Optimierung ab, wohingegen effiziente Ressourcen- (61 %) und Flow-Verwaltungen (34 %) weniger beachtet werden. Bestehende Ansätze für die 5G-Integration in TSN im Hinblick auf ihre technischen Merkmale werden identifiziert und klassifiziert. Darunter fallen:

- Integrationsarchitekturen und deren Eigenschaften,
- Ansätze zur Zeitsynchronisation,
- Protokolle und Modelle für die Flow-Verwaltung sowie
- Aspekte der Ressourcenverwaltung wie Konfigurationsmodell und Scheduling.

Die Arbeiten werden nach ihren technischen Beiträgen analysiert. 74 % der Arbeiten folgen dem 3GPP Bridge-Modell gemäß Abbildung 2.15, begegnen jedoch Problemen bei der Zeitsynchronisation sowie bei der Ressourcen- und Flow-Verwaltung des in TSN integrierten 5G-Systems. Der am häufigsten verwendete Ansatz zur Zeitsynchronisation ist der in der 3GPP-Spezifikation vorgeschlagene Ansatz der Transparent Clock (vgl. Abschnitt 2.1.1). Darüber hinaus bieten 59 Arbeiten (72 %) ein Softwaredesign, während nur zwölf Arbeiten (15 %) ein Hardwaredesign für die Integration vorstellen. 29 Arbeiten verwenden simulierte und 19 Arbeiten reale Netzwerke für die Validierung ihrer Ansätze. Die Optimierung der Bandbreite bei der 5G-Integration in TSN ist das am meisten untersuchte Thema. In den meisten Fällen wird synthetischer statt realer Datenverkehr verwendet.

Zudem ermitteln Satka et al. Grenzen und Forschungslücken in Bezug auf den Stand der Forschung zur Integration von 5G in TSN, indem sie die Beziehung zwischen den verschiedenen Kategorien und der vorgeschlagenen Klassifikation analysieren. Demnach existieren bereits einige Methoden und Modelle, jedoch fehlt es an Prototypen und Werkzeugen zur Implementierung, was den Mangel an Evaluierungen und Erfahrungsberichten erklärt [Sa23a]. Abbildung 3.1 veranschaulicht dies.

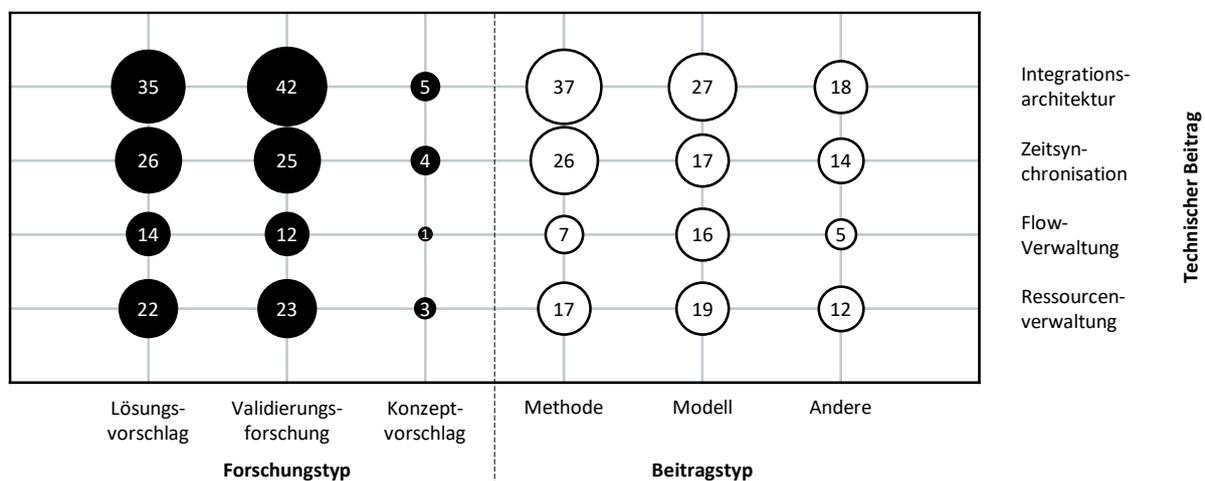


Abbildung 3.1: Literaturklassifizierung nach technischem Beitrag, Forschungs- und Beitragstyp (angelehnt an [Sa23a])

Schließlich untersuchen Sasiain et al. [Sa24] in der dritten Literaturanalyse die Technologi Landschaft, relevante Normen und Ergebnisse von Industrieinitiativen, die Architektur sowie Mechanismen zur Integration von 5G in TSN. Zudem präsentieren sie Vorschläge, welche die Integration und Interaktion der beiden Technologien ermöglicht, verbessert und/oder demonstriert. Sie klassifizieren die Themen in insgesamt acht Bereiche:

- hybride 5G-TSN-Architektur,
- hochpräzise TSN-Zeitsynchronisation über 5G,
- QoS-Konfiguration, einschließlich Scheduling und QoS-Mapping,
- TSN für 5G-Transportnetze (Fronthaul und Backhaul),
- beschleunigtes SDN für die Erweiterung von zeitkritischer Kommunikation,
- TSN-Integration in Virtualisierungs- und Orchestrierungsarchitekturen,
- Ende-zu-Ende-Lösungen zur Orchestrierung, einschließlich Network Slicing und autonomer Zero-Touch-Konfiguration, sowie
- Implementierungen, einschließlich Open Source-Software für die 5G-Integration in TSN.

Neben Aspekten in den genannten Bereichen identifizieren sie als künftige Forschungsrichtungen die Standardisierung und Adoption von URLLC-Fähigkeiten, die Exposition von 5G- und TSN-Fähigkeiten gegenüber industriellen Applikationen sowie Mobilität und Handover-Verwaltung für UEs in hybriden 5G-TSN-Netzwerken.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass alle drei Studien die Netzwerkarchitektur, die Zeitsynchronisation sowie die Flow- und Ressourcenverwaltung bzw. QoS als relevante und näher zu untersuchende Aspekte aufführen. QoS soll im Fokus dieser Dissertation stehen und deshalb intensiver sowie differenzierter betrachtet werden. Der Transport im Fronthaul und Backhaul soll lediglich am Rande betrachtet werden. SDN, Virtualisierung, Orchestrierung sowie rechnergestützte effiziente Hardware- und Softwareentwürfe sollen nicht explizit Gegenstand der Untersuchungen dieser Dissertation sein. Auch Handover werden nicht berücksichtigt. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht zu den thematischen Schwerpunkten relevanter verwandter Arbeiten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Tabelle 3.1: Übersicht zu thematischen Schwerpunkten in der Literatur

Abschnitt	Thema und Fokus	Relevante und in dieser Dissertation näher untersuchte Referenzen
3.1	<b>Literaturanalysen</b>	[Na19], [Sa23a], [Sa24]
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berichte aus Forschungsprojekten</li> <li>• White Paper</li> </ul>	[5G20b], [5G20c], [5G21g], [5G22c], [Fr21], [Gr22] [5G21f], [Ca20], [Ca22], [Fa19], [RCK20], [VD20b]
3.2	<b>Netzwerkarchitektur</b>	[5G21f], [Ca20], [Ca22], [Gu21], [Hu22], [Ka23], [KF20], [Ma19], [Pe22], [Sa22a], [Un18]
3.3	<b>Zeitsynchronisation</b>	[5G19c], [Ch21b], [Go20], [MTB24], [NWJ19], [Pa21], [SAJ21], [SMB19], [So21a], [SS21], [Wa24], [Xu21]
	• Schüngel et al.	[Sc20b], [Sc20a], [Sc21d], [Sc21c], [Sc21b]
	• Gundall et al.	[Gu20], [Gu21], [Gu22], [GHS23]
3.4	<b>QoS: Flow- &amp; Ressourcenverwaltung</b>	[BI19], [Di18], [Sc17]
	• Configured Grant (UL)	[La23b], [La23a], [Li23b], [Ya20a]
	• Semi-persistentes Scheduling (DL)	[Ab20], [Ca23a], [Wu23], [Zh22]
	• QoS-Mapping	[An22c], [Ca23a], [Ma21], [Yi21]
3.4.1	<b>Messungen in realen 5G-Netzwerken</b>	
	• nur 5G (IP-Pakete)	[Ca21], [CUR22], [GH23], [Ly21], [Ma22b], [Ma22c], [Ri21], [SMS23], [So22], [UCN22], [Xu20]
	• 5G und PROFINET	[Bh22], [Fi22]
	• 5G und TSN	[An22b], [An22a], [Ke22], [Ni22], [NPC22], [Sa23b], [Sh20b], [Sh20a], [Sh21]
3.4.2	<b>Analytische Berechnungen</b>	[La20], [Ma22e], [Ma22a], [Sa22c], [Sc19]
3.4.3	<b>Simulationen</b>	
	• OMNeT++	[Ba23], [De23], [Li23a], [Li23b], [Ma20a], [MP21], [RK22], [Sa22b], [Ta23]
	• andere Tools	[ADA21], [Ch22], [Ha23a], [Kr22], [Li20a], [Li21], [Wa23], [YY22], [Zh21], [Zh24]
	• Ginhör et al.	[Gi19], [Gi20], [Gi21b], [Gi21d], [Gi21a], [GW20]

Grundlagen zur 5G-Integration in TSN werden von Farkas et al. [Fa19], Rost et al. [RCK20] und der 5G-ACIA [5G21f] erläutert. Alle drei Quellen untersuchen Anwendungsfälle, Architekturen, Weiterleitungs- und Topologie-Informationen in der Control Plane, die Netzwerkverwaltung, Zeitsynchronisation sowie QoS in der User Plane. Keine der drei Quellen geht jedoch im Detail auf die Zuordnung der QoS-Parameter zwischen 5G und TSN ein.

Das EU-Forschungsprojekt *5G-SMART* liefert erste Ansätze zur 5G-Integration in TSN [5G20b], [5G20c], [5G21g], [5G22c], [Gr22]. Weitere relevante Forschungsprojekte sind *5G-Comet* [Fr21], bei dem über 5G und TSN zeitkritische Rechenprozesse zur Maschinensteuerung in eine Edge Cloud ausgelagert werden, sowie *TICCTEC*, in dessen Rahmen TSN-Translatoren für die Teleoperation in 5G-Campusnetzen entwickelt werden sollen. Als Grundlage dafür arbeiten Senk et al. [Se23] heraus, dass nur wenige Simulationen und kaum reale (Open Source-) Testumgebungen, z. B. *OpenAirInterface* oder *Open5GS* existieren. Ein URLLC-fähiger Prototyp von Ericsson stellt die einzige Hardware-Testumgebung dar, wohingegen ansonsten nur Software-Testumgebungen bekannt sind.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten arbeiten industrielle Gremien die Konzepte aus und bringen diese in die Standardisierung. In Bezug auf 5G sind national in Deutschland die VDMA-Arbeitsgruppe *Wireless Communications for Machines* (WCM) [VD20b] und international die 5G-ACIA, insbesondere mit ihrem White Paper [5G21f], zu nennen. Treiber für TSN sind das Projekt IEC/IEEE 60802 für das TSN Industrial Automation Profile [II24] und die *Avnu Alliance*, z. B. zu Wireless TSN sowohl über Mobilfunk als auch WLAN [Ca20], [Ca22]. Die Standardisierung von 5G für TSN erfolgt schließlich in 3GPP, z. B. in TS 23.501 [3G22b], wobei viele Aspekte weiterhin von der Implementierung abhängen und daher erforscht werden müssen.

### **Exkurs: Stand der Forschung zu TSN über WLAN**

Im Kontext von Wireless TSN werden neben Mobilfunk insbesondere WLAN [Mi19], aber auch andere drahtlose Technologien erforscht, wie z. B. Wireless HART, IO-Link sowie EchoRing [OBW20]. Diverse Arbeiten vergleichen Mobilfunk und WLAN im Hinblick auf die TSN-Integrationsfähigkeit. Beide Funktechnologien stehen vor Herausforderungen, insbesondere wegen der inhärent unzuverlässigen, variierenden Kapazität und Latenz der drahtlosen Kommunikation, was eine deterministische Übertragung über das drahtlose Medium erschwert [At22], [Ca19], [Za23]. Standard-Mechanismen von WLAN werden angepasst, um z. B. den Kanalzugriff für zeitkritischen Datenverkehr zu beschleunigen und somit Latenz sowie Jitter reduzieren [Ai20], [Co19b], [GD19], [Ha23b], [SIV22]. Folglich konnten bereits die Zeitsynchronisation [Va22] sowie das Scheduling über WLAN implementiert und für den industriellen Anwendungsfall mobiler Roboter validiert werden [Ca23b], [Ha21b], [Su21]. NFV und SDN spielen für eine modulare Architektur und dynamische Schedule-Konfiguration von TSN-fähigen WLAN-Netzwerken ebenfalls eine Rolle [Mi23b], [Mi23c]. Redundanz über FRER kann Ausfälle oder Verzögerungen aufgrund von Roaming und Interferenzen vermeiden [Su23].

## **3.2 Verwandte Arbeiten zur Netzwerkarchitektur**

Architekturkonzepte für die Integration von 5G in TSN existieren bereits, z. B. in [Ma19] und in den Publikationen über Wireless TSN der Avnu Alliance [Ca22], [Ca20]. Diese fokussieren sich auf das 5G Bridge-Modell, berücksichtigen jedoch nicht die Dimensionen großer industrieller Netzwerke. Zumindest die 5G-ACIA betrachtet OT- und IT-Domänen sowie das Rechenzentrum [5G21f].

Gundall et al. [Gu21] erarbeiten ein Architekturkonzept für Industrie 4.0 mit 5G und TSN. Ihre Architektur ist auf die heterogenen Anforderungen repräsentativer Industrie 4.0-Anwendungsfällen ausgerichtet und hält gleichzeitig bestehende Standards ein. Ihr Ansatz mit fünf Schichten ermöglicht

die Integration von 5G, TSN, SDN und Industrial Ethernet. Darüber hinaus schlagen sie ein Konzept für die Verwaltung von Funktechnologien, die Integration von 5G und TSN, eine zentrale QoS-Verwaltung für Ende-zu-Ende sowie eine innovative Sicherheitsstrategie vor.

Satka et al. [Sa22a] verwenden das Bridge-Modell in der vollständig zentralisierten TSN-Architektur und schlagen vor, dass anstatt der TSN AF direkt die CNC das QoS-Mapping übernimmt und somit den Schedule für alle TSN-Bridges und das 5G-System konfiguriert. Dafür soll das Protokoll NETCONF genutzt und ein YANG-Datenmodell definiert werden, womit schließlich ein ganzheitlicher Scheduling-Algorithmus für das hybride 5G-TSN-Netzwerk erreicht werden soll.

Für Underberg et al. [Un18] erfordert die Implementierung von industriellen CPS hybride kabelgebundene und drahtlose Netzwerke. Deren Zusammenwirken muss effizient sein, um anspruchsvolle industrielle Anforderungen zu erfüllen und die Performance des kabelgebundenen Netzwerks zu erhalten. Sie empfehlen ein Konzept für ein geeignetes hybrides Kommunikationsnetzwerk, einschließlich Mehrfachzugriff mit effizientem Koexistenz-Management. Weitere Verbesserungen sind möglich, wenn die Ressourcenzuweisung im drahtlosen Netzwerk unter Berücksichtigung seiner Eingliederung in der Topologie des Gesamtnetzwerks optimiert wird. Für die zyklische Kommunikation in der industriellen Automatisierung leiten sie vier obligatorische Eigenschaften eines geeigneten drahtlosen Netzwerks ab: (1) die zuverlässige Datenübertragung in jedem Zyklus, (2) eine präzise synchrone Verteilung des globalen Sampling-Punkts, (3) eine sichere Kommunikation und Authentifizierung sowie (4) die Koexistenz zwischen und innerhalb von Systemen. Hamann et al. [Ha20] verdeutlichen, dass beim Aufbau echtzeitfähiger verteilter CPS- und IoT-Systeme die Schwerpunkte auf den Mechanismen innerhalb der Knoten sowie auf den die sie verbindenden Kommunikationsprotokollen, wie TSN und 5G, liegen. Die erforderlichen Bausteine für einen Ende-zu-Ende Technologie-Stack sind bereits vorhanden, jedoch fehlt ihre Integration in ein ganzheitliches Framework.

Karaagac et al. [Ka23] entwickeln eine Lösung für die Verwaltung und Überwachung von 5G-Netzwerken nach funktionalen Anforderungen eines Prozesssteuerungssystems. Ihre prototypisch implementierten Expositionsfunktionen ermöglichen die Verwaltung eines 5G-Systems aus dem industriellen Automatisierungssystem, während die Komplexität der tieferen Ebenen verborgen bleibt. Das von King und Farrel [KF20] konzipierte Framework erweitert Elemente, Funktionen und Mechanismen der User Plane sowie Control Plane für 5G URLLC-Anforderungen. Path Computation Element ermöglicht URLLC- und IoT-Anwendungsfälle, z. B. durch die Integration in TSN oder DetNet. Huang et al. [Hu22] erarbeiten eine lokale Netzwerkarchitektur für 5G URLLC, TSN und Edge Computing. Diese berücksichtigt die Trennung von Control Plane und User Plane für eine effiziente Datenweiterleitung und optimiert die Integration von Netzwerkelementen, wie z. B. UPF, CU, DU und TSN-Translatoren.

Peng et al. [Pe22] entwickeln Kooperationsmechanismen für Layer 2, Layer 3 und 5G in einer deterministischen Netzwerkarchitektur für kritische Aufgaben zwischen Edge Cloud-Systemen, um deren Latenz zu minimieren. Ihr Ansatz für den TSN-Controller, den Edge-Orchestrator und andere Koordinatoren ermöglicht die Edge-Kollaboration und eine globale deterministische Weiterleitung. Die wichtigsten Funktionsmodule ihrer Architektur umfassen den heterogenen Edge-Zugriff, die 5G-Integration in TSN, die domänenübergreifende Zusammenarbeit auf mehreren Ebenen und die einheitliche Verwaltung des globalen SDN-Controllers.

Die analysierten Arbeiten berufen sich zwar meist auf das 3GPP Bridge-Modell, untersuchen aber nicht konkret hochskalierte industrielle Netzwerke mit mehreren TSN-Domänen, welche die Integration und Konfiguration des 5G-Systems als TSN-Bridge erschweren.

### 3.3 Verwandte Arbeiten zur Zeitsynchronisation

Die Zeitsynchronisation bildet die Grundlage für das Scheduling und berücksichtigt sowohl Kabelverzögerungen als auch sämtliche Weiterleitungszeiten aller Knoten bzw. Bridges [NWJ19]. Striffler et al. [SMB19] fassen 3GPP-Standardisierungsaktivitäten zur Integration von 5G in TSN für eine flexible Produktion zusammen und leiten daraus Forschungsfragen ab. Insbesondere erörtern sie die Zeitsynchronisation und schlagen Optimierungen für vertikale Anwendungen vor. Auch Godor et al. [Go20] erläutern Anforderungen der Fabrikautomatisierung an die TSN-Zeitsynchronisation über 5G. Die Referenzzeit wird von einer oder mehreren Grandmaster-Uhren bereitgestellt, die sich außerhalb des 5G-Systems befinden. Die Zeitverteilung basiert auf PTP, wobei Synchronisations-Nachrichten um die Aufenthaltszeit innerhalb des 5G-Systems korrigiert werden. Diese sogenannte *Residence Time* wird über Zeitstempel der PTP-Nachrichten am Eingangs- und Ausgangsport des 5G-Systems mithilfe der 5G Grandmaster-Uhr bestimmt. Während gNBs und UPFs in der Regel über das zugrunde liegende Netzwerk synchronisiert werden, erfolgt die Übertragung der Referenzzeit an die UEs über die Luftschnittstelle [5G19c].

Schüngel et al. untersuchen in diversen Arbeiten die Zeitsynchronisation in hybriden kabelgebundenen und drahtlosen Netzwerken über IEEE 802.1AS [Sc20b], [Sc20a], [Sc21c], [Sc21b], [Sc21d]. Sie entwickeln Mechanismen und ein Systemmodell für die Zeitsynchronisation nach IEEE 802.1AS über 5G. Außerdem untersuchen sie die Synchronisationsgenauigkeit für reine TSN- und hybride 5G-TSN-Netzwerke unter Berücksichtigung der Anforderungen von IEEE, 3GPP und IEC/IEEE. Neben dem Architekturkonzept für 5G und TSN liegt auch der Forschungsschwerpunkt von Gundall et al. in der Zeitsynchronisation nach IEEE 802.1AS über 5G [Gu20], [Gu21], [Gu22], [GHS23]. Sie entwickeln Konzepte und Mechanismen zur Optimierung der Zeitsynchronisation und validieren diese in einer industriellen Testumgebung und mittels Simulationen.

Shi et al. [SAJ21] untersuchen die Performance des in 3GPP Release 16 vorgeschlagenen Mechanismus für die Zeitsynchronisation über die Luftschnittstelle. Sie analysieren die Präzision der Zeitsynchronisation durch den Ansatz der Boundary Clock in Gegenwart von Taktdrift und verschiedenen Zeitfehlern der Luftschnittstelle in Bezug auf die Referenzzeit. Dabei erreichen sie Abweichungen von maximal 1  $\mu$ s. Außerdem untersuchen sie Frequenz- und Skalierbarkeitsaspekte der drahtlosen Zeitsynchronisation.

Auch Song et al. [So21a] bewerten die Synchronität des 3GPP-Mechanismus unter Berücksichtigung des Frequenzversatzes im 5G-System. Sie zeigen, dass der Frequenzversatz innerhalb des 5G-Systems zu Zeitfehlern von mehreren Mikrosekunden führt, wenn die Latenz mehr als 10 ms beträgt. Da industrielle Anwendungen, wie z. B. die Bewegungssteuerung, eine Synchronität von weniger als 1  $\mu$ s fordern, entwickeln und implementieren sie eine Methode zur Schätzung des Frequenzversatzes innerhalb des 5G-Systems, um dessen Auswirkungen abzuschwächen.

Chai et al. [Ch21b] entwickeln eine Methode zur domänenübergreifenden Zeitsynchronisation basierend auf der Weiterleitung von Datenpaketen unter Berücksichtigung des 5G-Systems als virtuelle TSN-Bridge, die ausschließlich Datenpakete mit Zeitstempel weiterleitet. Ihre Methode zur Clock-Domain-Kompensation schätzt die Residence Time im 5G-System.

Darüber hinaus wird die Optimierung der Zeitsynchronisation mit unterschiedlichen Ansätzen in diversen weiteren Arbeiten bereits eingehend untersucht, z. B. in [MTB24], [Pa21], [SS21], [Wa24] und [Xu21]. Deshalb scheint eine tiefgreifende Untersuchung der Zeitsynchronisation im Rahmen dieser Dissertation weniger sinnvoll im Vergleich zu den anderen Aspekten.

### 3.4 Verwandte Arbeiten zur Flow- und Ressourcenverwaltung

Dieser Abschnitt differenziert zwischen Messungen in realen 5G-Netzwerken, analytischen Berechnungen und Simulationen. Diese drei Ansätze werden später im Rahmen der Validierung des Datenverkehrskonzepts in Kapitel 8 verfolgt. Die Flow- und Ressourcenverwaltung ist im Folgenden gleichbedeutend mit Quality of Service.

Banovic-Curguz und Ilisevic [BI19] modellieren qualitativ den Zusammenhang von 5G QoS und Quality of Experience (QoE) bzw. den Einfluss von QoS- auf QoE-Metriken. QoE bezeichnet die subjektive Akzeptanz der vom Nutzer wahrgenommenen Qualität eines Kommunikationsdienstes, wohingegen QoS objektive und technische Metriken auf Netzwerk- und Anwendungsebene betrifft.

In Bezug auf die Flow- und Ressourcenverwaltung erläutern Schulz et al. [Sc17] Ansätze zur Erfüllung von URLLC-Anforderungen. Darunter fallen Aspekte wie Schemata zur Ressourcenzuweisung, ein schnelles Scheduling durch Configured Grant im UL und durch semi-persistentes Scheduling im DL, eine Verkürzung des Transmission Time Interval, das Wellenform-Design, eine Modellierung auf Flow-Ebene als Werkzeug zur Ableitung gerätezentrierter Performance-Kennzahlen sowie eine dienstzentrierte Analyse, Verwaltung und Orchestrierung.

Dietrich et al. [Di18] untersuchen verschiedene Schemata zur Ressourcenzuweisung. Mittels qualitativer Analyse liefern sie Methoden und einen Algorithmus für ein latenzoptimiertes Scheduling in hybriden Netzwerken. Sie fokussieren auf die Ressourcenzuweisung nach Zeit und Frequenz, gehen aber nicht auf konkrete QoS-Parameter ein.

Diverse Arbeiten fokussieren auf die Aspekte Configured Grant [La23a], [La23b], [Li23b], [Ya20a] sowie semi-persistentes Scheduling [Ab20], [Ca23a], [Wu23], [Zh22]. Hervorzuheben ist die Methodik von Cai et al. [Ca23a], die ein dynamisches lastflexibles QoS-Mapping mittels K-Means Clustering-Algorithmus und Flow-Aggregation nach der Rough Set Theory entwickeln. Gekoppelt mit einem adaptiven semi-persistenten Scheduling für eine faire Ressourcenverteilung mittels max-min Fair Share-Algorithmus weisen sie eine bessere Performance als bei einem rein dynamischen Scheduling nach.

Martenvormfelde et al. [Ma21] präsentieren einen ersten QoS-Mapping-Ansatz zwischen 5G und TSN, ohne jedoch zu einer konkreten Zuordnung von Parameterwerten zu gelangen.

Andrade Jardim et al. [An22c] halten ein Patent über das QoS-Mapping zwischen 5G und TSN. Dabei gehen sie auf die Verortung der Mapping-Tabelle innerhalb des 5G-Systems ein, beschränken sich jedoch auf eine dynamische Zuordnung und geben keine konkreten Vorschläge für Parameterwerte.

Yin et al. [Yi21] präsentieren ein QoS-Mapping zwischen 5G und IP-basierten Diensten für urbane Energiesysteme. Sie berücksichtigen deren QoS-Anforderungen und ordnen einen QFI sowie 5G Resource Type einem Differentiated Services Code Point (DSCP)-Wert eines IP-Pakets zu. Sie leiten ihren Ansatz jedoch nicht im Detail her und validieren ihn nicht.

#### 3.4.1 Messungen in realen 5G-Netzwerken

Xu et al. [Xu20] fokussieren sich bei ihren Messungen auf vier Hauptaspekte: (1) die Signalqualität auf OSI Layer 1, die Netzabdeckung und Handover-Performance, (2) Ende-zu-Ende-Durchsatz und -Latenz, (3) QoE von 5G-Videotelefonie sowie (4) den Energieverbrauch von Smartphones. Sie erreichen einen Durchsatz von annähernd 1 Gbit/s, stellen jedoch fest, dass Legacy-TCP lediglich zu einer Kapazitätsauslastung von < 32 % führt. Die Latenz ist zu hoch für taktile Anwendungen. Der Stromverbrauch steigt im Vergleich zu 4G um das Zwei- bis Dreifache.

Mallikarjun et al. [Ma22c] messen die Performance eines 5G-Campusnetzes mit einem Smartphone sowie einem Telit- und Quectel-Modem in Bezug auf UL- und DL-Durchsatz, Latenz und Jitter.

Abhängig vom Endgerät und von der Verortung des Servers (intern oder extern) erzielen sie sehr unterschiedliche Ergebnisse, die jedoch keine industriellen Anwendungsfälle abbilden.

Rischke et al. [Ri21] messen Verzögerungen im 5G-Core und Einweg-Paketverzögerungen zwischen einem 5G-UE und einem 5G Standalone-Core im UL und DL, wobei sie die Paketgröße (128-1.280 Byte) und die Paketrate (10-100.000 Pakete pro Sekunde) variieren. Sie beobachten ein asymmetrisches Verhalten zwischen UL und DL trotz gleichmäßig verteilter Zeitschlitze für UL und DL im TDD-Muster. Cainelli et al. bewerten in [Ca21] die 5G Performance-Parameter Reaktionszeit (engl. Response Time) und Aktualisierungszeit (engl. Update Time) bei unterschiedlichen Übertragungsintervallen (engl. Transfer Interval; 2, 10 und 100 ms) und Paketgrößen (20 und 2.000 Byte). Die Reaktionszeit beträgt bei 95 % der Übertragungen etwa 30 ms, was für Anwendungen mit einem Übertragungsintervall von mehr als 100 ms ausreichend ist. Darüber hinaus zeigen Cainelli et al. in [CUR22] eine signifikante Interdependenz des Timing-Verhaltens von UL- und DL-Datenverkehr, wenn beide auf demselben Gerät oder auf zwei separaten Geräten ausgeführt werden.

Underberg et al. [UCN22] bewerten die Performance eines 5G Standalone-Campusnetzes aus der Perspektive einer industriellen Automatisierungsanwendung. Laut ihren Ergebnissen ist ein tieferes gegenseitiges Verständnis der Spezifika industrieller Anwendungen und 5G-Komponenten erforderlich. Der Fokus sollte aus ihrer Sicht dabei nicht nur auf Performance-Parametern liegen, sondern auch auf Aspekten der Planung, des Engineerings, der Inbetriebnahme und des Betriebs.

Ginhör und Harutyunyan [GH23] bewerten die Performance einer C2C-Anwendung über das Protokoll Modbus/TCP (Transmission Control Protocol) in einem 5G Standalone-Netzwerk unter dem Einfluss von Querverkehr und Priorisierung. Ihre Ergebnisse zeigen, dass zusätzlicher Querverkehr die Latenz von UL-Datenverkehr erhöht, die Anwendung aber trotzdem über 5G funktioniert.

Lyczkowski et al. [Ly21] analysieren die Performance eines industriellen 5G-Campusnetzes im Hinblick auf die Zykluszeit und Zuverlässigkeit von Black Channel-Protokollen, welche hochkritischen Anwendungen zur Fehlererkennung in nicht-deterministischen Kommunikationssystemen dienen, z. B. PROFIsafe. Die gemessenen RTT zwischen 7 und 30 ms verdeutlichen, dass stabile Black Channels über 5G ohne Änderungen des Standards bei geringen Zykluszeiten möglich sind.

Sossalla et al. [So22] messen die Performance eines 5G Standalone-Netzwerks in einer Produktionsumgebung und vergleichen diese mit den von 3GPP spezifizierten Anforderungen in Bezug auf die Latenz und Zuverlässigkeit für den Anwendungsfall mobiler Roboter. Ihre Ergebnisse zeigen, dass ohne Querverkehr, d. h. ohne zusätzlichen Datenverkehr von anderen Anwendungen als Störfaktor, die geforderte Latenz von weniger als 10 ms für 99,9 % der Pakete für die Fernsteuerung und das Flotten-Management von mobilen Robotern erfüllt werden kann. Sobald jedoch Querverkehr eingespeist wird, insbesondere im UL, steigen die oberen Perzentile der Latenz deutlich an, so dass die geforderte Zuverlässigkeit nicht eingehalten werden kann.

Sonnberger et al. [SMS23] präsentieren experimentelle Ergebnisse eines nicht-öffentlichen 5G Standalone-Netzwerks. Sie konzentrieren sich auf die Kommunikation zwischen kollaborativen Robotern und zeigen die negativen Auswirkungen von zunehmendem Querverkehr im Netzwerk auf die erreichbare Latenz und somit auf die Kooperationsfähigkeit der Roboter. Darüber hinaus optimieren sie die Zuweisung von QoS-Profilen via 5QIs, die Paketgröße sowie das Übertragungsintervall, um den negativen Einfluss von Netzwerkstörungen auf die Roboterbewegungen zu minimieren. Ihre Resultate unterstreichen die Bedeutung einer strategischen Zuteilung der 5QIs an die Nutzer und einer sorgfältigen Anpassung der Verbindungsparameter, um die realisierbare kooperative Performance genau einschätzen zu können. Die 5QIs können sie nicht frei konfigurieren.

Marchenko et al. [Ma22b] entwickeln einen Ansatz zur QoS-Prognose in einem 5G-Campusnetz, um die Platzierung einer bildverarbeitungs-basierten Ortungsanwendung zu optimieren. Diese kann

entweder an Bord eines mobilen Roboters ausgeführt oder in eine Edge Cloud ausgelagert werden. Anhand von Messungen mit einem FTS in einem industriellen 5G-Campusnetz demonstrieren sie Algorithmen zur Prognose der verfügbaren UL-Datenrate und zur Fehlervorhersage. Zudem zeigen sie, wie Algorithmen auf eine Edge Cloud ausgelagert werden können und wie die QoS-Prognose des Netzwerks zur Optimierung der Platzierungsentscheidungen genutzt werden kann, z. B. als Frühwarnung zur Erhöhung der Offloading-Performance.

Auch Choi und Kim [CK23] untersuchen eine Vorhersage von 5G-Latenzen, um QoS-Anforderungen effektiver erfüllen zu können. Deshalb wenden sie verschiedene Machine Learning-Modelle auf die Messergebnisse von [Ri21] an, um die Präzision der Latenz-Vorhersagen zu evaluieren.

Für die QoS-Provisionierung von Ende zu Ende entwickeln Asad et al. [As20] einen hybriden Ansatz, an dem sowohl Clients als auch Controller beteiligt sind. Dieser sieht vor, dass jeder Client versucht, seine eigenen QoS-Anforderungen für den Access zu erfüllen, indem er optimale Access-Geräte auswählt und seine Entscheidungen auf Basis der lokal verfügbaren Informationen trifft. Die Controller sind dann für die Suche nach optimalen Pfaden im 5G-Core verantwortlich, um die QoS-Anforderungen der Clients im Core zu erfüllen. Ihre experimentellen Ergebnisse zeigen, dass ihr Ansatz bessere QoS-Garantien bietet als andere Verfahren zur Auswahl von Access-Geräten sowie Routing-Verfahren.

Für PROFINET über 5G können nur zwei verwandte Arbeiten identifiziert werden. Bhimavarapu et al. [Bh22] messen die Netzwerklatenz und -zuverlässigkeit für PROFINET RT über 5G Non-Standalone und Wi-Fi 6, berücksichtigen jedoch nicht die Ende-zu-Ende-Latenz aus Anwendungssicht. Ihr Messverfahren mit einer Einschaltverzögerung  $\leq 1 \mu\text{s}$  und einer Präzision von 40 ns in einem realen Aufbau für die Bewegungssteuerung zwischen SPS und Antrieb an. Ihre Ergebnisse beweisen die Umsetzbarkeit zeitkritischer IoT-Anwendungen über PROFINET und 5G.

Ficzere et al. [Fi22] führen Validierungsmessungen mit PROFINET- und PROFIsafe-Kommunikation über ein öffentliches 5G Non-Standalone-Netzwerk durch. Ihre Ergebnisse zeigen, dass ihre Implementierung die Anforderungen einer PROFINET-basierten Fernsteuerung, erfüllen kann. Ein Optimierungspotenzial liegt in der Konfiguration der Maximum Transmission Unit (MTU), da die PROFINET-Frames eine Länge zwischen 1.500 und 50.000 Byte aufweisen. Dagegen liegt die Frame-Länge für PROFIsafe lediglich bei 123 Byte, jeweils bei Aktualisierungszeiten von 1 ms und 20 ms.

Ansari et al. messen in [An22b] die Latenz und Zuverlässigkeit mit Paketen von 100 und 1.024 Byte im UL und DL in einem kommerziellen Release 15 und einem prototypischen URLLC-fähigen 5G-System. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass die 5G-Latenz maßgeblich von der Paketgröße, der Übertragungsrichtung (UL oder DL), der Netzwerkkonfiguration und des UE abhängt. Der Prototyp des URLLC-fähigen 5G-Systems erreicht unabhängig von der Paketgröße Latenzen von etwa 1 ms sowohl in UL- als auch in DL-Richtung. Darüber hinaus implementieren Ansari et al. in [An22a] die TSN-Mechanismen Zeitsynchronisation und Redundanz mittels FRER sowie einen *Hold and Forward Buffer* über 5G für den Anwendungsfall mobiler Roboter, gesteuert über eine Edge Cloud. Dadurch erhöhen sie die Zuverlässigkeit und reduzieren den Jitter, bei leicht erhöhter Latenz.

Kehl et al. [Ke22] implementieren ebenfalls die TSN-Zeitsynchronisation über 5G sowie das Scheduling an der TSN-Bridge hinter der 5G-Verbindung, um den durch das 5G-System verursachten Jitter zu reduzieren. Mit Nachrichten von 50 Byte bei einer Zykluszeit von 2 ms bilden sie den Datenverkehr zur Steuerung mobiler Roboter nach.

Nikhileswar et al. [NPC22] erörtern die Aspekte der Datenverkehrssteuerung des UE und schlagen einen neuen Anwendungsfall der eXpress Data Path-Programmierung über das 5G-Modem des UE vor, um den Datenverkehr in hybriden 5G-TSN-Netzwerken effizient zu steuern. Ihre experimentellen Ergebnisse in einer Testumgebung für TSN über 5G gemäß 3GPP Release 15 zeigen, dass die Latenz ihrer Lösung bei der Datenverkehrssteuerung nur 1 % im Vergleich zu einer konventionellen Ethernet-

bzw. TSN-Bridge beträgt. In [Ni22] erläutern sie die Messmethodik sowie Performance-Kennzahlen, welche zur Erfüllung der zeitkritischen Anforderungen für eine industrielle Steuerungsanwendung erforderlich sind. Zudem untersuchen sie die Konfiguration von hybriden 5G-TSN-Systemen und die erforderlichen Methoden zur Charakterisierung der QoE für industrielle Anwendungsfälle.

Satka et al. [Sa23b] vergleichen experimentell die Performance von TSN über 4G und Wi-Fi 5. Sie messen die Ende-zu-Ende-Latenz über drei PCs mit einer drahtlosen Verbindung und einer kabelgebundenen Verbindung über eine TSN-Bridge. Für Pakete mit einer Größe von 52 Byte und einer Periodizität von 1 s resultieren durchschnittliche Latenzwerte von 6,2 s über 4G und 645,4 ms über Wi-Fi 5. Die hohen Werte im Vergleich zu anderen Performance-Messungen werden durch das Windows-Betriebssystem verursacht, welches nicht echtzeitfähig ist.

Shibata et al. schlagen in [Sh20b] und aufbauend auf [Sh20a] eine Plattform mit autonomem TAS und adaptiver mobiler Fronthaul-Kompression vor und evaluieren diese in [Sh21] experimentell. Ihre Plattform kann gleichzeitig zwei 5G-Fronthauls in Echtzeit und Backhaul-Datenverkehr von 1.000 IoT-Geräten über eine Ethernet-Schnittstelle mit 10 Gbit/s bewältigen und dabei eine Fronthaul-Latenz für Ende-zu-Ende von  $< 100 \mu\text{s}$  einhalten.

Luque-Schempp et al. [Lu22], [Lu23] untersuchen die Herausforderung der sogenannten Zero Touch Configuration, d. h. eine möglichst aufwandsarme bis automatische und dynamische Konfiguration des 5G-Systems auf Basis der QoS-Anforderungen von deterministischem TSN-Datenverkehr. Mit dem Ansatz des Automatenlernens und aus den Live-Daten des hybriden 5G-TSN-Netzwerks entwickeln sie Algorithmen für einen intelligenten Controller, der dynamisch eine geeignete Konfiguration des 5G-Systems vorhersagen und anwenden kann, um die QoS-Anforderungen des TSN-Datenverkehrs zu erfüllen. Ihre experimentellen Validierungsergebnisse zeigen, dass ihr Ansatz eine Verbesserung von etwa 40 % im Vergleich zum normalen Betrieb des Netzwerks erzielt.

In der Literatur fehlt bisher die parallele Berücksichtigung von PROFINET und OPC UA über TSN und 5G. Mehrere Arbeiten untersuchen die genannten Standards einzeln oder paarweise. Keine dieser Arbeiten betrachtet jedoch alle vier Standards in Kombination, obwohl diese für CPS und Industrie 4.0 relevant sind.

### 3.4.2 Analytische Berechnungen

Larranaga et al. [La20] berechnen das 5G PDB für zwei exemplarische TSN-Streams in einem hybriden 5G-TSN-Netzwerk. Ihre Gleichungen enthalten idealerweise deterministische Komponenten und berücksichtigen lediglich eine native TSN-Bridge. Die berechneten PDBs betragen ca.  $700 \mu\text{s}$ .

Satka et al. [Sa22c] entwickeln und validieren einen QoS-Mapping-Algorithmus für TSN-Datenverkehr über 5G, beziehen sich dabei aber ausschließlich auf standardisierte 5QIs und interpretieren das 5G PDB als Ende-zu-Ende. Sie stützen sich nicht auf IEC/IEEE 60802 und ihr Fokus liegt auf der 5G PER. Mamane et al. [Ma22a] berechnen und simulieren eine Scheduling-Methode, die das PDB eines 5QI als Kriterium für die priorisierte Planung eines QoS-Flows berücksichtigt, jedoch nicht mit TSN kombiniert.

Schulz et al. [Sc19] untersuchen mathematische Modelle zur Optimierung der Netzwerk-Performance. Sie bewerten die Einführung von Warteschlangen-Modellen für allgemeine Systeme und Scheduling-Regeln für heterogenen Datenverkehr als einen wichtigen Schritt für die präzise Modellierung allgemeiner Systeme sowie für die Konfiguration und Optimierung von Network Slices.

Mai et al. [Ma22e] entwickeln ein Framework und einen verteilten Algorithmus für QoS zwischen Access- und Core-Netzwerken. Dadurch handeln diese ihre lokal und autonom verwalteten QoS-Budgets dynamisch aus und erreichen gemeinsam QoS-Ziele von Ende zu Ende, indem sie nur ihre

Schätzungen der globalen Constraint-Funktionen austauschen, ohne lokale Entscheidungsvariablen offenzulegen. Mittels numerischer Untersuchungen beweisen sie, dass ihr Algorithmus zu einer optimalen Lösung konvergiert.

Folglich fehlt in der Literatur bisher eine PDB-Berechnung unabhängig von den für standardisierte 5QIs hinterlegten Werten für TSN-Netzwerke mit mehreren nativen TSN-Bridges und auf Basis des IIC-Datenverkehrsmodells sowie IEC/IEEE 60802. Reine analytische Berechnungen sind in der Literatur selten und werden meist mittels Simulationen oder experimentell validiert. Deshalb sind Berechnungen und deren Ergebnisse zum Teil auch in anderen Abschnitten dieses Kapitels verortet.

### 3.4.3 Simulationen

Ginhör et al. legen in ihren Forschungsarbeiten den Fokus auf die Ressourcenoptimierung beim Scheduling [Gi19], [Gi20], [Gi21b], [Gi21d]. Beispielsweise stellen sie einen Simulator auf Systemebene vor, um die Auswirkungen zu untersuchen und Anforderungen an das Ende-zu-Ende-System abzuleiten, wenn zeitkritischer deterministischer Datenverkehr unterstützt wird. Auf Basis der Ergebnisse analysieren sie die Auswirkungen auf das Scheduling mehrerer Ende-zu-Ende-Streams mit Querverkehr über ein hybrides 5G-TSN-Netzwerk.

Martenvormfelde et al. [Ma20a] entwickeln ein Simulationsmodell für das Scheduling der 5G-Bridge in OMNeT++ und validieren es anhand des Anwendungsfalls geschlossener Regelkreis. Sie untersuchen nur eine TSN-Datenverkehrsklasse mit einer Periodizität von 1 ms und einer Frame-Länge von 256 Byte im DL bzw. 64 Byte im UL gemäß dem Datenverkehrsmodell der 5G-ACIA [5G19b], für das sie die Größe bzw. Dauer der Zeitschlitze für UL und DL variieren. Darüber hinaus identifizieren sie weitere Schritte zur Optimierung ihres Modells in Richtung einer 5G-Bridge, z. B. die Unterstützung von 5QIs und Priorisierung.

Bartolín-Arnau et al. [Ba23] untersuchen mithilfe von Simu5G in OMNeT++ die 5G-Latenz in Abhängigkeit der Anzahl von UEs (1-200), der Periodizität (0,5-10 ms) und der Paketgröße (5-7.000 Byte) für die Anwendungsfälle Bewegungssteuerung, Geschlossener Regelkreis und C2C mit Parameterwerten gemäß 3GPP TS 22.104 [3G21]. Sie betrachten jedoch nur einen Flow pro Anwendungsfall. Sie beurteilen das Transferintervall als den wichtigsten Parameter, da die Ende-zu-Ende-Latenz des Netzwerks am stärksten auf eine geringfügige Änderung des Transferintervalls reagiert. Sie liegt zwischen 4,2 und 9,5 ms und scheint sich auf RTT zu beziehen, da nicht zwischen UL und DL unterschieden wird.

Rost und Kolding [RK22] verwenden die kommerzielle Version OMNEST und ebenfalls das Datenverkehrsmodell der 5G-ACIA [5G19b], um die Ende-zu-Ende-Latenz zu evaluieren. Sie erreichen ein 5G Bridge Delay von 1 ms und weniger, indem sie das 5G-RAN durch zufällig ausgewählte SINR-Werte (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) nachbilden. Kabelgebundene TSN-Bridges verursachen eine Verzögerung von etwa 0,5  $\mu$ s. Sie untersuchen Transferintervalle von 1, 5, 10 und 20 ms sowie Frame-Längen von 64, 128 und 256 Byte. Die UL-Latenz liegt zwischen 0,5 und 2 ms. Die DL-Latenz und Zuverlässigkeit werden nicht erläutert.

Magnusson und Pantzar [MP21] sowie Satka et al. [Sa22b] entwickeln TSN-Translator für ihr 5G-Simulationsmodell in OMNeT++. Ihr Algorithmus und die daraus resultierende Tabelle für das QoS-Mapping basiert auf standardisierten 5QIs der Kategorie DC-GBR. Sie validieren ihr Modell in einem Anwendungsfall mit zwei exemplarischen TSN-Datenverkehrsklassen, d. h. mit zwei verschiedenen PCP-Werten, ohne jedoch alle QoS-Parameter der TSN-Datenverkehrsklassen zu berücksichtigen. Dabei fokussieren sie sich auf die PER.

Debnath et al. [De23] entwickeln einen QoS-Mapping-Algorithmus und validieren diesen in OMNeT++ für zwei 5G-TSN-Szenarien, mit und ohne DS-TT. Ihr Simulationsmodell berücksichtigt die isochrone Datenverkehrsklasse, Netzwerksteuerung, Video und Best Effort gemäß dem IIC-Datenverkehrsmodell

und ein prioritätsbasiertes Scheduling im 5G-System. Anhand einer detaillierten Performance-Analyse zeigen sie, dass die Performance des hybriden Netzwerks erheblich vom Scheduling im 5G-System beeinflusst wird, von dem ein wesentlicher Teil der Gesamtverzögerung ausgeht. Sie unterstreichen die Notwendigkeit eines gemeinsamen Scheduling-Mechanismus zur Erfüllung von URLLC-Anforderungen und erreichen maximale Ende-zu-Ende-Latenzen von unter 3 ms im DL. Sie implementieren eigenständig QoS in Simu5G und nutzen standardisierte 5QIs. Das PDB interpretieren sie als Ende-zu-Ende-Latenz des TSN-Streams im hybriden 5G-TSN-Netzwerk.

Für ein dynamisches QoS-Mapping in hybriden 5G-TSN-Netzwerken entwickeln Zhang et al. [Zh21] einen Algorithmus basierend auf NFV und Preemption. Ihre Simulationsergebnisse zeigen eine bessere Performance in Bezug auf die Akzeptanzquote, die durchschnittliche Latenz und die QoS-Garantie, beinhaltet aber nicht das Mapping zwischen TSN-Datenverkehrsklassen und 5QIs.

Auch Chen et al. [Ch22] entwickeln einen Algorithmus für ein dynamisches QoS-Mapping. Ihr Ansatz fokussiert auf SDN und Edge Computing. Um die Anforderung einer niedrigen Latenzzeit zu erfüllen, entwickeln sie einen zweistufigen Online-Algorithmus, um das gemeinsame Scheduling-Problem von 5G und TSN zu lösen und die verzögerungsfreie Übertragung von Diensten mit hoher Priorität zu realisieren. Aus ihren Simulationen in MATLAB resultiert, dass ihr Algorithmus eine höhere Ressourcennutzung und geringere Verzögerungen als andere Algorithmen liefert. Auch Liu et al. [Li21] zeigen mittels Simulation, dass SDN die Integration von 5G und TSN ermöglicht sowie die QoS verbessert.

Prioritätsmetriken berücksichtigt der Scheduling-Algorithmus von Yang und Yu [YY22], um die Ressourcenallokation im 5G-System zu optimieren. Dabei berücksichtigen sie die Koexistenz von URLLC- und eMBB-Datenverkehr. Ihre Simulationsergebnisse zeigen, dass ihr Ansatz die Ende-zu-Ende-Latenz zeitkritischer TSN-Streams minimieren und zugleich den Durchsatz maximieren kann.

Krummacker et al. [Kr22] zeigen, dass eine statische Priorisierung von logischen Kanälen für die Behandlung bzw. Weiterleitung von TSN-Streams entsprechend den Anforderungen der TSN-Control Plane über die 5G-Luftschnittstelle nicht geeignet ist. Sie implementieren und evaluieren mittels Simulation in der MATLAB 5G-Toolbox einen dynamischen Priorisierungsmechanismus für logische Datenkanäle, welcher eine TSN-konforme Konfiguration des Datenverkehrs über das 5G-RAN ermöglicht. Insgesamt verwenden sie vier Radio Bearers im DL, davon drei für TSN-Streams mit einer Periodizität von 10 ms und einen für Best Effort mit einer Periodizität von 1 ms. Die Paketgrößen betragen 700-900 Byte. Deterministische Ankunftszeiten der Pakete sind möglich, solange die Ressourcen des Funkkanals innerhalb eines Zeitschlitzes des TAS ausreichen, um den erforderlichen Datenverkehr vollständig zu übertragen. Anderenfalls können die TSN-Anforderungen nicht mehr erfüllt werden, was zu einem drastischen Anstieg des Jitters führt, da Pakete bis zum nächsten Zeitschlitz warten müssen. Das Verhalten ist von der Paketgröße abhängig.

Tang et al. [Ta23] analysieren die Performance verschiedener 5G Scheduling-Algorithmen in OMNeT++. Ihre Simulationsergebnisse zeigen, dass insbesondere der Proportional Fairness-Algorithmus für das Scheduling in hybriden 5G-TSN-Netzwerken gut geeignet ist, weil er die Anforderungen an Latenz, Jitter und Durchsatz auch bei mehreren zeitkritischen Diensten garantieren kann.

Li et al. [Li23b] entwickeln ein dezentralisiertes Scheduling auf Basis von Reinforcement Learning, wobei mehrere lokale Akteure die hierarchisch strukturierten Scheduling-Richtlinien für Flow-Hosts erlernen. Darüber hinaus schlagen sie einen asynchronen Zugriffsmechanismus vor, welcher den Jitter im 5G-System isoliert und einen Jitter von Null im TSN gewährleistet. Ihr Mechanismus dient zur Entwicklung eines asynchronen Scheduling-Modells für die koordinierte Zuweisung von Ressourcen für 5G und TSN, um Ende-zu-Ende-Latenzwerte für zeitkritische Streams zu garantieren. In [Li23a] bestätigen Li et al. mittels Simulationen in OMNeT++ die Performance-Verbesserung.

Auch Wang et al. [Wa23] nutzen Reinforcement Learning, um einen hierarchischen Partikelschwarm-Algorithmus zur Optimierung des Scheduling zu entwickeln. Ihre Simulationen ergeben, dass ihr Optimierungsalgorithmus die Erfolgsquote beim Scheduling von TSN-Streams und die Ressourcennutzung im Vergleich zu anderen Algorithmen erhöht.

Ebenfalls auf Basis von Deep Reinforcement Learning entwerfen Hao et al. [Ha23a] ein Scheduling-Framework für den DL, um Streams ohne vollständige Kanalinformationen selbstständig zu planen. Ihr rekurrenter Algorithmus zur proximalen Policy-Optimierung, nimmt den zugrunde liegenden Zustand wahr und beschleunigt das Lernen unter verschiedenen Zeitgranularitäten. Zudem schlagen sie einen Prädiktionsalgorithmus vor, welcher künftige Datenverkehrsinformationen einbezieht, um die Last auszugleichen und eine geringere Latenz in Echtzeit-Szenarien mit mehreren Zellen und Nutzern zu erreichen. Mittels Simulationen mit dem Vienna 5G Systemlevel-Simulator zeigen sie, dass ihr Framework bestehende Ansätze in Bezug auf die maximale und durchschnittliche Latenz um bis zu 48 % bzw. 41,7 % übertrifft.

Auch Zhou et al. [Zh24] nutzen die proximale Policy-Optimierung für ein vorhersagbares Scheduling von Funkressourcen, um die Übertragungsrate von zeitkritischen Diensten zu maximieren und gleichzeitig sowohl Latenz- als auch Jitter-Grenzwerte einzuhalten. Ihre Simulationsergebnisse belegen die Robustheit ihres Verfahrens im Vergleich zu alternativen Scheduling-Strategien. Es bietet eine prädiktive und überlegene Performance im Hinblick auf die Latenz von zeitkritischen Diensten, auf die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten und die Effizienz der Ressourcennutzung.

Zur Minimierung von Latenz und Jitter im 5G-Transportnetz entwickeln Bjørnstad et al. [Bj19] einen asynchronen Ansatz. Dabei verwenden sie einen Zeitfenster-Mechanismus in Kombination mit einer Zeitüberschreitung, um deterministisches Verhalten für aggregierten Datenverkehr zu erreichen. Mittels Simulation und praktischer Versuche zeigen sie, dass ihr Ansatz trotz einer Last von 85-90 % des aggregierten Datenverkehrs Latenz und Jitter auf unter 20  $\mu$ s begrenzen kann und somit für die zeitkritische Übertragung im 5G-Fronthaul geeignet ist.

Für das Scheduling im 5G-Fronthaul erarbeiten Liu et al. [Li20a] ein heuristisches Schema, bei dem ein höher priorisierter Flow niedriger eingestuft wird, da dessen Pakete einen größeren Lösungsraum für eine geringe Latenz beim Scheduling aufweisen. Aus ihren Simulationen resultiert, dass ihr Schema die Latenz um bis zu 92,6 % im Vergleich zu bestehenden Systemen reduziert, ohne dass Paketverluste auftreten.

Auch Akudo Nwogu et al. [ADA21] entwerfen eine Architektur sowie einen dynamischen latenz-optimierten Scheduling-Algorithmus für das 5G-Fronthaul, das auf dem Mechanismus des Burst-Limiting-Shaper basiert, um QoS-Garantien für unterschiedlichen Datenverkehr zu bieten. In ihren Simulationen mit ns-3 übertrifft ihr Schema den Scheduling-Algorithmus Weighted Round Robin in Bezug auf die durchschnittlichen Antwortzeiten für die beiden untersuchten Datenverkehrsklassen.

Für das 5G-Backhaul optimieren Prados-Garzon et al. die Flow-Allokation in [PT21] und [PTB21] auf Basis des asynchronen TSN-Traffic Shaper. Ihre Lösung zielt auf die Maximierung der Flow-Akzeptanzquote bei gleichzeitiger Garantie deterministischer QoS-Anforderungen für kritische Flows ab. Sie berechnen die Weiterleitungskapazität des asynchronen Traffic Shaper für 5G-Flows analytisch und bewerten diese mittels Simulationen. Für QoS-Flows vom Resource Type DC-GBR werden Frames dupliziert und über disjunkte Pfade übertragen, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Das Backhaul-PDB für jeden 5QI wird umgekehrt proportional zur Verbindungskapazität auf die Verbindungen des jeweiligen Pfads verteilt und auf 10 % des in den 3GPP-Standards definierten Ende-zu-Ende-PDB festgelegt. Die maximale Verzögerung variiert und hängt in erster Linie vom 5G Priority Level ab, welcher von ihrem Algorithmus zugewiesen wird. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Ablehnungsrate von Flows ca. 20 % bei geringer Last und 10 % bei hoher Last über der optimalen Rate für ein TSN-Backhaul

mit zehn Links und vier 5QIs vom Typ DC-GBR liegt. Dies unterstreicht die Relevanz der Datenanalyse für die Optimierung der Flow-Zuweisung.

Ohne direkten Bezug zu TSN entwickeln Ginhör et al. [Gi21a] ein dynamisches Modell zur Paketduplizierung für deterministische Steuerungsanwendungen mit bekannter Survival Time. Basierend auf dem Risiko, diese Survival Time zu überschreiten, steuert ihr Modell die Redundanz effizient nach Bedarf. Ihre Validierung mittels Simulation zeigt, dass ihr Modell Ausfälle in der Größenordnung von Standard-Paketduplizierung erreichen kann, während im Vergleich dazu nur etwa 50 % der Funkressourcen genutzt werden, was die Effektivität von Multi-Konnektivität unterstreicht. Auch der Ansatz von Gebert und Wich [GW20] nutzt die 5G Survival Time und die duale Konnektivität aus, um durch die alternierende Übertragung von Datenpaketen die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zu steigern. Die Validierung ihres Ansatzes mit dem Nokia-proprietären Systemlevel-Simulator FREAC zeigt, dass dieser Modus effizient ist und mit mindestens 99,2 % eine höhere Verfügbarkeit aufweist als eine einfache Konnektivität oder eine Paketduplizierung bei dualer Konnektivität für periodischen Datenverkehr einer Paketgröße von 40 Byte mit jeweils 1 ms Transferintervall und Ende-zu-Ende-Latenz bzw. Survival Time.

OMNeT++ wird in der Literatur am häufigsten verwendet. Dabei steht zumeist das Scheduling im Fokus, während die Priorisierung lediglich rudimentär und nicht unbedingt bezogen auf konkrete Flows betrachtet wird. Kaum eine der verwandten Arbeiten verwendet ein vollumfängliches TSN-Datenverkehrsmodell oder das 3GPP QoS-Framework. Folglich fehlt in der Literatur bisher eine intensivere Untersuchung der Priorisierung. Dabei sollten parallel Flows aller TSN-Datenverkehrsklassen berücksichtigt und der Effekt der Priorisierung auf deren Latenz bewertet werden.

## 4 Forschungsmethodik

In diesem Kapitel werden die im Stand der Forschung identifizierten Lücken zusammengefasst, die daraus abgeleiteten Forschungsfragen formuliert, der Forschungsansatz und die methodische Vorgehensweise erläutert sowie die Struktur zur Beantwortung der Forschungsfragen in den nachfolgenden Kapiteln aufgezeigt.

Die Literaturanalyse im vorangegangenen Kapitel offenbart die folgenden Forschungslücken:

- L 1:** Zur Evaluierung der Integrationsfähigkeit mangelt es an realen Implementierungen von hybriden 5G-TSN-Netzwerken und entsprechenden Anwendungen. Obwohl sich die in der Literatur beispielhaft untersuchten Anwendungsfälle ähneln, sind die Anforderungen an den Datenverkehr und dessen QoS-Parameterwerte nicht einheitlich.
- L 2:** Architekturkonzepte für hybride 5G-TSN-Netzwerke berücksichtigen keine hochskalierten industriellen Netzwerke mit mehreren TSN-Domänen, die das 5G-System im Bridge-Modell unterstützen können muss.
- L 3:** Im Rahmen der Flow- und Ressourcenverwaltung erfolgt keine detaillierte Untersuchung der QoS-Parameter bei heterogenem Datenverkehr. In verwandten Arbeiten wird meist die Performance eines zeitkritischen Streams bzw. Flows bei Querverkehr optimiert, ohne ein ganzheitliches QoS-Mapping für sämtliche Datenverkehrstypen und deren Anforderungen zu berücksichtigen.

Aus diesen Forschungslücken resultiert als übergeordnete Fragestellung, wie sich TSN als kabelgebundene und 5G-Mobilfunk als drahtlose Kommunikationsstandards so kombinieren lassen, dass ein für Industrie 4.0 geeignetes Datenverkehrskonzept entsteht. Weiterhin lassen sich daraus die folgenden drei konkretisierenden Forschungsfragen ableiten:

- F 1:** Nach welchen Anforderungen lassen sich Anwendungsfälle für die Integration von 5G in TSN im Kontext von Industrie 4.0 charakterisieren?
- F 2:** Welche Faktoren spielen für eine einsatzfähige Lösung einer hybriden Netzwerkarchitektur mit 5G und TSN im Kontext von Industrie 4.0 eine Rolle?
- F 3:** Wie kann ein ganzheitliches Datenverkehrskonzept basierend auf den Kommunikationsanforderungen der Anwendungsfälle kombiniert mit der Netzwerkarchitektur aussehen?
- F 4:** Inwiefern ist das entwickelte Datenverkehrskonzept anwendbar?

Im Zuge der dritten Forschungsfrage ist insbesondere zu klären, wie die einzelnen QoS-Parameter zwischen 5G und TSN konkret übersetzt werden, wie QoS sowohl 5G- und TSN-systemintern als auch Ende-zu-Ende berücksichtigt werden kann und wie QoS durch die Anbindung der Kommunikationspartner beeinflusst wird.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen kann nur ein ganzheitlicher Ansatz zielführend sein. Dies bedeutet einerseits eine ausgewogene Betrachtung sowohl ausgehend von der TSN- als auch der 5G-Perspektive. Andererseits ist eine Untersuchung sowohl von der Applikationsseite als auch von der Infrastrukturseite erforderlich. Abbildung 4.1 zeigt den Forschungsansatz dieser Dissertation. Um Datenverkehrskonzepte abzuleiten, ist eine vierdimensionale Betrachtungsweise notwendig, welche sowohl die IT- und OT-Ebene als auch die Applikations- und Infrastrukturseite berücksichtigt. Im Zuge

von Industrie 4.0 kommt es zu einer Konvergenz von IT und OT, welche 5G und TSN fördern. 5G und TSN sind zwar Kommunikationsstandards; für die Datenverkehrskonzepte werden jedoch die Applikationsdaten benötigt.

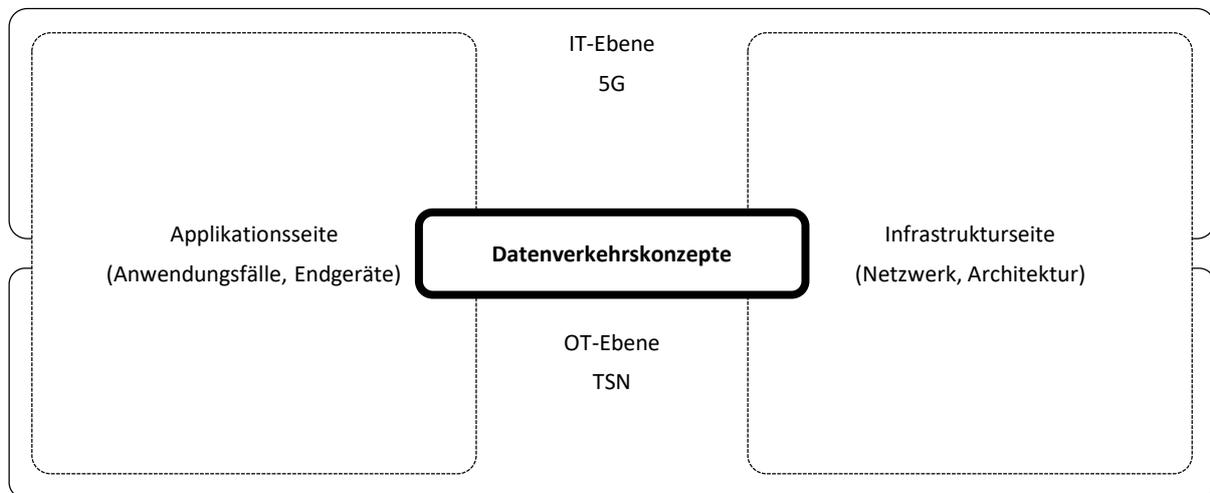


Abbildung 4.1: Forschungsansatz zur Ableitung von Datenverkehrskonzepten für 5G und TSN

Gemäß der Literaturanalyse und Forschungslücke L 1 fehlen reale 5G-TSN-Implementierungen. Folglich ist zu erwarten, dass das im Rahmen dieser Dissertation zu entwickelnde Datenverkehrskonzept mittels alternativer Ansätze validiert werden muss. Daraus folgt die in Abbildung 4.2 dargestellte Forschungsmethodik in drei Schritten: Im ersten Schritt werden anhand von Performance-Messungen an einem realen Versuchsaufbau der Stand der Technik oder Ist-Zustand untersucht, mögliche Einschränkungen bzw. Lücken bei der Implementierung identifiziert und daraus resultierende Anforderungen abgeleitet. Im zweiten Schritt wird mittels der Methode der symbolischen Regression und auf Grundlage der vorherigen Messungen ein Berechnungsmodell für das 5G PDB entwickelt. Im dritten und letzten Schritt dienen Simulationen in OMNeT++ zur Beurteilung des Einflusses von Priorisierung auf die Latenz von TSN-Datenverkehr über 5G.

<b>Anwendungsfälle</b> Kapitel 5	5.3 <b>Automobilproduktionsspezifische Anwendungsfälle</b> "Self-Navigating Automotive Production: Using 5G for automated driving in car assembly" [Am22a]
<b>Netzwerkarchitektur</b> Kapitel 6	6.3 <b>Architekturkonzept für 5G und DetNet</b> "5G and DetNet: Towards holistic determinism in industrial networks" [Am22b]
<b>Datenverkehrskonzept</b> Kapitel 7	"Traffic priority mapping for a joint 5G-TSN QoS model" [AU22] "5G QoS model for Time-Sensitive Networking" [Am24]
<b>Validierung</b> Kapitel 8	8.1 <b>Messungen in Laborversuchen</b>
	8.2 <b>Analytische Berechnungen</b> "5G packet delay considerations for different 5G-TSN communication scenarios" [AU23]
	8.3 <b>Simulationen</b> "Simulations of the 5G-TSN bridge delay: towards a joint QoS model" [AAU23]

← verwendet

Abbildung 4.2: Forschungsmethodik und Einbettung eigener Veröffentlichungen

## 5 Analyse relevanter Anwendungsfälle für 5G und TSN

In diesem Kapitel werden relevante Anwendungsfälle für den kombinierten Einsatz von 5G und TSN sowie deren Anforderungen analysiert. Dazu wird in Abschnitt 5.1 zunächst von der 5G-Perspektive ausgegangen. Daraufhin erfolgt in Abschnitt 5.2 die Analyse ausgehend von der TSN-Perspektive. Darüber hinaus werden in Abschnitt 5.3 automobilspezifische Anwendungen motiviert. Abschnitt 5.4 liefert schließlich ein Fazit einschließlich abstrahierter Anwendungsfälle.

### 5.1 5G-spezifische Anwendungsfälle

Underberg und Willmann [UW20] konsolidieren die Quellen der 5G-Anwendungsfälle. Aus ihrer Analyse resultiert, dass die Anwendungsfälle letztendlich durch die Organisationen 5G-ACIA und 3GPP aufgegriffen werden, weshalb deren Sammlung an Anwendungsfällen als Grundlage für die Analyse in diesem Abschnitt verwendet wird. Quellen für 5G-Anwendungsfälle sind 3GPP als Mobilfunk-Standardisierungsgremium, 5G-ACIA als internationale sowie die VDMA-Arbeitsgruppe WCM als nationale Interessensvertretungen für 5G in der Industrie.

Die 5G-ACIA sammelt relevante industrielle 5G-Anwendungsfälle und deren Anforderungen [5G19d], [5G19f], [5G20a] und kommuniziert diese an 3GPP [3G20], [3G21], weshalb sich die Anwendungsfälle größtenteils decken. 3GPP TS 22.104 [3G21] enthält umfangreiche Tabellen mit den Parametern aller Anwendungsfälle. Eine Zusammenfassung ist im Anhang zu finden. Die Kombination von 5G und TSN scheint insbesondere für die folgenden Anwendungsfälle sinnvoll:

- Bewegungssteuerung, darunter auch mobile Roboter, inkl. Integration in Industrial Ethernet,
- C2C-Kommunikation für Subsysteme mit Bewegung und
- mobile Bedien-Panels mit Safety-Funktionen.

Grundsätzlich kommen also primär URLLC-Anwendungsfälle im IoT infrage, z. B. Druck- oder Verpackungsmaschinen [Sc17]. Auf dem Weg zur Smart Manufacturing und dem Industrial Internet of Things (IIoT) spielen aber auch folgende Anwendungsfälle eine Rolle [Ch18]:

- Virtualisierung von Steuerungsfunktionen,
- Digitaler Zwilling und
- Fernwartung.

Gundall et al. [Gu18] identifizieren kooperativen Gütertransport sowie die Bewegungsregelung als repräsentative Anwendungsfälle und analysieren diese im Hinblick auf die wichtigsten Heraus- und Anforderungen (z. B. QoS und TSN) an Kommunikationsnetzwerke inkl. 5G-System für Industrie 4.0. Die Bewegungssteuerung (mobiler) Roboter wird auch von Brown [Br] als exemplarischer 5G-Anwendungsfall für URLLC und die Integration in Industrial Ethernet bzw. TSN herangezogen.

Bislang befindet sich der Großteil der Rechenleistung im FTS selbst, auch um die persönliche Sicherheit zu gewährleisten. Mit einer zuverlässigen Funkverbindung wird eine Auslagerung von Steuerungsintelligenz in eine Edge Cloud oder ein zentrales Rechenzentrum möglich. Dies reduziert die Hardwarekomponenten jedes einzelnen FTS und damit seine Kosten. Abbildung 5.1 zeigt verschiedene Auslagerungsstufen. Je nach Integrationstiefe und Standort des zentralen Servers, z. B. außerhalb der Fabrik in einem Cloud-Rechenzentrum oder als Edge Cloud entweder im Produktions- oder Anlagennetzwerk, reicht die Kommunikation innerhalb des Anlagennetzwerks nicht aus und muss auf das Produktionsnetzwerk ausgeweitet werden.

Für FTS und Industrieroboter in Fertigungsanlagen gelten sicherheitstechnische Anforderungen. Als übergreifende Norm gilt die Maschinenrichtlinie EN ISO 13849-1 Sicherheit von Maschinen. Dabei sind FTS und Anlage als Gruppe oder Gesamtheit von Maschinen zu verstehen. Ein Not-Halt der Anlage muss deshalb auch das FTS stoppen, jedoch gilt dies umgekehrt nicht. Folglich muss sich das über 5G im übergreifenden Hallennetz angebundene FTS beim Einfahren in die Produktionsanlage durch ein Rolltor Teil des Anlagen-Subnetz werden.

Die Weiterleitung von Echtzeit-Alarmmeldungen an mobile Clients eines Industrienetzwerks sehen Sauer et al. [Sa21] als einen komplexen Anwendungsfall. Die häufig geforderte Echtzeitgarantie für die Zustellung von Nachrichten ist in einer dynamischen und unvorhersehbaren Umgebung nicht gegeben. Real-Time Alarm Dissemination Systeme bieten einen Kompromiss: Entweder kann die Nachricht innerhalb eines garantierten Zeitfensters übertragen oder der Empfänger darüber informiert werden, dass die Echtzeitverbindung innerhalb desselben Zeitfensters unterbrochen wurde.

	Kommerzielles FTS	Moderate Auslagerung	Hohe Auslagerung
Flottensteuerung	Edge Cloud	Edge Cloud	Edge Cloud
Trajektorien-Planung			
Karte			
Navigation			
Positionsbestimmung und Kartierung			
Servo-Steuerung			
Sensorsteuerung			beides
Safety			
Antrieb	FTS	FTS	FTS

Abbildung 5.1: Szenarien zur Auslagerung von FTS-Steuerfunktionen (angelehnt an [Am22b])

Ein digitaler Zwilling ist ein Modell bzw. virtuelles Abbild der Realität. Es wird verwendet, um die Auswirkungen von Änderungen der Modellparameter auf das reale System zu simulieren und vorherzusagen. Dies ermöglicht Condition Monitoring und Predictive Maintenance. Im Idealfall existieren digitale Zwillinge für das Produkt, alle Maschinen und Anlagen sowie für den gesamten Produktionsprozess. Um dies zu erreichen, müssen alle Komponenten vernetzt und synchronisiert werden, was wiederum Rechenleistung für Big Data Analytics in Echtzeit erfordert [5G21e].

Für die Fernwartung dienen z. B. VR oder AR. Ein Instruktor befindet sich an einem anderen Ort als der ausführende Wartungstechniker. Aus Gründen des menschlichen Wohlbefindens und der Sicherheit ist eine Kommunikation mit extrem geringer Latenz notwendig. Obwohl dieser Anwendungsfall keine kritische Maschinen-Kommunikation betrifft, ist dennoch Determinismus über eine große räumliche Distanz erforderlich, z. B. zwischen dem Ausbilder im Büro und dem Techniker an der zu wartenden Maschine.

Die VDMA-Arbeitsgruppe WCM unterscheidet insgesamt 35 Anwendungsfälle und kategorisiert diese in neun Familien von Anwendungsfällen [VD20a]. Der kombinierte Einsatz von 5G und TSN wird lediglich für die folgenden drei Anwendungsfälle explizit genannt:

- Mobile Bedien-Panels mit bidirektionaler, zyklischer Datenkommunikation und Nothalt für Montageroboter,
- Industrial Ethernet-Protokolle, z. B. PROFINET, über TSN und
- Zeitsynchronisation zwischen optischen Sensorsystemen und Antriebseinheiten sowie drahtlose Übertragung großer Datenmengen zu einer externen Auswerteeinheit im Einsatzfeld mobiler Messsysteme in Produktionsumgebungen.

Für jeden Anwendungsfall werden nur die Maximalanforderungen beschrieben, z. B. ein Transferintervall von 0,5 ms für die Bewegungssteuerung, obwohl jeder Anwendungsfall wiederum verschiedene Datenverkehrstypen mit unterschiedlichen Anforderungen und Parametern umfasst.

### 5.2 TSN-spezifische Anwendungsfälle

Die Arbeitsgruppe zur Erstellung des TSN-Profiles für die industrielle Automatisierung IEEE/IEC 60802 [I124] liefert auch ein Dokument über Anwendungsfälle. Im Folgenden sind die darin enthaltenen TSN-Anwendungsfälle mit Bezug auf eine drahtlose Verwendung, also z. B. via 5G, aufgelistet [Be18]:

- Drahtlose Bedien-Panels, Remote-IOs, drahtlose Sensoren und Bridges sowie drahtlos angebundene Ringsegmente für Medienredundanz.
- Gemischte Link-Geschwindigkeiten zwischen 10 Mbit/s und 10 GBit/s erschweren den Mischbetrieb von Geräten in TSN-Domänen. Auf einem Kommunikationspfad bestimmt das Pfadsegment mit der minimalen Link-Geschwindigkeit die nutzbare Bandbreite.
- Funktionale Sicherheit (Safety) erfordert ein zusätzliches Sicherheitsübertragungsprotokoll auf einem Standardübertragungssystem (Black Channel), wobei Safety- und Standard-Anwendungen zeitgleich dasselbe Standardkommunikationssystem nutzen.
- Sensoren werden direkt über 10 Mbit/s an das maschineninterne Ethernet angeschlossen und realisieren eine zyklische Echtzeitkommunikation mit der SPS. Dieser TSN-Anwendungsfall deckt sich mit 5G Sensor-Netzwerken aus 3GPP [3G21].
- Dynamisches An- und Abdocken von Maschinen oder Subnetzen: Mehrere FTS fahren verschiedene Andockstationen an, um Zugriff auf die übergeordnete SPS zu erhalten. Der TSN-Datenverkehr zwischen der übergeordneten SPS und dem FTS wird automatisch nach dem An- bzw. Abdocken eingerichtet bzw. entfernt. Verschiedene FTS können unterschiedliche Schedules erfordern. Viele FTS können gleichzeitig eingesetzt werden, aber nur eine begrenzte Anzahl ist zu einem bestimmten Zeitpunkt angeschlossen.
- Dynamisches Hinzufügen und Entfernen einer Maschine, Produktionszelle oder -linie: Um flexibel auf Kapazitätsschwankungen reagieren zu können, müssen zusätzliche Maschinen möglichst ohne Störung des laufenden Produktionsprozesses in die bestehende Kommunikation integrierbar oder daraus entkoppelbar sein.

### 5.3 Automobilproduktionsspezifische Anwendungsfälle

In der Automobilproduktion sind außerdem die beiden 5G-Anwendungsfälle Fahrzeugbedatung und Automatisiertes Fahren in der Fabrik (AFIF) denkbar. Für die Fahrzeugbedatung über 5G wird das Fahrzeug mit einem 5G-fähigen Konnektivitätsmodul ausgestattet, um Software für seine Steuergeräte herunterzuladen. Bei AFIF kann das Fahrzeug ab einem ausreichenden Bauzustand selbstständig durch die Fabrik fahren. In diesem Abschnitt wird der neue Anwendungsfall Self-

Navigating Automotive Production (SNAP) vorgestellt und ein Umsetzungskonzept entwickelt. Die Inhalte dieses Abschnitts basieren auf der vorab publizierten Arbeit [Am22a].

Bisher wurden die Anwendungsbereiche industrielle Automatisierung und automatisiertes Fahren separat betrachtet. Beide Bereiche entwickeln sich in getrennten Ökosystemen. Während die 5G-ACIA industrielle Automatisierungsthemen in Richtung Standardisierung vorantreibt, ist die 5G Automotive Association (5GAA) das Pendant für die Fahrzeugkommunikation. Die jeweiligen Anforderungen werden schließlich häufig in 3GPP-Standards berücksichtigt, jedoch mangelt es an gegenseitiger Berücksichtigung von gemeinsam umsetzbaren Anwendungen, obwohl dies in der Automobilindustrie sehr sinnvoll scheint.

Bei der Fahrzeug- oder V2X-Kommunikation kommunizieren Autos untereinander sowie mit der Infrastruktur und Geräten in der Umgebung. Künftig wird V2X für automatisierte Fahrfunktionen eine noch größere Rolle spielen. V2X-Funktionen werden in [Ko20] und V2X-Kommunikationstechnologien in [MH19] erläutert. 5G und TSN ermöglichen die deterministische Übertragung von V2X-Fahrzeugsteuersignalen und damit Cloud-gesteuerte Fahrzeuge [WS20]. Dies wird im Kontext des autonomen Fahrens diskutiert, kann jedoch genauso für die zentrale Steuerungsinstanz beim Fahrzeughersteller in der Fertigung gelten. Ding et al. [Di22] untersuchen eine intelligente Edge-zu-Cloud Fahrzeug-Infrastruktur basierend auf der Integration von 5G in TSN. Samii und Zinner [SZ18] diskutieren TSN-Standards vor dem Hintergrund möglicher künftiger Anwendungsfälle in Ethernet-basierten Fahrzeug-Bordnetzen für das autonome Fahren, wo dieselben Mechanismen wie in der industriellen Automatisierung relevant sind. Das Projekt IEEE 802.1DG [IE24a] standardisiert ein TSN-Profil für die fahrzeuginterne Ethernet-Kommunikation.

Wenn sich Automotive Ethernet bzw. TSN in Fahrzeug-Bordnetzen langfristig durchsetzt, kann das 5G Bridge-Modell in diesem Szenario angewendet werden. Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, verbindet die 5G-Bridge die beiden TSN-Domänen und -Netzwerke der Produktionsanlage und des Fahrzeugs. Das Auto fungiert in diesem Fall als ein FTS, für das dieselben Anforderungen im Hinblick auf die Personensicherheit gelten, d. h. eine Safety-Kopplung mit der Anlage, wodurch ein Nothalt der Anlage auch das darin befindliche Auto bzw. FTS stoppt.

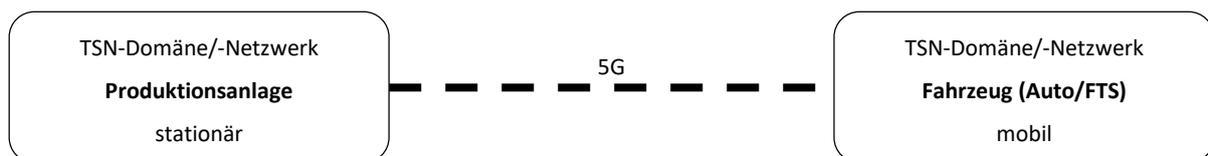


Abbildung 5.2: Kopplung der TSN-Netzwerke von Produktionsanlage und Fahrzeug über 5G

Ein beispielhafter V2X-Anwendungsfall ist das Automated Valet Parking (AVP). AVP soll als Komfortfunktion dienen, die es dem Fahrer ermöglicht, sein Fahrzeug an der Einfahrt eines Parkhauses abzugeben, wo das Fahrzeug dann automatisch und sicher an einem freien Parkplatz parkt. Das Backend-System des Parkhauses übernimmt die Steuerung und führt das Fahrzeug durch seine Bereiche. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die drei AVP-Typen, die sich nach der Aufgabenverteilung zwischen Fahrzeug und Backend unterscheiden [Sc21a], analog zur Auslagerung von FTS-Steuerungsfunktionen (vgl. Abbildung 5.1).

Tabelle 5.1: AVP-Typen und Aufgabenzuweisung (angelehnt an [Am22b])

Aufgabe	AVP-Typ		
	1	2	3
Parkplatz-Zuweisung	Backend	Backend	Backend
Routenplanung	Fahrzeug	Backend	Backend/Fahrzeug
Objekterkennung	Fahrzeug	Backend	Backend/Fahrzeug
Fahrzeuglokalisierung	Fahrzeug	Backend	Backend/Fahrzeug
Trajektorien- und Manöverberechnung	Fahrzeug	Backend	Backend/Fahrzeug
Fahrzeugsteuerung	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug

Bei AVP-Typ 1 ist das Fahrzeug verantwortlich für die Planung der Trajektorie, das Manövrieren durch das Parkhaus und die Überprüfung der Umgebung zur Kollisionsvermeidung. Das Backend übermittelt nur den Grundriss des Bereichs und zeigt den reservierten Parkplatz an.

Bei AVP-Typ 2 liegt der größte Teil der Intelligenz, d. h. Pfadberechnung und Entscheidungsfindung, im Backend. Es ist verantwortlich für die Trajektorien und überwacht die Manöver im Parkbereich mit Kameras. Das Backend zeigt dem Fahrzeug Pfadausschnitte an, welches den Befehlen folgt.

AVP-Typ 3 stellt den Kompromiss dar, bei dem sich Fahrzeug und Backend die Intelligenz teilen. Dieser Typ kann wiederum in Subtypen unterteilt werden, abhängig von der konkreten Aufgabenverteilung zwischen Fahrzeug und Backend.

Die verfügbaren Kommunikationstechnologien ermöglichen bereits proprietäre AVP-Implementierungen an dedizierten Standorten [Me20]. Aus Gründen der Interoperabilität zwischen verschiedenen Fahrzeugherstellern und Parkhausbetreibern wurde die Standardisierung gemeinsam zu nutzender Technologien und Protokolle initiiert [In23].

Darüber hinaus dient Automated Factory Parking (AFP) oder AFIF einem ähnlichen Zweck wie AVP, ist jedoch auf das automatisierte Fahren vom Fließband zu einem Fabrikparkplatz spezialisiert, wo das fertig produzierte Fahrzeug vor dem Versand zwischengelagert wird. Automatisierte Fahrfunktionen wie AVP und AFP können bereits im Produktionsprozess eingesetzt werden und bieten somit das Potenzial, kostenintensive Fördertechnik und zusätzliche Transportfahrzeuge zu eliminieren [Un22]. In AFP fährt das fertige Fahrzeug über das Werksgelände zu seinem Zwischenlager, bevor es zur Auslieferung auf einen Zug, LKW oder Schiff verladen wird.

AFP oder AFIF erweitern somit AVP in die Produktion, wodurch die bislang getrennten Ökosysteme industrielle Automatisierung und automatisiertes Fahren miteinander verschmelzen. Speziell in der Automobilproduktion bedeutet die Vernetzung von Produkt und Prozess im Rahmen von Industrie 4.0 eine Integration des intelligenten Produkts in den Produktionsprozess, wobei das Fahrzeug selbst als Fördertechnik fungiert [KRA22].

Dies führt zu dem neuen Anwendungsfall SNAP für die Automobilfabrik, welcher auf AVP und AFP basiert. Während SNAP von erhöhter Flexibilität und Effizienz profitiert, stellt die höhere Systemkomplexität in der Fabrik aufgrund zusätzlicher Kameras, Software sowie der Zusammenarbeit von Mitarbeitern und Maschinen eine Herausforderung dar. Im Folgenden werden die Voraussetzungen, Vorteile und Lücken aus beiden Ökosystemen erläutert, um ein Umsetzungskonzept für SNAP in einem hochflexiblen Produktionssystem zu entwickeln.

### 5.3.1 Faktoren für automatisiertes Fahren in der Automobilproduktion

In diesem Abschnitt werden die Prozesse in der Automobilproduktion erläutert, beginnend mit dem heutigen Stand bis hin zu möglichen Zukunftsszenarien. Abbildung 5.3 gibt dazu einen Überblick und

unterscheidet zwischen der heutigen starren Montagelinie und einem Konzept für die künftige Matrixfertigung.

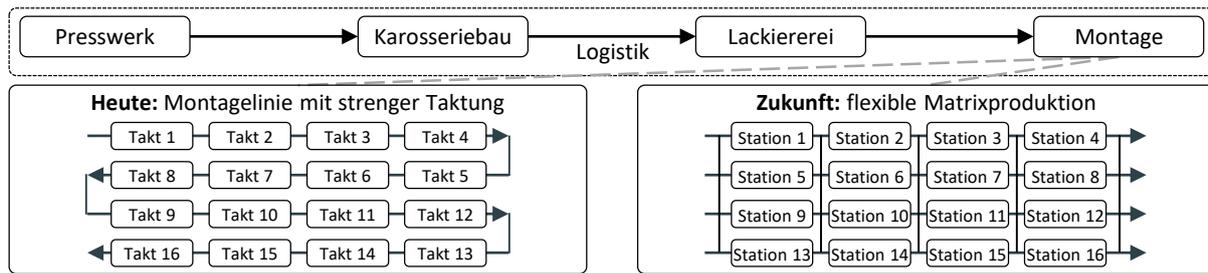


Abbildung 5.3: Automobilproduktion mit Montagelinie und Matrixfertigung (angelehnt an [Gr14])

In Zukunft soll sich die klassische starre Montagelinie in Richtung Industrie 4.0 zu einer Inselfertigung (bzw. Mischform aus Linien- und Inselfertigung) entwickeln, wie z. B. die Matrixfertigung [Gr14], [He22] oder die modulare Montage. Diese machen den Produktionsfluss durch entkoppelte Arbeitsplätze ohne einheitliche Taktzeit flexibler und effizienter [Ke21].

Ein visionäres Konzept für den Fahrzeug-Grundaufbau sieht ein selbstfahrendes Fahrgestell vor, auf dem eine Karosserie aus großen Modulen montiert ist. Abbildung 5.4 zeigt das Prinzip des sogenannten *Rolling Chassis* und ein Flussdiagramm der nachgelagerten Prozessschritte bis zur Auslieferung. Um das automatisierte Fahren im Produktionsprozess so früh wie möglich nutzen zu können, muss das Rolling Chassis Antriebsstrang, Batterie, Räder, Sensoren und Aktoren enthalten. Zusätzlich müssen das Connectivity-Modul, Antennen und Steuergeräte installiert und kalibriert werden. Nach Abschluss der restlichen Montagearbeiten kann die finale Inbetriebnahme des gesamten Fahrzeugs erfolgen. Dieses Konzept führt einerseits zu höherer Flexibilität und gesteigerter Produktivität durch Reduzierung der Fertigungszeit. Die kostenintensive Fördertechnik kann entfallen, da das Fahrzeug den Transport zum Arbeitsplatz für den nächsten Prozessschritt selbst durchführt. Komplexer ist hingegen die Produktionsflusssteuerung für das koordinierte Anfahren an die einzelnen Stationen [WKK20].



Abbildung 5.4: Prinzip des Rolling Chassis

Als Voraussetzungen und Vorteile des Einsatzes von automatisiertem Fahren in der Produktion lassen sich die folgenden Punkte festhalten, welche als Grundlage für das Umsetzungskonzept dienen:

- AFP und SNAP erweitern automatisierte Fahrfunktionen unter langsameren festgelegten Rahmenbedingungen von der reinen Nutzungsphase auf der Straße in die Fertigungsphase des Fahrzeuglebenszyklus.
- Eine effektive Nutzung der an Bord des Fahrzeugs verfügbaren Sensoren und Aktoren erfordert nur einen geringen Änderungsaufwand am Fahrzeug und an der Produktionslinie.
- Unabhängig von der Kommunikationstechnologie muss das Fahrzeug die erforderlichen Voraussetzungen und Funktionalitäten für das automatisierte Fahren bieten [SA21].
- 5G scheint im Vergleich zu WLAN die bessere und günstigere Universallösung für den Innen- und Außenbereich sowie über den gesamten Produktlebenszyklus zu sein.

Allerdings umfasst das Konzept auch die folgenden Einschränkungen bzw. Lücken:

- Die von separaten Organisationen verfolgten Anwendungsbereiche und deren Anforderungen müssen konsolidiert und standardisiert werden.
- Länderspezifische Funkfrequenzen für öffentliche und nicht-öffentliche 5G-Netzwerke sowie Roaming-Mechanismen müssen harmonisiert werden.
- Die Anwendung SNAP muss bei der Fabrik- und Funkressourcenplanung berücksichtigt werden bzw. bestehende Fabrikumgebungen müssen angepasst werden.
- Eine sichere Mensch-Roboter-Kollaboration ohne Beeinträchtigungen des Produktionsflusses und der Qualität muss garantiert sein.

### 5.3.2 Umsetzungskonzept

Dieser Abschnitt konkretisiert ein Konzept für die praktische Umsetzung des Anwendungsfalls. Das Konzept berücksichtigt die Anforderungen an V2X-Funktionen, einschließlich SNAP, sowie die Anforderungen an die Indoor-Produktion und die Outdoor-Logistik, die alle durch eine gemeinsame 5G-Netzwerkinfrastruktur ermöglicht werden. Abbildung 5.5 fasst die Anwendungsfälle und Kernaspekte des Konzepts zusammen.

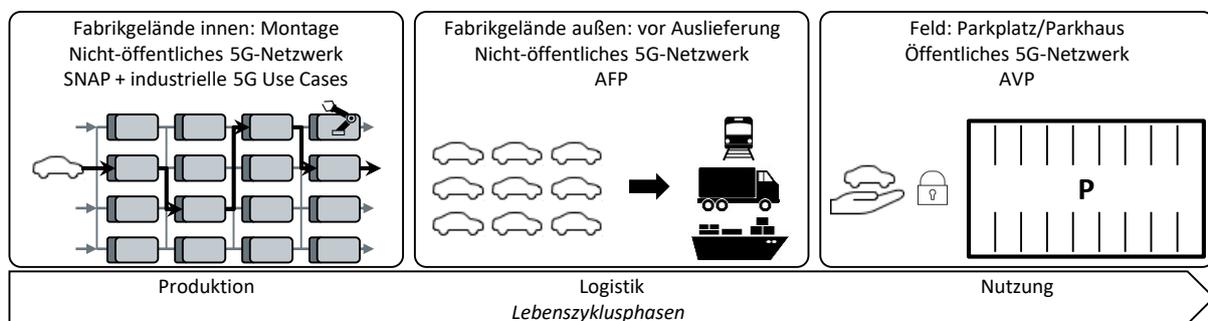


Abbildung 5.5: Einordnung von SNAP, AFP und AVP (angelehnt an [Am22a])

SNAP basiert auf dem Prinzip des Rolling Chassis und stellt die höchste Integrationsstufe des automatisierten Fahrens innerhalb des Werksgeländes dar, die auch die Montage beinhaltet und den höchsten Nutzen bringt. SNAP umfasst eine Abfolge mehrerer AVP-Prozesse, die eine flexible Matrixproduktion oder modulare Montage realisieren. SNAP benötigt kein zusätzliches dediziertes Steuergerät, sondern nutzt die vorhandenen Komponenten, die auch für AVP relevant sind. Um alle Anwendungsfallvarianten der Lebenszyklusphasen zu ermöglichen, unterstützt das Konnektivitätsmodul des Fahrzeugs die Anbindung an die öffentliche 5G-Infrastruktur sowie an das nicht-öffentliche 5G-Campusnetz. Da öffentliche Netzwerke nur eine eingeschränkte Anpassung bieten (z. B. Überlastung bei vielen Teilnehmern bzw. Endgeräten), sollten nicht-öffentliche 5G-Campusnetze an Produktionsstandorten bevorzugt werden. Da sie für die industrielle Automatisierung vorgesehen sind und unterschiedliche Network Slices für Automatisierungsanwendungen und SNAP zuweisen, ist eine Netzwerk-Performance erreichbar, die beide Systeme parallel unterstützt.

Das Backend-Infrastrukturdesign gewährleistet jederzeit eine zuverlässige Kommunikation mit allen Fahrzeugen, FTS und anderen produktionsrelevanten Geräten. Ein zentrales Steuerungssystem koordiniert den Produktionsfluss. Aufgrund des hochflexiblen Montageprozesses ist dieser deutlich komplexer als in der konventionellen Fahrzeugfertigung. Durch den Einsatz der Fahrzeugsensoren ist die SNAP-Implementierung auf Basis von AVP Typ 1 zu empfehlen, da in der Produktion deutlich weniger zusätzliche Hardware (z. B. externe Kameras) benötigt wird. Das Backend-System koordiniert die in der Montagehalle fahrenden Fahrzeuge und zeigt die nachfolgenden Arbeitsstationen an. Das Steuerungssystem berechnet die optimale Reihenfolge der Prozessschritte für mehrere Fahrzeuge im

Voraus. Diese Kooperation ermöglicht serielle und parallele Fahrzeugbewegungen durch die verschiedenen Prozessschritte.

Fahrzeuge, die identische Produktionsschritte benötigen, können Sidelink verwenden, um sich wie ein Platoon zu verhalten, d. h. da die Fahrzeuge innerhalb eines vertrauenswürdigen Systems verwaltet werden, können die Abstände zwischen den Fahrzeugen stark reduziert werden. Ohne die Notwendigkeit einer vollständigen externen Kontrolle und Überwachung durch das Backend-System können die Fahrzeuge die zuvor einheitlichen Bandgeschwindigkeiten und -abstände nachbilden.

Aufgrund möglicher Maschinenausfälle oder manueller Fehler kann die Zeit für ein Fahrzeug an einem Arbeitsplatz variieren. Mit vorgegebenen Kontrollpunkten, die das Fahrzeug während des Produktionsprozesses passieren muss, können Staus in bestimmten Bereichen vom Steuerungssystem verfolgt werden. Neue Trajektorien zu Arbeitsstationen können berechnet und an die wartenden Fahrzeuge weitergeleitet werden, um Ausfallzeiten zu vermeiden und den Produktionsprozess zu glätten, ohne die Arbeiter zu belasten. Bevor das Fahrzeug das Werksgelände verlässt, wird die SNAP-Funktionalität deaktiviert oder gelöscht.

Insgesamt kann SNAP also weitreichende Vorteile bringen, wenn die genannten Anforderungen und Randbedingungen für das hochkomplexe Gesamtsystem aus Fahrzeugen und Produktionsumgebung gelöst werden können.

### 5.4 Fazit der Anwendungsfälle

Grundsätzlich kommen für den kombinierten Einsatz von 5G in TSN verteilte zeitkritische Applikationen infrage, welche bestimmte QoS-Garantien erfordern. Dabei muss ein Partner zwingend drahtlos angebunden werden, z. B. wegen eines Mobilitätsanspruchs. Außerdem ist mindestens ein stationärer Kommunikationspartner beteiligt, angebunden über (Industrial) Ethernet, z. B. PROFINET. In diesem Kapitel wurden sowohl 5G-spezifische Anwendungsfälle mit TSN-Bezug aus den Organisationen 3GPP, 5G-ACIA und VDMA WCM als auch TSN-spezifische Anwendungsfälle mit 5G-Bezug aus IEC/IEE 60802 untersucht. Zudem wurde speziell für die Automobilproduktion der Anwendungsfall SNAP mit Relevanz für 5G und TSN herausgearbeitet.

Eine Erkenntnis aus der Analyse der Anwendungsfälle ist, dass in den einzelnen Organisationen Anwendungsfälle und deren Anforderungen an bestimmte Parameter in Tabellen mit konkreten Werten gesammelt werden. Diese sind jedoch selten einheitlich und beziehen sich ausschließlich auf die strengsten Anforderungen, z. B. die zeitkritischen Daten bei der Bewegungssteuerung. Es wird jedoch vernachlässigt, dass jeder Anwendungsfall unterschiedliche Datenverkehrstypen und -klassen mit unterschiedlichen QoS-Anforderungen beinhaltet (vgl. Abschnitt 2.1.4). Um keine Netzwerkressourcen zu verschwenden, sollten für weniger kritische Daten, z. B. zur Konfiguration, weniger Ressourcen als für zeitkritische Daten vorgehalten werden. Folglich sollte eine feingranulare QoS-Differenzierung auf Basis von Datenverkehrstypen bzw. -klassen vorgenommen werden.

Jeder Anwendungsfall stellt eine Abstraktion einer konkreten Applikation dar, wie z. B. mobile Roboter. Die Applikation kreiert einen bestimmten Datenverkehr mit teilweise heterogenen Anforderungen. Beispielweise kann sowohl zeitkritischer Datenverkehr, z. B. im Safety-Kontext, als auch datenratenintensiver Datenverkehr auftreten, z. B. für die Video-Übertragung. Da gewöhnlich viele Applikationen parallel Daten über dasselbe Netzwerk übertragen, ist TSN ein Werkzeug zur Mangelverwaltung auf Seiten der Infrastruktur. Die gewonnenen Erkenntnisse gelten grundsätzlich auch für DetNet.

Im Kontext von 5G und TSN abstrahiert die 5G-ACIA drei Typen von Anwendungsfällen über die OT- und IT-Domänen hinweg [5G21f]:

1. C2C, z. B. bei langen flexiblen Anlagen mit gekoppelten synchronisierten Steuerungen,
2. C2D, wobei differenziert wird zwischen
  - verteilte Steuerung, z. B. bei drahtlosen Bedien-Panels, und
  - zentralisierte Steuerung, z. B. virtualisierte SPS zur FTS-Flottensteuerung sowie
3. Device-to-Compute (D2Cmp), z. B. zur Bildverarbeitung in der Edge für FTS-Steuerungsbefehle [HM21].

Für die detaillierte Betrachtung der Mechanismen zur QoS-Steuerung in der 5G-Bridge sind allerdings nicht die Anwendungen an sich ausschlaggebend, sondern die Eigenschaften der unterschiedlichen Kommunikationsdienste innerhalb der Anwendung. Diese lassen sich in TSN in bis zu acht verschiedene Datenverkehrstypen bzw. -klassen einordnen, welche unterschiedliche Anforderungen und Funktionalitäten erfordern, z. B. Echtzeit-Streams, Bandbreiten-Reservierung oder Best Effort. Das Auftreten der Datenverkehrsklassen hängt von der Implementierung ab. In 5G entspricht diese grobe Unterscheidung den Szenarien eMBB, URLLC und mMTC, wobei über Network Slicing alle drei parallel betrieben werden können. Eine feinere Differenzierung erfolgt über QFIs mit 5QIs.

Als Beitrag zu Forschungsfrage 1 lässt sich festhalten, dass sich die Anwendungsfälle für die Integration von 5G in TSN in den unterschiedlichen Organisationen größtenteils decken, z. B. Bedien-Panels, Bewegungssteuerung und mobile Roboter. Bei deren Anforderungen werden lediglich die Extremfälle mit der höchsten Kritikalität betrachtet. Zu berücksichtigen sind allerdings alle Datenverkehrstypen, die parallel mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anforderungen bei jedem Anwendungsfall sowie im gesamten Netzwerk auftreten können. Deshalb ist es wichtig, im nächsten Schritt geeignete hybride Netzwerkarchitekturen näher zu untersuchen und dafür ein geeignetes Datenverkehrskonzept zu entwickeln.

## 6 Konzeptionierung hybrider Netzwerkarchitekturen

In diesem Kapitel werden hybride Netzwerkarchitekturen unter Berücksichtigung nativer 5G-, TSN- und DetNet-Systemarchitekturen inklusive des 5G Bridge-Modells konzeptioniert. Dafür werden in Abschnitt 6.1 zunächst die grundlegenden Voraussetzungen geklärt. In Abschnitt 6.2 wird ein hybrides 5G-TSN-Architekturkonzept erarbeitet. Abschnitt 6.3 beinhaltet das Pendant für DetNet. Abschnitt 6.4 liefert ein Zwischenfazit zu den Architekturkonzepten.

### 6.1 Voraussetzungen

Wie in Abschnitt 3.2 herausgearbeitet, spielen für ein ganzheitliches 5G-TSN-Architekturkonzept folgende Voraussetzungen und Faktoren eine Rolle:

- Industrielles Netzwerk mit IT- und OT-Domäne,
- TSN-Domänenstruktur,
- TSN-Ringtopologie,
- 5G Bridge-Modell in einer und mehreren TSN-Domänen sowie
- 5G Ethernet PDU-Sessions.

Im Folgenden wird auf diese Voraussetzungen und Faktoren im Einzelnen näher eingegangen.

#### Industrielles Netzwerk mit IT- und OT-Domäne

Die Überlegungen setzen auf den in Abschnitt 2.2.4 erläuterten Grundlagen zu den Netzwerkdomänen und deren in Abbildung 2.13 veranschaulichten Trennung auf. Abbildung 6.1 zeigt ein Netzwerkkonzept am Beispiel der Volkswagen AG, bei dem die Verantwortungsbereiche der OT und IT gemäß der klassischen Automatisierungspyramide klar voneinander getrennt sind, d. h. Steuerungs- und Feldebene gehören zur OT-Domäne (PROFINET, in grün dargestellt) und alle höheren Ebenen sind Teil der IT-Domäne (Switches in grau und 5G-System in rot). Jede Anlage bildet ein OT-Subnetz mit Ringtopologie und enthält eine eigene SPS. Über den Uplink-Switch erfolgt die redundant ausgelegte Anbindung an den Distribution-Switch im IT-Netzwerk. Mobile Geräte, wie z. B. FTS, müssen Ethernet-Frames für PROFINET bzw. perspektivisch TSN-Datenverkehr über 5G und das IT-Netzwerk mit der SPS im Anlagen-Subnetz austauschen (vgl. Maschinenrichtlinie in Abschnitt 5.1). Über unterschiedliche VLANs müssen Ethernet-/PROFINET- und IP-Datenverkehr logisch separiert werden, was jedoch nicht implementiert ist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation ist keiner der Switches TSN-fähig.

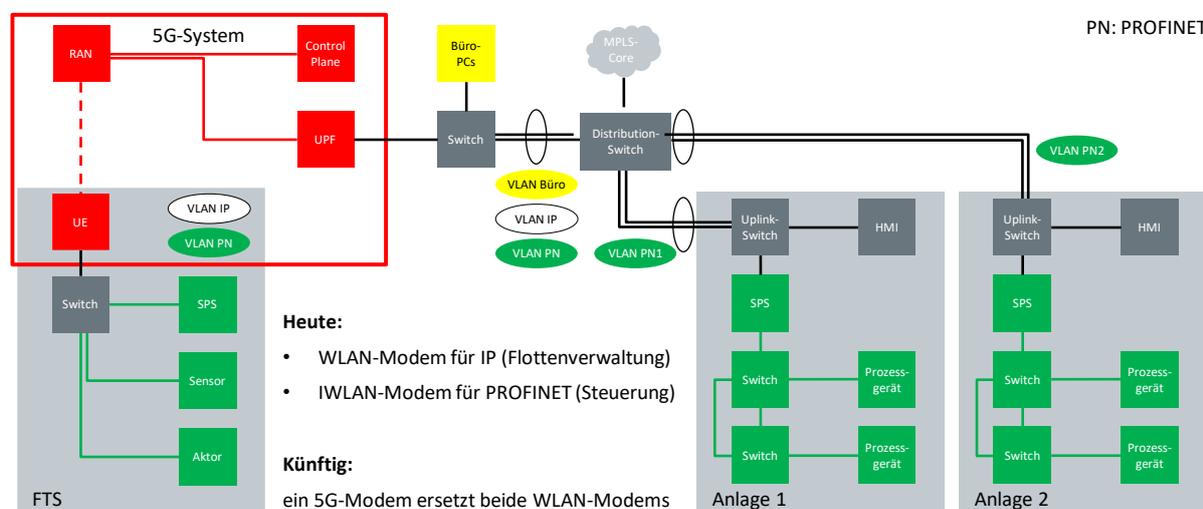


Abbildung 6.1: Industrielles Netzwerk mit FTS in zwei Produktionszellen

### TSN-Domänenstruktur

In einer ersten Integrationsstufe von TSN ins OT-Netzwerk wird lediglich eine TSN-Domäne, d. h. ein Anlagen-Subnetz, betrachtet. Übergänge der Übertragungsgeschwindigkeit von 100 Mbit/s auf 1 Gbit/s sollen nur außerhalb der TSN-Domäne oberhalb des Uplink-Switch erfolgen, wobei zeitkritischer PROFINET-Datenverkehr weiterhin mit 100 Mbit/s übertragen wird. Das OT-Netzwerk unterscheidet aktuell keine VLANs. Auf dem weiteren Migrationspfad sind mehrere TSN-Domänen zu erwarten. Abbildung 6.2 zeigt die Unterteilung in und Verbindung zwischen TSN-Domänen, welche auf verschiedenen Ebenen realisiert werden können. Eine Maschine bzw. Anlage bildet die kleinste Domäne und kann hierarchisch der Reihenfolge in die nächstgrößeren Domänen Produktionszelle, Produktionslinie und Fabrik eingebettet sein.

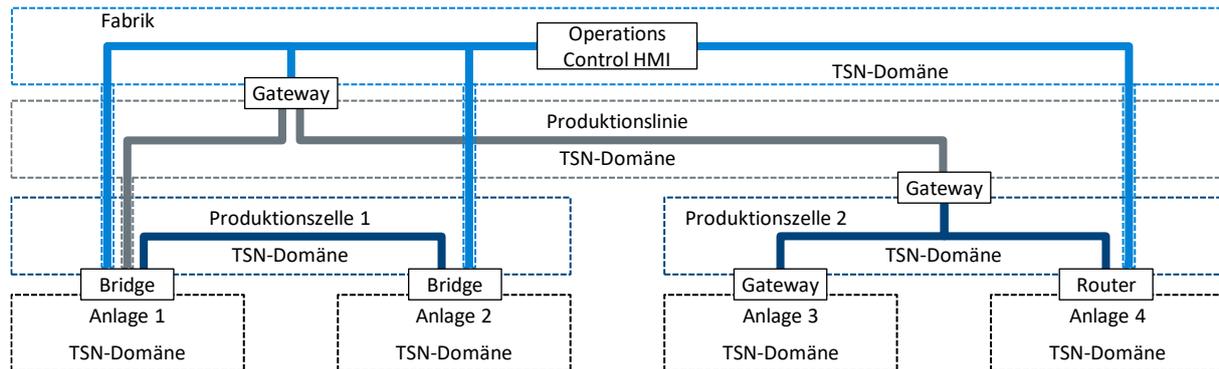


Abbildung 6.2: Anbindungsmöglichkeiten verschiedener TSN-Domänen (angelehnt an [Be18])

Auch die von der 5G-ACIA erarbeiteten Architekturkonzepte für 5G und TSN berücksichtigen unterschiedliche TSN-Domänen in der OT- und IT-Domäne sowie in einem Rechenzentrum [5G21f]. Allerdings bleiben die Architekturen abstrakt und adressieren nicht die Kommunikation zwischen TSN-Domänen mit separaten CNCs. Dies stellt für das 5G-System eine Herausforderung dar, weil die TSN AF mit mehreren CNCs interagieren muss. Das in diesem Kapitel zu entwickelnde Konzept für eine hybride 5G-TSN-Netzwerchitektur soll konkret auf diese Problematik eingehen.

### TSN-Ringtopologie

Die Ringtopologie bietet eine höhere Datenverfügbarkeit und Ausfallsicherheit im Anlagennetzwerk. Am Beispiel der Volkswagen AG ist von folgenden Kennzahlen in TSN-Netzwerken auszugehen: Eine SPS bedient ca. 70 Netzwerkteilnehmer an einem zentralen TSN-Controller (einschließlich CNC und CUC), wovon ca. 40 Teilnehmer TSN-fähig sind. Insgesamt kann das gesamte Netzwerk bis zu 256 Teilnehmer enthalten. Roboter und weitere Teilnehmer dahinter werden als Linie an den Ring angebunden. Typischerweise enthält ein Ring zehn Bridges und einen TSN-Controller. Alle TSN-Teilnehmer im Ring bieten Redundanz, welche folglich auch bei der drahtlosen Anbindung von Geräten über 5G relevant ist. Details dazu folgen in Abschnitt 6.2.

Die Last an zeitkritischem PROFINET- und PROFIsafe-Datenverkehr beträgt ca. 25-30 % bei 100 Mbit/s und einer Aktualisierungszeit von 4 ms. Die Last an zeitunkritischem Datenverkehr beträgt derzeit noch 20 %. Sie steigt jedoch künftig an, da immer mehr Geräte, z. B. Roboter, zusätzlich zeitunkritischen Datenverkehr über OPC UA generieren, der zur Datenanalyse vertikal an der SPS vorbei in die zentrale Anlagenüberwachung übertragen werden muss. Deshalb wird im Vergleich zum bisherigen Netzwerk ein zusätzlicher Switch eingeführt, an den der Ring und die SPS angebunden werden.

### **Integrationsmodelle**

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, lassen sich bei der Integration von 5G in Ethernet- bzw. TSN-Netzwerke das Link-Modell und das Bridge-Modell unterscheiden. Das Link-Modell ist im Hinblick auf TSN-Funktionalitäten stark eingeschränkt und somit nur als kurzfristige Übergangslösung zu sehen. Das Bridge-Modell (vgl. Abbildung 2.15) bietet eine höhere Flexibilität bei der Integration und Verwendung von TSN-Funktionalitäten. Allerdings ist es mit den TSN-Translatoren deutlich komplexer, weshalb diese Variante auf dem Migrationspfad als langfristige Lösung zu betrachten ist.

### **5G in einer TSN-Domäne**

Befinden sich SPS und Prozessgerät (z. B. Roboter, Sensor oder Bedien-Panel) physikalisch in der Anlage, kommen zwei Kommunikationsszenarien infrage. Beide Teilnehmer können als UE angebunden werden, was zwei Funkstrecken pro Übertragung bedeutet, die Latenz erhöht, die Zuverlässigkeit reduziert und aufgrund der zusätzlichen Verbindung zwischen IT- und OT-Netzwerk anfällig bezüglich der Security ist.

Da die SPS in den meisten Fällen weiterhin stationär bleiben kann, ist es aber auch denkbar, dass nur das Prozessgerät drahtlos als UE angebunden wird. Die Daten müssen dann zwischen UPF und SPS über das IT- und OT-Netzwerk übertragen werden. Mit Edge Computing lassen sich Steuerungen virtualisieren und in Rechenzentren zentralisieren [HM21]. In diesem Szenario gehört auch die SPS zur Layer 3 IT-Domäne. In dem Fall ist ein Layer 2-Tunnel, z. B. über Virtual Extensible Local Area Network (VXLAN), zwischen SPS und Prozessgerät erforderlich, welcher konkret jeweils am Distribution-Switch und am Uplink-Switch terminiert. Diese Lösung erhöht allerdings den Konfigurationsaufwand an den Switches und ist unflexibel für den Anwendungsfall der FTS, die regelmäßig zwischen mehreren Anlagen-Subnetzen wechseln müssen.

### **5G in mehreren TSN-Domänen**

Um mit einem Endgerät über 5G die Verbindung zu Steuerungen in verschiedenen TSN-Domänen bzw. -Subnetzen herzustellen, bildet jede Domäne ein eigenes Datennetzwerk mit Data Network Name (DNN) sowie Access Point Name (APN) und erfordert folglich jeweils eine eigene UPF. Dies bedeutet wiederum eine virtuelle 5G-Bridge pro UPF und TSN-Domäne [3G22b]. Folglich ist die Anzahl und Unterteilung der Subnetze sowie deren geografische Verteilung zu berücksichtigen. Denkbar ist z. B. ein Subnetz mit eigener UPF und gNB pro Produktions-/Industriehalle, weil aufgrund der baulichen Trennung durch Wände die Funkwellen beeinträchtigt werden können und weil aus organisatorischer Sicht ähnliche Anlagen für ein bestimmtes Gewerk gruppiert werden und entsprechend kollaborieren. Ein weiterer Faktor ist die Organisation der CNC. Das Bridge-Modell geht von einer einzigen CNC aus. Unter der Annahme eines werksweiten 5G-Systems ist dieses Szenario realistisch, wenn entsprechend der zuvor erläuterten TSN-Domänenstruktur einzelne Anlagen Subdomänen der Fabrik-Domäne darstellen. In letzterer wäre schließlich die CNC zu verorten. Dagegen sind bei separaten CNCs je Anlage ohne übergreifende CNC mehrere TSN AFs und somit ein 5G-System pro Anlage bzw. TSN-Domäne mit eigener CNC notwendig.

Um verschiedene Konfigurationen für TSN-Domänen zu bewerten, lässt sich die Methodik von Bosk et al. [Bo22] heranziehen: Sie definieren und bewerten zunächst die Anforderungen von Echtzeit-Datenverkehr in einer bestimmten Domäne. Anschließend konfigurieren sie repräsentative TSN-Netzwerke, um die Performance verschiedener TSN-Standards in den gewählten Konfigurationen zu bewerten und zu optimieren sowie geeignete TSN-Topologien zu identifizieren.

### 5G Ethernet PDU-Sessions

Wie ebenfalls in Abschnitt 2.2.4 erläutert, bedingt eine native Layer 2-Kommunikation innerhalb des 5G-Systems die Unterstützung von Ethernet PDU-Sessions. Abbildung 6.3 veranschaulicht, wie Ethernet-Frames zwischen Prozessgeräten und SPS über das 5G-System und anschließend über das dahinterliegende IT- und OT-Netzwerk inklusive Distribution- und Uplink-Switches übertragen werden.

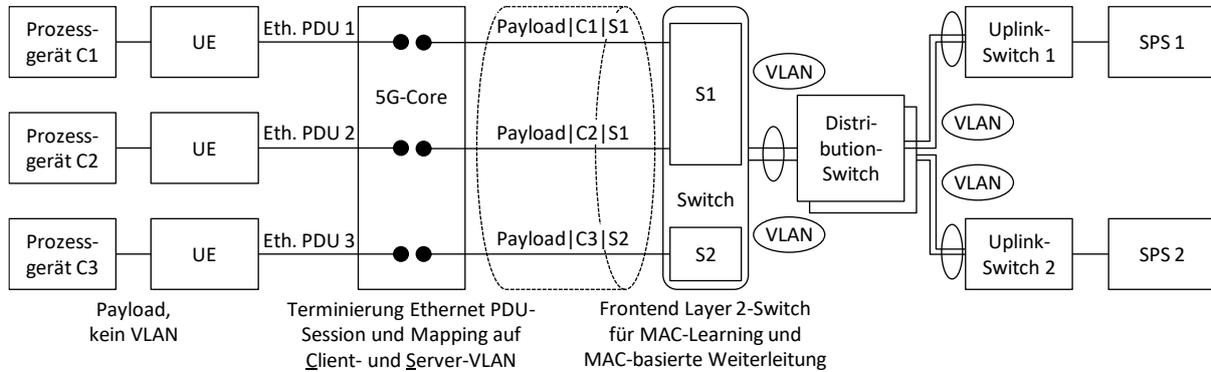


Abbildung 6.3: 5G-Integrationskonzept für Layer 2-Datenverkehr

## 6.2 Architekturkonzept für 5G und TSN

Die zuvor erläuterten Voraussetzungen und zu berücksichtigenden Faktoren sollen nun in eine gemeinsame Architektur zusammengeführt werden. Während Abbildung 6.4 ein Basiskonzept einer hybriden 5G-TSN-Netzwerkarhitektur darstellt, erweitert Abbildung 6.5 dieses Basiskonzept um Redundanz, hierarchische CNC und Edge Cloud. Beide Abbildungen stellen drei TSN-Domänen mit Ringtopologie dar (davon ein FTS und zwei Anlagen, was den Anwendungsfall gemäß der Maschinenrichtlinie repräsentiert), das 5G-System als mehrere virtuelle Bridges, Distribution- und Uplink-Switches sowie zentralisierte CNC und CUC.

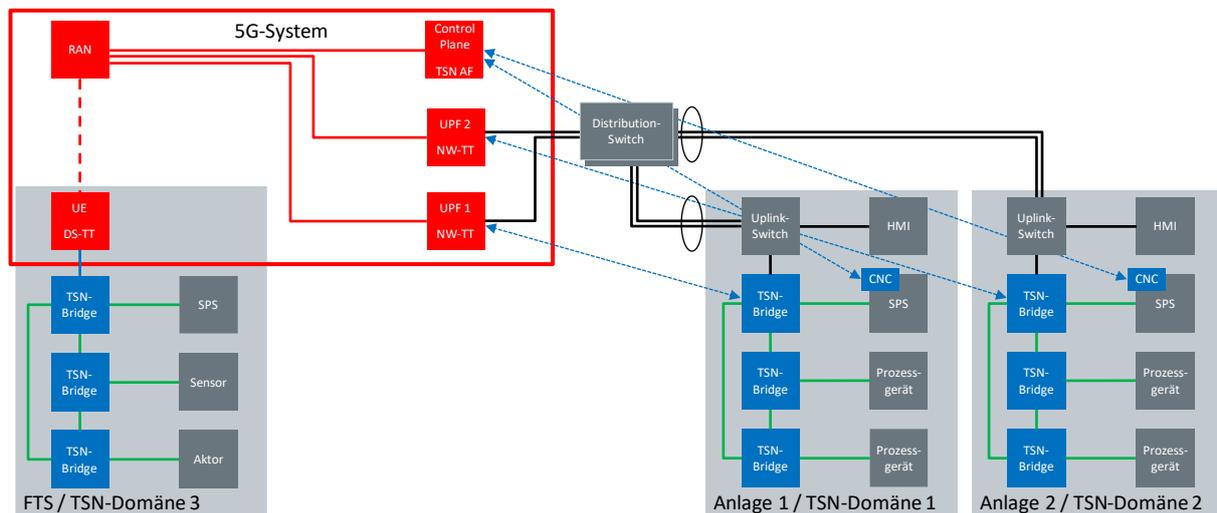


Abbildung 6.4: Basiskonzept einer industriellen Netzwerkarhitektur mit 5G und TSN

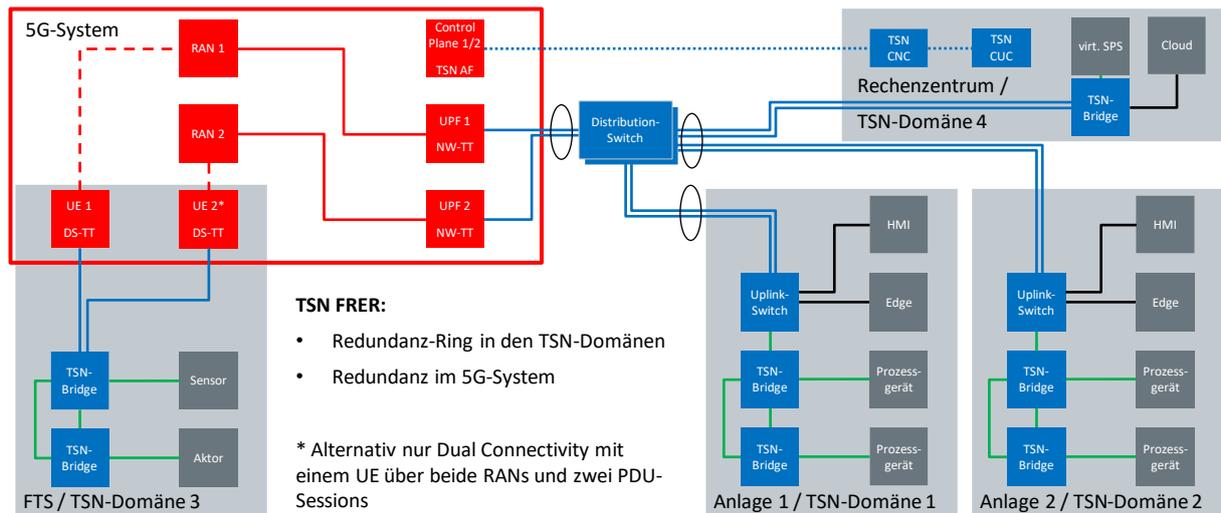


Abbildung 6.5: 5G-TSN-Netzwerkarchitektur mit Redundanz, hierarchischer CNC und Edge Cloud

Im Hinblick auf die Redundanz unterstreichen die Ringtopologie und der TSN-Mechanismus FRER nach IEEE 802.1CB auch die Relevanz innerhalb des 5G-Systems. Eine duale Konnektivität lässt sich in unterschiedlichen Varianten realisieren:

- Jedes Prozessgerät kann mit zwei UEs ausgestattet werden,
- das RAN inkl. gNB kann redundant ausgelegt werden (d. h. auch zwei Modems und SIM-Karten pro UE),
- der 5G-Core kann redundant ausgelegt werden, oder
- eine Kombination aus allen drei Varianten [5G20b], [5G21g].

Gemäß IEC/IEEE 60802 kann die drahtlose Verbindung an sich auch als redundanter Pfad alternativ zur kabelgebundenen Verbindung fungieren (vgl. Anwendungsfall aus Abschnitt 5.2).

### 6.3 Architekturkonzept für 5G und DetNet

Dieser Abschnitt enthält ein Architekturkonzept für ein ganzheitlich deterministisches Netzwerk mit 5G und DetNet. Die Inhalte dieses Abschnitts basieren auf der vorab publizierten Arbeit [Am22b].

Um in der Produktion möglichst flexibel auf Nachfrageänderungen und ungeplante Maschinenausfälle reagieren zu können, werden SPS in der IT-Domäne virtualisiert, z. B. in einer Edge Cloud oder in zentralen Rechenzentren. Diese müssen skalierbar, hochverfügbar und energieeffizient sein. Als Vorteile sind Hardware-Unabhängigkeit, eine vereinfachte Systemwartung sowie eine effektive Nutzung von Hardwareressourcen zu nennen. Dies reduziert wiederum die Anschaffungskosten und den ökologischen Fußabdruck [Ya20b].

Darüber hinaus ermöglichen SDN und NFV hochflexible Netzwerktopologien, ohne die physische Hardware zu verändern. Im Rahmen der Netzwerkverwaltung erfasst SDN Protokolle, überwacht den Zustand von Geräten und ermöglicht so eine schnelle Fehlerbehebung auch bei dynamischen Änderungen innerhalb des Netzwerks [Kr15].

Weit verbreitet sind industrielle Netzwerke, die auf proprietären Feldbussen basieren und weder IT-Netzwerkarchitekturen mit einer Access Layer, Distribution Layer und Core Layer noch die Skalierbarkeit und Flexibilität von IT-Netzwerken auf Basis von SDN-Ansätzen ermöglichen. Stattdessen haben sich Ringtopologien bis heute durchgesetzt und die Anzahl der Hops zwischen Kommunikationspartnern erhöht.

Folglich sind Echtzeitfähigkeit und Determinismus in lokalen Layer 2-Anlagennetzwerken der OT-Domäne nicht ausreichend, sondern müssen in das viel größer dimensionierte Layer 3-Netzwerk der IT-Domäne skalierbar sein, um kritische Anwendungsfälle zu ermöglichen.

Skalierbare Architekturen aus protokollunabhängigen und segmentbasierten Konzepten für hybride deterministische Netzwerke mit 5G-, TSN- und DetNet-Komponenten liefern z. B. [An22d] und [So21b]. Basierend auf dem Technologievergleich in Abschnitt 2.3 scheint 5G in Kombination mit DetNet besser für hybride kabelgebundene und drahtlose Netzwerke geeignet zu sein als 5G und TSN. Alle drei Technologien stehen vor der Herausforderung der Interoperabilität mit externen Netzwerken. Um diese Herausforderung möglichst klein zu halten, also Schnittstellen zu externen Netzwerken zu reduzieren, ist es folglich einfacher, ein einzelnes großes DetNet bereitzustellen, als mehrere lokale Anlagennetzwerke als TSN-Inseln in ein übergeordnetes DetNet- oder IP-Netzwerk zu integrieren.

Für die bereits in Abbildung 2.9 dargestellte Unterteilung des 5G-Systems in Fronthaul, Midhaul und Backhaul kann auch DetNet diese 5G-interne Konnektivität bereitstellen, aber die Integration von DetNet auf Protokollebene in bestehende Mobilfunknetzwerke wird noch untersucht, um die Control Plane mit geringer Komplexität zu verwalten [Na19]. Während Fronthaul und Midhaul eine deterministische Datenübertragung erfordern, gilt dies für das Backhaul nicht.

Abbildung 6.6 zeigt das Architekturkonzept für ein CPS basierend auf 5G und DetNet. Ganzheitlicher Determinismus durch die Integration von 5G in DetNet und Redundanzmechanismen über Access, Distribution und Core Layer ermöglichen ein resilientes Netzwerk. Unter der Annahme, dass ein WAN mehrere Produktionsstandorte über eine große räumliche Distanz miteinander verbindet, reicht ein einziger zentraler 5G-Core aus, da das Backend keinen Determinismus erfordert. Alternativ kann sich der Core auch vor Ort befinden, wenn nur eine Fabrik existiert oder jeder Standort einen eigenen Core verwendet, was aus Security-Gesichtspunkten wichtig für die lokale Produktion ist. Die 5G ORAN-Komponenten und die Cloud befinden sich physisch auf der Access Layer des hybriden deterministischen CPS. Dies erleichtert die Virtualisierung von Steuerungsfunktionen und die Vorverarbeitung zeitkritischer Daten. Darüber hinaus kann eine Echtzeitkommunikation über eine hohe räumliche Distanz erreicht werden, wie sie z. B. für den Anwendungsfall Fernwartung mit AR/VR erforderlich ist (vgl. Abschnitt 5.1). Mobile Geräte können direkt als 5G-UEs angebunden werden und switched-Umgebungen über 5G-Gateways, z. B. TSN-Subnetze oder FTS-interne Netzwerke. Pakete durchlaufen die Access, Distribution und Core Layers und zurück zu den RUs, UEs und umgekehrt. Schließlich erhöht die Paketduplizierung über redundante Verbindungen zur Access Layer die Verfügbarkeit innerhalb des Servers.

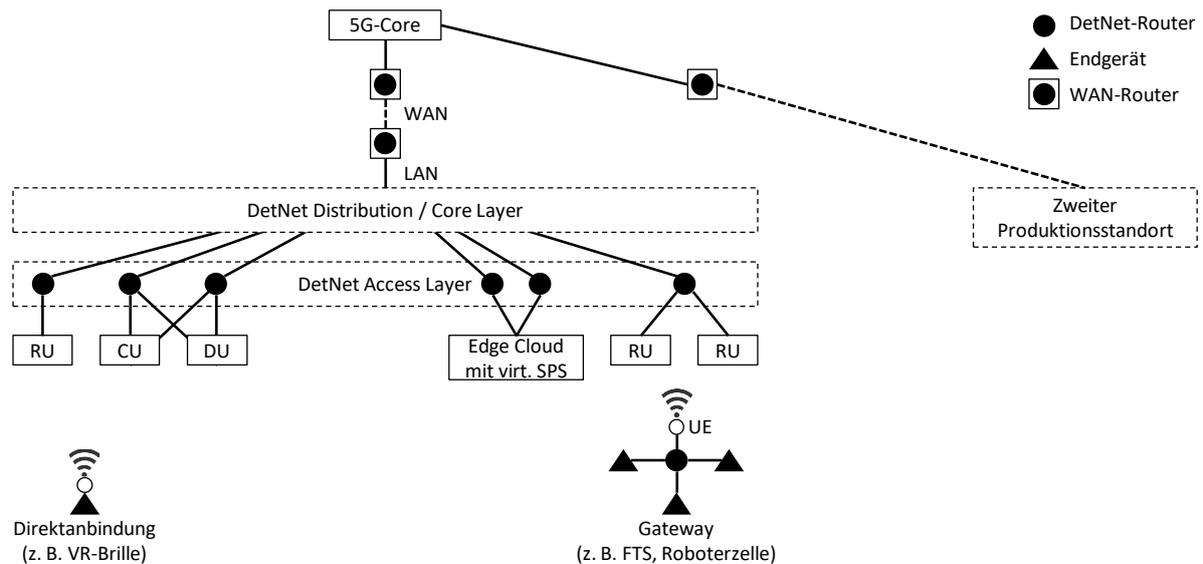


Abbildung 6.6: CPS-Architekturkonzept basierend auf 5G und DetNet (angelehnt an [Am22b])

## 6.4 Fazit der Architekturkonzepte

Durch die 5G-Integration in industrielle Fabriknetzwerke wird die IT/OT-Konvergenz auf dem Weg zu CPS in Industrie 4.0 deutlich. Das 5G-System fällt in den Verantwortungsbereich der IT, überträgt aber auch zeitkritischen OT-Datenverkehr und überwindet somit die klare Separation zwischen IT- und OT-Domäne. Für diese Herausforderung lassen sich die folgenden vier Optionen als Lösungsansätze ableiten:

- TSN-Befähigung der IT-Domäne,
- Tunneling von Layer 2 OT-Datenverkehr durch das Layer 3 IT-Netzwerk,
- DetNet-Befähigung der OT-Domäne oder
- 5G-System als IT/OT-Gateway.

Die TSN-Befähigung der IT-Domäne würde die Implementierung des 5G-Systems als Bridge vereinfachen. Allerdings würde dadurch je nach Dimension des Fabriknetzwerks und der Anzahl an Teilnehmern ein riesiges Subnetz mit mehreren Tausend Clients entstehen, was Probleme bei Broadcast-Nachrichten und bei der Auflösung von Adressen verursachen würde.

Die konkrete Organisation der TSN-Domänen beeinflusst die Skalierbarkeit und Flexibilität. Die Anbindung jeder Anlage als separate TSN-Domäne mit eigener CNC an das IT-Netzwerk ohne übergreifende TSN-Domänen widerspricht dem 3GPP Bridge-Modell. Dieses setzt eine vollständig zentralisierte TSN-Konfiguration voraus. Die Alternativen, das Fully Distributed Model und das Centralized Network / Distributed User Model (vgl. Abschnitt 2.1.1), werden noch nicht im 3GPP-Standard berücksichtigt und bieten weniger TSN-Funktionalitäten. Andererseits ist fraglich, inwiefern eine übergeordnete CNC und CUC pro Werk überhaupt skalieren könnten.

Bei Option 2 wird Layer 2-Datenverkehr hinter der UPF durch das Layer 3 IT-Netzwerk getunnelt, z. B. mittels VXLAN oder künftig mittels TSN over DetNet. Die Layer 2-Kommunikation z. B. über PROFINET ist in der OT-Domäne noch weit verbreitet. Kurzfristig werden also Layer 2-Tunnel als VPN zwischen der Edge Cloud und Feldgeräten über ein echtzeitfähiges Layer 3-Netzwerk notwendig für Brownfield-Implementierungen und Retrofits sein. Ein Nachteil ist jedoch, dass Tunneln Overhead erzeugt.

Die DetNet-Befähigung der OT-Domäne würde die Implementierung des 5G-Systems als DetNet-Router vereinfachen. Damit könnten Layer 2-Lösungen langfristig sogar obsolet werden, da sowohl 5G

als auch DetNet nativ Layer 3 unterstützen und die Anforderungen von Anwendungen an Echtzeit und Determinismus erfüllen.

Option 4 stellt einen völlig neuen Vorschlag dar. Das 5G-System fungiert als IT/OT-Gateway, d. h. es repräsentiert weder eine TSN-Bridge noch einen DetNet-Router, sondern eine Hybrid-Lösung, die zwischen beiden Domänen vermittelt bzw. übersetzt. Dieser Ansatz wurde in der Standardisierung bislang jedoch überhaupt noch nicht berücksichtigt und wird im Rahmen dieser Dissertation auch nicht näher untersucht.

Für das 5G-System ist bei streng separierten Anlagen-Subnetzen zu klären, inwiefern jede Anlage ein eigenes VLAN mit eigenem APN/DNN und eine eigene UPF benötigt. Im Extremfall kann sogar eine TSN AF pro Anlage und somit jeweils ein eigenes 5G-System notwendig sein. Das wirkt sich wiederum auf die Flexibilität aus, weil sich insbesondere FTS mit verschiedenen stationären Produktionsanlagen und somit Subnetzen sowie VLANs koppeln bzw. zwischen diesen wechseln müssen. Als Lösungsansatz bietet sich an, den Distribution-Switch künftig für TSN und/oder DetNet zu befähigen, um übergeordnete TSN-Domänen und damit sowohl eine netzwerkweite Zeitsynchronisation als auch eine durchgängige Kommunikation über alle Netzwerkkonstrukturen zu ermöglichen. Dies wird künftig auch im Zuge der SPS-Virtualisierung und von Edge Computing zunehmend relevant.

Als Beitrag zu Forschungsfrage 2 lässt sich festhalten, dass insbesondere die Topologie und Domänenstruktur als Faktoren für ein hybrides Netzwerk mit 5G und TSN zu berücksichtigen sind. Es existiert nicht die eine ideale Lösung, sondern mehrere Alternativen stehen zur Verfügung. Diese sind flexibel und hängen von der Implementierung ab. Alle Lösungen bilden einen Kompromiss und können kurzfristig für Brownfields oder langfristig für neu errichtete Netzwerke verwendet werden. Die Domänentrennung gilt es sowohl zwischen IT und OT als auch zwischen TSN-Subnetzen und dem 5G-System, welches parallel mehrere TSN-Bridges repräsentieren kann, zu berücksichtigen. Aufbauend auf die Architektur gilt es im nächsten Schritt zu untersuchen, wie Datenverkehr in Bezug auf QoS von Ende zu Ende über die Systemgrenzen zwischen 5G und TSN konkret übersetzt und behandelt werden kann, um die Anforderungen von Anwendungen zu erfüllen.

## 7 Entwicklung eines Datenverkehrskonzepts für 5G und TSN

Dieses Kapitel zielt auf ein gemeinsames QoS-Modell für 5G und TSN ab. Die Umsetzung von QoS unterscheidet sich in den beiden Technologien grundlegend und ist nicht übergreifend standardisiert. Die 3GPP-Spezifikationen erwähnen QoS-Mapping-Tabellen, ohne eine spezifische Aussage über deren Inhalt zu treffen [3G22b], [3G22a]. Auch die 5G-ACIA, die sich auf industrielle Automatisierung konzentriert, leitet keine 5G QoS-Mapping-Tabelle für TSN im Detail ab [5G21f].

In den Abschnitten 2.1.4 und 2.2.6 wurde bereits beschrieben, wie und mit welchen Parametern die QoS-Anforderungen in TSN- und 5G-Netzwerken realisiert werden. In Abschnitt 7.1 werden drei verschiedene Ansätze für das QoS-Mapping zwischen 5G und TSN erarbeitet. Die Ansätze werden in Abschnitt 7.2 miteinander verglichen und im Hinblick auf den Erfüllungsgrad der TSN-Datenverkehrsanforderungen durch das 5G-System bewertet. In Abschnitt 7.3 wird ein Lösungsvorschlag für ein künftig optimiertes Mapping aufgezeigt. Schließlich wird in Abschnitt 7.4 eine Schlussfolgerung aus den Ergebnissen im Hinblick auf ein gemeinsames QoS-Modell gezogen. Die Inhalte basieren auf den vorab publizierten Arbeiten [AU22] und [Am24].

Analog für DetNet existiert bereits eine Arbeit zum QoS-Mapping zwischen 5G und IP-Datenpaketen in [Ge20], welche einem 5QI einen DSCP-Wert aus dem IP-Header zuordnet und somit eine Grundlage für das Mapping in hybriden Netzwerken mit 5G und DetNet bildet. Darin werden nur standardisierte Dienste, primär Audio/Video, und 5QI- bzw. DSCP-Werte berücksichtigt.

### 7.1 Ansätze für ein QoS-Mapping zwischen 5G und TSN

In diesem Abschnitt werden drei Ansätze vorgestellt, wie das 5G QoS-Framework unter Berücksichtigung der TSN-Standards an das IIC-Datenverkehrsmodell angepasst werden kann. Zum besseren Verständnis wird davon ausgegangen, dass die in IEC/IEEE 60802 [I124] definierte Zuordnung von Priorität zu Datenverkehrsklasse für das Automatisierungsnetzwerk gegeben ist, d. h. das 5G-System fungiert als Ethernet-Bridge und unterstützt die empfohlenen acht Datenverkehrsklassen. Die unterschiedlichen Ansätze für das im Rahmen dieser Dissertation erarbeitete QoS-Mapping folgen den 3GPP-Spezifikationen und lassen sich nach steigender Komplexität klassifizieren:

1. statisches Mapping auf Basis standardisierter 5QIs,
2. statisches Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs
  - a) 1:1-Mapping mit je einem 5QI für eine der acht TSN-Datenverkehrsklassen
  - b) 1:n-Mapping mit 64 QoS-Flows für acht TSN-Datenverkehrsklassen sowie
3. Kombination aus dynamischem und statischem Mapping.

Im Allgemeinen erfordert ein sinnvolles QoS-Mapping, dass das 5G-System die TSN-Datenverkehrsklasse und deren QoS-Parameter, wie z. B. die Priorität, berücksichtigt. Deshalb werden für die Übersetzung der QoS-Parameter zwischen 5G und TSN die folgenden Grundregeln definiert:

- Die TSN-Datenverkehrsklassen 0-7 sind den drei 5G Resource Types Non-GBR, GBR und DC-GBR zugeordnet. Da ausschließlich DC-GBR stets das PDB erfüllt und in die PER zählt, werden TSN-Streams dem Resource Type DC-GBR zugeordnet.
- Die durch den PCP angegebene TSN-Priorität wird dem 5G Priority Level zugeordnet.
- Die TSN-Periodizität werden der Periodizität des 5G Time-Sensitive Communication Assistance Container zugeordnet, die aus der PSFP-Konfiguration (vgl. Abschnitt 2.1.3) abgeleitet werden kann, wie in 3GPP TS 23.501 [3G22b] angegeben.

- Die TSN-Datenübertragungsgarantie und Kritikalität werden kombiniert auf 5G PDB und PER abgebildet.
- Die Frame-Länge (einschließlich Ethernet-Header) wird zur Berechnung des 5G MDBV verwendet, wie in 3GPP TS 23.501 [3G22b] angegeben. Die Frame-Länge wird nicht direkt von der CNC vorgegeben, sondern kann aus der PSFP-Konfiguration abgeleitet werden. Liegt keine PSFP-Konfiguration vor, so sind die Extremwerte für die jeweiligen Datenverkehrstypen gemäß Tabelle 2.2 zu verwenden.

Das 5G-System kann QoS-Anforderungen für TSN-Datenverkehr von der CNC über die TSN AF empfangen. Die von der TSN AF vorkonfigurierte QoS-Mapping-Tabelle dient zur Identifizierung eines geeigneten 5G QoS-Profiles. Das 5G-System als Bridge erwartet an der TSN AF von der CNC für jeden TSN-Stream eine PSFP-Konfiguration, aus der die QoS-Parameter abgeleitet werden [3G22b]. Dies ist für isochrone und zyklisch synchrone Streams sinnvoll, nicht aber für zyklisch asynchrone Streams und Traffic-Engineered Non-Streams. Auf Grundlage der erhaltenen Informationen wählt das 5G-System ein geeignetes QoS-Profil für jeden TSN-Stream aus, um einen entsprechenden 5G QoS-Flow für die Übermittlung des TSN-Datenverkehrs zwischen den Eingangs- und Ausgangsports der 5G-Bridge einzurichten. Darüber hinaus ist es möglich, Paketfilter auf UE- und UPF-Seite zu verwenden, mit denen verschiedene TSN-Streams auf entsprechende 5G QoS-Flows abgebildet werden können [5G21b]. Die Paketfilter-Informationen werden von der Stream-Identifikation gemäß IEEE 802.1CB abgeleitet, die wiederum Teil der PSFP-Konfiguration ist.

Wenn PSFP nicht von der CNC bereitgestellt wird, verfügt die TSN AF nur über statische Filtereinträge. In diesem Fall kann das Mapping nur den PCP nach IEEE 802.1Q verwenden, der in jedem Frame des TSN-Streams enthalten ist. Verschiedene TSN-Datenverkehrsklassen müssen auch innerhalb des 5G-Systems entsprechend priorisiert werden.

Für sporadisch auftretenden Datenverkehr fehlen Informationen für das Averaging Window. Dieses hängt ab von der Gesamtzahl der Flows und deren Zeitbasis, d. h. von Netzwerk- und Anwendungszyklus. Das Averaging Window beschreibt ein sich wiederholendes Datenverkehrsmuster, so dass der mit 2.000 ms angegebene Standardwert selten geeignet ist. Dieser kann jedoch eingestellt werden, z. B. auf die *AdminCycleTime* der PSFP-Konfiguration. Falls diese nicht zur Verfügung steht, ist es möglich, die *AdminCycleTime* der Qbv-Konfiguration für die Datenverkehrsklassen 6 und 7 zu wählen und für die übrigen Klassen bei den Standardwerten zu belassen. Eine geeignete Dauer für das Averaging Window ist für eine nähere Untersuchung im Rahmen dieser Dissertation zu komplex und daher in den nachfolgenden Mapping-Tabellen exkludiert.

Da TSN in Kombination mit verschiedenen möglichen Einsatzszenarien für nicht-öffentliche 5G-Netzwerke [5G19e] eingesetzt werden kann, sind zwei Varianten zu berücksichtigen: PNI-NPNs sollen ausschließlich oder primär standardisierte 5QIs in Abstimmung mit dem MNO verwenden, während der Betreiber eines SNPN zusätzliche 5G QoS-Parameter frei definieren kann.

PNI-NPNs scheinen für die Anwendung des 5G Bridge-Modells ungeeignet, da TSN AF und CNC-Schnittstelle vertrauenswürdig sein müssen und das Transportnetz zwischen UPF und RAN besondere Maßnahmen erfordern kann, um die Anforderungen an das PDB des 5G-Core zu erfüllen. Deshalb ist es sehr kompliziert, die port- und datenverkehrsklassenspezifischen minimalen und maximalen Werte für die abhängigen und unabhängigen Verzögerungen abzuleiten. Zumindest standardisierte 5QIs sind für diesen Fall realistisch. In einem PNI-NPN ist unklar, ob der Endnutzer alle 5QIs für TSN-Datenverkehr nutzen darf oder ob dieser bereits vom MNO fest für andere Datenverkehrstypen reserviert ist. Diese Frage kann einen erheblichen Einfluss auf die Eignung des QoS-Mappings haben und stellt somit ein Risiko dar. Ein realistisches PNI-NPN-Szenario würde darin bestehen, nur das RAN

gemeinsam zu nutzen und einen Network Slice zu konfigurieren, welcher den Einsatz einer dedizierten UPF ermöglicht, welche wiederum als separate 5G-Bridge fungiert.

Die standardisierten 5QIs sind sowohl in öffentlichen als auch in nicht-öffentlichen Netzwerken verpflichtend. Damit haben sie die Rolle einer gemeinsamen Basis, um z. B. die Interoperabilität zwischen verschiedenen Netzwerken und Betreibermodellen sicherzustellen. Bei Bedarf kann der Betreiber zusätzliche 5QIs definieren. Auch wenn standardisierte 5QIs verwendet werden, erlaubt das 5G-System die Änderung der 5G QoS-Merkmale aller 5QIs, d. h. Priority Level, PDB, MDBV und Averaging Window [3G22b].

### 7.1.1 Statisches Mapping auf Basis standardisierter 5QIs

Dieser erste Ansatz verwendet diejenigen standardisierten 5QIs und deren QoS-Parameter, welche am besten zu den TSN-Datenverkehrstypen und -parametern nach IEC/IEEE 60802 [II24] passen. Hierbei wird jeder TSN-Datenverkehrsklasse nur ein einziger 5G QoS-Flows zugeordnet. Somit kann dieser Ansatz als „Minimalkonfiguration“ angesehen werden. Standardisierte 5QIs werden für bestimmte Anwendungsfälle spezifiziert, die in klassischen Mobilfunknetzwerken auftreten und daher nicht optimal für industrielle Anwendungen geeignet sind. Im schlimmsten Fall, z. B. bei isochronem Datenverkehr, ist es unmöglich, die Anforderungen überhaupt zu erfüllen. Die konkreten Parameterwerte für das QoS-Mapping leiten sich aus den folgenden Regeln ab:

- TSN-Streams mit strengen Echtzeit-Latenzanforderungen (d. h. die Datenverkehrsklassen 5-7) werden 5QIs mit DC-GBR (5QI 82-88) zugeordnet.
- Die verbleibenden (eher datenratenintensiven) TSN-Datenverkehrsklassen werden 5QIs vom Resource Type GBR zugeordnet. Da der Zweck von TSN darin besteht, jedem Datenverkehrstyp ausreichende Ressourcen zu garantieren, ist es auch von Vorteil, Datenverkehr vom Typ Best Effort High auf GBR abzubilden.
- Die Rangfolgen von 5G Priority Level und TSN-Priorität müssen übereinstimmen.
- Im Allgemeinen muss die Ende-zu-Ende-Latenz kleiner sein als die Periodizität eines Streams. Ausgehend von dieser Voraussetzung lässt sich für isochrone und zyklisch synchrone TSN-Streams ableiten, dass das 5G PDB an die TSN-Periodizität angepasst werden kann. Diese stark vereinfachte Annahme ist gültig, wenn der Pfad zwischen Talker und Listener (vgl. Abbildung 2.6) neben der 5G-Bridge nur eine geringe Anzahl von nativen TSN-Bridges enthält und wenn das 5G PDB  $\geq 1$  ms beträgt.
- Die maximale TSN-Frame-Länge entspricht dem 5G MDBV [Ma21].

Tabelle 7.1 zeigt einen Vorschlag zur Parameterzuordnung für TSN und 5G. Die Werte in Klammern stellen Alternativen mit einem höheren Priority Level (d. h. niedrigerer Priorität) in aufsteigender Reihenfolge dar, z. B. um eine Anpassung des Dienstes an aktuelle Performance-Bedingungen zu ermöglichen [5G21b], da drahtlose Netzwerke naturgemäß weniger zuverlässig sind als kabelgebundene Netzwerke.

Tabelle 7.1: 5G-TSN QoS-Mapping auf Basis standardisierter 5QIs (angepasst aus [AU22])

TSN-Datenverkehrs- klasse / Priorität	5QI	5G Resource Type	5G Priority Level	5G PDB [ms]	5G PER	5G MDBV [Byte]
7 / 6	86 (85)	DC-GBR	18 (21)	5 (5)	10 <sup>-5</sup> (10 <sup>-4</sup> )	1.354 (255)
6 / 5	82 (83)	DC-GBR	19 (22)	10 (10)	10 <sup>-4</sup> (10 <sup>-4</sup> )	255 (1.354)
5 / 4	84 (88)	DC-GBR	24 (25)	30 (10)	10 <sup>-5</sup> (10 <sup>-3</sup> )	1.354 (1.125)
4 / 7	65 (67)	GBR	7 (15)	75 (100)	10 <sup>-2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	n. a.
3 / 3	3 (2)	GBR	30 (40)	50 (150)	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-3</sup> )	n. a.
2 / 2	4 (71)	GBR	50 (56)	300 (150)	10 <sup>-6</sup> (10 <sup>-6</sup> )	n. a.
1 / 1	73 (72)	GBR	56 (56)	300 (300)	10 <sup>-8</sup> (10 <sup>-4</sup> )	n. a.
0 / 0	80 (7)	(Non-)GBR	68 (70)	10 (100)	10 <sup>-6</sup> (10 <sup>-3</sup> )	n. a.

Die Verwendung standardisierter 5QIs für industrielle Anwendungen entspricht in der Regel nicht den Parameterwerten des IIC-Datenverkehrsmodells aus Tabelle 2.2. Mehrere PDB- und PER-Werte liegen weit über den TSN-Anforderungen oder sind inkonsistent, z. B. ein PDB von 5 ms für isochronen Datenverkehr oder eine PER von 10<sup>-2</sup> für die Netzwerksteuerung. Die Datenverkehrsklasse 7 kann eine Frame-Länge von bis zu 100 Byte aufweisen, während bei einem 5QI von 86 das MDBV 1.354 Byte beträgt (d. h. Ressourcen werden verschwendet). Ein 5QI von 85 mit einem deutlich besser passenden MDBV von 255 Byte hätte eine niedrigere Priorität als die Datenverkehrsklasse 6. Die Default-Werte für MDBV und PDB können überschrieben werden, um die Ressourcenverwaltung im RAN zu optimieren und strengere Latenzanforderungen zu erfüllen. Das Überschreiben der Standardwerte ist jedoch auf maximal 64 verschiedene QoS-Flows beschränkt.

Tabelle 2.7 aus Abschnitt 2.2.6 mit standardisierten 5QIs aus 3GPP TS 23.501 listet nur Beispieldienste auf, z. B. für die diskrete Automatisierung 5QIs von 82 und 83. Für beide ist ein PDB von 10 ms spezifiziert, welches die geforderten Latenzen für isochrone Anwendungen deutlich übersteigt. Ethernet-Frames können eine Länge von bis zu 1.522 Byte einschließlich des Ethernet-Headers erreichen, was das MDBV von 1.354 Byte überschreitet. Das IIC-Datenverkehrsmodell für TSN [In19] begrenzt jedoch die Frame-Länge von Echtzeit-Streams auf maximal 1.000 Byte.

Im Allgemeinen ist dieser QoS-Mapping-Ansatz für die Datenverkehrsklassen 0-4 nützlich und für den Fall, dass die CNC keine PFSP-Informationen für die Klassen 6-7 bereitstellt. Andernfalls leitet die TSN AF die Informationen zur Berechnung des PDB gemäß den verfügbaren Konfigurationsinformationen ab, z. B. durch Bestimmung der minimalen und maximalen abhängigen und unabhängigen Verzögerungen pro Port-Paar und Datenverkehrsklasse.

## 7.1.2 Statisches Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs

5G erlaubt es, eigene QoS-Profile für die 5QIs 128-255 zu spezifizieren. Bei diesem Ansatz wird jeder TSN-Datenverkehrsklasse ein vorkonfigurierter 5QI zugewiesen und dessen QoS-Parametersatz spezifiziert, um eine präzisere Zuordnung zu erreichen, als es ein standardisierter 5QI zulässt. Die Herleitung entspricht methodisch der im vorherigen Abschnitt, geht aber von der TSN-Perspektive aus. Tabelle 7.2 enthält ein QoS-Mapping mit vorkonfigurierten 5QIs und deren QoS-Parametern. Alle Werte stellen Vorschläge dar, welche nicht durch bereits standardisierte 5QIs abgedeckt sind. Sie orientieren sich an den in IEC/IEEE 60802 [II24] angegebenen Extremwerten für TSN-Datenverkehr, d. h. an der minimalen Periodizität (bzw. 5G-Transferintervall) und der maximalen Frame-Länge (oder 5G MDBV) pro TSN-Datenverkehrsklasse.

Tabelle 7.2: 5G-TSN QoS-Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs (angepasst aus [AU22] und [AU23])

TSN-Datenverkehrsklasse / Priorität	5QI	5G Resource Type	5G Priority Level	5G PDB [ms]	5G PER	5G MDBV [Byte]
7 / 6	128	DC-GBR	2	0.3*	10 <sup>-6</sup>	100
6 / 5	129	DC-GBR	3	0.3*	10 <sup>-6</sup>	1.000
5 / 4	130	DC-GBR	4	0.3*	10 <sup>-5</sup>	1.000
4 / 7	131	GBR	1	30	10 <sup>-5</sup>	500
3 / 3	132	GBR	5	6	10 <sup>-4</sup>	1.500
2 / 2	133	GBR	6	n. a.	10 <sup>-4</sup>	1.500
1 / 1	134	GBR	7	n. a.	10 <sup>-3</sup>	1.500
0 / 0	135	(Non-) GBR	8	n. a.	10 <sup>-3</sup>	1.500

\* entsprechend dem minimalen Transferintervall von 0,5 ms für die drahtlose Bewegungssteuerung gemäß 3GPP TS 22.104 [3G21]

Dynamische 5QIs werden bereits unterstützt. Es ist fraglich, ob es notwendig ist, noch mehr 5QI zu standardisieren, was die Anzahl der dynamischen 5QIs verringert. Die Einschränkung besteht dann darin, dass eine PDU-Session nur 64 QFI-Werte unterscheiden kann, d. h. 63 und einen Best Effort QoS-Flow. Die Notwendigkeit einer Standardisierung dieser neuen Werte ist fraglich, da sie die Flexibilität des Konzepts zur Unterstützung einer Anpassung an andere spezifische Anwendungsfälle einschränkt. Darüber hinaus würde dies zu einer verringerten Anzahl verfügbarer 5QIs für die Bereitstellung anderer anwendungsfallspezifischer QoS-Zuordnungen führen. 255 5QIs scheinen ausreichend zu sein, da aufgrund der PCP-Begrenzung von 0-7 nur acht 5QIs ohne eine zusätzliche Identifizierung des Datenverkehrstyps differenziert werden können. Nur wenn zusätzliche Informationen, wie z. B. Quell- und Ziel-MAC-Adressen, bereitgestellt werden, können bis zu 64 QoS-Flows pro PDU-Session zugewiesen werden.

Da die 5G-Bridge nur einen Hop in einem größeren TSN-Netzwerk repräsentiert, kann das 5G PDB nicht als die maximal akzeptable Ende-zu-Ende-Latenz zwischen den Kommunikationspartnern der Automatisierungsanwendung interpretiert werden, sondern nur als die maximale Latenz innerhalb des 5G-Systems. In Bezug auf die PER quantifiziert das IIC-Datenverkehrsmodell für TSN keine Paketverlust-Toleranz [In19]. 3GPP TS 22.104 [3G21] bietet nur eine anwendungsfallspezifische Verfügbarkeit von Kommunikationsdiensten, z. B. für die Bewegungssteuerung, die nur für die Datenverkehrsklassen 6 und 7 gilt. Solange 3GPP keine niedrigeren PDB-Werte unterstützt, kann es akzeptabel sein, die minimale Periodizität für drahtlose Anwendungen auf etwa 0,8 ms zu erhöhen. Unabhängig von den Integrationsproblemen bietet dieser Ansatz eine höhere Flexibilität und damit eine deutliche Optimierung für die Anwendungsfälle der industriellen Automatisierung als die Zuordnung standardisierter 5QIs. Allerdings bietet der Ansatz lediglich Extremwert-Betrachtungen und führt daher zu einer Verschwendung von Netzwerkressourcen.

In Fabriken ist das wahrscheinlichste Szenario ein übergreifendes 5G-Netzwerk für das gesamte Fabrikgelände und mehrere separate TSN-Netzwerke pro Produktionszelle, Gruppe von Fertigungszellen oder, in maximaler Ausprägung, pro gesamter Produktionshalle. Dies erfordert jedoch eine differenziertere Priorisierung im 5G-System als nur acht Datenverkehrsklassen oder Prioritäten, da es nicht ausschließlich den TSN-Datenverkehr bedient. Darüber hinaus muss je nach Dimensionierung und Skalierbarkeit des Netzwerks eine Obergrenze existieren, ab der die Kapazität des 5G-Systems nicht mehr in der Lage ist, die QoS-Anforderungen und Parameterwerte zu erfüllen. Dieser Aspekt soll künftig näher erforscht werden.

### 7.1.3 Kombination aus dynamischem und statischem Mapping

3GPP verfolgt ausschließlich ein dynamisches Mapping, das für Scheduled TSN-Streams funktioniert, bei denen die CNC eine PSFP-Konfiguration liefert. Für alle Datenverkehrsklassen der anderen

Kategorien ist nur ein statisches Mapping anwendbar. Die Motivation dieses Ansatzes ist daher, das bestehende dynamische Mapping und die zuvor diskutierten statischen Ansätze mit dem Ziel einer erhöhten Ressourceneffizienz zu kombinieren. Abbildung 7.1 zeigt das Prinzip des kombinierten statischen und dynamischen QoS-Mappings. Die blauen Linien zwischen den TSN-Entitäten und den Translatoren DS-TT und NW-TT repräsentieren den Datenverkehr der acht TSN-Datenverkehrsklassen.

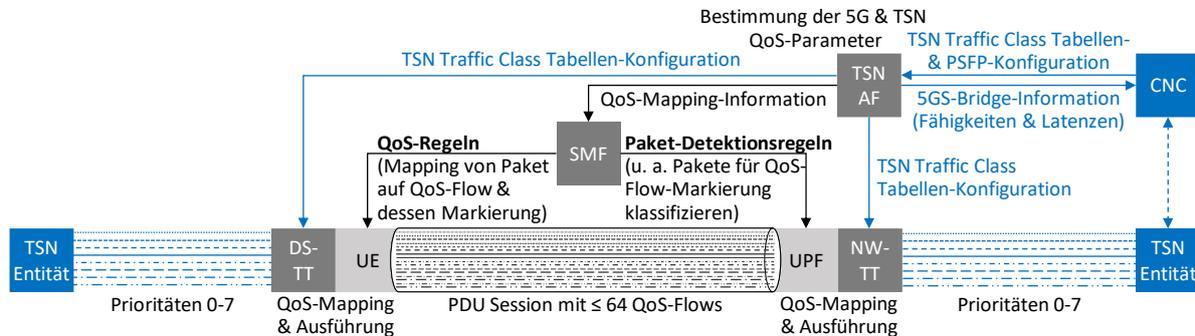


Abbildung 7.1: Dynamisches 5G-TSN QoS-Mapping (angelehnt an [Am24])

Die TSN AF liefert die Bridge-Fähigkeiten und -Verzögerungsinformationen an die CNC, welche wiederum die PSFP-Konfiguration für TSN-Streams gemäß Schedule bereitstellt. Auf diese Weise kann die TSN AF die Stream-spezifischen Informationen für das dynamische QoS-Mapping an die SMF ermitteln, vgl. Abbildung 2.19. Die SMF extrahiert die entsprechenden Informationen und informiert das UE, das nicht in Abbildung 7.1 dargestellte RAN und die UPF, wie in 3GPP TS 23.501 [3G22b] spezifiziert. Um den Datenverkehrsklassen Prioritäten zuzuordnen, leitet die TSN AF die Konfiguration der TSN-Datenverkehrsklassen-Tabelle, die von der CNC bereitgestellt wird, an den DS-TT und NW-TT weiter. UE und UPF ordnen den TSN-Datenverkehr (blau) dem entsprechenden 5G QoS-Flow (grau) zu.

Der kombinierte statische und dynamische Mapping-Ansatz ermöglicht es, für jeden Datenverkehrstyp die beste Option auszuwählen, um die Anforderungen in Bezug auf die QoS-Merkmale zu erfüllen, während er gleichzeitig die Komplexität im Vergleich zum ausschließlich dynamischen Ansatz begrenzt. Unter Berücksichtigung des IIC-Datenverkehrsmodells [In19], IEC/IEEE 60802 [II24] und IEEE 802.1Q [IE24d] kann für jeden Datenverkehrstyp individuell entschieden werden, ob die statische oder dynamische Zuordnung besser geeignet ist.

Zunächst können die vier in Tabelle 2.3 definierten Kategorien verwendet werden, um grob diejenigen Datenverkehrstypen zu identifizieren, die entweder besser zum statischen oder zum dynamischen Mapping-Ansatz passen. Gemäß IEEE 802.1Q [IE24d] und IEC/IEEE 60802 [II24] ist davon auszugehen, dass die CNC keine TSN-Konfigurationen für die Kategorien Traffic-Engineered Non-Stream und Non-Stream bereitstellt, d. h. die Datenverkehrsklassen 0-4 werden statisch einem 5G QoS-Flow zugeordnet, während zeitkritische Streams der Klassen 5-7 mit strengen QoS-Anforderungen dynamisch auf 5G QoS-Flows abgebildet werden.

Aufgrund der identifizierten Unterschiede zwischen IEC/IEEE 60802 [II24] und IIC [In19] kann es darüber hinaus sinnvoll sein, eine Überarbeitung des Ansatzes für die Datenverkehrstypen Alarme und Events (Datenverkehrsklasse 3), zyklisch synchron (Klasse 6) und zyklisch asynchron (Klasse 5) zu prüfen. Unter der Annahme, dass Alarme und Events unterschiedliche Endgeräte adressieren, können beide Datenverkehrstypen gemäß dem IIC-Datenverkehrsmodell in Tabelle 2.2 anhand der MAC-Adressen sowie VLAN-Tags unterschieden und individuelle 5QIs konfiguriert werden. Die TSN AF kann diese weiterführenden Informationen in QoS-Regeln für das UE und Paket-Detektionsregeln für die UPF übersetzen, um Alarme und Events separaten QoS-Flows zuzuweisen. Daher eignen sich sowohl Alarme als auch Events gut für den statischen Mapping-Ansatz. Im Gegensatz zu den Datenverkehrsklassen 1, 2 und 4 soll Klasse 3 also zwei vordefinierte 5QIs unterstützen.

Für zyklisch asynchronen Datenverkehr kann die CNC PSFP nicht entsprechend den Anforderungen des 5G-Systems konfigurieren. Ohne PSFP-Konfiguration kann kein dynamisches QoS-Profil abgeleitet werden. Eine dynamische Zuweisung von QoS-Merkmalen erfordert zusätzliche Erweiterungen, die Informationen zu MaxFrameSize, MaxFramesPerInterval, Interval sowie zur eindeutigen Stream-Identifikation gemäß IEEE 802.1Q [IE24d] bereitstellen. Daher ist der statische Mapping-Ansatz, der auf vorkonfigurierten 5QIs basiert, für die Datenverkehrsklasse 5 besser geeignet. Für zyklisch synchronen Datenverkehr kann die CNC PSFP auf die gleiche Weise konfigurieren wie für isochronen Datenverkehr, d. h. der dynamische Mapping-Ansatz eignet sich am besten. Tabelle 7.3 fasst die Ergebnisse für den kombinierten statischen und dynamischen Mapping-Ansatz zusammen und listet die identifizierten Optionen auf. Zu beachten gilt, dass Alarme und Events separat zugeordnet werden (kursiv dargestellt).

Tabelle 7.3: 5G-TSN QoS-Mapping mit dynamischen und statischen 5QIs (angelehnt an [Am24])

Datenverkehrsklasse / Priorität	Datenverkehrstyp	Datenverkehrs- kategorie	Mapping-Ansatz	5QI und QoS-Eigenschaften
7 / 6	Isochron	Scheduled Stream <sup>1</sup>	Dynamisch auf Basis von Stream-Identifikation in PSFP	Individuell pro TSN-Stream auf Basis von PSFP-Konfiguration
6 / 5	Zyklisch synchron			
5 / 4	Zyklisch asynchron	Stream <sup>2</sup>	Statisch auf Basis von PCP	5QI = 130 (siehe Tabelle 7.2)
4 / 7	Netzwerk-steuerung	Traffic-Engineered	Statisch auf Basis von PCP	5QI = 131 (siehe Tabelle 7.2)
3 / 3	<i>Events</i>	Non-Stream	<i>Statisch auf Basis von MAC- Adresse und VLAN-Tag</i>	<i>5QI = 136<sup>3</sup></i>
	<i>Alarme</i>			<i>5QI = 137<sup>4</sup></i>
2 / 2	Konfiguration & Diagnose		Statisch auf Basis von PCP	5QI = 133 (siehe Tabelle 7.2)
1 / 1	Best Effort High	Non-Stream	Statisch auf Basis von PCP	5QI = 134 (siehe Tabelle 7.2)
0 / 0	Best Effort Low			5QI = 135 (siehe Tabelle 7.2)

<sup>1</sup> CNC liefert PSFP-Konfiguration      <sup>3</sup> GBR; Priority Level = 5; PDB = 6 ms; PER = 10<sup>-5</sup>; MDBV = 200 Byte  
<sup>2</sup> ohne PSFP-Konfiguration      <sup>4</sup> GBR; Priority Level = 5; PDB = 500 ms; PER = 10<sup>-4</sup>; MDBV = 1.500 Byte

Der kombinierte Mapping-Ansatz mit statischen und dynamischen Anteilen deckt sich mit den Parametern des IIC-Datenverkehrsmodells aus Tabelle 2.2. Er bietet eine wesentlich höhere Flexibilität als die beiden rein statischen Ansätze. Darüber hinaus bietet er für das 5G-TSN-Ökosystem die beste Balance zwischen der Komplexität eines vollständig dynamischen Ansatzes und den Kompromissen des statischen Ansatzes mit vorkonfigurierten 5QIs. Die semi-statische Zuordnung auf einzelne vorkonfigurierte 5QIs für die Datenverkehrstypen Alarme und Events entspricht dem IIC-Datenverkehrsmodell [In19], ohne die Zuordnung von Datenverkehrstyp, -klasse und Priorität nach IEC/IEEE 60802 [I124] zu verletzen.

Unabhängig von allen oben diskutierten Konfigurationsszenarien bleibt die Frage offen, wie das 5G-System die benötigten Informationen für den TSN-Datenverkehr der Kategorie Non-Stream erhält. Die folgenden Ansätze kommen zur Lösung dieses Problems in Betracht:

1. Anpassung der Anwendung,
2. Verwendung mehrerer MAC-Adressen pro Gerät für eine feinere QoS-Differenzierung,
3. Anpassung der Netzwerkinfrastruktur oder
4. Aggregation mehrerer Datenverkehrsklassen zu einem einzigen 5G QoS-Flow.

Nach Ansatz 1 könnte die Anwendung angepasst werden, indem entweder Frames mit einheitlichen Anforderungen pro Datenverkehrsklasse gesendet werden oder detaillierte Anforderungen über eine zusätzliche, neu zu definierende Expositionsschnittstelle an das 5G-System gemeldet werden.

Ansatz 2 ist fragwürdig, da 5G nur als Übertragungsmedium dienen soll, ohne direkten Einfluss auf die Gestaltung von Anwendungen und Geräten zu nehmen.

Nach Ansatz 3 könnte die Netzwerkinfrastruktur angepasst und stärker segmentiert werden. Da der PCP als Teil des VLAN-Tags im Ethernet-Frame keine weiteren Informationen über Frame-Länge, Periodizität oder Latenzanforderungen liefert, könnten native TSN-Bridges Frame-Eigenschaften analysieren und spezifische VLANs für bestimmte Wertebereiche konfigurieren. Innerhalb des 5G-Systems könnten unterschiedliche Portnummern verwendet werden.

Gemäß Ansatz 4 und IEEE 802.1Q [IE22] kann die TSN Gate Control List Gates für mehrere Datenverkehrsklassen mit niedriger Priorität gleichzeitig öffnen, d. h. Frames verschiedener Klassen können zu einem einzigen 5G QoS-Flow mit kumulierter Periodizität und MDBV aggregiert werden.

## 7.2 Vergleich und Bewertung der Mapping-Ansätze

In diesem Abschnitt werden die bisher vorgestellten Mapping-Ansätze verglichen und ihre Eignung im Hinblick auf die Erfüllung der Referenzanforderungen für TSN-Datenverkehr aus dem IIC-Datenverkehrsmodell bewertet. Da die absolute Performance von der spezifischen Implementierung abhängt, scheint es besser, die Mapping-Ansätze in Relation und qualitativ zu vergleichen. Tabelle 7.4 enthält die Wertebereiche der Parameter Priorität, Periodizität/PDB und Frame-Länge für den Referenzfall sowie die drei Mapping-Ansätze. Weiterhin ist eine Bewertung der Ansätze nach dem Erfüllungsgrad angegeben, wobei R für den Referenzwert steht, (-) schlechter als R, (0) gleichwertig zu R und (+) besser als R zu verstehen ist. Eine rein quantitative Bewertung ist aufgrund der heterogenen Eigenschaften der Parameter und QoS-Merkmale nicht möglich.

Tabelle 7.4: Vergleich und Bewertung der QoS-Mapping-Ansätze (angelehnt an [Am24])

QoS Mapping-Ansatz	TSN Priorität / 5G Priority Level		TSN Periodizität / 5G PDB		TSN Frame-Länge / 5G MDBV		Gesamt- bewertung
	Wertebereich bzw. Mengen	Bewertung	Wertebereich bzw. Mengen	Bewertung	Wertebereich bzw. Mengen	Bewertung	
TSN-Referenz gemäß IIC	[0; 7]	R	[0,1; 2.000] oder n. a.	R	[30; 1.500]	R	R
<b>1) Statisch standardisiert</b> (Abschnitt 7.3.1)	7-68 mit Ausnahmen	-	5-300 mit Ausnahmen	--	{255; 1.354} oder n. a.	--	--
<b>2) Statisch vorkonfiguriert</b> (Abschnitt 7.3.2)	[1; 8]	0	{0,3; 6; 30} oder n. a.	+	{100; 500; 1.000; 1.500}	-	0
<b>3) Dynamisch und statisch komb.</b> (Abschnitt 7.3.3)	[1; 8] individuelle Streams	+	{0; 500} individuelle Streams	++	{0; 1.500} individuelle Streams	+	+

In Bezug auf die Priorität ist die relative Reihenfolge bei Ansatz 1 im Allgemeinen korrekt. Innerhalb des großen Wertebereichs können jedoch Zwischenprioritätswerte, die für Nicht-TSN-Datenverkehr konfiguriert wurden, negative Auswirkungen auf die Performance von kritischem TSN-Datenverkehr haben. Ansatz 2 basiert vollständig auf den Referenzwerten und kann daher als nahezu gleichwertig angesehen werden. Ansatz 3 kann die Referenz sogar übertreffen, da die Datenverkehrsklassen 6 und 7 für jeden TSN-Stream individuell und präzise abgebildet werden.

Unter der Annahme, dass  $5G\ PDB \leq TSN\ Periodizität$  gilt, liegen die minimalen PDB-Werte bei Ansatz 1 für Datenverkehrsklasse 6 bis zu zwanzigmal höher als die geforderten Periodizitätswerte im Referenzfall. Ansatz 2 berücksichtigt nur das 5G-System für das PDB und kann daher theoretisch genauer sein als die Referenz, welche Ende zu Ende innerhalb eines TSN-Netzwerks mit mehreren

Hops gilt. Das Stream-individuelle Mapping bei Ansatz 3 kann die Latenz für zeitkritischen TSN-Datenverkehr minimieren, was zu einer besseren Performance als im Referenzfall führt.

In Bezug auf die Frame-Länge gibt Ansatz 1 nur wenige MDBV-Werte vor, welche grundsätzlich nicht mit den Referenzwerten übereinstimmen. Ansatz 2 berücksichtigt die Maximalwerte pro Datenverkehrsklasse, was in einigen Fällen zu einer suboptimalen Ressourcen-Bereitstellung führen kann. Hier bietet Ansatz 3 auch im Vergleich zum Referenzfall Vorteile, da er weiterhin zwischen Alarmen und Events differenziert und Stream-individuelle QoS-Merkmale sicherstellt.

Insgesamt kann Ansatz 1 die Referenzanforderungen gemäß IIC-Datenverkehrsmodell nicht erfüllen und das Mapping ist als inadäquat zu bewerten. Ansatz 2 kommt den Referenzwerten deutlich näher und erfüllt die Anforderungen weitgehend. Ansatz 3 erlaubt eine noch feinere Differenzierung und bietet damit eine bessere Flexibilität sowie eine effektivere Ressourcennutzung des Funksystems.

### 7.3 Künftige Erweiterung für den kombinierten Mapping-Ansatz

Die folgende Konfiguration stellt eine mögliche Erweiterung des kombinierten dynamischen und statischen Mapping-Ansatzes dar, wenn mehrere 5G QoS-Flows nicht nur für die Datenverkehrsklassen 3, 6 und 7 zulässig sind, wie im vorherigen Abschnitt vorgestellt. Bei diesem mathematischen Ansatz handelt es sich um eine gewichtete Zuordnung der insgesamt 64 QoS-Flows auf die bis zu acht TSN-Datenverkehrsklassen und damit um eine „Maximalkonfiguration“. Die Motivation für diese Erweiterung ist eine verbesserte und gerechte Verteilung der bis zu 64 verfügbaren QoS-Flows pro PDU-Session auf alle Datenverkehrsklassen entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften und Anforderungen. Aufgrund fehlender Mechanismen zum Erhalt detaillierter Frame-Informationen für Datenverkehrsklassen der Kategorie Non-Stream kann eine solche feingranulare Zuordnung jedoch noch nicht implementiert werden. Das primäre Ziel der Erweiterung besteht darin, Komplexität zu begrenzen, welche entsteht, wenn zusätzliche QoS-Flows flexibel auf die TSN-Datenverkehrsklassen und -Prioritäten abgebildet werden müssen. Basierend auf den Wertebereichen der Parameter aus dem IIC-Datenverkehrsmodell werden bis zu 64 vorkonfigurierte 5QIs und ihre entsprechenden QoS-Profile für den statischen Mapping-Ansatz spezifiziert, um trotz der statischen Zuordnung eine gewisse Flexibilität erreichen zu können. Die Verwendung einer separaten PDU-Session pro Datenverkehrstyp bzw. -klasse könnte eine Alternative sein. Diese steht aber ebenfalls vor der Herausforderung, dass Informationen für eine konkrete Zuordnung der Frames zu den einzelnen PDU-Sessions fehlen und wird daher hier nicht weiter untersucht.

Für eine gerechte Verteilung einer bestimmten Anzahl von QoS-Flows auf die einzelnen Datenverkehrsklassen ist es sinnvoll, die Wertebereiche der QoS-Parameter genauer zu untersuchen und entsprechend zu gewichten. Der Ansatz basiert auf dem Konzept der Balanced Scorecard, einem Framework für die Planung und Messung von Zielwerten unter Berücksichtigung verschiedener Perspektiven und ihrer Gewichtung, in diesem Fall Priorität, Periodizität, Frame-Länge und PDB, wie in Tabelle 7.5 dargestellt. Die TSN-nativen Prioritäten werden in 5G-angepasste Werte  $\geq 1$  umgewandelt, so dass auch Best Effort Low eine bestimmte Gewichtung erhält, und ihre Summe (36) wird auf 1 normiert (mit dem Faktor  $1/36 = 0,0278$ ). Die Punktzahl wird durch Multiplikation des Gewichtungs- bzw. Prioritätswertes mit dem Faktor berechnet (z. B.  $7 \times 0,0278 = 0,194$ ). Die Punktzahlen für die Periodizität und die Frame-Länge ergeben sich aus der Differenz zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert und folgen derselben Logik wie für die Priorität. Die Werte sind ebenfalls an 5G angepasst, d. h. eine minimale Periodizität der Datenverkehrsklasse 7 von 0,5 ms und eine minimale Frame-Länge von 64 Byte bzw. eine maximale von 1.522 Byte. Für das PDB wird die qualitativ angegebene Kritikalität (hoch, mittel, niedrig) durch numerische Werte quantifiziert, welche als Input für die Punktzahl-Berechnung dienen. Die Gesamtbewertung basiert auf den Mittelwerten

der vier vorangegangenen Einzelbewertungen und ergibt somit den relativen Anteil  $\mu$  bzw. die absolute Anzahl der QoS-Flows für jede Datenverkehrsklasse. Ein Nachteil des Konzepts ist die subjektive Gewichtung aufgrund der Bewertungen von Priorität und Kritikalität im PDB. Im Rahmen weiterer Forschung sollte eine geeignete objektive Lösung entwickelt werden.

Tabelle 7.5: Kalkulation zur gerechten Verteilung von QoS-Flows pro Datenverkehrsklasse (angelehnt an [Am24])

TSN-nativ	Priorität		Periodizität				Frame-Länge				PDB		Gesamtpunktzahl	
	5G-angepasst	Punktzahl	Minimum	Maximum	Differenz	Punktzahl	Minimum	Maximum	Differenz	Punktzahl	Kritikalität	Punktzahl	Mittelwert	QoS-Flows
7	7	0,194	0,5	2	1,5	0,001	64	100	36	0,006	100	0,47	0,167	12
6	6	0,167	0,5	20	19,5	0,019	64	1.000	936	0,158	70	0,33	0,167	11
5	5	0,139	10	50	40	0,040	100	200	100	0,017	30	0,14	0,084	5
4	8	0,222	50	1.000	950	0,940	64	500	436	0,073	4	0,02	0,313	20
3	4	0,111	2.000	2.000	0	0	100	1.522	1.422	0,240	5	0,02	0,094	6
2	3	0,083	n. a.	n. a.	0	0	500	1.522	1.022	0,172	3	0,01	0,067	4
1	2	0,056	n. a.	n. a.	0	0	1.000	1.522	522	0,088	2	0,01	0,038	2
0	1	0,028	n. a.	n. a.	0	0	64	1.522	1.458	0,246	1	0,00	0,070	4
$\Sigma$	36	1			1.011	1			5.932	1	215	1	1	64
Faktor		$\frac{1}{36}$				$\frac{1}{1011}$				$\frac{1}{5932}$		$\frac{1}{215}$		

Wiederum eine andere Verteilung ergibt sich durch einen grafischen Ansatz, bei dem die Datenverkehrsklassen in Intervalle der Periodizität und Frame-Länge eingeteilt werden, angelehnt an [AEN16] und [In01]. Abbildung 7.2 zeigt das entsprechende Diagramm, in dem die Periodizität horizontal und die Frame-Länge vertikal aufgetragen ist. Das graue Dreieck verdeutlicht die Annahme, dass große Frames seltener auftreten. Die Ausnahme bilden performante Video-Streams der Datenverkehrsklasse 1, für die ein QoS-Flow mit 32 ms und 1.522 Byte veranschlagt wird. An mehreren Punkten überschneiden sich die Wertebereiche der Parameter von Datenverkehrsklassen, sodass die Zuordnung von 5G QoS-Flow auf TSN-Datenverkehrsklasse nicht eindeutig ist. Zu beachten ist, dass dieser grafische Ansatz nur aus Applikationssicht gilt. Aus Netzwerksicht können mehrere Streams verschiedener Applikationen aggregiert und über denselben 5G QoS-Flow übertragen werden.

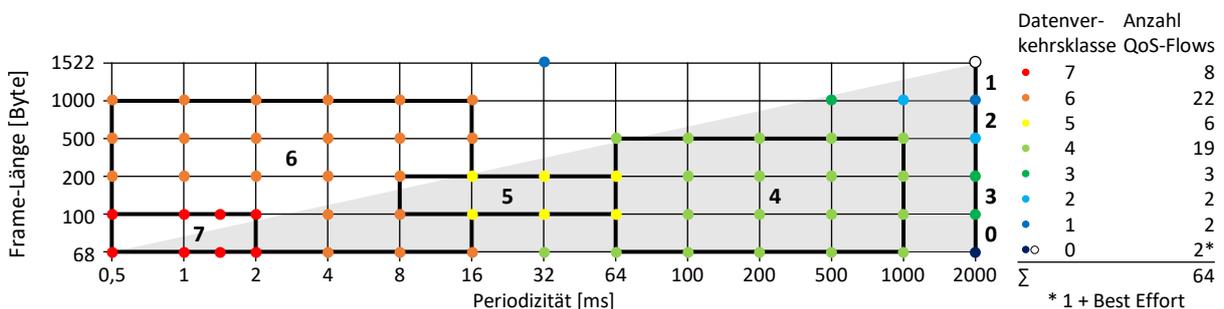


Abbildung 7.2: Schematische Zuordnung der 64 QoS-Flows auf die Datenverkehrseigenschaften

Tabelle 7.6 ordnet die bis zu 64 möglichen QoS-Flows den Eigenschaften des TSN-Datenverkehrs zu und übersetzt somit das Diagramm aus Abbildung 7.2 in konkrete 5QIs einschließlich zugehöriger QoS-Parameter.

# Entwicklung eines Datenverkehrskonzepts für 5G und TSN

Tabelle 7.6: Tabellarische Zuordnung der 64 QoS-Flows auf die TSN-Eigenschaften

TSN-Datenver-kehrsklasse	5QI	Resource Type	Priority Level	PDB [ms]	MDBV [Byte]			
7	128	DC-GBR	7	0,5	68			
	129			0,5	100			
	130			1	68			
	131			1	100			
	132			1,5	68			
	133			1,5	100			
	134			2	68			
	135			2	100			
6	136	DC-GBR	6	0,5	200			
	137			0,5	500			
	138			0,5	1.000			
	139			1	200			
	140			1	500			
	141			1	1.000			
	142			2	200			
	143			2	500			
	144			2	1.000			
	145			4	68			
	146			4	100			
	147			4	200			
	148			4	500			
	149			4	1.000			
5	158	DC-GBR	5	16	100			
	159			16	200			
	160			32	100			
	161			32	200			
	162			64	100			
	163			64	200			
	4			164	GBR	8	32	68
				165			64	68
				166			64	500
				167			100	68
				168			100	100
169		100	200					
170		100	500					
171		200	68					
172		200	100					
173		200	200					
174		200	500					
175		500	68					
176		500	100					
177		500	200					
178		500	500					
179		1.000	68					
180		1.000	100					
181		1.000	200					
182		1.000	500					
3	183	GBR	4	500	1.000			
	184			2.000	100			
	185			2.000	200			
2	186	GBR	3	1.000	1.000			
	187			2.000	500			
1	188	GBR	2	32	1.522			
	189			2.000	1.000			
0	190	Non-GBR	1	2.000	68			
	191			2.000	1.522			

## 7.4 Fazit des Datenverkehrskonzepts

Mehrere neuartige Lösungen für ein QoS-Mapping zwischen 5G und TSN wurden hergeleitet und diskutiert. Drei verschiedene Ansätze wurden systematisch untersucht:

1. statisches Mapping auf Basis standardisierter 5QIs,
2. statisches Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs sowie
3. Kombination aus dynamischem und statischem Mapping.

Die QoS-Parameter der TSN-Datenverkehrsklassen gemäß IEC/IEEE 60802 wurden analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die standardisierten 5QIs nur bedingt für die strengen TSN QoS-Anforderungen geeignet sind und motivieren zur Definition neuer 5QIs. Standardisierte 5QIs können die Anforderungen von TSN-Datenverkehr kaum erfüllen. Die Vorkonfiguration von 5QIs entsprechend den TSN-Anforderungen aus dem IIC-Datenverkehrsmodell ist ein wesentlich besserer Ansatz mit wenig Konfigurationsaufwand, der aufgrund der Extremwert-Betrachtung jedoch Netzwerkressourcen verschwendet. Der dritte Ansatz stellt die bestmögliche Lösung auf Basis der existierenden Standardisierung in 3GPP und IEEE 802.1Q dar. Dieser nutzt bis zu 64 QoS-Flows in 5G und zeigt, wie diese flexibel den TSN-Datenverkehrsklassen zugewiesen werden. Obwohl der Ansatz auf der Annahme basiert, dass TSN acht Datenverkehrsklassen unterstützt, kann das Konzept an eine beliebige Anzahl von Klassen angepasst werden, z. B. vier oder zwei.

Eine Erweiterung der Konfiguration für die Kombination aus statischem und dynamischem Mapping-Ansatz bietet eine vielversprechende Möglichkeit, die Flexibilität und Ressourceneffizienz bei der Integration von 5G in TSN zu optimieren. Dieser Ansatz befindet sich jedoch noch in der Entwicklung und erfordert weitere Forschung.

Als Beitrag zu Forschungsfrage 3 lässt sich festhalten, dass verschiedene Ansätze für ein ganzheitliches Datenverkehrskonzept in Form von Tabellen für das QoS-Mapping zwischen 5G und TSN, auf Basis des IIC-Datenverkehrsmodells entwickelt und diskutiert wurden. Die Ansätze unterscheiden sich in ihrer Komplexität und Flexibilität. Letztendlich liegt die Entscheidung für die Auswahl einer bestimmten Lösungsvariante beim Betreiber bzw. Anwender. Im nächsten Schritt soll die Anwendbarkeit des entwickelten Datenverkehrskonzepts validiert werden.

## 8 Validierung des entwickelten Datenverkehrskonzepts

Dieses Kapitel enthält drei unterschiedliche Ansätze zur Validierung des Datenverkehrskonzepts. Abschnitt 8.1 umfasst Messungen in Laborversuchen, Abschnitt 8.2 analytische Berechnungen und Abschnitt 8.3 Simulationen. Diese Reihenfolge weicht von der üblichen Vorgehensweise ab, bei der zunächst theoretisch berechnet, dann simuliert und abschließend in einer realen Implementierung getestet wird. Im Fokus dieser Dissertation steht die reale Implementierung, die der Aufnahme eines Ist-Zustands dient. Da die Laborversuche zeigen, dass notwendige 5G- und TSN-Funktionalitäten nur sehr begrenzt verfügbar sind, wird darauf aufbauend ein theoretischer Soll- bzw. Idealzustand berechnet und schließlich ein Teilumfang mittels Simulationen validiert. Die Abschnitte zu jedem der drei Ansätze sind ähnlich strukturiert und erläutern jeweils die grundsätzliche Methodik, die Testumgebung, Ergebnisse und deren Diskussion sowie ein Zwischenfazit pro Ansatz. Die Begriffe Latenz, Verzögerung und Übertragungszeit werden synonym verwendet. Das Kapitel schließt mit einer Beurteilung der Integrationsfähigkeit von 5G in TSN in Abschnitt 8.4.

### 8.1 Messungen in Laborversuchen

Ziel der Laborversuche ist es, Einblicke in die Interoperabilität und Integrationsfähigkeit verschiedener Kommunikationsstandards zu erhalten und deren Performance mit Fokus auf deterministisches Verhalten zu bewerten. Dabei werden PROFINET als etablierter Standard, OPC UA als sich ausbreitender Standard sowie TSN und 5G als künftige Standards untersucht. Einerseits sind die gegenwärtige Umsetzbarkeit sowie die Anbindung und konkrete Konfiguration der einzelnen Komponenten und Parameter zur Erreichung einer optimalen Performance des Testsystems zu klären. Optimale Performance bedeutet im Rahmen dieser Dissertation minimale Latenz und Jitter bei maximaler Zuverlässigkeit. Außerdem sollen Lücken realer Implementierungen identifiziert und erläutert werden, welche durch künftige Entwicklungen geschlossen werden müssen.

Der Beitrag dieses Abschnitts zur Forschung besteht darin, Performance-Ergebnisse für alle vier Standards in Kombination und Implikationen für ihre Interoperabilität bzw. Integrationsfähigkeit zu liefern, wohingegen frühere Arbeiten lediglich zwei der genannten Standards kombiniert haben. Die Ansätze in diesem Abschnitt und verwandter Arbeiten zur Performance-Analyse (vgl. Abschnitt 3.4.1) sind ähnlich und zielen ebenfalls auf die Messung und Optimierung von Latenz, Jitter und Zuverlässigkeit des zeitkritischen Datenverkehrs ab.

Im Kontext von Performance-Tests sind das Testsystem und das System unter Test (SUT) zu unterscheiden. Das universelle Testsystemkonzept beschreibt eine Konfiguration, die für alle Performance-Tests in der industriellen Automatisierung gilt. Dieses Konzept lässt sich auf unterschiedliche SUTs anwenden, z. B. ein drahtloses Gerät oder Kommunikationssystem (d. h. alle für die drahtlose Kommunikation erforderlichen Komponenten) und eine logische Verbindung. Die Schlüsselemente eines SUT und dessen Zusammenwirkung mit dem Testsystem werden beschrieben, um zu prüfen, wie festgelegte Performance-Parameter zu testen sind [5G21d]. Abbildung 8.1 stellt den Zusammenhang der beiden Systeme schematisch dar.

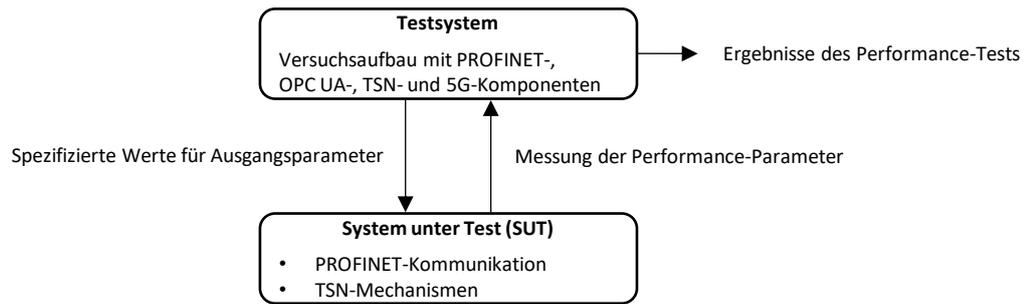


Abbildung 8.1: Performance-Testkonzept mit Testsystem und System unter Test (angelehnt an [5G21d])

Mit einem Testsystem bestehend aus PROFINET-, OPC UA-, TSN- und 5G-Komponenten werden Messungen in einer industriellen Laborumgebung durchgeführt, um die Interoperabilität bzw. Integrationsfähigkeit und kombinierte Performance der Kommunikation über die genannten Standards zu bewerten. Abbildung 8.2 zeigt das Testsystem schematisch und führt die Einflussgrößen der einzelnen Kommunikationsstandards auf. Das 5G-System ist in diesem Abschnitt stets in rot, die TSN-Bridges in blau, PROFINET in grün und OPC UA in grau dargestellt. Die Berücksichtigung dieser vier Technologien kann wie folgt begründet werden: PROFINET wird bislang und voraussichtlich auch in Zukunft für die Übertragung zeitkritischer Steuerungsdaten eingesetzt. Zusätzliche, nicht zeitkritische Daten zur Zustandsüberwachung und vorausschauenden Wartung kommunizieren über OPC UA. TSN bietet skalierbare deterministische Mechanismen sowohl für zeitkritischen als auch für weniger kritischen Datenverkehr. 5G ermöglicht eine drahtlose Konnektivität und Mobilität als performante Alternative zu WLAN.

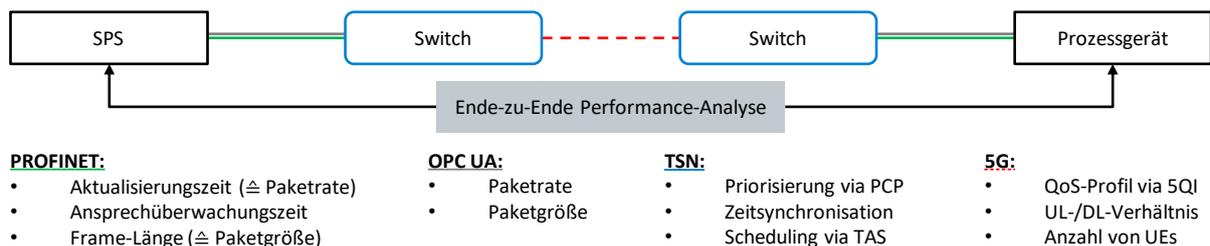


Abbildung 8.2: Testsystem zur Integrations- und Performance-Analyse inkl. Einflussparameter

Die Anbindung der Endgeräte an das 5G-System sowie die Einflussgrößen für die Performance werden variiert und die Komplexität des Versuchsaufbaus in verschiedenen Szenarien erhöht. Die Messgrößen entsprechen den QoS-Eigenschaften von Anwendungen mit zeitkritischem Datenverkehr. Darunter fallen Ende-zu-Ende-Latenz, Jitter und Zuverlässigkeit der Datenübertragung zwischen den Automatisierungsgeräten. Ein möglicher Anwendungsfall ist die FTS-Bewegungssteuerung (vgl. Abschnitt 5.1), die eine Ende-zu-Ende-Latenz von  $< 4$  ms, einen Jitter im Bereich von Mikrosekunden und eine Zuverlässigkeit von  $> 99,9999$  % erfordern kann [3G21]. Zwei aufeinanderfolgende Pakete können verloren gehen, was einem Watchdog-Faktor von drei entspricht.

### 8.1.1 Versuchsaufbau und -planung

#### Versuchsaufbau

Der FTS-Anwendungsfall kann durch zwei in diesem Abschnitt vorgestellte Versuchsaufbauten realisiert werden. Der Versuchsaufbau besteht aus folgenden Komponenten: Für die Applikationsendgeräte dient die SPS *Siemens SIMATIC S7-1500* als PROFINET IO-Controller und stellt einen OPC UA-Server zur Verfügung. Auf der anderen Seite repräsentiert die *Siemens Simulation Unit PN* insgesamt 20 PROFINET IO-Devices. *NodeRed* auf einem *Raspberry Pi Model 4B* dient als OPC UA-Client. Die TSN-Bridges *Hirschmann RSPE35* unterstützen die TSN-Mechanismen IEEE 802.1AS und

Qbv. Zwei *ProfiTap ProfiSharks* eingesetzt, um die PROFINET- und PTP-Frames sowie die TCP/IP-Pakete für OPC UA an beiden Enden zu erfassen. Diese sind mit zwei Schnittstellen eines *Siemens FieldPG* verbunden, auf dem Wireshark läuft, um die Messwerte zu bestimmen.

Die Messungen werden in einem 5G Standalone-Campusnetz gemäß 3GPP Release 15 von Nokia bei 3,7-3,8 GHz (Frequenzband n78) durchgeführt. Das 5G-System ist in die IT-Netzwerkinfrastruktur von Volkswagen integriert, d. h. außerhalb des 5G-Systems wird produktiv genutzter Datenverkehr übertragen, welcher nicht ohne Weiteres abgeschaltet werden kann und somit die Performance des SUT beeinträchtigen kann. Um Layer 2-Datenverkehr über 5G übertragen zu können, müssen die 5G-Komponenten einen VXLAN-Tunnel aufbauen.

In Bezug auf die Anbindung an das 5G-System werden zwei verschiedene Varianten unterschieden, welche in Abbildung 8.3 dargestellt sind:

1. UE zu UE über zwei 5G-Links (links) und
2. Tunnel-Gateway zum UE über einen einzigen 5G-Link (rechts).

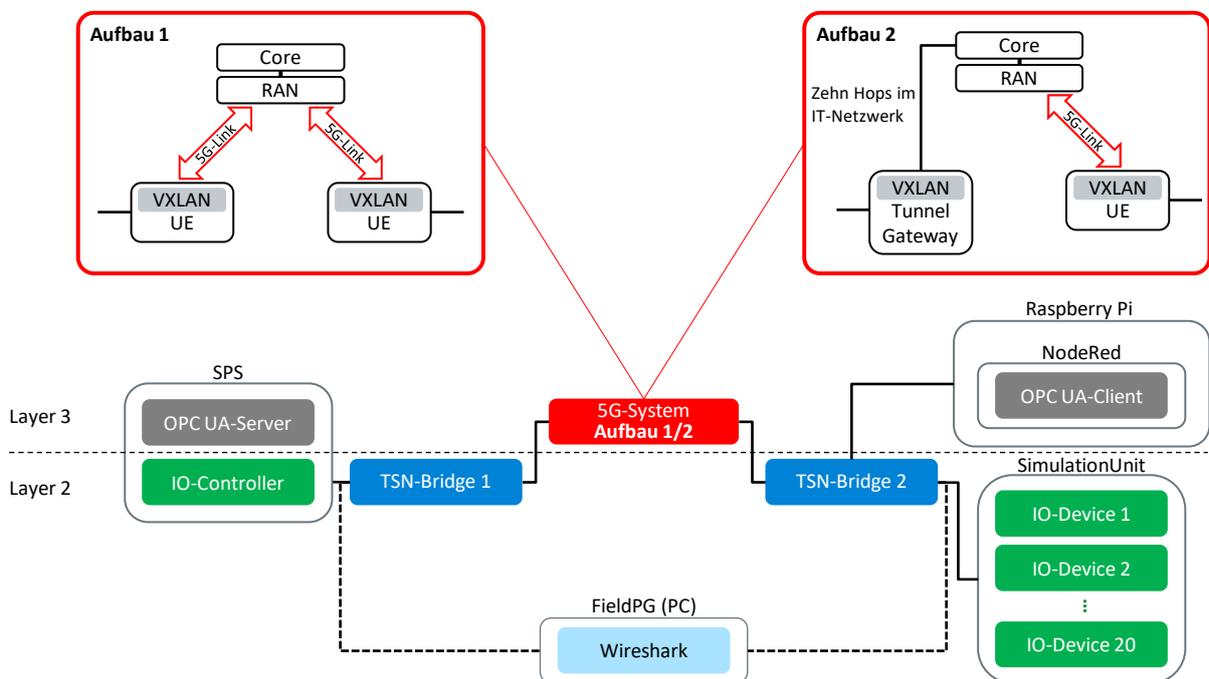


Abbildung 8.3: Versuchsaufbau mit zwei Varianten der 5G-Anbindung

In Aufbau 1 kommen zwei *NetModule NB1800 5G Industrial Router* mit VXLAN-Tunnel zum Einsatz. Der Abstand beider UEs zur RU beträgt ca. 5 m. Der Zweck von Aufbau 1 ist eine maximale Flexibilität durch die mobile Anbindung von Endgeräten verteilter Anwendungen. Die Kommunikation ist vom kabelgebundenen IT-Netzwerk isoliert, was die 5G-Integration für OT-Anwendungen erleichtert.

Aufbau 2 berücksichtigt den Fakt, dass drahtlose Kommunikation normalerweise weniger performant als die kabelgebundene ist. Deshalb sollte die Anzahl drahtloser Verbindungen minimiert werden, wenn eine Integration in die kabelgebundene Infrastruktur gegeben ist. Stationäre Komponenten in der Anlage, z. B. SPS, benötigen keine drahtlose Verbindung und können daher in die bestehende kabelgebundene Netzwerkinfrastruktur integriert werden. Zu diesem Zweck verwendet Aufbau 2 die *HMS Cellular Bridge* als UE und das *HMS Industrial Ethernet Tunnel Gateway*, die einen VXLAN-Tunnel aufbauen.

### Versuchsplanung

Relevante Parameter, welche die Latenz beeinflussen, sind die Paketrage und die Paketgröße [Ri21]. In PROFINET wird die Paketrage durch den Parameter Aktualisierungszeit bestimmt. Die Paketgröße

(Layer 3) entspricht der Frame-Länge (Layer 2). In den Versuchen werden PROFINET-Frames mit einer Länge von 68 Byte übertragen, in denen die SPS zyklisch die Ein- und Ausgänge der Simulation Unit abfragt. Diese Frame-Länge resultiert aus der Summe der Mindestgröße eines Ethernet-Frame von 64 Byte und dem VLAN-Tag inklusive PCP von 4 Byte. Die Aktualisierungszeit wird ausgehend von 64 ms sukzessive halbiert, um die minimale Aktualisierungszeit zu identifizieren, bei der die Kommunikation über 5G stabil läuft.

Außerdem soll die Zuverlässigkeit aus der Anwendungsperspektive betrachtet werden. Der Begriff Zuverlässigkeit wird als die relative Häufigkeit von PROFINET-Frames, deren Ende-zu-Ende-Latenz kleiner als die Ansprechüberwachungszeit ist, definiert. Frames, die die Ansprechüberwachungszeit überschreiten, gelten als verloren und verringern die Zuverlässigkeit. Diese Definition der Zuverlässigkeit ist nicht ganz korrekt, da die Ansprechüberwachungszeit normalerweise ein Maß für den Jitter der Übertragungszeit und den Paketverlust darstellt. Wenn die Latenz stabil ist, d. h. kein Jitter auftritt, kann die Ansprechüberwachungszeit beliebig hoch sein, solange jeder Frame den Empfänger erreicht. Ein Fehler tritt erst dann auf, wenn drei aufeinanderfolgende Frames nicht empfangen werden. Aufgrund des zu erwartenden hohen Jitters innerhalb des 5G-Systems wird die Ansprechüberwachungszeit dennoch als Obergrenze für die Ende-zu-Ende-Latenz gewählt und zumindest in diesem Abschnitt als Maß für die Zuverlässigkeit verwendet.

Um ein ausgewogenes Verhältnis von aussagekräftigen Ergebnissen und angemessener Messdauer zu erreichen, werden pro Szenario 100.000 PROFINET-Frames gemessen. In den folgenden Szenarien werden schrittweise OPC UA-Datenverkehr und TSN-Mechanismen hinzugefügt:

1. PROFINET über 5G,
2. PROFINET und OPC UA über 5G,
3. PROFINET und TSN-Zeitsynchronisation über 5G sowie
4. PROFINET mit TSN-Zeitsynchronisation und TAS über 5G.

Für den OPC UA-Datenverkehr wird in *NodeRed* eine realistische Condition Monitoring-Anwendung modelliert, indem der OPC UA-Client fünf Werte in unterschiedlichen Zeitintervallen vom Server anfordert: drei Stückzähler mit einer Frequenz von 1 Hz, 1,25 Hz und 2 Hz sowie zwei Sensorwerte, einen für die Spannung (0,5 Hz) und einen für die Temperatur (1 Hz).

Bei 5G spielen die QoS-Profile (5QIs), die Verteilung der Zeitschlitz für UL und DL [Ri21] sowie die Anzahl der aktiven UEs eine Rolle für die Performance. Eine Anpassung der 5QIs ist bei den Versuchen nicht möglich und zusätzliche UEs werden nicht berücksichtigt. Gemäß den Standardeinstellungen im Frequenzband n78 liegt die Zeitschlitz-Verteilung zwischen UL und DL bei 3:7 und ist nicht konfigurierbar.

In TSN sind die Hauptfunktionalitäten die Zeitsynchronisation und der TAS. Die Zeitsynchronisation soll mit bestmöglicher Präzision umgesetzt werden. Die Standardeinstellungen der Synchronisationsparameter betragen 125 ms für das *Sync Interval* und 10  $\mu$ s für den *Peer Delay Threshold*. Diese gehen standardmäßig von einer kabelgebundenen Verbindung mit stabiler Latenz aus und erwarten eine TSN-Bridge als nächsten Hop. Aufgrund der dazwischenliegenden 5G-Verbindung sind beide Voraussetzungen nicht erfüllt. Daher müssen die beiden Parameter ausreichend groß gewählt werden. In diesem Fall werden beide zunächst auf 1 s gesetzt. Andere Synchronisationsparameter bleiben beim Standardwert.

Für den TAS zeigt Abbildung 8.4 zwei verschiedene Konfigurationen. Die Zeitstrahlen unter jeder Komponente beziehen sich stets auf die Übertragungszeit vom IO-Controller (Sender) zu den IO-Devices (Empfänger). Die grünen Kurven stellen Latenzverteilungen von PROFINET-Frames dar, die bei  $t = 0$  beginnen und sich aufgrund der durch jeden Hop verursachten Verzögerung weiter nach rechts bewegen. Da die Latenz des 5G-Systems stärker als im kabelgebundenen Netzwerk streut, werden die

Kurven rechts hinter dem 5G-System breiter und flacher. Blaue Rechtecke markieren die Dauer eines geöffneten TAS-Gates.

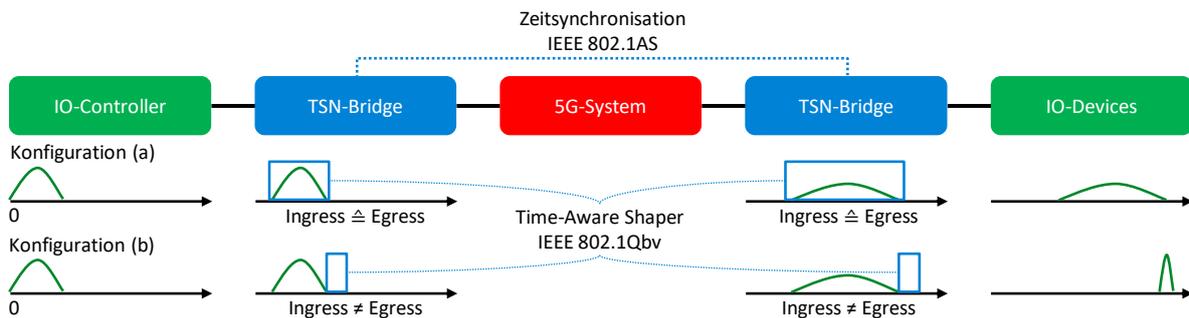


Abbildung 8.4: TAS-Konfiguration für (a) minimale Latenz und (b) minimalen Jitter

Konfiguration (a) zielt darauf ab, die Latenz zu minimieren, d. h. TAS-Gates sollen so konfiguriert sein, dass zeitkritischer Datenverkehr nahezu verzögerungsfrei übertragen wird.

Konfiguration (b) zielt auf Jitter-Minimierung bzw. deterministisches Verhalten ab. TAS-Gates sollen so konfiguriert sein, dass zeitkritischer Datenverkehr mit konstanter Ende-zu-Ende-Latenz und minimalem Jitter übertragen wird. Frames mit einer kurzen Übertragungszeit müssen in den Ausgangspuffern der TSN-Bridges verbleiben, bis das definierte Gate geöffnet wird, was die Ende-zu-Ende-Latenz im Vergleich zur Konfiguration (a) erhöht, jedoch den Jitter minimiert.

## 8.1.2 Messergebnisse

### Szenario 1: PROFINET über 5G

Die Aktualisierungszeit wird schrittweise reduziert bzw. halbiert. Aktualisierungszeiten von 64 ms, 32 ms, 16 ms und 8 ms können erfolgreich gemessen werden, jeweils mit dem typischen Watchdog-Faktor von 3, d. h. mit einer Ansprechüberwachungszeit von jeweils 192 ms, 96 ms, 48 ms und 24 ms bei einer festen Frame-Länge von 68 Byte. Zu dem ursprünglichen Ethernet-Frame fügt VXLAN 50 Byte Header hinzu. Daher haben die Pakete, die das 5G-System durchlaufen, anstelle von 68 Byte eine Größe von 118 Byte.

Die Aktualisierungszeit kann nicht weiter reduziert werden, da die SPS aufgrund von zu häufigen Fehlermeldungen infolge von Verbindungsabbrüchen zu den IO-Devices die PROFINET-Kommunikation unterbricht bzw. stoppt. Bei einer konfigurierten Aktualisierungszeit von 4 ms überschreiten zu viele Frames die Ansprechüberwachungszeit von 12 ms aufgrund der durch das 5G-System induzierten deutlich höheren Verzögerung. Abbildung 8.5 zeigt die gemessenen Übertragungszeiten bei den vier Aktualisierungszeiten für Aufbau 1 mit zwei 5G-Links.

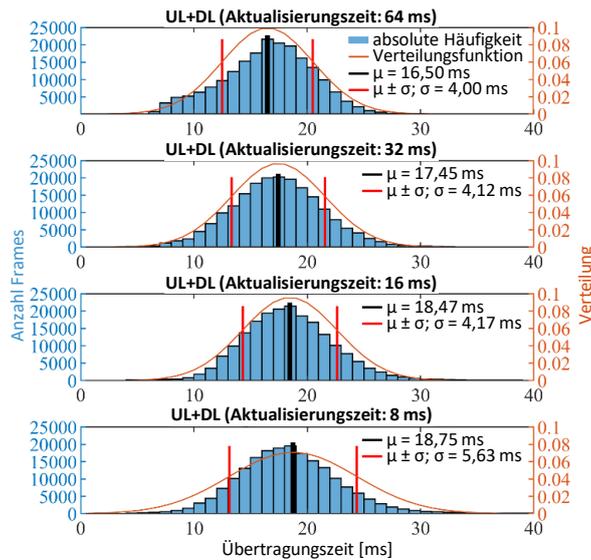


Abbildung 8.5: Aktualisierungs- und Übertragungszeiten von PROFINET über zwei 5G-Links

Für Aufbau 2 mit einem 5G-Link unterscheidet Abbildung 8.6 die Übertragungszeiten zwischen UL und DL-Richtung bei einer Zeitschlitz-Verteilung zwischen UL und DL von 3:7. Diese sind für jede Aktualisierungszeit im DL stets niedriger sind als im UL.

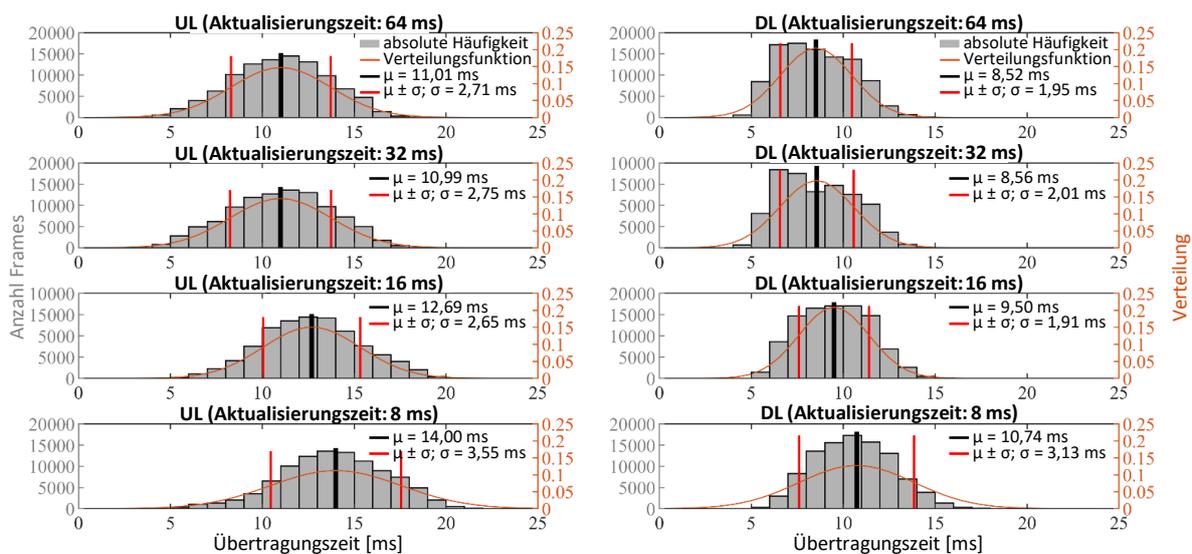


Abbildung 8.6: Aktualisierungs- und Übertragungszeiten von PROFINET über einen 5G-Link

Alle zwölf Diagramme zeigen näherungsweise normalverteilte Übertragungszeiten, wobei die Verteilungsfunktionen aus den Messwerten abgeleitet werden. Die Übertragungszeiten und deren Jitter nehmen mit geringeren PROFINET-Aktualisierungszeiten zu. Im Vergleich zu Aufbau 1 bedeutet ein 5G-Link nicht die halbierte Übertragungszeit. Die kabelgebundene IT-Infrastruktur und die systeminternen Prozesse von 5G tragen einen Anteil zur längeren Verzögerung bei.

Weiterhin zeigt Abbildung 8.7 die kumulativen Verteilungsfunktionen (engl. Cumulative Distribution Function; CDF) für die verschiedenen Aufbauten und Szenarien. Die CDF-Graphen von Aufbau 2 liegen weiter links und steigen steiler an als die Graphen für Aufbau 1, d. h. die Übertragungszeiten von Aufbau 1 sind geringer und streuen weniger als von Aufbau 2. Die CDF-Graphen von Aufbau 1 unterscheiden sich nur minimal zwischen den Aktualisierungszeiten von 8 und 16 ms, während dies in

Aufbau 2 bei 32 und 64 ms der Fall ist. Zusätzlicher OPC UA-Datenverkehr und PTP-Frames für die Zeitsynchronisation verschieben die Graphen ebenfalls nach rechts und verzögern die PROFINET-Frames.

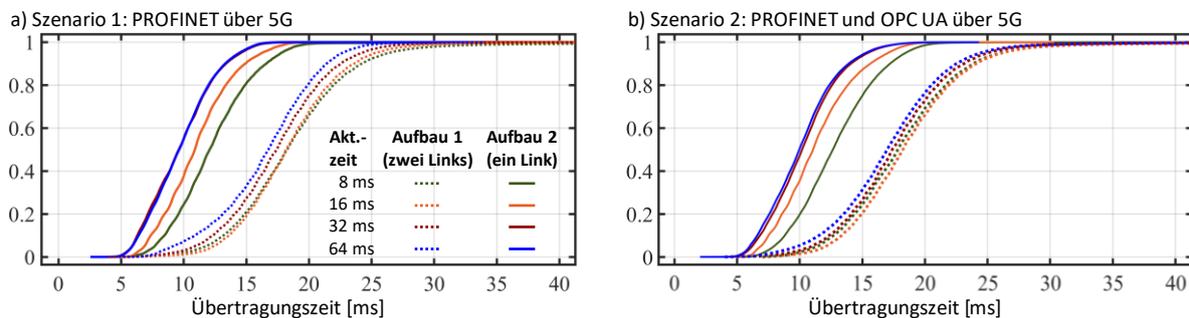


Abbildung 8.7: CDFs der Übertragungszeiten in a) Szenario 1 und b) Szenario 2

Aufbau 2 fällt im Gegensatz zu Aufbau 1 mit einer fehlerhaften PROFINET-Kommunikation zwischen Tunnel-Gateway und UE auf. Während des Initialisierungsprozesses der PROFINET-Kommunikation sendet die SPS große DCE/RPC-Pakete (Distributed Computing Environment / Remote Procedure Call) von 1.506 Byte. Da die maximal unterstützte MTU-Size des VXLAN-Tunnels 1.500 Byte beträgt, sollten diese Pakete fragmentiert werden. Diese Fragmentierung scheint nicht korrekt zu funktionieren, so dass die IO-Devices diese Paket nicht empfangen und folglich nicht antworten können. Die SPS wiederum meldet den Fehler „Verbindung zu IO-Devices unterbrochen“ und sendet nur als ungültig oder leer markierte PROFINET-Frames.

Normalerweise beträgt die Paketgröße von DCE/RPC-Paketen zwischen 100 und 200 Byte. Für diese Anomalie konnten weder Siemens noch Hirschmann oder interne Spezialisten der Automatisierungstechnik eine Erklärung oder Lösung liefern. Um den Fehler zu vermeiden, muss die 5G-Verbindung nur für den Initialisierungsprozess mit einem Kabel „überbrückt“ werden. Anschließend kann das Kabel entfernt und der PROFINET-Datenverkehr fehlerfrei über 5G übertragen werden.

### Szenario 2: OPC UA über 5G

Die mittels OPC UA konfigurierten Zähler und Sensorwerte erzeugen TCP/IP-Pakete von 133-167 Byte. Der OPC UA-Datenverkehr wird während der Versuche nicht variiert und hat einen vergleichsweise geringen Anteil an der Netzwerklast, während sich die durch den PROFINET-Datenverkehr erzeugte Last bei einer Halbierung der Aktualisierungszeit verdoppelt. Zusätzlicher OPC UA-Datenverkehr erhöht jedoch die Latenz und Jitter des zeitkritischen PROFINET-Datenverkehrs, was in Tabelle 8.1 und Abbildung 8.7b) deutlich wird. Bei einer Aktualisierungszeit von 64 ms ist der OPC UA-Anteil und damit der Einfluss auf die Verzögerung von PROFINET-Frames am größten, nimmt dann aber mit geringeren Aktualisierungszeiten ab. Da OPC UA hier lediglich als Querverkehr dient und der Fokus auf der zeitkritischen PROFINET-Kommunikation liegt, wird dieses Szenario weniger ausführlich behandelt.

### Szenario 3: TSN-Zeitsynchronisation über 5G

Obwohl die Werte für die Synchronisationsparameter *Sync Interval* und *Peer Delay Threshold* mit 1 s ausreichend groß gewählt sind, funktioniert die Zeitsynchronisation nicht über 5G, da die TSN-Bridges in einer Schleife von Peer Delay Request- und Peer Delay Response-Nachrichten stecken bleiben und den Synchronisationsprozess nicht initiieren, d. h. Sync- und Follow-up-Nachricht fehlen (vgl. Abbildung 2.1). Auch hier muss auf die Notlösung zurückgegriffen werden, die 5G-Verbindung mit einem Kabel zu „überbrücken“. Der PTP-Datenverkehr für die Zeitsynchronisation wird über separate Ports auf den TSN-Bridges vom PROFINET-Datenverkehr getrennt, um die Funktionalität der Zeitsynchronisation nachzuweisen. Dies ist jedoch für eine reale Implementierung nicht praktikabel.

Darüber hinaus ist es zwingend erforderlich, dass die 5G-Komponenten Frames des Link Layer Discovery Protocol (LLDP) weiterleiten, obwohl zu erwarten gewesen wäre, dass die Layer 2 PTP-Frames auf die gleiche Weise über den VXLAN-Tunnel weitergeleitet werden.

#### Szenario 4: TSN Time-Aware Shaper über 5G

Der TAS kann nicht wie geplant mit den beiden Konfigurationen in Abbildung 8.4 implementiert und getestet werden, da die Zeitsynchronisation über 5G als Voraussetzung nicht funktioniert.

Tabelle 8.1 fasst alle Messergebnisse zusammen. Die ersten beiden Spalten auf der linken Seite enthalten die vier untersuchten Szenarien und die Konfigurationen der PROFINET-Parameter, gefolgt von den Messergebnissen für beide Versuchsaufbauten, einschließlich arithmetischem Mittelwert, Standardabweichung, Maximalwert und Zuverlässigkeit in Prozent. Während der Mittelwert und die Standardabweichung der Übertragungszeit mit geringerer PROFINET-Aktualisierungszeit zunehmen, sinkt die Zuverlässigkeit. Dies ist bereits bei 16 ms in Aufbau 1 mit zwei 5G-Links zu beobachten, aber erst bei 8 ms in Aufbau 2 mit einem 5G-Link. In Aufbau 1 steigen die Maximalwerte der Übertragungszeit mit der Netzwerklast, während sie in Aufbau 2 zufällig aufzutreten scheinen. Ein Grund dafür könnte sein, dass das Scheduling der Pakete in Aufbau 1 Ende-zu-Ende für beide 5G-Links erfolgt. Im Gegensatz dazu durchlaufen die Pakete in Aufbau 2 zehn Hops im produktiven IT-Netzwerk unter zusätzlicher Netzwerklast, bevor das Scheduling im RAN des 5G-Systems erfolgt. Der Einfluss dieser zusätzlichen Hops im IT-Netzwerk lässt sich nicht vermeiden, da die Versuche in einem realen Fabriknetzwerk durchgeführt werden, in welches das 5G-System integriert ist. Auch reale Anwendungen müssten diesen Weg über mehrere Hops nehmen.

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der Messergebnisse inklusive Zuverlässigkeit

Szenario	PROFINET-Parameter		Versuchsaufbau 1: zwei 5G-Links				Versuchsaufbau 2: ein 5G-Link			
	Aktualisierungszeit [ms]	Ansprechüber- wachungszeit [ms]	$\mu$ [ms]	$\sigma$ [ms]	max [ms]	Zuverlässi- gkeit [%]	$\mu$ [ms]	$\sigma$ [ms]	max [ms]	Zuverlässi- gkeit [%]
1) PROFINET über 5G	64	192	16,50	4,00	33,88	100	9,76	2,67	68,80	100
	32	96	17,48	4,27	87,99	100	9,72	2,68	42,60	100
	16	48	18,64	4,96	92,57	99,63	11,03	2,82	26,60	100
	8	24	18,76	5,77	110,56	89,34	12,39	3,73	82,79	99,60
2) PROFINET und OPC UA über 5G	64	192	17,15	4,77	88,91	100	10,14	2,81	57,08	100
	32	96	17,72	4,75	84,39	100	10,35	2,79	23,92	100
	16	48	18,70	5,23	100,77	99,62	11,33	3,03	30,32	100
	8	24	18,78	5,80	112,11	88,67	12,85	3,24	49,61	99,85
3) PROFINET und Zeitsynchronisation über 5G	64	192	17,27	4,35	39,22	100	9,79	2,71	68,16	100
	32	96	17,11	3,90	43,06	100	9,66	2,70	33,20	100
	16	48	18,59	4,84	93,10	99,67	11,67	3,61	30,24	100
	8	24	19,00	5,80	107,28	88,30	12,31	3,77	29,55	99,80
4) TAS über 5G	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.

Szenario 1 wird mit demselben Versuchsaufbau in einem anderen 5G-System untersucht, welches Ethernet PDU-Sessions sowie gleichverteilte Zeitschlitz für UL und DL unterstützt. Die Messungen der Übertragungszeiten von PROFINET über 5G bei den unterschiedlichen Aktualisierungszeiten ergeben insgesamt zwar niedrigere Maxima, jedoch etwas höhere Mittelwerte. Folglich führen Ethernet PDU-Sessions und die Gleichverteilung der Zeitschlitz noch nicht zu einer signifikanten Verbesserung.

Allerdings hängt die Performance auch von der Implementierung des 5G-Systems ab [UCN22], weshalb eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit den Messwerten in Tabelle 8.1 nicht gegeben ist.

### 8.1.3 Diskussion und Fazit der Messungen

#### **Diskussion**

Aufgrund bekannter Einschränkungen in der Praxis in Bezug auf 5G-Implementierungen war bereits vor der Versuchsdurchführung zu erwarten, dass instabile Latenzen in 3GPP Release 15 eine ordnungsgemäße TSN-Zeitsynchronisation über 5G einschränken. Der hohe Jitter lässt sich durch die Frame-Struktur des TDD-Musters erklären, die zu Verzögerungen von 2-20 ms für unterschiedliche Anzahlen und Sequenzen von UL- und DL-Zeitschlitzten von jeweils 1 ms führt. Latenz und Jitter sollten mit der Unterstützung von TSN-Funktionalitäten im Zuge von URLLC ab 3GPP Release 16 reduziert werden, wie in [Ke22] gezeigt. Durch bestimmte Techniken lässt sich der maximale Ende-zu-Ende-Jitter von 1,1 ms auf 137  $\mu$ s reduzieren [Mi23a]. Da Tunneling Overhead erzeugt und zusätzliche Verzögerungen verursacht, sind Ethernet PDU-Sessions definitiv hilfreich, um Layer 2-Datenverkehr in 5G zu unterstützen. Darüber hinaus erfordert zyklischer periodischer PROFINET-Datenverkehr symmetrische Kapazitäten in UL- und DL-Richtung. Diese waren bei den Messungen nicht gegeben und führten somit zu Performance-Einschränkungen.

Auch die SPS und Simulation Unit unterstützen noch keine TSN-Funktionalitäten. Bisher sind nur TSN-Bridges verfügbar. Eine netzwerkweite Zeitsynchronisation zwischen PROFINET-, TSN- und 5G-Systemen ist Voraussetzung für eine sinnvolle Nutzung des TAS. Sie bedeutet aber noch keine deterministische Datenübertragung, die aufgrund der hohen Latenz- und Jitterwerte im 5G-System nicht möglich ist. Die fehlende Synchronisation zwischen den PROFINET- und TSN-Komponenten ist also nicht der Engpass. Darüber hinaus muss die SPS den TCP/IP-Paketen für OPC UA einen VLAN-Tag mit PCP hinzufügen. Da sie Ethernet-Frames für PROFINET und TCP/IP-Pakete für OPC UA über dieselbe Schnittstelle und dasselbe Kabel sendet, muss die TSN-Bridge ihre Prioritäten am Eingangsport unterscheiden, was noch nicht möglich ist. Die TSN-Bridge kann dem gesamten eingehenden Datenverkehr auf einem Port einen VLAN-Tag inklusive Priorität zuweisen, was es jedoch unmöglich macht, zwischen PROFINET und OPC UA zu unterscheiden, auch nicht anhand des EtherType.

Es sind sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zu den Performance-Messungen in verwandten Arbeiten festzustellen (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die gewählten Ansätze sind sehr ähnlich: Die Performance wird in verschiedenen Konfigurationen eines Versuchsaufbaus gemessen, um das optimale Ergebnis zu bewerten. Der Beitrag dieser Dissertation besteht jedoch darin, dass mit PROFINET, OPC UA, TSN und 5G zum ersten Mal vier Technologien in Kombination unter realistischen industriellen Anwendungs- und Netzwerkbedingungen bewertet werden. Tabelle 8.2 stellt die Messergebnisse aus dieser Dissertation und aus verwandten Arbeiten vergleichend gegenüber.

Tabelle 8.2: Vergleich der Messergebnisse dieser Dissertation mit verwandten Arbeiten

Referenz	Transferintervall [ms]	Paketgröße/Frame-Länge [Byte]	DL-Latenz [ms]	UL-Latenz [ms]	Zuverlässigkeit [%]	Bemerkungen
Dissertation	8, 16, 32, 64	68 (118 in VXLAN)	8,5-10,7	11-14	≥ 99,6	Normalverteilte Übertragungszeiten; zusätzlicher OPC UA-Datenverkehr erhöht die Verzögerung von PROFINET-Frames
[Ri21]	0,01, 0,1, 1, 10, 100	128	4-10	3-25	95	IP-Pakete statt industrieller Protokolle
[Ca21]	(2), 10, 100	20, 2000	17,3	9,5	95	IP-Pakete statt industrieller Protokolle; Transferintervall von 2 ms wird nicht fehlerfrei übertragen
[CUR22]	53	20	3,1-9,5	7,7-31	99,999	UDP/IP-Pakete; Übertragungszeiten sind nicht normalverteilt; Muster variiert abhängig von den Testfällen
[An22b]	8, 16, 32	100, 1024	11-15,5	8,5-24,5	99,9	Übertragungszeiten kleiner Pakete ist niedriger im UL als im DL
[Bh22]	16	76	14	13	99,9999	5G Non-Standalone-Netzwerk mit 80 MHz Bandbreite; GRE-Tunnel
[Fi22]	1, 20	123	-	-	-	Öffentliches 5G-Netzwerk mit Querverkehr; gemessene Übertragungszeiten und Zuverlässigkeit bleiben unklar
[GH23]	10	94 (DL), 181 (UL)	15,4- 16,9	7,7-12,9	99,9	Modbus/TCP-Pakete mit unterschiedlichen Bandbreiten für Querverkehr
[Ke22]	2	50	0,3-1,3	0,3-1,3	99,9	TSN-Zeitsynchronisation über 5G mit Forschungsprototyp; Zeitfehler ≤ 8 μs

In [Ri21] liegen 95 % der DL-Verzögerungen zwischen 4 und 10 ms. Die Messungen in dieser Dissertation liefern hingegen Ende-zu-Ende-Latenzen mit kleineren gekapselten Frames und Werte zwischen 14,5 und 18 ms für 95 %.

In [So22] wird ohne Querverkehr die geforderte Latenz von weniger als 10 ms für 99,9 % der Pakete für die Fernsteuerung und das Flotten-Management von mobilen Robotern erfüllt. Sobald jedoch Querverkehr eingespeist wird, insbesondere im UL, steigen die oberen Perzentile der Latenz deutlich an, so dass die geforderte Zuverlässigkeit nicht eingehalten werden kann.

Der vergleichbarste Testfall zu [Ca21] ist ein Transferintervall von 10 ms bei einer Paketgröße von 20 Byte, wobei 95 % der Pakete 17,3 ms im DL und 9,5 ms im UL erreichen. Ein Transferintervall von 2 ms funktionierte überhaupt nicht und 10 ms nur instabil, was mit den Beobachtungen in dieser Dissertation übereinstimmt.

In [CUR22] werden bei einem ungeraden Transferintervall von 53 ms UL-Verzögerungen zwischen 7,7 und 31 ms und DL-Verzögerungen von 3,1-9,5 ms erreicht. Das Verhaltensmuster der Übertragungszeit variiert je nach Testfall, aber im Gegensatz zu den vorliegenden Messungen sind die Latenzen nicht normalverteilt.

In [An22b] erfahren Pakete einer Größe von 100 Byte UL-Verzögerungen zwischen 8,5 und 13 ms und DL-Verzögerungen von 11 bis 15 ms mit einer Zuverlässigkeit von 99,9 %. Bei einer Paketgröße von 1.024 Byte beträgt die Verzögerung 19-24,5 ms im UL und 11,5-15,5 ms im DL. Die Messergebnisse dieser Dissertation können die geringeren Verzögerungen beim UL im Vergleich zum DL für kleine Pakete nicht bestätigen.

In [Bh22] wird eine PROFINET-Aktualisierungszeit von 16 ms und eine Frame-Länge von 76 Byte in einem 5G Non-Standalone-Netzwerk mit einer Bandbreite von 80 MHz getestet. Für einen 5G-Link betragen die Latenzen 14 ms im DL und 13 ms im UL bei einer Zuverlässigkeit von 99,9999 %. Im

Vergleich dazu betragen die Mittelwerte in dieser Dissertation 9,5 ms im DL und 12,7 ms im UL mit 100 % Zuverlässigkeit.

Die Größe der PROFINET-Frames in [Fi22] sind nicht mit den Versuchen in dieser Dissertation vergleichbar und die erreichten Latenzen bleiben unklar.

In [GH23] wird das Protokoll Modbus/TCP verwendet. 10 ms, 94 Byte für DL und 181 Byte für UL, 15,4-16,9 ms im DL und 7,7-12,9 ms im UL, Zuverlässigkeit 99,9 %.

In [Ke22] ist die Abweichung bei der Zeitsynchronisation kleiner als 8  $\mu$ s bei einem Mittelwert von unter 3  $\mu$ s. Die Ende-zu-Ende-Latenz über das hybride 5G-TSN-Netzwerk beträgt weniger als 0,8 ms bei einer Zuverlässigkeit von 99,9 % und einem Jitter von etwa 500  $\mu$ s. Der konfigurierte TAS der TSN-Bridge, die sich hinter dem 5G-System befindet, kann den Ende-zu-Ende-Jitter über das hybride 5G-TSN-Netzwerk auf 0,9  $\mu$ s reduzieren. Im Gegensatz dazu beträgt das Peer Delay bei den Messungen in dieser Dissertation zwischen 13 und 18 ms. Der TAS konnte nicht implementiert werden, um die Jitter-Reduzierung zu bestätigen. Da Kehl et al. [Ke22] einen Forschungsprototypen verwendeten, unterscheiden sich ihre Ergebnisse stark von denen in dieser Dissertation.

Wie aus dem Vergleich aller Messergebnisse ersichtlich und in [UCN22] angegeben ist, hängt die Performance von der konkreten Implementierung ab. Sie kann je nach Netzwerkausrüster und Konfiguration des Netzwerks sowie je nach Verwendung von UEs verschiedener Gerätehersteller variieren.

Weiterhin können neue Lücken für die künftige Forschung identifiziert werden: 5G-Komponenten müssen LLDP weiterleiten, um PTP-Frames für die TSN-Zeitsynchronisation über 5G zu senden. Darüber hinaus müssen sie die QoS-Differenzierung pro Flow unterstützen. UEs unterstützen zur Zeit der Erstellung dieser Dissertation nur ein QoS-Profil. Ziel ist jedoch eine Flow-spezifische QoS-Differenzierung. Abbildung 8.8a) stellt die Möglichkeiten bisheriger Implementierungen dar, wobei QoS-Profile lediglich pro UE unterschieden werden können. Um PROFINET und OPC UA unterschiedlich zu priorisieren, muss der Datenverkehr über getrennte 5G-Verbindungen übertragen werden. Obwohl TCP/IP-Pakete für OPC UA keinen VXLAN-Tunnel benötigen, fügt die nicht notwendige Einkapselung einen Header hinzu, erhöht dadurch die Paketgröße und erzeugt somit einen Overhead. Abbildung 8.8b) beschreibt das optimierte Zielbild mit einer Flow-basierten QoS-Differenzierung, bei der der Layer 2 PROFINET-Datenverkehr eine Ethernet PDU-Session und der OPC UA-Datenverkehr eine IP PDU-Session für die 5G-Übertragung verwendet. Somit resultiert als Anforderung an die 5G-Bridge parallel Ethernet- und IP-Datenverkehr zu verarbeiten und zu übertragen.

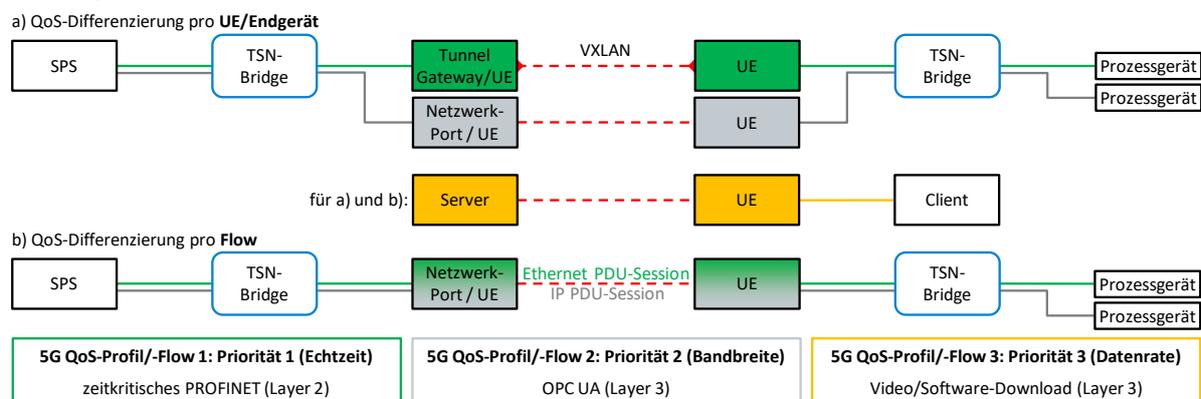


Abbildung 8.8: QoS-Differenzierung pro a) UE/Endgerät und b) Flow

Im Rahmen der Messungen wurde nur eine einzige Anwendung ohne 5G-QoS oder Einflüsse durch andere Geräte und UEs untersucht. Tritt im 5G-System zusätzlicher Querverkehr auf, z. B. ein

datenratenintensiver Software- oder Video-Download (vgl. gelber Pfad in Abbildung 8.8), muss dessen Einfluss auf den zeitkritischen Datenverkehr mit und ohne Priorisierung untersucht werden.

### **Fazit**

In einem industriellen Versuchsaufbau wurden Messungen mit PROFINET-, OPC UA-, TSN- und 5G-Komponenten durchgeführt, um die Performance und Interoperabilität bzw. Integrationsfähigkeit in einem kommerziell verfügbaren 5G-System gemäß 3GPP Release 15 zu bewerten. Dabei wurden zwei Varianten bei der Anbindung an das 5G-System untersucht. Gemäß der Literaturanalyse werden im Rahmen dieser Dissertation zum ersten Mal alle vier Kommunikationsstandards in Kombination betrachtet, wie sie in einem künftigen industriellen CPS einer realen Fabrik eingesetzt werden können. Zusammenfassend zeigen die Messungen, dass die Ende-zu-Ende-Performance den Anforderungen des Anwendungsfalls mobiler Roboter in Bezug auf Latenz, Jitter und Zuverlässigkeit noch nicht genügt. Die Interoperabilität der Technologien ist bereits gegeben, nicht aber eine deterministische Ende-zu-Ende-Kommunikation. Die vollständige Integrationsfähigkeit der Technologien ist zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation begrenzt. Die PROFINET-Parameterwerte wurden reduziert, bis die Kommunikation der Anwendung gestört war. Die Übertragung von PROFINET und OPC UA über 5G ist grundsätzlich möglich, jedoch nur mit eingeschränkten Echtzeitanforderungen bei einer PROFINET-Aktualisierungszeit von 16 ms.

Die Ziele, eine möglichst genaue TSN-Zeitsynchronisation und einen Schedule für eine minimale Ende-zu-Ende-Latenz (bei gleichzeitiger Sicherstellung einer ausreichenden Bandbreite für den OPC UA-Datenverkehr) zu implementieren, konnten nicht erreicht werden. Die beiden TSN-Mechanismen sind aufgrund hoher und instabiler 5G-Latenzen noch nicht in einem kommerziellen 5G-System nach 3GPP Release 15 implementierbar. Letztendlich beschränkt sich die Lösung des Performance-Optimierungsproblems also auf eine PROFINET-Aktualisierungszeit von 16 ms für einen 5G-Link und 32 ms für zwei 5G-Links bei einer Zuverlässigkeit von 100%, aber mit instabiler Latenz deutlich über den geforderten 4 ms. Folglich sind die Erkenntnisse aus den Messungen eingeschränkt, da die 5G-Latenzen zu hoch sind, QoS-Parameter, wie z. B. das PDB, im 5G-System nicht konfigurierbar sind und das Bridge-Modell nicht unterstützt wird. Deshalb müssen alternative Ansätze wie die analytische Berechnung und Simulationen verfolgt werden, um aussagekräftigere Erkenntnisse über das Verhalten von Latenz und QoS, insbesondere über das PDB, zu erlangen. Da eine PROFINET-Aktualisierungszeit von 4 ms aus der beispielhaft untersuchten Anwendung für kabelbasiertes TSN noch keine Herausforderung darstellt, sollen im weiteren Verlauf die Parameterwerte des IIC-Datenverkehrsmodells zur Orientierung dienen.

Die erforderlichen Performance-Verbesserungen und die Integrierbarkeit sind mit künftigen 3GPP-Releases zu erwarten, wenn URLLC zu signifikanten Reduzierungen bei Latenz und Jitter führt und das 5G Bridge-Modell für TSN unterstützt wird. Trotzdem besitzen die Erkenntnisse aus den Messungen eine Relevanz, um die praktische Integration der untersuchten Technologien in industrielle CPS zu ermöglichen.

## 8.2 Analytische Berechnungen

Ziel dieses zweiten Validierungsansatzes ist es, mittels der symbolischen Regression auf Basis der Messergebnisse aus Abschnitt 8.1.2 und zusätzlichen Messungen ein Berechnungsmodell zur Kalkulation geeigneter PDB-Werte für jede TSN-Datenverkehrsklasse und unterschiedliche Kommunikationsszenarien abzuleiten.

Der Beitrag dieses Abschnitts zur Forschung umfasst die analytische Berechnung des 5G PDB für TSN-Datenverkehr in einem hybriden 5G-TSN-Netzwerk, um daraus TSN-spezifische 5QIs für das QoS-Mapping in den TSN-Translatoren abzuleiten. Die Inhalte dieses Abschnitts basieren auf der vorab publizierten Arbeit [AAU23].

### 8.2.1 Methodik und Herleitung

Die analytischen Berechnungen in diesem Abschnitt sollen sich nicht nur auf rein theoretische und somit idealisierte Werte berufen, sondern die vorhandenen Messergebnisse und weitere Messwerte als Anhaltspunkte für die Inter- und Extrapolation berücksichtigen. Dafür eignet sich die Methode der symbolischen Regression. Diese ist eine Art der Regressionsanalyse, bei der der Raum der mathematischen Ausdrücke durchsucht wird, um ein möglichst einfaches und genaues Regressionsmodell für einen gegebenen Datensatz zu finden. Als Ausgangspunkt wird kein Modell spezifiziert oder vorgegeben. Stattdessen werden anfängliche Ausdrücke durch die Kombination mathematischer Operatoren, analytischer Funktionen, Konstanten und Zustandsvariablen gebildet. Sie versucht, die dem Datensatz innewohnenden Beziehungen aufzudecken, indem sie die Muster in den Daten selbst die geeigneten Modelle erkennen lässt, anstatt eine Modellstruktur vorzuschreiben, die aus menschlicher Sicht mathematisch nachvollziehbar ist. Die Fitnessfunktion steuert die Entwicklung der Modelle und berücksichtigt Fehlermetriken sowie Komplexitätsmaße, um ein präzises Extrapolationsverhalten sicherzustellen. Die symbolische Regression kann nicht immer den optimalen mathematischen Ausdruck für einen gegebenen Datensatz in polynomieller Zeit finden. Wenn die gesuchte Gleichung jedoch nicht zu komplex ist, ist es möglich, das symbolische Regressionsproblem genau zu lösen, indem man jede mögliche Funktion, die aus einem vordefinierten Satz von Operatoren gebildet wird, generiert und sie auf dem fraglichen Datensatz auswertet.

Im Folgenden soll die symbolische Regression auf das Optimierungsproblem der PDBs für die Datenverkehrstypen auf Basis von Gleichungen aus der Literatur und weiteren Messungen angewendet werden.

#### Mathematische Gleichungen

In (1)-(3) steht  $l_{EzE}$  für das Ende-zu-Ende-Verzögerungsbudget der Anwendung,  $l_{App}$  für die Verarbeitungszeit auf Applikationsebene in den Endgeräten,  $l_{Links}$  für die Kabelverzögerung,  $BD$  für das Bridge Delay der TSN- bzw. 5G-Bridge und  $t_{Residenz}$  für die Verweilzeit, die ein Frame benötigt, um vom DS-TT an das UE und umgekehrt weitergeleitet zu werden. Während  $d_{abhängig}$  die von der Frame-Länge abhängige Bridge-Verzögerung ist, bezeichnet  $d_{unabhängig}$  die Verzögerung, um einen Frame unabhängig von der Frame-Länge zu speichern und durch die Bridge weiterzuleiten. Die Gleichungen berücksichtigen nur eine native TSN-Bridge. Nach den Berechnungen in [La20] resultieren daraus PDBs von ca. 700  $\mu$ s.

$$PDB \leq l_{EzE} - l_{App} - l_{Links} - BD_{TSN} \quad (1)$$

$$BD_{5G} = t_{Residenz} + d_{abhängig} + d_{unabhängig} \quad (2)$$

$$PDB \geq BD_{5G} + t_{Residenz} \quad (3)$$

Wie aus Abbildung 8.9 sowie dem realen Versuchsaufbau in Abschnitt 8.1.1 ersichtlich ist, ergeben die verschiedenen Möglichkeiten zur Anbindung der TSN-Endgeräte, in diesem Fall der SPS und des Prozessgeräts, insgesamt drei Kommunikationsszenarien, die in Tabelle 8.3 dargestellt sind.

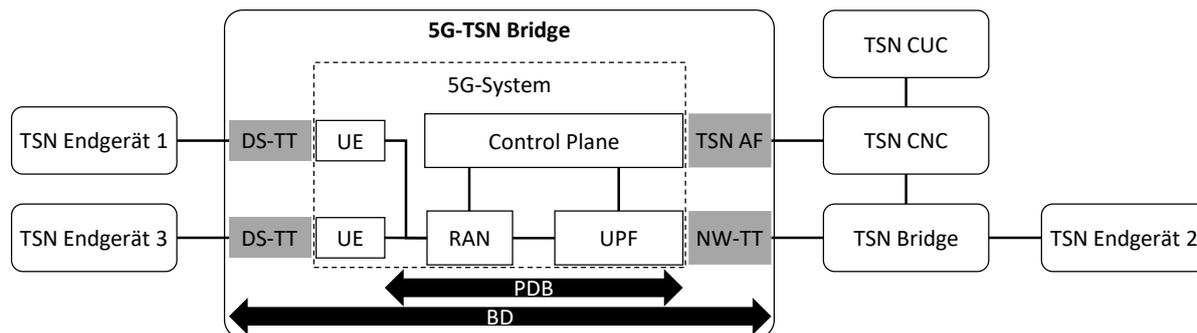


Abbildung 8.9: Bridge Delay und PDB im 5G Bridge-Modell

Tabelle 8.3: Kommunikationsszenarien für den kombinierten Einsatz von 5G und TSN (angelehnt an [AAU23])

Szenario	Applikationsperspektive	5G-Perspektive	Anzahl 5G-Links	Hops in Netzwerktopologie
1	Stationäre, kabelgebundene SPS und mobiles IO-Device	UPF zu UE	1	SPS – IT-Netzwerk – UPF – RAN – UE – IO-Device
2	SPS und IO-Device als zwei mobile Endgeräte in derselben Anlage oder Produktionshalle	UE zu UE in derselben Mobilfunkzelle	2	SPS – UE 1 – RAN – UE 2 – IO-Device
3	SPS und IO-Device als zwei mobile Endgeräte in unterschiedlichen Anlagen oder Produktionshallen	UE zu UE in unterschiedlichen Mobilfunkzellen	2	SPS – UE 1 – RAN – UPF – RAN – UE 2 – IO-Device

$l_{EzE}$  darf das PDB (innerhalb des 5G-Systems) zuzüglich der verbleibenden kabelgebundenen Netzwerkverzögerung (außerhalb des 5G-Systems), die stabil sein soll, nicht überschreiten. Sowohl das PDB als auch die Netzwerkverzögerung (NWV) stellen Obergrenzen dar. Folglich lässt sich für Szenario 1 oder  $PDB_{UPFzUE}$  (1) zu (4) konkretisieren, wobei

- $n > m > p \in \mathbb{N}$  Werte für die Anzahl der Hops (bei Redundanz über den längsten möglichen Pfad) sind,
- $l_{UEzEG}$  für die Verzögerung zwischen LAN- und WAN-Schnittstellen des Endgeräts steht, auch wenn das UE direkt in das TSN-Endgerät (EG; z. B. SPS oder IO-Device) integriert ist und
- $l_{Bridge}$  die Bridge-Verzögerung bezeichnet, die durch den TSN-Schedule beeinflusst werden kann, z. B. wenn ein Frame ein offenes TAS-Gate minimal verfehlt hat und bis zum nächsten Zyklus warten muss.

$$l_{EzE} \leq PDB + NWV_{TSN} = PDB + \underbrace{2 \cdot l_{EG} + l_{UEzEG}}_{l_{App}} + \underbrace{(n-1) \cdot l_{Kabel} + p \cdot l_{Firewall}}_{l_{Links}} + \underbrace{m \cdot l_{Bridge}}_{BD_{TSN}} \quad (4)$$

Darüber hinaus gilt (5) für die Szenarien 2 und 3 bzw.  $PDB_{UEzUE}$ , da erwartet wird, dass das doppelte PDB die Obergrenze für zwei drahtlose Verbindungen darstellt. Die Kabelverzögerung ist dabei vernachlässigbar.

$$l_{EzE} \leq 2 \cdot (PDB + l_{EG} + l_{UEzEG}) \quad (5)$$

### Messungen

Mittels Messungen gilt es herauszufinden, inwiefern sich die tatsächlichen Verzögerungen nach den obigen PDB-Berechnungsformeln verhalten. Abbildung 8.10 zeigt den Versuchsaufbau, der die drei Kommunikationsszenarien abdeckt: mit einem Gateway über das kabelgebundene IT-Netzwerk und einem 5G-Link zum UE (Szenario 1) oder über zwei 5G-Links zwischen zwei UEs (Szenarien 2 und 3). Dafür werden zwei Messreihen durchgeführt:

1. Rundlauf-Zeiten (engl. Roundtrip Time, RTT), bei 5G auch als Reaktionszeit bezeichnet, auf der Trace-Route zwischen den 5G-Komponenten und
2. Einwegverzögerungen (engl. One-Way-Delays, OWD) von PROFINET-Frames zwischen dem IO-Controller und dem IO-Device.

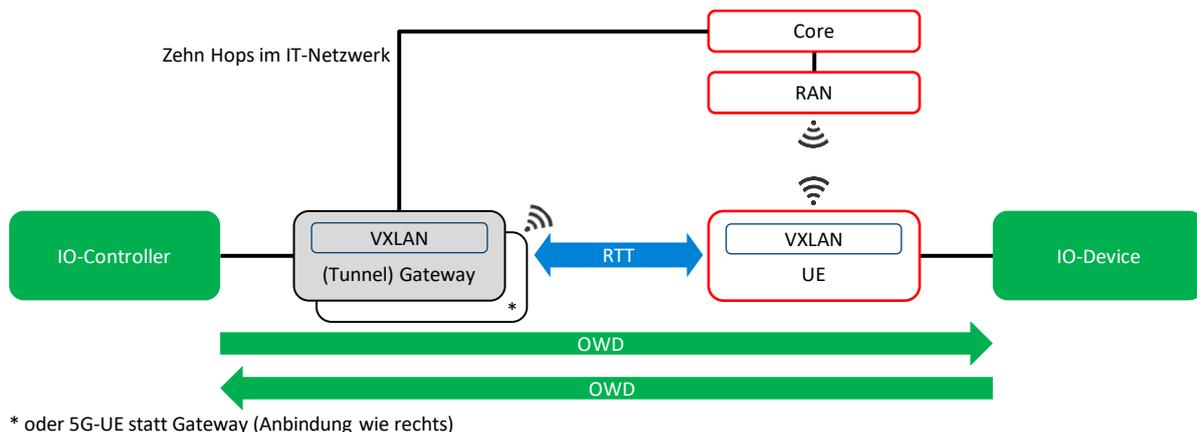


Abbildung 8.10: Versuchsaufbau (angelehnt an [AAU23])

Die Paketgröße variiert zwischen 64 und 1.470 Byte und die Paketrade (bei 5G als Transferintervall bezeichnet) zwischen 1 und 1000 Paketen/s. Die Netzwerkkomponenten unterstützen Paketgrößen bis 1.500 Byte, entsprechend der MTU-Size.

### Trace-Routes mit RTT-Messungen

Trace-Routes offenbaren die Anzahl der Hops und ihre Ping-Verzögerungen für jedes Kommunikationsszenario. Die folgenden Trace-Routes werden ohne TSN-Bridges oder PROFINET-Devices erfasst:

1. Gateway zum UE über zehn Hops, einschließlich zwei Firewalls,
2. UE zum UE in der gleichen Mobilfunkzelle ohne Zwischen-Hops und
3. UE zum UE in verschiedenen Mobilfunkzellen über einen Switch.

Im Hinblick auf die Latenz liefern Trace-Routes ausgehend vom Gateway gemäß Szenario 1 die stabilsten und damit aussagekräftigsten Werte, da der 5G-Link den letzten Hop darstellt. Die durchschnittliche Ping-Verarbeitungszeit (DPVZ) wird als arithmetisches Mittel der Ping-Verzögerungen aller intermediären Hops definiert, mit Ausnahme des 5G-Teils. DPVZ ist annähernd unabhängig von der Paketrade und -größe. Die DPVZ für Tausende von gemessenen Paketen liegt bei ca. 3,3 ms für jeden kabelgebundenen Hop mit einer Schwankung von ungefähr  $\pm 0,4$  ms. Während

DPVZ einen Hinweis auf die Netzwerkverzögerung liefert, gilt dies beim „Selbst-Ping“ des lokalen Hosts auf dem Gateway und dem UE entsprechend für  $l_{UEzEG}$ . Er beträgt ca. 0,5 ms, unabhängig vom Ping-Intervall und der jeweiligen LAN- bzw. WAN-Schnittstelle.

Dagegen können Ping-Verzögerungen, einschließlich der 5G-Links, als Funktion der Paketrate und der Paketgröße ausgedrückt werden. Abbildung 8.11, Abbildung 8.12 und Abbildung 8.13 zeigen die Messpunkte und die daraus abgeleiteten Trendfunktionen der durchschnittlichen RTTs bei tausend gemessenen Paketen pro Kombination aus Paketgröße und -rate für die drei Kommunikationsszenarien. Bei Paketraten von 16 ms und mehr scheinen die Verzögerungen nahezu konstant zu sein. Die Messergebnisse zeigen, dass die Verzögerung von UPF zu UE oder umgekehrt (Szenario 1) nicht halb so groß ist wie die Verzögerung zwischen zwei UEs (Szenarien 2 und 3). Die Pakete scheinen innerhalb des RAN zu verbleiben, anstatt bis zur UPF transportiert zu werden.

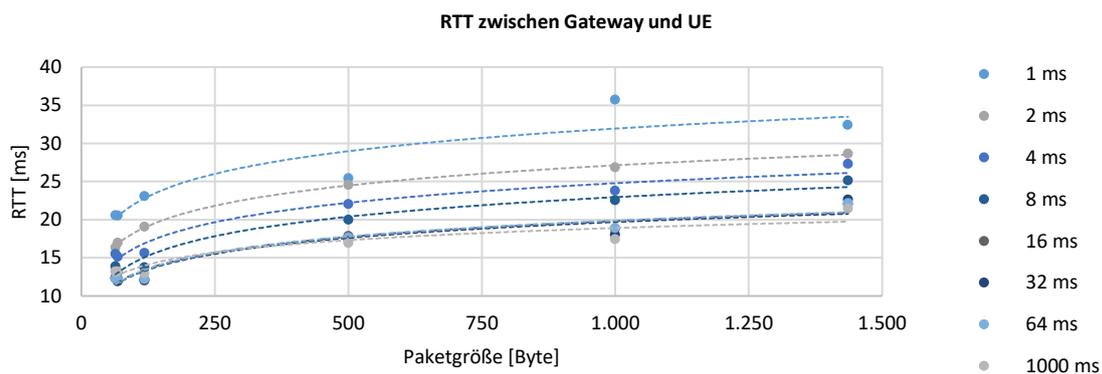


Abbildung 8.11: RTT-Messergebnisse für Szenario 1 (angelehnt an [AAU23])

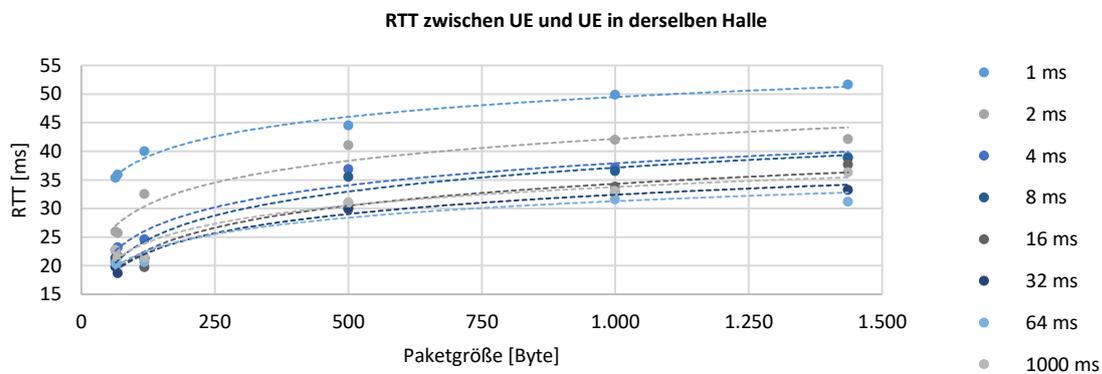


Abbildung 8.12: RTT-Messergebnisse für Szenario 2 (angelehnt an [AAU23])

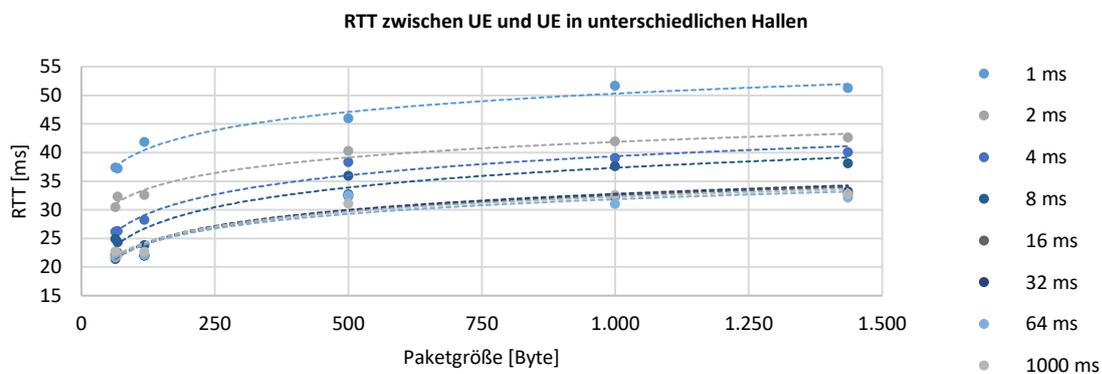


Abbildung 8.13: RTT-Messergebnisse für Szenario 3 (angelehnt an [AAU23])

## PROFINET-OWDs

An dieser Stelle werden die Messergebnisse aus Tabelle 8.1 in Abschnitt 8.1.2 erneut aufgegriffen. Tabelle 8.4 zeigt noch einmal die mittleren Ende-zu-Ende-OWDs für die beiden Versuchsaufbauten mit einem bzw. zwei 5G-Links in komprimierter Form. Jeder Messwert beruht auf 100.000 Frames und einer konstanten Frame-Länge von 68 Byte bzw. 118 Byte über VXLAN im 5G-System.

Tabelle 8.4: Messergebnisse von PROFINET über 5G (angelehnt an [AAU23])

Aktualisierungszeit $t$ [ms]	Ein 5G-Link		Zwei 5G-Links
	OWD <sub>UL</sub> [ms]	OWD <sub>DL</sub> [ms]	OWD <sub>UL+DL</sub> [ms]
64	11,01	8,52	16,50
32	10,99	8,56	17,45
16	12,69	9,50	18,47
8	14,00	10,74	18,75

### Methodik für die Berechnung des PDB

Basierend auf den gemessenen Ping-Verzögerungen über die Trace-Routes und PROFINET-OWDs für unterschiedliche Zeitintervalle bzw. Aktualisierungszeiten sowie für die unterschiedlichen 5G-Verbindungsrichtungen (UL, DL und UL+DL) können die 5G PDB-Werte mit den nachfolgenden Schritten näherungsweise berechnet werden. Unter Verwendung der Messungen und bestimmter Annahmen kann das PDB abgeleitet werden, um die Tabelle für das QoS-Mapping zwischen 5G und TSN zu konkretisieren.

### Verhältnis von DL- zu UL-OWDs für einen 5G-Link

Unabhängig von der Aktualisierungszeit führt das TDD-Muster mit der standardmäßig im 5G-System konfigurierten Zeitschlitz-Verteilung zwischen UL und DL von 3:7 zu einem durchschnittlichen OWD-Verhältnis gemäß (6). Dafür wird der Faktor  $x$  eingeführt, welcher die geringere Verzögerung im DL verglichen zum UL ausdrückt.

$$x = \frac{\text{OWD}_{\text{DL}}}{\text{OWD}_{\text{UL}}} \approx 0,767 \quad (6)$$

Da die PROFINET-Kommunikation zwischen IO-Controller und IO-Device in beide Richtungen symmetrisch ist, sollte die 5G-Verzögerung idealerweise in UL- und DL-Richtung identisch sein. Nach [Ri21] führen jedoch auch gleichmäßig zwischen UL und DL verteilte Zeitschlitze nicht zu einem Wert von  $x \approx 1$ .

### OWD-Verhältnisse verschiedener Verbindungsrichtungen

Die Verhältnisse von  $\text{OWD}_{\text{UL+DL}}$  zu  $\text{OWD}_{\text{DL}}$  und von  $\text{OWD}_{\text{UL+DL}}$  zu  $\text{OWD}_{\text{UL}}$  lassen sich aus den Messungen ableiten und bestimmen die Funktion  $y(t)$  gemäß (7) für den DL und (8) für den UL.

$$y_{\text{DL}}(t) = \frac{\text{OWD}_{\text{UL+DL}}(t)}{\text{OWD}_{\text{DL}}(t)} \quad (7)$$

$$y_{\text{UL}}(t) = \frac{\text{OWD}_{\text{UL+DL}}(t)}{\text{OWD}_{\text{UL}}(t)} \quad (8)$$

$y(t)$  gilt für Szenario 2 und verdeutlicht, dass zwei 5G-Links zu einer höheren Verzögerung im Vergleich zu einem einzelnen DL oder UL führen. Tabelle 8.5 zeigt die gemessenen  $y$ -Werte für

unterschiedliche Aktualisierungszeiten  $t$  in Abhängigkeit von  $OWD_{DL}$  und  $OWD_{UL}$ . Das Verhältnis ist bezogen auf den UL niedriger als bezogen auf den DL.

Tabelle 8.5:  $y$ -Werte für verschiedene Aktualisierungszeiten (angelehnt an [AAU23])

Aktualisierungszeit $t$ [ms]	$y_{DL}$	$y_{UL}$
64	1,937	1,499
32	2,039	1,588
16	1,944	1,455
8	1,746	1,339
Mittelwert	1,916	1,470

Abbildung 8.14 zeigt die entsprechenden Funktionsgraphen.

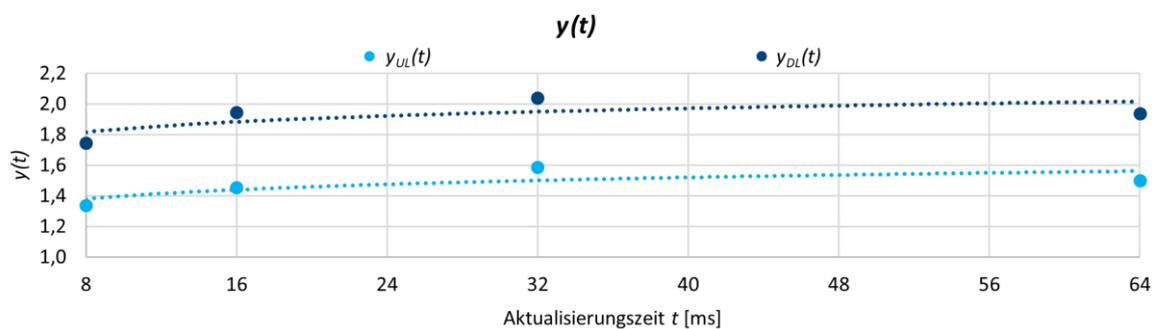


Abbildung 8.14: Berechnete OWD-Verhältnisse (angelehnt an [AAU23])

Der Vergleich von Szenario 2 und 3 zeigt, dass die RTT-Werte in Szenario 3 unabhängig von  $t$  durchschnittlich um 12 % höher sind als in Szenario 2. Dieser Faktor wird durch die Funktion  $z(t)$  beschrieben und führt zu (9).

$$z(t) \approx 1,12 \cdot y(t) \quad (9)$$

### Verhältnisse von OWD zu RTT verschiedener Verbindungsrichtungen

Die OWD-Werte in Relation zu den RTT-Werten in den jeweiligen Verbindungsrichtungen resultieren in den linearen Näherungsfunktionen  $f(t)$ ,  $g(t)$  und  $h(t)$  gemäß (10)-(12) für die Szenarien 1 und 2. Darin werden sowohl ein 5G-Link (1L) als auch zwei 5G-Links (2L) berücksichtigt.

$$f(t) = \frac{OWD_{UL}(t)}{RTT_{1L}(t)} \approx -0,0023 \cdot t + 0,8755 \quad (10)$$

$$g(t) = \frac{OWD_{DL}(t)}{RTT_{1L}(t)} \approx -0,0016 \cdot t + 0,6642 \quad (11)$$

$$h(t) = \frac{OWD_{UL+DL}(t)}{RTT_{2L}(t)} \approx -0,0015 \cdot t + 0,9255 \quad (12)$$

Abbildung 8.15 stellt die Verhältnisse als Funktionsgraphen dar. Beispielsweise zeigt der Graph von  $h(t)$ , dass das OWD bereits etwa 85 % der RTT beträgt. Folglich macht  $l_{UEzEG}$  etwa 35 % von RTT/2 aus, d. h. für eine Strecke. Dementsprechend entfallen ca. 60 % auf den UL und 22 % auf den DL.

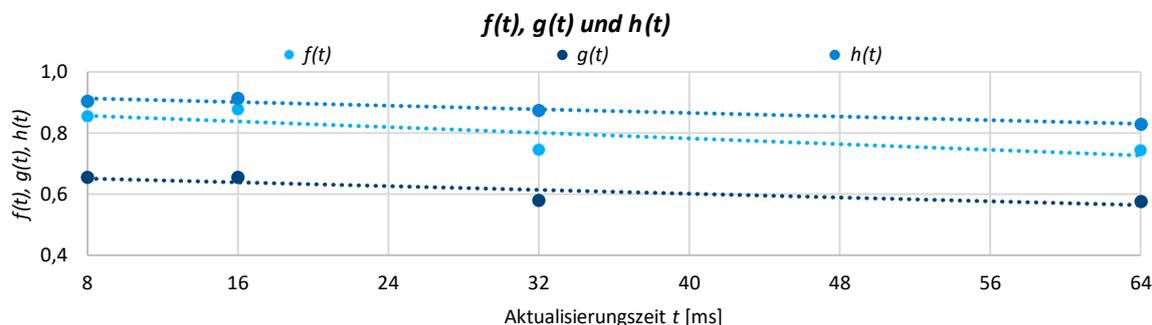


Abbildung 8.15: Berechnete Verhältnisse von OWD zu RTT (angelehnt an [AAU23])

## 8.2.2 Berechnungsergebnisse

Die Berechnungsergebnisse sollen Schlussfolgerungen für das PDB zulassen. Trace-Routes, die auf allen intermediären kabelgebundenen Hops basieren, führen zu einer konstanten DPVZ von etwa 3,3 ms, die unabhängig von Paketrate und Paketgröße ist, falls keine Überlastung oder fragmentierten Jumbo-Frames vorhanden sind. Im Gegensatz dazu sind in 5G sowohl OWD als auch RTT Funktionen der Paketrate  $t$  und der Paketgröße  $s$ . Dies ist auf die Modulation und das TDD-Muster zurückzuführen. Die Messergebnisse deuten auf eine zusätzliche Verzögerung hin, die durch die Konvertierung von Kabel auf Funk und umgekehrt verursacht wird, wie in (13) dargestellt.

$$\frac{RTT - DPVZ}{2} < OWD \ll PDB \quad (13)$$

Es wird angenommen, dass  $l_{EzE}$  der TSN-Periodizität bzw. der PROFINET-Aktualisierungszeit entspricht. Während sich  $l_{EzE}$  und PDB auf das OWD beziehen, gilt DPVZ für die RTT. Das Verhältnis von RTT (einschließlich der 5G-Verbindung) zu DPVZ (nur kabelgebundene Hops) drückt den Anteil des 5G-Systems an der Gesamtverzögerung aus und ist definiert als der Gewichtungsfaktor  $w$  pro Datenverkehrsklasse mit Index  $i$  ( $i = 0, \dots, 7$ ), wie in (14) angegeben, wobei  $n$  für die Anzahl der Hops steht.

$$PDB_i(s, t) = \frac{l_{EzE}}{n} \cdot \frac{RTT(s, t)}{DPVZ} = \frac{l_{EzE}}{n} \cdot w_i(s, t) \quad (14)$$

Als Referenz-Szenario soll die DL-Übertragung definiert werden. Um die gleiche reale Verzögerung für die anderen Kommunikationsszenarien zu erreichen, können  $x$ ,  $y$  und  $z$  als zusätzliche Faktoren in den PDB-Berechnungsformeln (15)-(18) berücksichtigt werden. Darin wird die Abhängigkeit von  $s$  und  $t$  aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit nicht erneut aufgeführt.

$$PDB_i = \frac{l_{EzE}}{n} \cdot w_i \cdot \begin{cases} 1 & \text{für Szenario 1 (DL)} \\ x & \text{für Szenario 1 (UL)} \\ y & \text{für Szenario 2} \\ z & \text{für Szenario 3} \end{cases} \quad (15)$$

$$PDB_{i, \text{Szenario1 (UL)}} = x \cdot PDB_i \approx 0,767 \cdot PDB_i \quad (16)$$

$$PDB_{i, \text{Szenario2}} = y \cdot PDB_i \approx 1,667 \cdot PDB_i \quad (17)$$

$$PDB_{i, \text{Szenario3}} = z \cdot PDB_i \approx 1,867 \cdot PDB_i \quad (18)$$

Zu beachten gilt, dass die Werte auf Messungen mit einem 5G-System nach 3GPP Release 15 basieren. Sie liefern nur einen Anhaltspunkt für URLLC bzw. TSN-Kommunikation. Durch Weiterentwicklungen werden für die Zukunft präzisere Werte erwartet. Somit lässt sich die allgemein gültige Berechnungsformel für das PDB vorerst mit (19) bestimmen, wobei  $l_{UEzEG}$  und  $BD$  jeweils von der Paketrate und der Paketgröße abhängen.

$$PDB_i = \frac{l_{EzE}}{n} \cdot \frac{BD_{5G} + l_{UEzEG}}{\overline{BD}_{TSN}} \quad (19)$$

Gemäß dem 3GPP Bridge-Modell befinden sich aus der Perspektive des 5G-Systems hinter den DS-TTs nur TSN-Endgeräte und keine TSN-Bridges. Auf der anderen Seite kann mehr als eine TSN-Bridge hinter dem NW-TT angebunden sein. Da ein hybrides Netzwerk höchstwahrscheinlich fünf und höchstens acht Hops umfasst [CL12], werden die zehn Hops entsprechend dem Versuchsaufbau in dieser Dissertation als Extremfall angenommen. Dies kann für C2D in einer TSN-Ringtopologie oder C2C für die Kommunikation zwischen TSN-Domänen gelten. Tabelle 8.6 enthält die berechneten gerundeten PDB-Werte auf Basis der zuvor erläuterten Einflussgrößen und Berechnungsformeln.

Tabelle 8.6: Berechnete PDB-Werte (angelehnt an [AAU23])

TSN-Datenverkehrstyp	Frame-Länge / Paketgröße [Byte]	Periodizität / Paketrate [ms]	RTT [ms]	DPVZ [ms]	Gewichtungs- faktor $w$	PDB [ms]
Isochron	500	50	17,67	2,94	5,98	30
Zyklisch synchron	100	0,1	21,08	2,96	7,17	0,07
Zyklisch asynchron	1.000	0,5	21,47	3,49	6,15	0,30
Netzwerksteuerung	200	10	12,52	2,89	4,33	4,33
Alarmer & Events	1.500	2.000	21,43	3,65	5,87	1.174
Konfiguration & Diagnose	1.500	1.000	21,55	3,59	6,00	600
Best Effort High	1.500	10	22,15	3,66	6,04	6
Best Effort Low	1.500	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.

### 8.2.3 Diskussion und Fazit der analytischen Berechnung

#### Diskussion

Die Berechnungsergebnisse basieren auf den Mittelwerten der annähernd normalverteilten gemessenen Verzögerungen aus Abschnitt 8.1.2, vgl. Abbildung 8.5 und Abbildung 8.6. Es ist nicht zielführend, die Maximalwerte in den Berechnungsformeln zu berücksichtigen, da sie in jeder Messreihe unabhängig von Paketrate und Paketgröße zufällig ausfallen. Der Fokus liegt auf der Methodik und darüber hinaus ist davon auszugehen, dass künftige 3GPP-Releases den Jitter deutlich

reduzieren, wodurch Mittelwerte relevanter sind als Maximalwerte. Da das PDB im 5G-System noch nicht konfiguriert werden kann, müssen auf der Grundlage periodischer Übertragungen mit minimalem Jitter Rückschlüsse auf das PDB gezogen werden.

Das PDB markiert eine Obergrenze und ist daher für eine deterministische Kommunikation nur bedingt brauchbar. Die Paketverzögerung nimmt mit der Datenlast im Netzwerk zu. Mit dem standardmäßig im 5G-System konfigurierten  $5QI = 9$  liegt das PDB bei 300 ms und wird nicht ausgeschöpft. Im Falle eines erforderlichen PDB von 1 ms mit Tausenden von zeitkritischen TSN-Streams über 5G in einem ausgedehnten Fabriknetzwerk ist das Verhalten des 5G-Systems jedoch fraglich.

Abhängig vom Kommunikationspfad der TSN-Streams und von der 5G-Anbindung der TSN-Endgeräte gemäß den diskutierten Kommunikationsszenarien sollte ein  $PDB_{UL}$ ,  $PDB_{DL}$  und  $PDB_{UL+DL}$  für das QoS-Mapping berechnet und bei der Konfiguration der TSN-Streams berücksichtigt werden. Der DS-TT muss bei demselben PDB für einen UL-Stream eine höhere Verzögerung veranschlagen als der NW-TT für einen DL-Stream, um letztendlich dasselbe OWD zu erreichen. Tabelle 8.7 gibt die modifizierten 5QIs mit einem berechneten PDB-Wert pro TSN-Datenverkehrstyp an. Zu beachten ist, dass die berechneten PDB-Werte nicht bedeuten, dass das 5G-System sie in der Realität erfüllen kann.

Tabelle 8.7: Modifizierte QoS-Mapping-Tabelle für 5G und TSN (angelehnt an [AAU23])

TSN-Priorität	5QI	Resource Type	5G Priority Level	PDB [ms]	PER	MDBV [Byte]
7	128	GBR	1	30	$10^{-6}$	500
6	129	DC-GBR	2	0,07	$10^{-6}$	100
5	130	DC-GBR	3	0,3	$10^{-5}$	1.000
4	131	DC-GBR	4	4,33	$10^{-5}$	200
3	132	GBR	5	1.174	$10^{-4}$	1.500
2	133	GBR	6	600	$10^{-4}$	1.500
1	134	GBR	7	6	$10^{-3}$	1.500
0	135	(Non-) GBR	8	n. a.	$10^{-3}$	1.500

$BD_{5G}$  beinhaltet die Verzögerung zwischen LAN- und WAN-Schnittstellen des UE, die auch für die PDB-Berechnung in der Ende-zu-Ende-Betrachtung essentiell ist. Es stellt sich heraus, dass für einen einzelnen TSN-Stream mit einer Periodizität von 8 ms und kleinen Frames von 68 Byte (oder 118 Byte durch VXLAN) das maximal gemessene OWD in Szenario 1 bereits 82,79 ms beträgt (vgl. Tabelle 8.1), wobei  $l_{UEzEG}$  etwa 4,9 ms ausmacht, d. h. das PDB von 300 ms wird zu fast 26 % ausgereizt.

### Fazit

Die Korrelation zwischen realen Verzögerungen und dem PDB wurde untersucht und eine Methodik zur Berechnung geeigneter PDB-Werte für das QoS-Mapping zwischen 5G und TSN abgeleitet. Die gemessenen RTT- und OWD-Werte hängen jeweils vom Kommunikationsszenario, der Paketrate und der Paketgröße ab. Dass die OWDs immer höher als die Hälfte der RTT sind, liegt an der zusätzlichen Verzögerung bei den UEs selbst, die durch die Konvertierung zwischen Funk- und Kabelschnittstellen, durch VXLAN-Tunneling und durch die Übersetzung am DS-TT verursacht wird. Die gemessenen Verzögerungen sollten ebenfalls in die PDB-Berechnung einbezogen werden. Da zwei 5G-Links anstelle von einem 5G-Link keine doppelte Verzögerung bedeuten, sollte auch nicht unbedingt ein doppeltes PDB angesetzt werden. Folglich kann es sinnvoll sein, zwischen  $PDB_{UL}$ ,  $PDB_{DL}$  und  $PDB_{UL+DL}$  zu unterscheiden, was die TSN-Translatorn entsprechend mappen.

Die Einschränkungen der Messungen in einem 5G-System nach 3GPP Release 15 können die Berechnungsergebnisse leicht verfälschen. Deshalb sollen die Simulationen im nachfolgenden Abschnitt noch stärker auf den Anteil des 5G-Systems an den Verzögerungen fokussieren und um den Aspekt der Priorisierung erweitert werden.

## 8.3 Simulationen

Ziel dieses dritten Validierungsansatzes ist es, die Übertragungszeiten in verschiedenen Kommunikationsszenarien zur Beurteilung geeigneter PDB-Werte zu simulieren. Je nach TSN-Datenverkehrsklasse werden unterschiedliche QoS-Parameterwerte für die Priorität, Periodizität und Frame-Länge definiert, welche die Verzögerungen innerhalb des 5G-Systems beeinflussen. Die Werte orientieren sich am IIC-Datenverkehrsmodell, was die Simulationen im Rahmen dieser Dissertation von den meisten verwandten Arbeiten aus Abschnitt 3.4.3 unterscheidet. Anhand von Simulationen des TSN-Datenverkehrs über 5G in OMNeT++ werden die Verzögerungen unter Variation der UE-Anzahl untersucht, um realistische Bridge Delay- und PDB-Werte für Frames verschiedener TSN-Datenverkehrstypen und -klassen zu ermitteln.

Der Beitrag dieses Abschnitts zur Forschung umfasst Indikationen für das 5G Bridge Delay und das PDB in Abhängigkeit der Eigenschaften von Datenverkehr in einem hybriden 5G-TSN-Netzwerk. Diese dienen als Grundlage für die Entwicklung und Konkretisierung der TSN-Translatorn und für das QoS-Mapping zwischen 5G und TSN. Die Inhalte dieses Abschnitts basieren auf der vorab publizierten Arbeit [AAU23].

### 8.3.1 Simulationsmodell

In diesem Abschnitt wird das Simulationsmodell in der Umgebung OMNeT++ mit ihren Frameworks INET und Simu5G erläutert. INET ist eine Modellbibliothek und stellt Protokolle, Agenten und andere Modelle für Kommunikationsnetzwerke bereit, z. B. Modelle für den Internet-Stack oder drahtlose und kabelgebundene Protokolle auf Layer 2. Diverse andere Simulations-Frameworks basieren auf INET und erweitern es, z. B. Simu5G für 5G-Mobilfunk [Bo23]. Simu5G simuliert die Data Plane von RAN und Core gemäß 3GPP Release 16. Es ermöglicht die Simulation von 5G-Kommunikation mit mehreren Funktionen und bietet 3GPP-konforme Protokolle [VN20]. Für die Simulationen im Rahmen dieser Dissertation werden die Versionen INET 4.4.1 und Simu5G 1.2.1 verwendet.

Um geeignete Werte für die Parameter BD und PDB pro Datenverkehrsklasse zu evaluieren, werden die 5G-Übertragungszeiten mit Simu5G in den folgenden vier Szenarien mit einer unterschiedlichen Anzahl von UEs und gemäß den in Für die Periodizität und Frame-Länge werden jeweils ungefähr die Mittelwerte aus dem Definitionsbereich laut IIC-Datenverkehrsmodell mit Anpassungen an IEC/IEEE 60802 verwendet. Nur Best Effort Low wird mit 1.500 Byte modelliert, um auch annähernd die maximale Paketgröße zu berücksichtigen. Für sporadisch auftretenden Datenverkehr werden Periodizitäten  $\geq 1$  s angenommen.

Um die Skalierbarkeit zu bewerten, wird die Anzahl der UEs erhöht, beginnend mit einem UE. Zur besseren Vergleichbarkeit befinden sich alle UEs an derselben Position in einem Abstand von 10 m zur gNB. Insgesamt enthält die Simulation 22 Iterationen (vier Szenarien mit jeweils unterschiedlicher Anzahl von UEs sowie ohne und mit Priorisierung).

Tabelle 8.8 aufgeführten Datenverkehrsparametern simuliert:

1. UPF zu UE (DL),
2. UE zu UPF (UL),
3. UE zu UE (UL+DL) und
4. Mischverkehr (UL+DL zwischen UPF und UE).

Für die Periodizität und Frame-Länge werden jeweils ungefähr die Mittelwerte aus dem Definitionsbereich laut IIC-Datenverkehrsmodell mit Anpassungen an IEC/IEEE 60802 verwendet. Nur Best Effort Low wird mit 1.500 Byte modelliert, um auch annähernd die maximale Paketgröße zu berücksichtigen. Für sporadisch auftretenden Datenverkehr werden Periodizitäten  $\geq 1$  s angenommen.

Um die Skalierbarkeit zu bewerten, wird die Anzahl der UEs erhöht, beginnend mit einem UE. Zur besseren Vergleichbarkeit befinden sich alle UEs an derselben Position in einem Abstand von 10 m zur gNB. Insgesamt enthält die Simulation 22 Iterationen (vier Szenarien mit jeweils unterschiedlicher Anzahl von UEs sowie ohne und mit Priorisierung).

Tabelle 8.8: TSN-Parameterkonfiguration für die Simulation der 5G-Übertragungszeiten (angelehnt an [AAU23])

TSN-Daten- verkehrsklasse	TSN-Datenverkehrstyp	TSN-Priorität / 5G Priority Level	TSN-Periodizität / 5G Transferintervall [ms]	TSN Frame-Länge / 5G MDBV [Byte]
7	Isochron	6 / 2	1	68
6	Zyklisch synchron	5 / 3	10	500
5	Zyklisch asynchron	4 / 4	30	500
4	Netzwerksteuerung	7 / 1	500	250
3	Alarmer & Events	3 / 5	2.000	800
2	Konfiguration & Diagnose	2 / 6	1.000	1.000
1	Best Effort High	1 / 7	25	1.250
0	Best Effort Low	0 / 8	1.000	1.500

Innerhalb des zu simulierenden Netzwerks wird ein Timer konfiguriert, um die Pakete beim Sender und Empfänger mit einem Zeitstempel zu versehen. Abbildung 8.16 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Komponenten und Module. Um die Priorisierung zu implementieren, müssen Module modifiziert werden (vgl. grüne Blöcke): Der Server und die gNB werden durch ein *Ppp*-Verbundmodul modifiziert, welches die Submodule *DropTailQueue*, *Classifier* und *PriorityScheduler* enthält, um acht Queues mit unterschiedlicher Priorität einzuführen. Die Module *CbrSender* und *CbrReceiver* dienen zur Übertragung von Paketen mit konstanter Bit-Rate über das Netzwerk und werden modifiziert, um die Kennzeichnung von Paketen für die anschließende Priorisierung in den *Ppp*-Modulen zu ermöglichen.

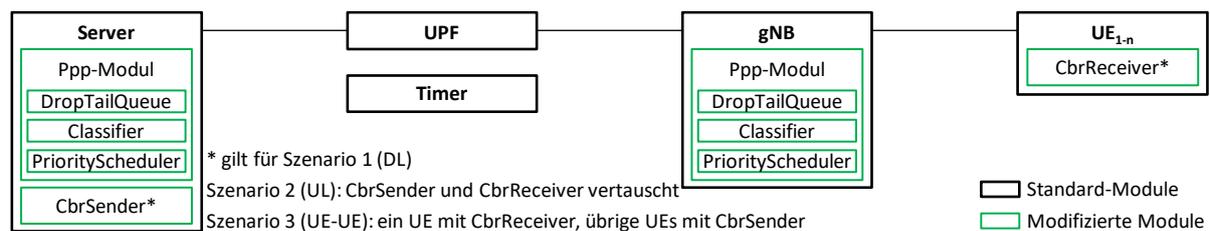


Abbildung 8.16: Schematische Darstellung der Komponenten und Module in OMNeT++ (angelehnt an [AAU23])

### 8.3.2 Simulationsergebnisse

Tabelle 8.9 zeigt die maximalen Übertragungszeiten der 22 Iterationen pro Datenverkehrsklasse.

Tabelle 8.9: Maximale Übertragungszeiten in ms pro Iteration und Datenverkehrsklasse (angelehnt an [AAU23])

Datenverkehrsklasse			7	6	5	4	3	2	1	0
Iteration	Szenario	Priorisierung (Ja/Nein)	Isochron 1 ms, 68 Byte	Zyklisch synchron 10 ms, 500 Byte	Zyklisch asynchron 30 ms, 500 Byte	Alarmer 500 ms, 250 Byte	Events 2.000 ms, 800 Byte	Konfig. & Diagnose 1.000 ms, 1.000 Byte	Best Effort High 25 ms, 1.250 Byte	Best Effort Low 1.000 ms, 1.500 Byte
1	DL	N	13	13	12	14	12	11	11	8
2	1 UE	J	12	12	12	12	12	12	12	12
3	DL	N	21	21	19	22	19	18	20	15
4	2 UEs	J	21	21	21	21	21	21	21	21
5	DL	N	46	43	40	46	29	36	42	28
6	3 UEs	J	43	43	43	43	43	43	43	43
7	UL	N	28	28	27	24	20	23	25	22
8	1 UE	J	28	28	27	28	26	26	26	23
9	UL	N	35	35	30	32	29	28	31	27
10	2 UEs	J	31	31	30	31	30	30	30	27
11	UL	N	53	53	47	46	43	42	53	37
12	3 UEs	J	51	51	49	51	49	49	49	39
13	UE-UE	N	35	35	33	32	27	31	34	30
14	2 UEs	J	34	34	34	34	34	34	34	30
15	UE-UE	N	43	43	39	40	38	37	43	35
16	3 UEs	J	44	44	40	44	40	40	40	35
17	Misch- verkehr	N	DL: 13 UL: 28	DL: 13 UL: 28	DL: 12 UL: 27	DL: 14 UL: 24	DL: 12 UL: 20	DL: 11 UL: 23	DL: 11 UL: 25	DL: 8 UL: 22
18	1 UE	J	DL: 12 UL: 28	DL: 12 UL: 28	DL: 12 UL: 27	DL: 12 UL: 28	DL: 12 UL: 26	DL: 12 UL: 26	DL: 12 UL: 26	DL: 12 UL: 23
19	Misch- verkehr	N	DL: 23 UL: 35	DL: 23 UL: 35	DL: 22 UL: 30	DL: 23 UL: 31	DL: 21 UL: 29	DL: 20 UL: 28	DL: 21 UL: 31	DL: 16 UL: 27
20	2 UEs	J	DL: 21 UL: 33	DL: 21 UL: 33	DL: 21 UL: 30	DL: 21 UL: 33	DL: 21 UL: 30	DL: 21 UL: 30	DL: 21 UL: 30	DL: 21 UL: 26
21	Misch- verkehr	N	DL: 42 UL: 54	DL: 40 UL: 54	DL: 33 UL: 46	DL: 37 UL: 49	DL: 30 UL: 45	DL: 35 UL: 42	DL: 39 UL: 51	DL: 29 UL: 35
22	3 UEs	J	DL: 43 UL: 57	DL: 43 UL: 57	DL: 43 UL: 56	DL: 43 UL: 57	DL: 43 UL: 56	DL: 43 UL: 56	DL: 43 UL: 56	DL: 43 UL: 43

In allen Szenarien und Iterationen ist ein ähnliches Muster zu beobachten. Große Pakete und solche mit geringer Periodizität weisen längere Übertragungszeiten auf. Auch die Priorisierung wirkt sich auf die Übertragungszeiten aus. Wie bei den beiden anderen Validierungsansätzen in den Abschnitten 8.1 und 8.2, sind die Übertragungszeiten aufgrund des TDD-Musters im UL höher als im DL. Die Zeitschlitz-Verteilung zwischen UL und DL von 3:7 kann in OMNeT++ nicht konfiguriert werden. Mischverkehr erhöht die Netzwerklast und damit die Übertragungszeiten im Vergleich zu den Szenarien mit reinem UL- oder DL-Datenverkehr. Die UE-zu-UE-Kommunikation beinhaltet immer UL und DL und stellt das komplexeste Szenario mit den höchsten Übertragungszeiten dar.

Die Datenverkehrsklassen 4, 6 und 7 mit den höchsten Prioritäten und die Datenverkehrsklasse 1 profitieren von der Priorisierung, insbesondere im UL. Im Allgemeinen verbessern sich durch die Priorisierung Verzögerungen von kleinen Paketen bis zu 500 Byte und niedrigen Periodizitäten von bis zu 25 ms. Zwei Ausnahmen bilden die Datenverkehrsklasse 1 mit großen Paketen von 1.250 Byte und die Datenverkehrsklasse 4 mit niedriger Periodizität von 500 ms, bei denen sich die Priorisierung ebenfalls positiv auswirkt. Bei anderen Datenverkehrsklassen kommt es aufgrund der mit der Priorisierung eingeführten Queues zu zusätzlichen Verzögerungen.

Je mehr UEs gleichzeitig Pakete übertragen, desto größer sind die Mittelwerte, Maxima und Ausreißer der Übertragungszeit. Im DL verhalten sich UEs unterschiedlich, obwohl sie sich im gleichen Abstand zur gNB befinden. Bei mehreren UEs existiert nur ein absolutes Maximum, aber die Mittelwerte sind ähnlich. Durch separate Zeitmessungen pro UE können mehrere Werte für den DL ermittelt werden. Der UL liefert nur einen Wert, da die Zeit nur am Server gemessen werden kann. Die Minimalwerte der Übertragungszeit betragen 4-7 ms im DL, 4-15 ms im UL und 9-20 ms für UE zu UE, wobei die Performance von drei UEs besser ist als von zwei. Für Mischverkehr liegen die Minima bei 5-7 ms im DL und 4-15 ms im UL. Sie scheinen unabhängig von der Paketgröße und Periodizität zu sein.

Abbildung 8.17 bis Abbildung 8.24 zeigen Boxplot-Diagramme der Iterationen, bei denen Unterschiede und Effekte sichtbar und vergleichbar sind. Die Mittelwerte und Boxgrößen (unteres und oberes Quartil) sind tendenziell bei den Datenverkehrsklassen 0 und 2 am höchsten, was auf die Kombination aus großen Paketen und hoher Periodizität zurückzuführen ist. Die sogenannten Whiskers der Boxplot-Diagramme enden im 5. und 95. Perzentil. Werte außerhalb davon sind Ausreißer und als Kreuze dargestellt. Das arithmetische Mittel, die Minima und Maxima sind in den Diagrammen als Zahlenwerte angegeben. Die orangefarbene Linie in jedem Boxplot markiert jeweils den Median.

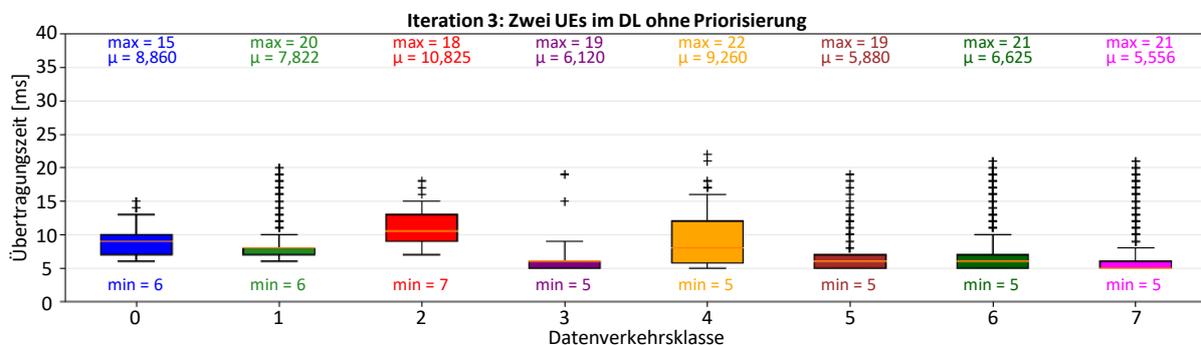


Abbildung 8.17: Zwei UEs im DL ohne Priorisierung (Iteration 3) (angelehnt an [AAU23])

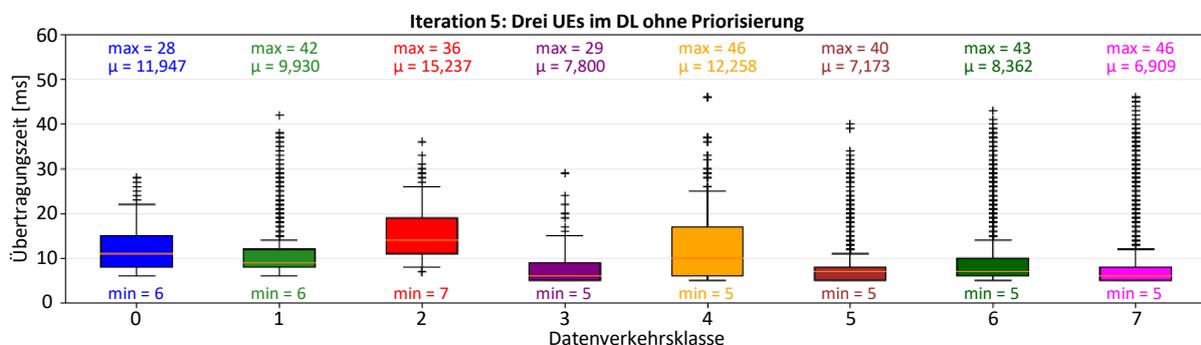


Abbildung 8.18: Drei UEs im DL ohne Priorisierung (Iteration 5) (angelehnt an [AAU23])

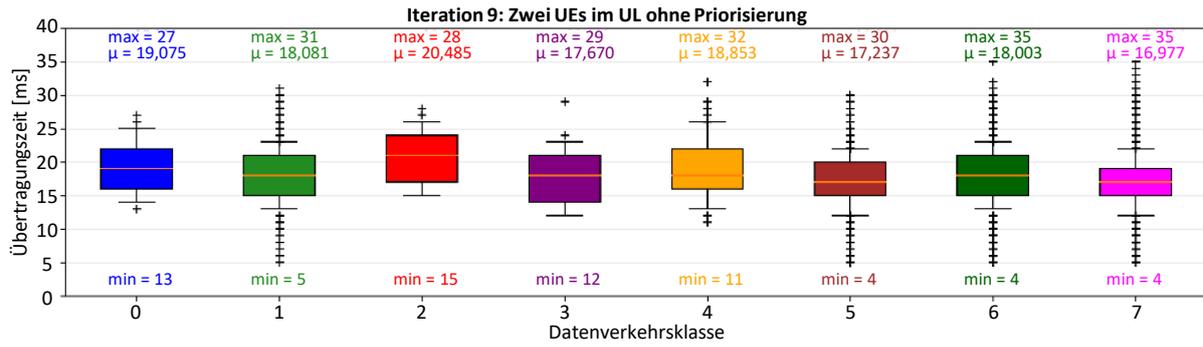


Abbildung 8.19: Zwei UEs im UL ohne Priorisierung (Iteration 9) (angelehnt an [AAU23])

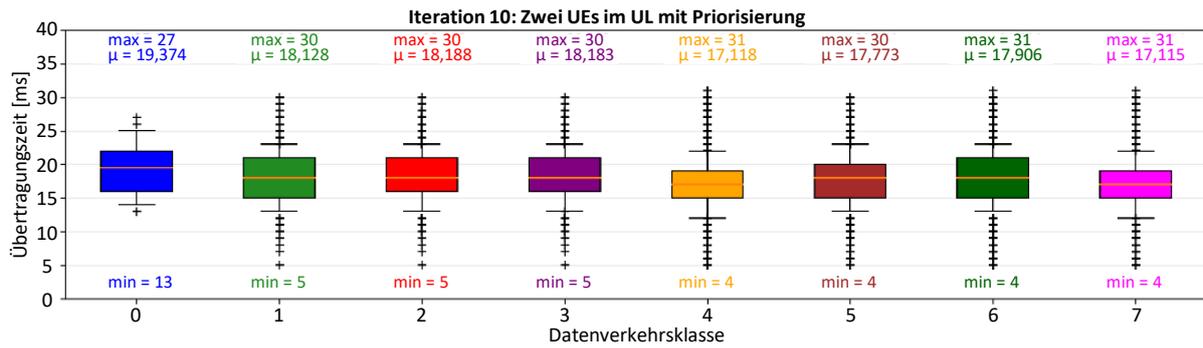


Abbildung 8.20: Zwei UEs im UL mit Priorisierung (Iteration 10) (angelehnt an [AAU23])

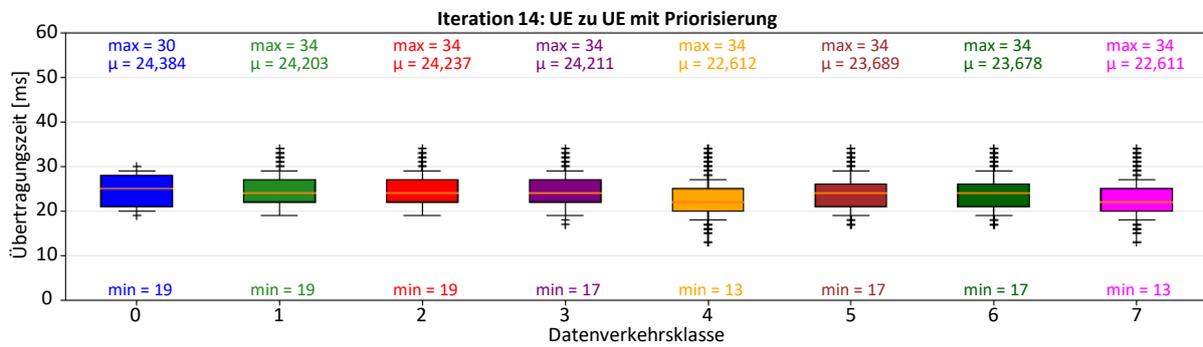


Abbildung 8.21: UE zu UE mit Priorisierung (Iteration 14) (angelehnt an [AAU23])

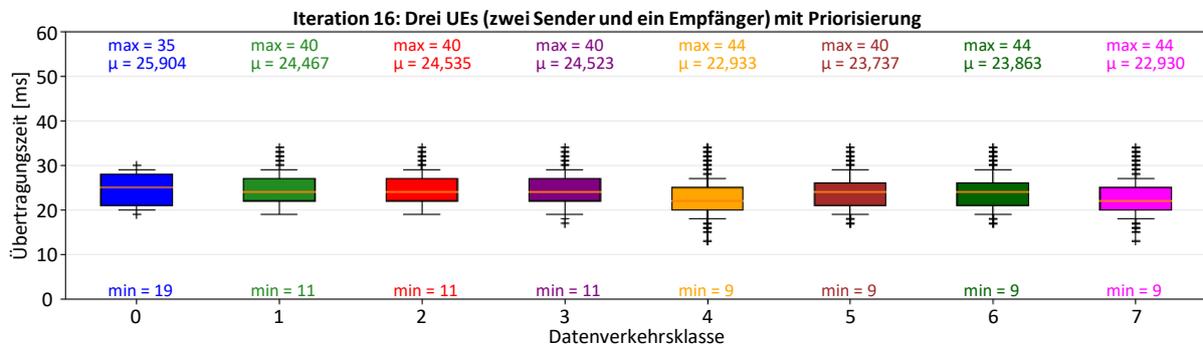


Abbildung 8.22: Drei UEs (zwei Sender und ein Empfänger) mit Priorisierung (Iteration 16) (angelehnt an [AAU23])

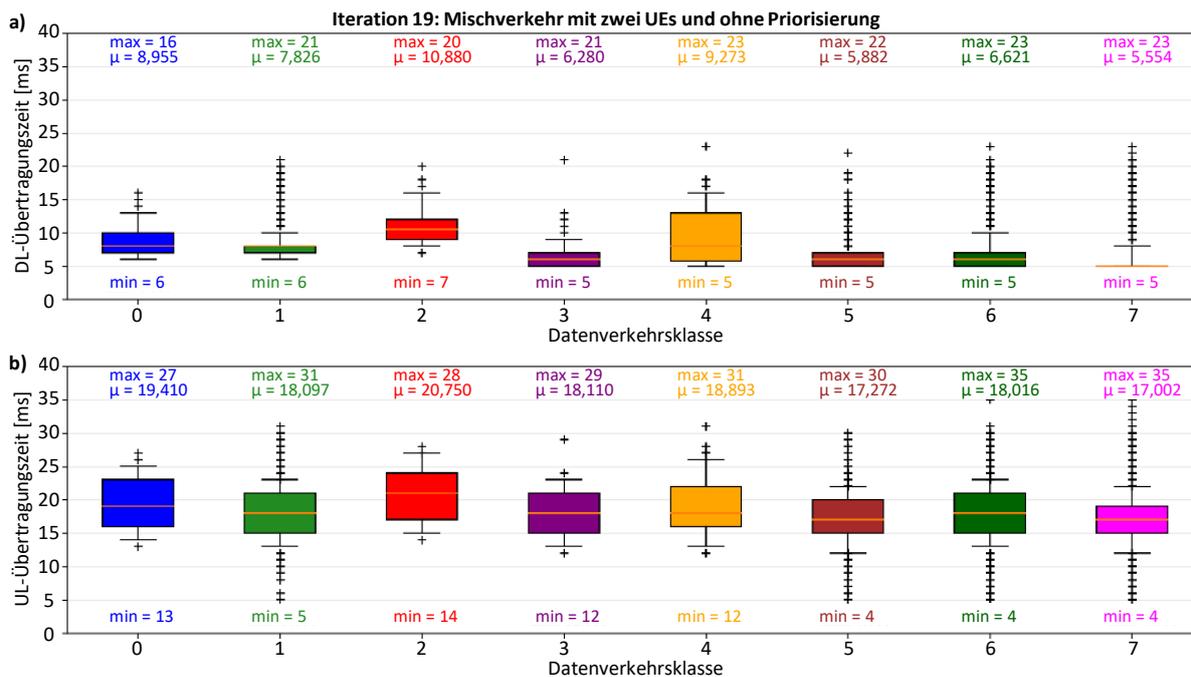


Abbildung 8.23: Mischverkehr mit zwei UEs ohne Priorisierung; a) DL und b) UL (Iteration 19) (angelehnt an [AAU23])

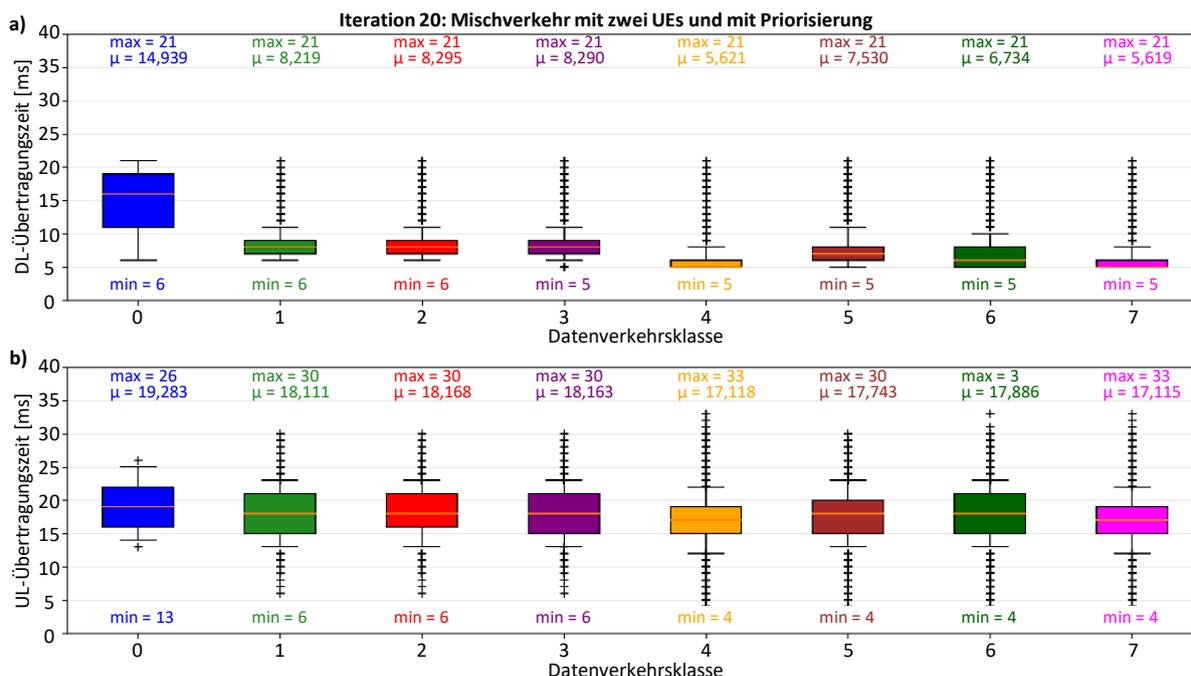


Abbildung 8.24: Mischverkehr mit zwei UEs und Priorisierung; a) DL und b) UL (Iteration 20) (angelehnt an [AAU23])

### 8.3.3 Diskussion und Fazit der Simulation

#### Diskussion

Tabelle 8.10 stellt die Simulationsergebnisse aus dieser Dissertation und aus denjenigen verwandten Arbeiten mit ähnlichem Fokus vergleichend gegenüber. Die Übertragungszeiten aus den Simulationen im Rahmen dieser Dissertation sind deutlich höher als die in den verwandten Arbeiten simulierten Werte. Obwohl alle aufgeführten Referenzen OMNeT++ verwenden, sind die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlich konfigurierten Simulationsmodelle und Parameter nicht unmittelbar vergleichbar.

Tabelle 8.10: Vergleich der Simulationsergebnisse dieser Dissertation mit verwandten Arbeiten

Referenz	Anzahl Datenverkehrsklassen	Datenverkehrsmodell	Ergebnisse der Übertragungszeit
Dissertation	8	IIC	8-57 ms
[Ma20a]	1	5G-ACIA	0,12-7 ms
[RK22]	7	5G-ACIA	≤ 1 ms
[Ba23]	3	3GPP TS 22.104	4,2-9,5 ms
[De23]	4	IIC	< 3 ms im DL

Die Resultate sind für mehr als drei UEs nicht mehr zuverlässig, da die Übertragungszeiten im Sekundenbereich liegen. Bei vier und mehr UEs treten in jedem Szenario und jeder Datenverkehrsklasse Anomalien mit Paketverlusten und extrem hohen Verzögerungen auf, z. B. im DL bis zu 16,9 s bei fünf UEs oder bis zu 46,7 s bei zehn UEs. Dabei gilt es zu beachten, dass vermeintliche Paketverluste aufgetreten sind, weil die Simulation bereits beendet war, als die Pakete empfangen wurden. Daher ist die Skalierbarkeit des Simulationsmodells begrenzt und der ursprüngliche Plan mit 50 und 100 UEs muss verworfen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Differenz zwischen den Verzögerungen für priorisierte und nicht priorisierte Pakete proportional zur Anzahl der UEs zunimmt. Eine Verfeinerung des Simulationsmodells kann dieses Problem lösen. Die Mobilität der UEs wurde nicht berücksichtigt, kann aber in einer künftigen Weiterentwicklung des Simulationsmodells implementiert werden. Obwohl es nicht der Realität entspricht, dass sich alle UEs an derselben Position befinden, wird diese Vereinfachung zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewählt.

Darüber hinaus ist es relevant, die Bedeutung der Simulationsergebnisse für das BD und PDB zu interpretieren. Die Übertragungszeit kann mit dem BD gleichgesetzt werden. Die Übertragungszeiten werden auf Anwendungsebene gemessen, da sie ansonsten unabhängig von den Paketeigenschaften stets etwa 1 ms zwischen UPF und UE betragen. Folglich verursacht die Applikation auf Sender- und Empfängerseite die Verzögerungen. Von diesen wird angenommen, dass sie vergleichbar mit den von NW-TT und DS-TT im 3GPP Bridge-Modell eingeführten Verzögerungen sind, z. B. auch aufgrund der Konvertierung zwischen Funk- und Kabelschnittstellen im UE. Die simulierten BDs übertreffen jedoch deutlich die Erwartungswerte für zeitkritische TSN-Übertragungen über 5G.

QoS im Allgemeinen und das PDB im Speziellen können bislang nicht in Simu5G konfiguriert werden. Die Maximalwerte der Übertragungszeit könnten als PDBs von TSN-Datenverkehrsklassen definiert werden. Allerdings verfehlen diese Werte immer noch deutlich die Erwartungen an URLLC, was von Simu5G offensichtlich noch nicht unterstützt wird. Die Priorisierung in 5G konnte mit einem positiven Effekt auf TSN-Datenverkehrsklassen mit hoher Priorität implementiert werden. Je mehr Datenverkehr im Netzwerk durch größere Pakete, eine kürzere Periodizität und/oder mehr UEs auftritt, desto höher liegen die Übertragungszeiten ( $\hat{=}$  BD) und desto mehr wird ein mögliches PDB ausgeschöpft. Es ist fraglich, ob PDBs tatsächlich auf Werte im Mikrosekunden-Bereich (wie in [La20] berechnet) herunterskaliert werden können und ob künftige 5G-Systeme diese unter allen Bedingungen einhalten können.

### Fazit

Im Rahmen der Simulationen wurden die Übertragungszeiten der acht TSN-Datenverkehrsklassen mit unterschiedlichen QoS-Parametern in einem 5G-System simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verzögerungen von den Parametern Priorität, Periodizität und Frame-Länge sowie von den vier untersuchten Szenarien mit unterschiedlichen Verbindungsrichtungen und der Anzahl von UEs abhängen. Die simulierten Verzögerungen der 5G-Bridge sind für zeitkritischen TSN-Datenverkehr zu hoch, 5QIs und PDBs sind nicht konfigurierbar und somit lässt sich die Verzögerung nicht auf einen bestimmten Wert beschränken.

## 8.4 Beurteilung der Integrationsfähigkeit von 5G in TSN

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse aus den drei Validierungsansätzen bezogen auf die Anwendbarkeit des entwickelten Datenverkehrskonzepts für hybride 5G-TSN-Netzwerke beurteilt und Schlussfolgerungen für die Integrationsfähigkeit von 5G in TSN im Kontext von QoS gezogen.

Eine bidirektionale Übersetzung der QoS-Parameter zwischen 5G und TSN an den 5G-Systemgrenzen ist notwendig. Eine zentrale Rollen spielen die TSN-Datenverkehrsklassen und die 5G QoS-Profile. Dabei stellt der 5QI lediglich eine Kennung dar, für den standardisierte (1-127) und frei definierbare (128-255) Werte möglich sind. Jedoch lassen sich nur 64 verschiedene QoS-Flows anhand des QFI unterscheiden. Eine Standardisierung TSN-spezifischer 5QIs scheint nicht sinnvoll, weil dadurch die Flexibilität für implementierungsabhängige Besonderheiten eingeschränkt wird. 5QIs konnten weder in den praktischen Versuchen noch in den Simulationen konfiguriert werden. Sämtlicher Datenverkehr wurde mit demselben 5QI bzw. QoS-Profil behandelt.

Beim Resource Type scheint es bedingt sinnvoll, nicht nur zeitkritische TSN-Streams, sondern alle Datenverkehrsklassen als DC-GBR zu konfigurieren, weil die beiden anderen Typen nicht in die PER zählen und deren PDB überschritten werden darf. Dies würde der Zielsetzung von TSN widersprechen, eine reservierte Bandbreite für alle Datenverkehrstypen ohne Verluste zur Verfügung zu stellen. Abschließend zu klären ist der konkrete Umgang mit Best Effort. In dieser Dissertation konnte der Resource Type nicht konfiguriert und somit dessen Einfluss nicht evaluiert werden. Sein Effekt sollte in künftigen Arbeiten näher untersucht werden.

Das 5G Priority Level lässt sich auf die TSN-Priorität bzw. den PCP des VLAN-Tags im Ethernet Frame mappen, jedoch ist die logische Reihenfolge unterschiedlich. Eine prototypische Priorisierung konnte im Rahmen der Simulationen umgesetzt und der Effekt erfolgreich demonstriert werden, auch wenn diese nicht über den konkreten Priority Level umgesetzt werden konnte. Die simulierten Datenpakete unterschiedlicher Prioritäten zeigten, dass die Priorisierung die Übertragungszeit beeinflusst. Dabei muss künftig noch geklärt werden, wie Non-TSN-Datenverkehr, z. B. datenraten-intensiver IP-Datenverkehr, behandelt wird. Dessen Priorität könnte zwischen oder außerhalb der Prioritäten für TSN-Datenverkehr liegen oder über einen separaten Network Slice organisiert werden.

Für das PDB bzw. Bridge Delay ist zu beachten, dass die 5G-Bridge nur einen Hop im TSN-Netzwerk darstellt, dessen Größe vom spezifischen Einsatzfall abhängt. Der Wert gilt demzufolge nicht Ende-zu-Ende zwischen Talker und Listener (vgl. Abbildung 2.6). Ein pauschaler vorkonfigurierter Wert für eine Datenverkehrsklasse ist nur im Rahmen einer Extremfall-Betrachtung möglich, bei dem Ressourcen verschwendet werden. Wenn die 5G-Bridge für zeitunkritische Frames jedoch keine PSFP-Konfiguration von der CNC erhält, ist ein statisches Mapping auf Basis vorkonfigurierter 5QIs unerlässlich. Bei den Stream-Klassen wird die Verzögerung für jeden Flow individuell über das Bridge Delay berechnet. Allerdings gilt auch hierfür die Beschränkung auf maximal 64 verschiedene QoS-Flows, weshalb eine gewichtete Verteilung der Anzahl von QoS-Flows über alle Datenverkehrsklassen als sinnvoll erachtet wird. Ein PDB-Wert pro TSN-Datenverkehrsklasse wurde im Rahmen der analytischen Berechnungen ermittelt. Weder in den praktischen Versuchen noch in den Simulationen war eine Konfiguration des PDB möglich. Das Bridge Delay wurde in den Simulationen als Übertragungszeit für die verschiedenen TSN-Datenverkehrsklassen untersucht.

In Bezug auf die PER zielt ein Anlagenbetreiber bzw. -instandhalter stets auf einen fehlerlosen Betrieb oder 100 % Zuverlässigkeit ab, d. h. eine PER = 0, was jedoch unrealistisch ist. Dafür wird zumindest eine PER nahe 0 angestrebt, z. B.  $10^{-9}$ . Inwiefern ein solcher Wert für alle Datenverkehrsklassen möglich und auch tatsächlich notwendig ist, gilt es in künftigen Arbeiten zu erforschen. Im Rahmen der realen Messungen und der Simulationen wurde die PER gemessen, jedoch wurden sinnvolle Werte nicht hinterfragt.

Das MDBV entspricht der maximalen Frame-Länge der TSN-Datenverkehrsklasse und lässt keinen Interpretationsspielraum zu. Eine konkrete Konfiguration im 5G-System ist noch nicht möglich und wurde folglich in dieser Dissertation nur insofern berücksichtigt, dass der Effekt unterschiedlicher maximaler Frame-Längen auf die Übertragungszeit untersucht wurde.

Das Averaging Window stellt einen komplexen Parameter dar, welcher von der Gesamtheit aller Flows im 5G-System abhängt. Das Averaging Window beschreibt ein Zeitintervall eines sich wiederholenden Verkehrsmusters (Traffic Pattern), um ausreichend Bandbreite zu reservieren. Eine sinnvolle Konfiguration dieses Parameters ist schwierig und konnte im Rahmen dieser Dissertation nicht überprüft werden.

Abschließend lässt sich als Beitrag zu Forschungsfrage 4 festhalten, dass das entwickelte Datenverkehrskonzepts bislang nur bedingt anwendbar ist, weil eine Implementierung von 5G-QoS weder in der Realität noch in Simulationsmodellen vollständig gegeben ist. Die Effekte unterschiedlicher Eigenschaften von TSN-Datenverkehr, d. h. unterschiedliche Werte für die Frame-Länge, Periodizität und Priorität, auf die Übertragungszeiten im 5G-System konnten demonstriert werden. Ein kritischer Faktor bleibt insbesondere das PDB, dessen Untersuchung im Rahmen dieser Dissertation nur eingeschränkt möglich ist und weiterer Forschung bedarf.

## 9 Fazit und Ausblick

Dieses Kapitel fasst in Abschnitt 9.1 die Erkenntnisse und Antworten auf die Forschungsfragen dieser Dissertation zusammen, unterstreicht die Relevanz der Ergebnisse für Wissenschaft sowie Praxis und reflektiert das gewählte Vorgehen. Abschnitt 9.2 liefert einen Ausblick auf weitere Perspektiven und offene Fragestellungen, die sich aus dieser Dissertation ergeben.

### 9.1 Fazit

Diese Dissertation sollte klären, wie sich TSN als kabelgebundene und 5G-Mobilfunk als drahtlose Kommunikationsstandards so kombinieren lassen, dass ein für Industrie 4.0 geeignetes Datenverkehrskonzept entsteht. Diese übergeordnete Frage wurde im Zuge von vier konkreten Forschungsfragen beantwortet:

1. *Nach welchen Anforderungen lassen sich Anwendungsfälle für die Integration von 5G in TSN im Kontext von Industrie 4.0 charakterisieren?*

Es wurde herausgearbeitet, dass dafür grundsätzlich verteilte Applikationen mit spezifischen QoS-Anforderungen infrage kommen. Dabei sind mindestens ein stationärer kabelgebundener sowie ein mobiler drahtloser Kommunikationspartner beteiligt. Die drahtlose Anbindung ist entweder zwingend erforderlich, z. B. wegen eines Mobilitätsanspruchs, oder vorteilhaft, z. B. wenn eine hohe Beanspruchung zu Kabelbrüchen führen kann. Prinzipiell sind alle Anwendungsfälle geeignet, da TSN skalierbar sowohl für zeitkritischen als auch für weniger kritischen Datenverkehr Ressourcen verwaltet und somit Determinismus bietet. Dennoch liegt der Fokus auf zeitkritischem Datenverkehr. In der Literatur, in industriellen Gremien und in der Standardisierung werden primär mobile Roboter, drahtlose Bedien-Panels und die Roboter-Bewegungssteuerung (inkl. Safety-Daten) als relevante Anwendungsfälle für die Integration von 5G in TSN genannt.

Wichtiger als die Anwendungsfälle an sich sind jedoch die TSN-Datenverkehrstypen pro Anwendungsfall wie sie im Datenverkehrsmodell des Industry IoT Consortium und im TSN-Profil für die industrielle Automatisierung (IEC/IEEE 60802) differenziert werden und schließlich auch im 5G-System auf QoS-Flows abgebildet werden müssen. Die unterschiedliche Priorisierung von Datenverkehr spiegelt sich auch in den verwendeten Protokollen wider, z. B. PROFINET und OPC UA, die beide über TSN und 5G übertragen werden können.

2. *Welche Faktoren spielen für eine einsatzfähige Lösung einer hybriden Netzwerkarchitektur mit 5G und TSN im Kontext von Industrie 4.0 eine Rolle?*

Die Dissertation verdeutlicht, dass die bislang streng zwischen IT und OT getrennten Netzwerkdomänen im Zuge von Industrie 4.0 zu Cyber-physischen Systemen verschmelzen werden. Für die unterschiedlichen Paradigmen der Datenübertragung auf IP- oder Ethernet-Basis ist eine Entscheidung erforderlich. Die TSN-Befähigung der IT-Domäne würde die Implementierung des 5G-Systems als TSN-Bridge vereinfachen. Dagegen würde die DetNet-Befähigung der OT-Domäne die Implementierung des 5G-Systems als DetNet-Router ermöglichen, jedoch etablierte Layer 2-Lösungen verdrängen. Kompromisslösungen stellen das Tunneling, z. B. über VXLAN, oder die vorgeschlagene Idee des 5G-Systems als IT-/OT-Gateway dar.

Für 5G sind neben den Integrationsmodellen als Link, Bridge oder Router die Unterstützung von Ethernet PDU-Sessions und Redundanz wichtige Voraussetzungen. Die redundante Ringtopologie in Anlagennetzwerken ist auch im 5G-System zu berücksichtigen. Ein weiterer Faktor ist die Implementierung von TSN oder DetNet im 5G-Fronthaul und -Midhaul. Entscheidend für die Integration von 5G in TSN ist die Organisation der TSN-Domänen und CNC, was für industrielle

Netzwerke gegenwärtig eine Herausforderung darstellt und im Widerspruch zum 3GPP Bridge-Modell steht. In dieser Dissertation wurden 5G-integrierte Netzwerkarchitekturen sowohl für TSN als auch DetNet konzipiert und diskutiert, welche die zuvor genannten Faktoren berücksichtigen.

### *3. Wie kann ein ganzheitliches Datenverkehrskonzept basierend auf den Kommunikationsanforderungen der Anwendungsfälle kombiniert mit der Netzwerkarchitektur aussehen?*

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Datenverkehrskonzept beruht auf dem 5G QoS-Modell aus 3GPP TS 23.501, dem TSN-Datenverkehrsmodell des Industry IoT Consortium sowie dem TSN-Profil für die industrielle Automatisierung (IEC/IEEE 60802) und legt den Fokus auf das Mapping der QoS-Parameter zwischen 5G und TSN. Dabei werden die charakteristischen Parameter Priorität, Periodizität, Frame-Länge (bzw. Paketgröße) und Latenz berücksichtigt. Auf Grundlage der statischen und dynamischen Ansätze wurden verschiedene Zuordnungen erarbeitet und diskutiert. Die acht TSN-Datenverkehrsklassen können bis zu 64 5G QoS-Flows zugeordnet werden. Deren gerechte Verteilung gemäß den Wertebereichen typischer Datenverkehrsparameter wurde angestrebt, jedoch fehlen bislang konkrete Mechanismen im 3GPP-Standard, um eine solche Verteilung zu realisieren.

### *4. Inwiefern ist das entwickelte Datenverkehrskonzept anwendbar?*

Zur Validierung des Datenverkehrskonzepts wurden drei Ansätze untersucht: Zunächst wurde die Performance in einem realen Versuchsaufbau mit PROFINET, OPC UA, TSN und 5G gemessen. Im zweiten Schritt wurde das 5G PDB in einer Ende-zu-Ende-Betrachtung über ein hybrides 5G-TSN-Netzwerk analytisch berechnet. Abschließend wurden Übertragungszeiten von TSN-Datenverkehr über das 5G-System unter Berücksichtigung der Priorisierung in OMNeT++ simuliert. Bislang fehlende URLLC-Fähigkeiten erschweren die Integration von 5G in TSN und deren gemeinsame Implementierung erheblich. Deshalb liefern die Messungen am realen Versuchsaufbau kaum aussagekräftige Ergebnisse in Bezug auf QoS in 5G-TSN-Netzwerken. Sie berücksichtigen nur einen bzw. zwei spezifische Streams bei variabler Periodizität und fester Paketgröße. Die analytischen Berechnungen verwenden zusätzlich auch Messwerte für unterschiedliche Paketgrößen, allerdings nicht bei mehreren parallelen Streams, und liefern PDB-Werte für die TSN-Datenverkehrsklassen. In den Simulationen konnte die Priorisierung implementiert und der Einfluss verschiedener Parameter-Kombinationen von TSN-Datenverkehr in acht parallelen Streams auf die 5G-Übertragungszeiten analysiert werden. Allerdings sind auch diese Verzögerungen noch weitaus höher als für zeitkritischen Datenverkehr gefordert.

### **Relevanz der Ergebnisse für Wissenschaft und Praxis**

In der Praxis sind Kompetenzen und Verantwortlichkeiten meistens auf eine Technologie oder Domäne beschränkt, d. h. entweder auf 5G oder TSN. Zudem sind die Anforderungen der Automatisierungsanwendungen nicht einheitlich und den Netzwerkverantwortlichen oft nicht bekannt. Deshalb sind reale Versuche unter Beteiligung aller für die industrielle Automatisierung relevanten Technologien zielführend, obwohl die Funktionalitäten noch keine vollständige Integration von 5G in TSN ermöglichen. Auf Basis der Datenverkehrsmodelle sowie mithilfe der analytischen Berechnungen und Simulationen lässt sich trotzdem ein Datenverkehrskonzept ableiten und validieren, welches unabhängig vom Endanwender, der Applikation und dem Netzwerk gültig ist und somit zu einem Fortschritt für Wissenschaft und Praxis beiträgt. Das QoS-Mapping wurde zuvor nicht derart tiefgreifend untersucht. Die in dieser Dissertation herausgearbeiteten Ansätze offenbaren noch einige Lücken auf dem Weg zu einer praktischen Implementierung der 5G-Bridge, welche im Rahmen künftiger Forschung adressiert werden sollten.

### **Reflexion des eigenen Vorgehens**

Der ganzheitliche Ansatz aus den Perspektiven 5G, TSN, Applikation und Netzwerk ist sinnvoll und wichtig, um alle relevanten Aspekte in ausreichendem Maße zu berücksichtigen. 5G- und TSN-Funktionalitäten wie URLLC, 5G als TSN-Bridge, CNC/CUC-Instanzen mit automatischer Schedule-Konfiguration oder TSN-fähige Endgeräte sind bislang kaum oder gar nicht verfügbar. Deshalb liefern die praktischen Versuche im Hinblick auf die Integration von 5G in TSN deutlich weniger zielführende Erkenntnisse als ursprünglich erwartet. Ein Zugang zu prototypischen 5G-Systemen mit Unterstützung von URLLC, QoS und/oder TSN hätte die Validierung deutlich vereinfacht. So sind Rückschlüsse und Vorhersagen in Bezug auf die Fähigkeiten bzw. Performance künftiger Funktionalitäten schwierig und als kritisch zu bewerten.

Die Reihenfolge der Validierungsansätze weicht von der üblichen Vorgehensweise ab, bei der zunächst theoretisch berechnet, dann simuliert und abschließend in einer realen Implementierung getestet wird. Im Fokus dieser Dissertation sollte von Anfang an die reale Implementierung stehen. Da die Laborversuche jedoch keine Validierung von TSN-Funktionalitäten über 5G zuließen, wurden stattdessen analytische Berechnungen und Simulationen durchgeführt. Beide beruhen auf einigen vereinfachenden Annahmen. Die Berechnungen hätten auch auf rein theoretischer Basis erfolgen können, sollten aber bewusst auch Messwerte aus den praktischen Versuchen berücksichtigen, um realitätsnähere Ergebnisse zu erhalten. Die eigenständige Umsetzung der Priorisierung in OMNeT++ lieferte zielführende Erkenntnisse, auch wenn sie nur einen Aspekt des gesamten 5G QoS-Frameworks darstellt. Vor allem eine Möglichkeit zur Konfiguration des PDB hätte noch aussagekräftigere Erkenntnisse liefern können.

## **9.2 Ausblick**

### **Generelle 5G-Funktionalitäten für TSN**

Aufgrund der Trends zur IT/OT-Konvergenz und Virtualisierung von Steuerungen im Zuge von Industrie 4.0 ist fraglich, ob sich TSN überhaupt in der industriellen Automatisierung durchsetzen wird oder langfristig doch IP-basierte deterministische Technologien, z. B. DetNet, zum Einsatz kommen.

Infolge der Einschränkungen bei der praktischen Implementierung in dieser Dissertation stellt sich die Frage, ob Mobilfunk mit URLLC wirklich eine skalierbare Performance erreichen wird, welche es ermöglicht, eine 5G-Bridge real zu implementieren und diese in ein kabelgebundenes TSN-Netzwerk zu integrieren. Künftig ist zu erforschen, wie zuverlässig eine 5G-Bridge in einer hochdynamischen Umgebung mit vielen Flows und UEs bei häufigem Handover funktionieren kann. Zudem sind die Auswirkungen von Sidelink, d. h. D2D-Kommunikation, und Verschlüsselung auf das QoS-Verhalten näher zu untersuchen. Beim QoS-Mapping ist eine einheitliche bidirektionale Übersetzung an NW-TT und DS-TT, unabhängig vom UE-Hersteller und den Performance-Bedingungen, sicherzustellen.

Die Konfigurationsmöglichkeiten in 5G und TSN bieten viele flexible Optionen. In Zukunft könnten neben dem Fully Centralized Model auch die anderen TSN-Konfigurationsmodelle für die Mobilfunk-Integration im 3GPP-Standard berücksichtigt und unterstützt werden. Für die CNC existieren erste prototypische Implementierungen, z. B. in [Al22], jedoch noch nicht für die TSN AF.

Eine mögliche Performance-Verbesserung durch Edge Computing und Network Slicing, deren Betrachtung in dieser Dissertation explizit ausgeschlossen wurde, ist im Kontext der 5G-Integration in TSN zu prüfen. Beim Network Slicing sollten die Auswirkungen einer spezifischen Aufteilung nach Datenverkehrstypen oder ganzen Applikationen hinsichtlich der URLLC- bzw. TSN-Performance evaluiert werden. Bestehende Ansätze, z. B. in [AJA24] und [Gu23], sollten um den Aspekt der Skalierbarkeit erweitert werden, um die QoS für multiple Network Slices, UEs, PDU-Sessions und QoS-Flows zu bewerten. Nicht zuletzt sind auch die Effekte von Redundanz-Mechanismen zu beurteilen.

### **Konkrete Untersuchungen basierend auf dieser Dissertation**

Um industrielle CPS real zu implementieren, muss die Integrationsfähigkeit aller relevanten Technologien und Konzepte im Hinblick auf skalierbare Mechanismen zur QoS-Steuerung weiter erforscht werden. Um die Realisierbarkeit des Anwendungsfalls SNAP demonstrieren zu können, sollten künftige Arbeiten die Matrixproduktion mit Rolling Chassis und deren Auswirkungen auf das 5G-System simulieren. Dies führt zwar zu einem hochkomplexen System, ist aber ein notwendiger Schritt, um SNAP in der Realität testen und schließlich implementieren zu können.

Die erarbeiteten Architekturkonzepte mit 5G, TSN und DetNet sollten in weiterführenden Forschungsarbeiten bzgl. Anforderungen, Funktionalitäten und Skalierbarkeit validiert werden. Damit könnten die Netzwerkarchitekturen und Datenverkehrskonzepte verfeinert und optimiert werden, um als Orientierung für Konzepte künftiger CPS dienen zu können. Auch der Lösungsvorschlag für die Problematik der IT-/OT-Separation in hybriden Netzwerken, bei dem das 5G-System als IT/OT-Gateway fungiert, sollte näher untersucht werden.

Das entwickelte Datenverkehrskonzept und dessen Mapping-Ansätze sollten in künftigen Arbeiten noch umfassender simuliert werden und sobald wie möglich die Praxistauglichkeit anhand von Experimenten mit realen 5G- und TSN-Komponenten validiert werden. Dabei sind die verschiedenen Kommunikationsszenarien zu berücksichtigen. Außerdem gilt es zu prüfen, ob und inwiefern frei konfigurierbare 5QIs und deutlich niedrigere PDB-Werte erfüllt werden können.

Das mathematische Berechnungsmodell sollte im Rahmen weiterer Forschung verfeinert und durch Simulationen und praktische Experimente validiert werden. Insbesondere ist zu klären, ob und inwiefern das QoS-Mapping in den TSN-Translatoren eine zusätzliche Verzögerung verursacht. Diese gilt es mit der durch das Tunneln mittels VXLAN verursachten Verzögerung zu vergleichen, d. h. durch die erhöhte Paketgröße aufgrund zusätzlicher Header.

Eine Erweiterung des Simulationsmodells um Mobilität und eine verbesserte Skalierbarkeit für eine deutlich größere Anzahl von UEs sind ebenfalls an die Zukunft zu stellende Erwartungen.

In realen Implementierungen sollten künftige Arbeiten sich auch auf die Effekte weiterer 5G-Parameterkonfigurationen konzentrieren, wie z. B. der Zeitschlitz-Verteilung zwischen UL und DL sowie der QoS-Profilen differenziert pro QoS-Flow.

Es ist anzustreben, PROFINET und OPC UA parallel über verschiedene Typen von PDU-Sessions über das 5G-System zu übertragen. Die Zeitsynchronisation ist mit hinreichender Präzision zu stabilisieren, um die Implementierung des TAS zu ermöglichen.

Darüber hinaus sollten die Skalierbarkeit und Effekte durch erhöhte Netzwerklast sowie zusätzliche UEs mit hoher Datenrate auf die Performance von zeitkritischem Datenverkehr untersucht werden. Dabei wird empfohlen, auch unterschiedliche Topologien zu überprüfen, z. B. eine variable Anzahl von Bridges zwischen den Automatisierungsgeräten.

Das QoS-Verhalten in Handover-Szenarien und unter anderen Störeinflüssen für die Funkverbindung ist näher zu untersuchen. Handover sollen zwar unterbrechungsfrei erfolgen, können aber kurzzeitig die Verzögerung erhöhen und somit Determinismus verhindern. Dies ist besonders kritisch im Anwendungsfall von FTS, die für Handover prädestiniert sind, insbesondere bei sicherheitsrelevanter Datenübertragung.

Die Mechanismen zur QoS-Steuerung in 5G und TSN sind noch vielschichtiger als sie im Rahmen dieser Dissertation untersucht werden konnten. Eine Lösung für ein gemeinsames QoS-Modell ist nicht trivial und erfordert weitere Forschung mit einem ganzheitlichen Ansatz und unter Berücksichtigung von Zeitsynchronisation, Priorisierung und Scheduling. Darüber hinaus sollte untersucht werden, wie das Netzwerk entscheidet, Flows bzw. Streams zu terminieren, falls nicht alle Anwendungen mit hoher Priorität gleichzeitig bedient werden können.

## Literaturverzeichnis

- [3G20] 3GPP: TR 22.804: Study on Communication for Automation in Vertical Domains (V16.3.0), 2020.
- [3G21] 3GPP: TS 22.104: Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains (V18.3.0), 2021.
- [3G22a] 3GPP: TS 23.503: Policy and charging control framework for the 5G System (V18.0.0), 2022.
- [3G22b] 3GPP: TS 23.501: System architecture for the 5G System (V18.0.0), 2022.
- [3G22c] 3GPP: TS 22.261: Service requirements for the 5G system (V18.8.0), 2022.
- [3G23] 3GPP: TS 38.300: NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (V18.0.0), 2023.
- [3G24] 3GPP: Releases. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases>, Stand: 18.04.2024.
- [5G19a] 5G-ACIA: Selected Testing and Validation Considerations for Industrial Communication with 5G Technologies. White Paper, 2019. <https://5g-acia.org/whitepapers/selected-testing-and-validation-considerations-for-industrial-communication-with-5g-technologies/>.
- [5G19b] 5G-ACIA: A 5G Traffic Model for Industrial Use Cases. White Paper, 2019. <https://5g-acia.org/whitepapers/a-5g-traffic-model-for-industrial-use-cases/>.
- [5G19c] 5G-ACIA: Integration of Industrial Ethernet Networks with 5G Networks. White Paper, 2019. <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-industrial-ethernet-networks-with-5g-networks/>.
- [5G19d] 5G-ACIA: 5G for Automation in Industry. White Paper, 2019. <https://5g-acia.org/whitepapers/5g-for-automation-in-industry/>.
- [5G19e] 5G-ACIA: 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios. White Paper, 2019. <https://5g-acia.org/whitepapers/5g-non-public-networks-for-industrial-scenarios/>.
- [5G19f] 5G-ACIA: 5G for Connected Industries and Automation. White Paper, 2019. <https://5g-acia.org/whitepapers/5g-for-connected-industries-and-automation-second-edition/>.
- [5G20a] 5G-ACIA: Key 5G Use Cases and Requirements. White Paper, 2020. <https://5g-acia.org/whitepapers/key-5g-use-cases-and-requirements/>.
- [5G20b] 5G-SMART: D5.1 - First Report on New Technological Features to be Supported by 5G Standardization and Their Implementation Impact, 2020.
- [5G20c] 5G-SMART: D5.2 - First Report on 5G Network Architecture Options and Assessments, 2020.
- [5G21a] 5G Americas: 3GPP Releases 16 & 17 & Beyond, 2021.
- [5G21b] 5G-ACIA: 5G QoS for Industrial Automation. White Paper, 2021. <https://5g-acia.org/whitepapers/5g-quality-of-service-for-industrial-automation/>.

- [5G21c] 5G-ACIA: Exposure of 5G Capabilities for Connected Industries and Automation Applications. White Paper, 2021. <https://5g-acia.org/whitepapers/exposure-of-5g-capabilities-for-connected-industries-and-automation-applications-2/>.
- [5G21d] 5G-ACIA: Performance Testing of 5G Systems for Industrial Automation. White Paper, 2021. <https://5g-acia.org/whitepapers/performance-testing-of-5g-systems-for-industrial-automation/>.
- [5G21e] 5G-ACIA: Using Digital Twins to Integrate 5G into Production Networks. White Paper, 2021. <https://5g-acia.org/whitepapers/using-digital-twins-to-integrate-5g-into-production-networks/>.
- [5G21f] 5G-ACIA: Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications. White Paper, 2021. <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>.
- [5G21g] 5G-SMART: D5.4 - Second Report on 5G Network Architecture Options and Assessments, 2021.
- [5G22a] 5G-ACIA: Clarification of communication terms, parameters, and concepts. Internal Report, 2022.
- [5G22b] 5G-ACIA: Analysis of DetNet-based deterministic IP communication for industrial IoT and relationship to 5G. Internal Report, 2022.
- [5G22c] 5G-SMART: D4.4 - Report on Validation of 5G Use Cases in the Factory, 2022.
- [5G24a] 5G-ACIA: NPNs for Industrial Scenarios. White Paper, 2024. <https://5g-acia.org/whitepapers/npns-for-industrial-scenarios/>.
- [5G24b] 5G-ACIA: Integration of OPC UA in 5G Networks, 2024.
- [Ab20] Abreu, R. B. et al.: Scheduling Enhancements and Performance Evaluation of Downlink 5G Time-Sensitive Communications. *IEEE Access* 8, S. 128106–128115, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3008598.
- [ADA21] Akudo Nwogu, O.; Diaz, G.; Abdennebi, M.: Differential Traffic QoS Scheduling for 5G/6G Fronthaul Networks: 2021 31st International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). *IEEE*, S. 113–120, 2021. DOI: 10.1109/ITNAC53136.2021.9652162.
- [AEN16] Al-Shaikhli, A.; Esmailpour, A.; Nasser, N.: Quality of service interworking over heterogeneous networks in 5G: 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). *IEEE*, S. 1–6, 2016. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510913.
- [Ag18] Aguilera, P.: A hyperconnected world. 802.11ax and the next generation WiFi. Galgus (AOIFE Solutions S.L.), Sevilla, Spanien, 2018.
- [Ai20] Aijaz, A.: High-Performance Industrial Wireless: Achieving Reliable and Deterministic Connectivity Over IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society* 1, S. 28–37, 2020. DOI: 10.1109/OJIES.2020.2983259.
- [AI20] Addanki, V.; Iannone, L.: Moving a step forward in the quest for Deterministic Networks (DetNet): 2020 IFIP Networking Conference (Networking), S. 458–466, 2020.

- [AJA24] Adhikari, B.; Jaseemuddin, M.; Anpalagan, A.: Resource Allocation for Co-Existence of eMBB and URLLC Services in 6G Wireless Networks: A Survey. *IEEE Access* 12, S. 552–581, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3343250.
- [Ak17] Aktas, I. et al.: VDE Positionspapier Funktechnologien für Industrie 4.0, 2017.
- [Al22] Alvarez, I. et al.: Implementing a First CNC for Scheduling and Configuring TSN Networks: 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). *IEEE*, S. 1–4, 2022. DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921518.
- [An22a] Ansari, J. et al.: 5G enabled flexible lineless assembly systems with edge cloud controlled mobile robots: 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). *IEEE*, S. 1419–1424, 2022. DOI: 10.1109/PIMRC54779.2022.9977496.
- [An22b] Ansari, J. et al.: Performance of 5G Trials for Industrial Automation. *Electronics* 3/11, S. 412, 2022. DOI: 10.3390/electronics11030412.
- [An22c] Andrade Jardim, M. de; Zhang, K. K.; Harmatos, J.; Farkas, J.; Wang, K.; Schliwa-Bertling, P.; Sachs, J.; Varga, B.; Pancorbo Marcos, M. B.; Wang, C.; Miklos, G.; Sultana, S.: 5G System Support for Virtual TSN Bridge Management, QoS Mapping and TSN Qbv Scheduling, 2022. US 2022/0046462 A1.
- [An22d] Angilella, V. et al.: High Capacity and Resilient Large-Scale Deterministic IP Networks. *Journal of Network and Systems Management* 4/30, S. 1–28, 2022. DOI: 10.1007/s10922-022-09683-3.
- [As20] Asad, M. et al.: Beyond 5G: Hybrid End-to-End Quality of Service Provisioning in Heterogeneous IoT Networks. *IEEE Access* 8, S. 192320–192338, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032704.
- [At22] Atiq, M. K. et al.: When IEEE 802.11 and 5G Meet Time-Sensitive Networking. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society* 3, S. 14–36, 2022. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3135524.
- [Ba23] Bartolín-Arnau, L. M. et al.: Private 5G Networks for Cyber-Physical Control Applications in Vertical Domains: 2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–4, 2023. DOI: 10.1109/WFCS57264.2023.10144230.
- [BAB23] Bhattacharjee, S.; Alexandris, K.; Bauschert, T.: Hierarchical Control Plane Framework for Multi-Domain TSN Orchestration: 2023 IEEE 9th International Conference on Network Softwarization (NetSoft). *IEEE*, S. 26–34, 2023. DOI: 10.1109/NetSoft57336.2023.10175430.
- [Be18] Belliardi, R. et al.: Use Cases IEC/IEEE 60802. V1.3, 2018. <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2018/60802-industrial-use-cases-0918-v13.pdf>.
- [Bh21] Bhattacharjee, S. et al.: Network Slicing for TSN-Based Transport Networks. *IEEE Access* 9, S. 62788–62809, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074802.
- [Bh22] Bhimavarapu, K. et al.: Unobtrusive, Accurate, and Live Measurements of Network Latency and Reliability for Time-Critical Internet of Things. *IEEE Internet of Things Magazine* 3/5, S. 38–43, 2022. DOI: 10.1109/IOTM.001.2200068.

- [Bl19] Banovic-Curguz, N.; Ilisevic, D.: Mapping of QoS/QoE in 5G Networks: 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). IEEE, S. 404–408, 2019. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757034.
- [Bj10] Björklund, M.: RFC 6020. YANG - A Data Modeling Language for the Network Configuration Protocol (NETCONF). <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6020/>, Stand: 22.07.2024.
- [Bj16] Björklund, M.: RFC 7950. The YANG 1.1 Data Modeling Language. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc7950/>, Stand: 22.07.2024.
- [Bj19] Bjørnstad, S. et al.: Minimizing Delay and Packet Delay Variation in Switched 5G Transport Networks. *Journal of Optical Communications and Networking* 4/11, 49-59, 2019. DOI: 10.1364/JOCN.11.000B49.
- [Bo22] Bosk, M. et al.: Methodology and Infrastructure for TSN-Based Reproducible Network Experiments. *IEEE Access* 10, S. 109203–109239, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3211969.
- [Bo23] Bojthe, Z.; Meszaros, L.; Szászki, G.; Hornig, R.; Varga, A.; Török, A.: What Is INET Framework? <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>, Stand: 06.08.2024.
- [Br] Brown, G.: Ultra-Reliable Low-Latency 5G for Industrial Automation. White Paper. <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/ultra-reliable-low-latency-5g-for-industrial-automation.pdf>.
- [Br18] Bruckner, D. et al.: OPC UA TSN. A new Solution for Industrial Communication. White Paper, 2018. [https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/OPC\\_UA\\_TSN\\_-\\_A\\_new\\_Solution\\_for\\_Industrial\\_Communication.pdf](https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/OPC_UA_TSN_-_A_new_Solution_for_Industrial_Communication.pdf).
- [Br19] Bruckner, D. et al.: An Introduction to OPC UA TSN for Industrial Communication Systems. *Proceedings of the IEEE* 6/107, S. 1121–1131, 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2888703.
- [Bu24] Bundesnetzagentur: Regionale und lokale Netze. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/lokalenetze-node.html>, Stand: 06.08.2024.
- [Ca19] Cavalcanti, D. et al.: Extending Accurate Time Distribution and Timeliness Capabilities Over the Air to Enable Future Wireless Industrial Automation Systems. *Proceedings of the IEEE* 6/107, S. 1132–1152, 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2903414.
- [Ca20] Cavalcanti, D.: *Wireless TSN – Definitions, Use Cases & Standards Roadmap*, 2020.
- [Ca21] Cainelli, G. et al.: Performance evaluation of a 5G device in a non public network: 2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF). IEEE, S. 334–339, 2021. DOI: 10.1109/5GWF52925.2021.00065.
- [Ca22] Cavalcanti, D.: *Wireless TSN: Market Expectations, Capabilities & Certification*, 2022.
- [Ca23a] Cai, Y. et al.: Dynamic QoS mapping and adaptive semi-persistent scheduling in 5G-TSN integrated networks. *China Communications* 4/20, S. 340–355, 2023. DOI: 10.23919/JCC.fa.2022-0548.202304.
- [Ca23b] Candell, R. et al.: Scheduling for Time-Critical Applications Utilizing TCP in Software-Based 802.1Qbv Wireless TSN: 2023 IEEE 19th International Conference on Factory

- Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 1–8, 2023.  
DOI: 10.1109/WFCS57264.2023.10144232.
- [Ch18] Cheng, J. et al.: Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration* 2/10, S. 10–19, 2018.  
DOI: 10.1016/j.jii.2018.04.001.
- [Ch21a] Chinchilla-Romero, L. et al.: 5G Infrastructure Network Slicing: E2E Mean Delay Model and Effectiveness Assessment to Reduce Downtimes in Industry 4.0. *Sensors (Basel, Schweiz)* 1/22, 2021. DOI: 10.3390/s22010229.
- [Ch21b] Chai, Z. et al.: Cross Domain Clock Synchronization Based on Data Packet Relay in 5G-TSN Integrated Network: 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). IEEE, S. 141–145, 2021.  
DOI: 10.1109/ICECE54449.2021.9674640.
- [Ch22] Chen, Y. et al.: Power Service Mapping Scheduling Method Based on Fusion of 5G and Time-Sensitive Network: 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, S. 1309–1314, 2022.  
DOI: 10.1109/IAEAC54830.2022.9929661.
- [Ci17] Cisco: Time-Sensitive Networking: A Technical Introduction. White Paper, 2017.  
<https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>.
- [CK23] Choi, S.; Kim, C.: A Study on Latency Prediction in 5G network: 2023 14th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, S. 713–715, 2023.  
DOI: 10.1109/ICUFN57995.2023.10199172.
- [CL12] Chen, H.-Y.; Lee, C.: Analysis of the number of hops in wired-wireless heterogeneous networks: 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, S. 1806–1810, 2012. DOI: 10.1109/WCNC.2012.6214078.
- [Co19a] Collins, D.: Deterministic, real-time control: What does it really mean in motion control applications? <https://www.motioncontroltips.com/deterministic-real-time-control-what-does-it-really-mean-in-motion-control-applications/>, Stand: 06.08.2024.
- [Co19b] Costa, R. et al.: Handling real-time communication in infrastructured IEEE 802.11 wireless networks: The RT-WiFi approach. *Journal of Communications and Networks* 3/21, S. 319–334, 2019. DOI: 10.1109/JCN.2019.000013.
- [Cr16] Craciunas, S. S. et al.: Scheduling Real-Time Communication in IEEE 802.1Qbv Time Sensitive Networks. In (Plantec, A. et al. Hrsg.): *Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems*. ACM, New York, USA, S. 183–192, 2016. DOI: 10.1145/2997465.2997470.
- [CUR22] Cainelli, G.; Underberg, L.; Rauchhaupt, L.: Influences of logical link design in 5G campus systems: 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). IEEE, S. 373–378, 2022.  
DOI: 10.1109/FNWF55208.2022.00072.
- [De23] Debnath, R. et al.: 5GTQ: QoS-Aware 5G-TSN Simulation Framework: 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference, S. 1–7, 2023.
- [Di17] Dietrich, S. et al.: Performance indicators and use case analysis for wireless networks in factory automation: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging

- Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, S. 1–8, 2017.  
DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247605.
- [Di18] Dietrich, S. et al.: Optimized resource allocation for cascaded communication networks in factory automation: 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, S. 1616–1621, 2018. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352423.
- [Di22] Ding, P. et al.: Edge-to-Cloud Intelligent Vehicle-Infrastructure Based on 5G Time-Sensitive Network Integration: 2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, S. 1–5, 2022.  
DOI: 10.1109/BMSB55706.2022.9828687.
- [Do17] Dohler, M. et al.: Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the Tactile Internet: 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). IEEE, S. 1–5, 2017. DOI: 10.1109/EuCNC.2017.7980645.
- [En11] Enns, R.; Björklund, M.; Bierman, A.; Schönwälder, J.: RFC 6241. Network Configuration Protocol (NETCONF). <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6241/>, Stand: 22.07.2024.
- [Er21] Ericsson: SA Rel-18 SID: “Study on Extensions to the TSC Framework to support DetNet”, SP-211633 (2021-12), 2021.
- [Fa19] Farkas, J. et al.: 5G-TSN Integration for Industrial Automation, 2019.
- [Fa23] Farkas, J., Ludwigsburg, 2023.
- [Fi17] Finn, N.: Time-sensitive and Deterministic Networking Whitepaper. White Paper, 2017. <https://mentor.ieee.org/802.24/dcn/17/24-17-0020-00-sgtg-contribution-time-sensitive-and-deterministic-networking-whitepaper.pdf>.
- [Fi22] Ficzere, D. et al.: 5G public network integration for a real-life PROFINET application: NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. IEEE, S. 1–5, 2022. DOI: 10.1109/NOMS54207.2022.9789789.
- [Fr21] Fraunhofer IPT: 5G-Comet – Control over Time Sensitive Network. [www.ipt.fraunhofer.de/en/projects/5gcomet.html](http://www.ipt.fraunhofer.de/en/projects/5gcomet.html), Stand: 12.07.2024.
- [Fr22] Fragapane, G. et al.: Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. Annals of Operations Research 1-2/308, S. 125–143, 2022. DOI: 10.1007/s10479-020-03526-7.
- [Ga22] Garbugli, A. et al.: A Framework for TSN-enabled Virtual Environments for Ultra-Low Latency 5G Scenarios: ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, S. 5023–5028, 2022. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9839193.
- [GBB21] Garbugli, A.; Bujari, A.; Bellavista, P.: End-to-end QoS Management in Self-Configuring TSN Networks: 2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 131–134, 2021. DOI: 10.1109/WFCS46889.2021.9483600.
- [GD19] Genc, E.; Del Carpio, L. F.: Wi-Fi QoS Enhancements for Downlink Operations in Industrial Automation Using TSN: 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 1–6, 2019. DOI: 10.1109/WFCS.2019.8757992.
- [Ge20] George, B.: 5G QoS: 5QI to IP DSCP Mapping. White Paper, 2020. [https://www.researchgate.net/publication/344287398\\_5G\\_QoS\\_5QI\\_to\\_IP\\_DSCP\\_Mapping](https://www.researchgate.net/publication/344287398_5G_QoS_5QI_to_IP_DSCP_Mapping).

- [GGB16] Gronau, N.; Grum, M.; Bender, B.: Determining the optimal level of autonomy in cyber-physical production systems: 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). IEEE, S. 1293–1299, 2016. DOI: 10.1109/INDIN.2016.7819367.
- [GH23] Ginthör, D.; Harutyunyan, D.: Evaluation of Control-to-Control Communication in Industrial 5G Network: 2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 1–7, 2023. DOI: 10.1109/WFCS57264.2023.10144117.
- [GHS23] Gundall, M.; Huber, C.; Schotten, H. D.: Extended Reference Broadcast Infrastructure Synchronization Protocol in 5G and Beyond: 2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN). IEEE, S. 1–6, 2023. DOI: 10.1109/INDIN51400.2023.10217973.
- [Gi19] Ginthör, D. et al.: Analysis of Multi-user Scheduling in a TSN-enabled 5G System for Industrial Applications: 2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII). IEEE, S. 190–199, 2019. DOI: 10.1109/ICII.2019.00044.
- [Gi21a] Ginthör, D. et al.: Survival Time-aware Dynamic Multi-connectivity for Industrial Control Applications: 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, S. 1193–1199, 2021. DOI: 10.1109/ICIT46573.2021.9453498.
- [Gi21b] Ginthör, D. et al.: Robust End-to-End Schedules for Wireless Time-Sensitive Networks under Correlated Large-scale Fading: 2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 115–122, 2021. DOI: 10.1109/WFCS46889.2021.9483589.
- [Gi21c] Ginthör, D. et al.: Time-Sensitive Networking for Industrial Control Networks. In (Mahmood, N. H. et al. Hrsg.): Wireless Networks and Industrial IoT. Springer International Publishing, Cham, S. 39–54, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-51473-0\_3.
- [Gi21d] Ginthör, D. et al.: 5G RAN Slicing for Deterministic Traffic: 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417296.
- [Go20] Godor, I. et al.: A Look Inside 5G Standards to Support Time Synchronization for Smart Manufacturing. IEEE Communications Standards Magazine 3/4, S. 14–21, 2020. DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.2000010.
- [Gr14] Greschke, P. et al.: Matrix Structures for High Volumes and Flexibility in Production Systems. Procedia CIRP 17, S. 160–165, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.040.
- [Gr22] Grosjean, L. et al.: 5G-Enabled Smart Manufacturing. A booklet by 5G-SMART, 2022. <https://5gsmart.eu/documents/5g-smart-booklet/>.
- [Gu18] Gundall, M. et al.: 5G as Enabler for Industrie 4.0 Use Cases: Challenges and Concepts: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, S. 1401–1408, 2018. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502649.
- [Gu20] Gundall, M. et al.: Integration of 5G with TSN as Prerequisite for a Highly Flexible Future Industrial Automation: Time Synchronization based on IEEE 802.1AS: IECON 2020 - 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, S. 3823–3830, 2020. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254296.

- [Gu21] Gundall, M. et al.: Introduction of a 5G-Enabled Architecture for the Realization of Industry 4.0 Use Cases. *IEEE Access* 9, S. 25508–25521, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3057675.
- [Gu22] Gundall, M. et al.: Implementation and Evaluation of the RBIS Protocol in 5G: 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). *IEEE*, S. 323–328, 2022. DOI: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008489.
- [Gu23] Guan, W. et al.: RAN Slicing Towards Coexistence of Time-Sensitive Networking and Wireless Networking. *IEEE Communications Magazine*, S. 1–7, 2023. DOI: 10.1109/MCOM.003.2300089.
- [GW20] Gebert, J.; Wich, A.: Alternating Transmission of Packets in Dual Connectivity for Periodic Deterministic Communication Utilising Survival Time: 2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). *IEEE*, S. 160–164, 2020. DOI: 10.1109/EuCNC48522.2020.9200911.
- [Ha20] Hamann, A. et al.: Building End-to-End IoT Applications with QoS Guarantees: 2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). *IEEE*, S. 1–6, 2020. DOI: 10.1109/DAC18072.2020.9218564.
- [Ha21a] Hamidi-Sepehr, F. et al.: 5G URLLC. Evolution of High-Performance Wireless Networking for Industrial Automation. *IEEE Communications Standards Magazine* 2/5, S. 132–140, 2021. DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.2000035.
- [Ha21b] Haxhibeqiri, J. et al.: Bringing Time-Sensitive Networking to Wireless Professional Private Networks. *Wireless Personal Communications* 2/121, S. 1255–1271, 2021. DOI: 10.1007/s11277-021-09056-0.
- [Ha23a] Hao, Y. et al.: Delay-Oriented Scheduling in 5G Downlink Wireless Networks Based on Reinforcement Learning With Partial Observations. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 1/31, S. 380–394, 2023. DOI: 10.1109/TNET.2022.3194953.
- [Ha23b] Haxhibeqiri, J. et al.: To Update or Not: Dynamic Traffic Classification for High Priority Traffic in Wireless TSN: 2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–8, 2023. DOI: 10.1109/WFCS57264.2023.10144121.
- [He20] Hellmanns, D. et al.: Scaling TSN Scheduling for Factory Automation Networks: 2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–8, 2020. DOI: 10.1109/WFCS47810.2020.9114415.
- [He22] Hellmich, A. et al.: Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen, 2022. DOI: 10.48669/fb40\_2022-03.
- [HKW19] Hummen, R.; Kehrer, S.; Wüsteney, L.: TSN – Time Sensitive Networking. White Paper, 2019.
- [HM21] Harmatos, J.; Maliosz, M.: Architecture Integration of 5G Networks and Time-Sensitive Networking with Edge Computing for Smart Manufacturing. *Electronics* 24/10, S. 3085, 2021. DOI: 10.3390/electronics10243085.
- [HPO16] Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B.: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). *IEEE*, S. 3928–3937, 2016. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488.

- [Hu21] Huawei Technologies Co., Ltd.: Huawei Wi-Fi 6 (802.11ax) Technology White Paper, 2021.  
<https://e.huawei.com/de/material/networking/wlan/f3ae84efd98d440eb457b4caf405b509>.
- [Hu22] Huang, J. et al.: 5G URLLC Local Deployment Architecture for Industrial TSN Services: 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, S. 7–11, 2022. DOI: 10.1109/IWCMC55113.2022.9825113.
- [IE16a] IEEE 802.1Qbu:2016, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks -- Bridges and Bridged Networks -- Amendment 26: Frame Preemption.
- [IE16b] IEEE 802.1Qbv:2016, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks -- Bridges and Bridged Networks - Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic.
- [IE17a] IEEE 802.1CB:2017, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Frame Replication and Elimination for Reliability.
- [IE17b] IEEE 802.1Qci:2017, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Bridges and Bridged Networks--Amendment 28: Per-Stream Filtering and Policing.
- [IE18] IEEE 802.1Qcc:2018, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Bridges and Bridged Networks -- Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements.
- [IE20] IEEE 802.1AS:2020, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications.
- [IE22] IEEE:2022, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Bridges and Bridged Networks.
- [IE24a] IEEE: P802.1DG. TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications. D3.0. <https://1.ieee802.org/tsn/802-1dg/>, Stand: 07.07.2024.
- [IE24b] IETF: Deterministic Networking (detnet). [datatracker.ietf.org/wg/detnet/about](https://datatracker.ietf.org/wg/detnet/about), Stand: 12.07.2024.
- [IE24c] IETF: Reliable and Available Wireless (raw). <https://datatracker.ietf.org/group/raw/about>, Stand: 12.07.2024.
- [IE24d] IEEE: Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group. [1.ieee802.org/tsn](https://1.ieee802.org/tsn), Stand: 19.04.2024.
- [II24] International Electrotechnical Commission; Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEC/IEEE 60802 TSN Profile for Industrial Automation. D2.4. <https://1.ieee802.org/tsn/iec-ieee-60802>, Stand: 12.07.2024.
- [II94] International Organization for Standardization; International Electrotechnical Commission ISO/IEC 7498-1:1994(E):15.11.1994, Information technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model.
- [In01] International Telecommunication Union: ITU-T Recommendation G.1010. End-user multimedia QoS categories. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1010-200111-I>, Stand: 13.06.2024.
- [In19] Industry IoT Consortium: Time Sensitive Networks for Flexible Manufacturing Testbed - Characterization and Mapping of Converged Traffic Types. White Paper, 2019.

- [https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC\\_TSN\\_Testbed\\_Char\\_Mapping\\_of\\_Converged\\_Traffic\\_Types\\_Whitepaper\\_20180328.pdf](https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_TSN_Testbed_Char_Mapping_of_Converged_Traffic_Types_Whitepaper_20180328.pdf).
- [In23] International Organization for Standardization: ISO 23374-1:2023 Intelligent transport systems - Automated valet parking systems (AVPS). Part 1: System framework, requirements for automated driving and communications interface, 2023.
- [In96] International Electrotechnical Commission: International Electrotechnical Vocabulary - Quality of Service (IEC 60050 IEV 715-07-14), 1996.
- [Jo23] John, J. et al.: Industry 4.0 and Beyond: The Role of 5G, WiFi 7, and TSN in Enabling Smart Manufacturing, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2310.02379. <http://arxiv.org/pdf/2310.02379v1>.
- [Ka23] Karaagac, A. et al.: Managing 5G Non-Public Networks from Industrial Automation Systems: 2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 1–8, 2023. DOI: 10.1109/WFCS57264.2023.10144248.
- [Ke18] Kellermeier, K. et al.: Performance Evaluierung von PROFINET RT Geräten in einem TSN-basierten Backplane. In (Jasperneite, J.; Lohweg, V. Hrsg.): Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 40–53, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-55232-2\_4.
- [Ke21] Kern, W.: Modulare Produktion. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-36300-0.
- [Ke22] Kehl, P. et al.: Prototype of 5G Integrated with TSN for Edge Controlled Mobile Robotics. Electronics 11/11, S. 1666, 2022. DOI: 10.3390/electronics11111666.
- [KF20] King, D.; Farrel, A.: A PCE-Based Framework for Future Internet Deterministic and Time-Sensitive Networks: 2020 16th International Conference on Network and Service Management (CNSM). IEEE, S. 1–7, 2020. DOI: 10.23919/CNSM50824.2020.9269125.
- [Kh19] Khoshnevisan, M. et al.: 5G Industrial Networks With CoMP for URLLC and Time Sensitive Network Architecture. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 4/37, S. 947–959, 2019. DOI: 10.1109/JSAC.2019.2898744.
- [Ko20] Kostopoulos, A. et al.: Use Cases and Standardisation Activities for eMBB and V2X Scenarios: 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, S. 1–7, 2020. DOI: 10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145377.
- [Kr15] Kreutz, D. et al.: Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. Proceedings of the IEEE 1/103, S. 14–76, 2015. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
- [Kr21] Krolkowski, J. et al.: Joint routing and scheduling for large-scale deterministic IP networks. Computer Communications 1/165, S. 33–42, 2021. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.10.016.
- [Kr22] Krummacker, D. et al.: Analysis of 5G Channel Access for Collaboration with TSN Concluding at a 5G Scheduling Mechanism. Network 3/2, S. 440–455, 2022. DOI: 10.3390/network2030027.
- [KRA22] Kathmann, T.; Reh, D.; Arlinghaus, J. C.: Understanding “driving readiness”: exploiting self-driving functions of autonomous vehicles to increase assembly performance. Procedia CIRP 4/107, S. 1017–1022, 2022. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.101.

- [Ks18] Ksentini, A. et al.: Providing Low Latency Guarantees for Slicing-Ready 5G Systems via Two-Level MAC Scheduling. *IEEE Network* 6/32, S. 116–123, 2018. DOI: 10.1109/MNET.2018.1800005.
- [La20] Larrañaga, A. et al.: Analysis of 5G-TSN Integration to Support Industry 4.0: 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), S. 1111–1114, 2020. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212141.
- [La23a] Larrañaga, A. et al.: 5G Configured Grant Scheduling for 5G-TSN Integration for the Support of Industry 4.0: 2023 18th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS). *IEEE*, S. 72–79, 2023. DOI: 10.23919/WONS57325.2023.10062219.
- [La23b] Larrañaga, A. et al.: An open-source implementation and validation of 5G NR configured grant for URLLC in ns-3 5G LENA: A scheduling case study in industry 4.0 scenarios. *Journal of Network and Computer Applications* 912/215, S. 103638, 2023. DOI: 10.1016/j.jnca.2023.103638.
- [Le21] Lei, W. et al. Hrsg.: 5G System Design. An End to End Perspective. Springer International Publishing, Cham, 2021.
- [Li17] Lipinski, K.: Dienstgüte. <https://www.itwissen.info/Dienstguete-quality-of-service-QoS.html>, Stand: 10.05.2023.
- [Li20a] Liu, Y. et al.: Delay Aware Flow Scheduling for Time Sensitive Fronthaul Networks in Centralized Radio Access Network. *IEEE Transactions on Communications* 5/68, S. 2992–3009, 2020. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2976062.
- [Li20b] Liu, Y. et al.: Toward Edge Intelligence: Multiaccess Edge Computing for 5G and Internet of Things. *IEEE Internet Things Journal* 8/7, S. 6722–6747, 2020. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3004500.
- [Li21] Liu, Z. et al.: Software Defined Network based 5G and Time-Sensitive Network Fusion For Power services with Ultra-low Latency Requirements: 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG). *IEEE*, S. 381–385, 2021. DOI: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00082.
- [Li23a] Li, J. et al.: End-to-End Asynchronous Traffic Scheduling in Converged 5G and Time-Sensitive Networks, 2023. <http://arxiv.org/pdf/2312.10356v1>.
- [Li23b] Li, M. et al.: DecAge: Decentralized Flow Scheduling for Industrial 5G and TSN Integrated Networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, S. 1–13, 2023. DOI: 10.1109/TNSE.2023.3301879.
- [LS18] Lackes, R.; Siepermann, M.: Kommunikationsdienst. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kommunikationsdienst-40125/version-263518>, Stand: 06.08.2024.
- [LS19] Lo Bello, L.; Steiner, W.: A Perspective on IEEE Time-Sensitive Networking for Industrial Communication and Automation Systems. *Proceedings of the IEEE* 6/107, S. 1094–1120, 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2905334.
- [Lu22] Luque-Schempp, F. et al.: Toward Zero Touch Configuration of 5G Non-Public Networks for Time Sensitive Networking. *IEEE Network* 2/36, S. 50–56, 2022. DOI: 10.1109/MNET.006.2100442.

- [Lu23] Luque-Schempp, F. et al.: AutomAdapt: Zero Touch Configuration of 5G QoS Flows Extended for Time-Sensitive Networking. *IEEE Access* 11, S. 82960–82977, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3302264.
- [Ly19] Lyczkowski, E. et al.: Wireless Communication in Industrial Applications: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). *IEEE*, S. 1392–1395, 2019. DOI: 10.1109/ETFA.2019.8869323.
- [Ly21] Lyczkowski, E. et al.: Performance of a 5G NPN in industry: statistical analysis and application to black channel protocols: 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA ). *IEEE*, S. 1–8, 2021. DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613443.
- [Ma19] Mannweiler, C. et al.: Reliable and Deterministic Mobile Communications for Industry 4.0: Key Challenges and Solutions for the Integration of the 3GPP 5G System with IEEE Time-Sensitive Networking. In (Aschenbruck, N. et al. Hrsg.): *Mobilkommunikation. Technologien und Anwendungen Vorträge der 24. ITG-Fachtagung, 15.-16. Mai 2019 in Osnabrück*. VDE Verlag GmbH, Berlin, S. 64–69, 2019.
- [Ma20a] Martenvormfelde, L. et al.: A Simulation Model for Integrating 5G into Time Sensitive Networking as a Transparent Bridge: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). *IEEE*, S. 1103–1106, 2020. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9211877.
- [Ma20b] Math, S. et al.: An Intelligent Real-Time Traffic Control Based on Mobile Edge Computing for Individual Private Environment. *Security and Communication Networks* 3/2020, S. 1–11, 2020. DOI: 10.1155/2020/8881640.
- [Ma21] Martenvormfelde, L. et al.: Co-configuration of 5G and TSN enabling end-to-end quality of service in industrial communications. In (Jumar, U.; Jasperneite, J. Hrsg.): *Kommunikation in der Automation (KommA 2021)*. 12. Jahreskolloquium, 18.11.2021; in Verbindung mit dem Industrial Radio Day, 17.11.2021, 2021.
- [Ma22a] Mamane, A. et al.: Packet Delay Budget-Based Scheduling Approach for 5G Time Division Duplex. In (Motahhir, S.; Bossoufi, B. Hrsg.): *Digital Technologies and Applications*. Springer International Publishing, Cham, S. 312–321, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-02447-4\_33.
- [Ma22b] Marchenko, N. et al.: 5G QoS Prediction and Application Offloading: 27th European Wireless Conference 2022, S. 1–6, 2022.
- [Ma22c] Mallikarjun, S. B. et al.: Performance Analysis of a Private 5G SA Campus Network. In (ITG, V. D. Hrsg.): *ITG-Fb. 304: Mobilkommunikation – Technologien und Anwendungen*. Vorträge der 26. ITG-Fachtagung, 18. – 19. Mai 2022 in Osnabrück. VDE Verlag, Berlin, S. 99–103, 2022.
- [Ma22d] Mahmood, A. et al.: Factory 5G: A Review of Industry-Centric Features and Deployment Options. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 2/16, S. 24–34, 2022. DOI: 10.1109/MIE.2022.3149209.
- [Ma22e] Mai, V. S. et al.: End-to-End Quality-of-Service Assurance with Autonomous Systems: 5G/6G Case Study: 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). *IEEE*, S. 644–651, 2022. DOI: 10.1109/CCNC49033.2022.9700514.

- [Me20] Mercedes-Benz Group AG: Automated Valet Parking. Fahrerloses Parken. <https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/fahrerlos-geparkt.html>, Stand: 06.08.2023.
- [MH19] Möller, D. P.; Haas, R. E.: Guide to Automotive Connectivity and Cybersecurity. Springer International Publishing, Cham, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-73512-2.
- [Mi19] Mildner, A.: Time Sensitive Networking for Wireless Networks - A State of the Art Analysis, 2019. DOI: 10.2313/NET-2019-06-1\_07.
- [Mi23a] Miyamoto, K. et al.: Traffic Shaping With Optical-Wireless Cooperative Control to Reduce Uplink Jitter Due to Radio Transmission. IEEE Access 11, S. 134276–134285, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3337552.
- [Mi23b] Miranda, G. et al.: Flexible Wired/Wi-Fi TSN Networking Through SDN and Soft Traffic Control: 2023 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN). IEEE, S. 178–179, 2023. DOI: 10.1109/NFV-SDN59219.2023.10329729.
- [Mi23c] Miranda, G. et al.: Soft-W-TSN: Extending Time-Sensitive Networking Capabilities to Wi-Fi Using Virtualized Elements: 2023 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN). IEEE, S. 168–171, 2023. DOI: 10.1109/NFV-SDN59219.2023.10329591.
- [MKB23] Messaoudi, S.; Ksentini, A.; Bonnet, C.: SDN Framework for QoS provisioning and latency guarantee in 5G and beyond: 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, S. 587–592, 2023. DOI: 10.1109/CCNC51644.2023.10059714.
- [Mo19] Mocerino, J.: 5G Backhaul/Fronthaul Opportunities and Challenges: SCTE-ISBE Cable-Tec Expo 2019, 2019.
- [MP21] Magnusson, A.; Pantzar, D.: Integrating 5G Components into a TSN Discrete Event Simulation Framework. Masterarbeit. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1562021/FULLTEXT01.pdf>, Stand: 06.08.2024.
- [MS20] Mutalemwa, L. C.; Shin, S.: A Classification of the Enabling Techniques for Low Latency and Reliable Communications in 5G and Beyond: AI-Enabled Edge Caching. IEEE Access 8, S. 205502–205533, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3037357.
- [MTB24] Muslim, A. B.; Tönjes, R.; Bauschert, T.: Synchronizing TSN Devices via 802.1AS over 5G Networks, 2024. DOI: 10.20944/preprints202401.0741.v1.
- [Mu23] Muzaffar, R. et al.: 5G Deployment Models and Configuration Choices for Industrial Cyber-Physical Systems – a State of Art Overview. IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems, S. 1–21, 2023. DOI: 10.1109/TICPS.2023.3311394.
- [MWA20] Matencio-Escolar, A.; Wang, Q.; Alcaraz Calero, J. M.: SliceNetVSwitch: Definition, Design and Implementation of 5G Multi-Tenant Network Slicing in Software Data Paths. IEEE Transactions on Network and Service Management 4/17, S. 2212–2225, 2020. DOI: 10.1109/TNSM.2020.3029653.
- [Na19] Nasrallah, A. et al.: Ultra-Low Latency (ULL) Networks. The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research. IEEE Communications Surveys & Tutorials 1/21, S. 88–145, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2018.2869350.

- [Na20] Navarro-Ortiz, J. et al.: A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 2/22, S. 905–929, 2020. DOI: 10.1109/COMST.2020.2971781.
- [Ne18] Neumann, A. et al.: Towards integration of Industrial Ethernet with 5G mobile networks: 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–4, 2018. DOI: 10.1109/WFCS.2018.8402373.
- [Ne20] Neumann, A. et al.: Abstraction models for 5G mobile networks integration into industrial networks and their evaluation. In (Jasperneite, J.; Lohweg, V. Hrsg.): *Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 88–101, 2020. DOI: 10.1007/978-3-662-59895-5\_7.
- [Ni22] Nikhileswar, K. et al.: Time-Sensitive Networking Over 5G for Industrial Control Systems: 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFAs). *IEEE*, S. 1–8, 2022. DOI: 10.1109/ETFAs52439.2022.9921680.
- [NPC22] Nikhileswar, K.; Prabhu, K.; Cavalcanti, D.: Traffic Steering in Edge Compute Devices using eXpress Data Path for 5G and TSN Integration: 2022 IEEE 18th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–6, 2022. DOI: 10.1109/WFCS53837.2022.9779167.
- [NWJ19] Neumann, A.; Wisniewski, L.; Jasperneite, J.: 5G into Profinet integration as a use case for network slicing: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFAs). *IEEE*, S. 1293–1296, 2019. DOI: 10.1109/ETFAs.2019.8869041.
- [OBW20] Ohms, J.; Böhm, M.; Wermser, D.: Concept of a TSN to Real-Time Wireless Gateway in the Context of 5G URLLC: 2020 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). *IEEE*, S. 1–6, 2020. DOI: 10.1109/WINCOM50532.2020.9272460.
- [OP13] OPC Foundation: Unified Architecture. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua>, Stand: 06.08.2024.
- [OP21] OPC Foundation: OPC Foundation and 5G-ACIA sign Memorandum of Understanding to foster cooperation and synergies on OPC UA integration with 5G. <https://opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-and-5g-acia-sign-memorandum-of-understanding-to-foster-cooperation-and-synergies-on-opc-ua-integration-with-5g/>, Stand: 06.08.2024.
- [OP22] OPC Foundation: The OPC Foundation releases the OPC UA Field eXchange (UAFX) Specifications. <https://opcfoundation.org/news/press-releases/the-opc-foundation-releases-the-opc-ua-field-exchange-uafx-specifications>, Stand: 06.08.2024.
- [Or17] Ordonez-Lucena, J. et al.: Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges. *IEEE Communications Magazine* 5/55, S. 80–87, 2017. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600935.
- [Ou21] Oughton, E. J. et al.: Revisiting Wireless Internet Connectivity. 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy* 5/45, S. 102127, 2021. DOI: 10.1016/j.telpol.2021.102127.
- [Pa21] Patel, D. et al.: Time error analysis of 5G time synchronization solutions for time aware industrial networks: 2021 IEEE International Symposium on Precision Clock

- Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS). IEEE, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/ISPCS49990.2021.9615318.
- [Pe22] Peng, G. et al.: Enabling Deterministic Tasks with Multi-Access Edge Computing in 5G Networks. IEEE Communications Magazine 8/60, S. 36–42, 2022. DOI: 10.1109/MCOM.001.2101073.
- [Pf18] Pfrommer, J. et al.: Open Source OPC UA PubSub Over TSN for Realtime Industrial Communication: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, S. 1087–1090, 2018. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502479.
- [Ph20] Pham, Q.-V. et al.: A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art. IEEE Access 8, S. 116974–117017, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001277.
- [PI24] Plattform Industrie 4.0: Was ist Industrie 4.0? <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>, Stand: 06.08.2024.
- [Po18] Pocovi, G. et al.: Achieving Ultra-Reliable Low-Latency Communications: Challenges and Envisioned System Enhancements. IEEE Network 2/32, S. 8–15, 2018. DOI: 10.1109/MNET.2018.1700257.
- [Po23] Pocovi, G. et al.: Further Enhanced URLLC and Industrial IoT Support with Release-17 5G New Radio. IEEE Communications Standards Magazine 4/7, S. 12–19, 2023. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0002.2200004.
- [PR23] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.: PROFINET over TSN. <https://www.profibus.com/technology/industrie-40/profinet-over-tsn>, Stand: 25.01.2023.
- [PT21] Prados-Garzon, J.; Taleb, T.: Asynchronous Time-Sensitive Networking for 5G Backhauling. IEEE Network 2/35, S. 144–151, 2021. DOI: 10.1109/MNET.011.2000402.
- [PTB21] Prados-Garzon, J.; Taleb, T.; Baggaa, M.: Optimization of Flow Allocation in Asynchronous Deterministic 5G Transport Networks by Leveraging Data Analytics. IEEE Transactions on Mobile Computing, S. 1, 2021. DOI: 10.1109/TMC.2021.3099979.
- [PZ18] Plattform Industrie 4.0; ZVEI: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Infografiken/referenzarchitekturmodell-4-0>, Stand: 06.08.2024.
- [RCK20] Rost, P. M.; Chandramouli, D.; Kolding, T.: 5G plug-and-produce. How the 3GPP 5G System facilitates Industrial Ethernet deployments to fuel Industry 4.0 applications. White Paper, 2020. [https://d1p0gxnqcu0lvz.cloudfront.net/documents/Nokia\\_Bell\\_Labs\\_5G\\_plug-and-produce\\_White\\_Paper\\_EN.pdf](https://d1p0gxnqcu0lvz.cloudfront.net/documents/Nokia_Bell_Labs_5G_plug-and-produce_White_Paper_EN.pdf).
- [Ri21] Rischke, J. et al.: 5G Campus Networks: A First Measurement Study. IEEE Access 9, S. 121786–121803, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108423.

- [RK22] Rost, P. M.; Kolding, T.: Performance of Integrated 3GPP 5G and IEEE TSN Networks. *IEEE Communications Standards Magazine* 2/6, S. 51–56, 2022. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2000013.
- [Sa19] Sachs, J. et al.: Adaptive 5G Low-Latency Communication for Tactile Internet Services. *Proceedings of the IEEE* 2/107, S. 325–349, 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2864587.
- [Sa21] Sauer, C. et al.: Real-time Alarm Dissemination in Mobile Industrial Networks: 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). *IEEE*, S. 1152–1156, 2021. DOI: 10.1109/ICIT46573.2021.9453568.
- [SA21] SAE International: J3016, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, 2021.
- [Sa22a] Satka, Z. et al.: Work in Progress: A Centralized Configuration Model for TSN-5G Networks: 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). *IEEE*, S. 1–4, 2022. DOI: 10.1109/ETFA52439.2022.9921731.
- [Sa22b] Satka, Z. et al.: Developing a Translation Technique for Converged TSN-5G Communication: 2022 IEEE 18th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–8, 2022. DOI: 10.1109/WFCS53837.2022.9779191.
- [Sa22c] Satka, Z. et al.: QoS-MAN: A Novel QoS Mapping Algorithm for TSN-5G Flows: 2022 28th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA'22), 2022. DOI: 10.1109/RTCSA55878.2022.00030.
- [Sa23a] Satka, Z. et al.: A comprehensive systematic review of integration of time sensitive networking and 5G communication. *Journal of Systems Architecture* 1/138, S. 102852, 2023. DOI: 10.1016/j.sysarc.2023.102852.
- [Sa23b] Satka, Z. et al.: Experimental Analysis of Wireless TSN Networks for Real-time Applications: 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). *IEEE*, S. 1–4, 2023. DOI: 10.1109/ETFA54631.2023.10275665.
- [Sa24] Sasiain, J. et al.: Towards the Integration and Convergence Between 5G and TSN Technologies and Architectures for Industrial Communications: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024. DOI: 10.1109/COMST.2024.3422613.
- [SAJ21] Shi, H.; Aijaz, A.; Jiang, N.: Evaluating the Performance of Over-the-Air Time Synchronization for 5G and TSN Integration: 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). *IEEE*, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527833.
- [Sc15] Schmidt, R. et al.: Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. In (Abramowicz, W. Hrsg.): *Business Information Systems*. Springer International Publishing, Cham, S. 16–27, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19027-3\_2.
- [Sc17] Schulz, P. et al.: Latency Critical IoT Applications in 5G: Perspective on the Design of Radio Interface and Network Architecture. *IEEE Communications Magazine* 2/55, S. 70–78, 2017. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600435CM.
- [Sc19] Schulz, P. et al.: End-to-End Latency Analysis in Wireless Networks with Queuing Models for General Prioritized Traffic: 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). *IEEE*, S. 1–6, 2019. DOI: 10.1109/ICCW.2019.8757121.

- [Sc20a] Schüngel, M. et al.: Single Message Distribution of Timing Information for Time Synchronization in Converged Wired and Wireless Networks: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, S. 286–293, 2020. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9211936.
- [Sc20b] Schüngel, M. et al.: Analysis of Time Synchronization for Converged Wired and Wireless Networks: 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), S. 198–205, 2020. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212068.
- [Sc21a] Schörner, P. et al.: Park my Car! Automated Valet Parking with Different Vehicle Automation Levels by V2X Connected Smart Infrastructure: 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, S. 836–843, 2021. DOI: 10.1109/ITSC48978.2021.9565095.
- [Sc21b] Schüngel, M. et al.: Optimized Propagation Delay Compensation for an Improved 5G RAN Synchronization: IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589252.
- [Sc21c] Schüngel, M. et al.: Heterogeneous Synchronization in Converged Wired and Wireless Time-Sensitive Networks: 2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 67–74, 2021. DOI: 10.1109/WFCS46889.2021.9483592.
- [Sc21d] Schüngel, M. et al.: Advanced Grandmaster Selection Method for Converged Wired and Wireless Networks: 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, S. 1007–1014, 2021. DOI: 10.1109/ICIT46573.2021.9453490.
- [SCO18] Steiner, W.; Craciunas, S. S.; Oliver, R. S.: Traffic Planning for Time-Sensitive Communication. IEEE Communications Standards Magazine 2/2, S. 42–47, 2018. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700055.
- [Se23] Senk, S. et al.: Open-Source Testbeds for Integrating Time-Sensitive Networking with 5G and beyond: 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, S. 1–7, 2023. DOI: 10.1109/CCNC51644.2023.10060159.
- [Sh20a] Shibata, N. et al.: Deterministic Layer-2 Ring Network with Autonomous Dynamic Gate Shaping for Multi-Service Convergence in 5G and Beyond: Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. Optica Publishing Group, Washington, D.C., USA, Th2A.36, 2020. DOI: 10.1364/OFC.2020.Th2A.36.
- [Sh20b] Shibata, N. et al.: First Demonstration of Autonomous TSN-based Beyond-Best-Effort Networking for 5G NR Fronthauls and 1,000+ Massive IoT Traffic: 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC). IEEE, S. 1–4, 2020. DOI: 10.1109/ECOC48923.2020.9333324.
- [Sh21] Shibata, N. et al.: Time Sensitive Networking for 5G NR Fronthauls and Massive IoT Traffic. Journal of Lightwave Technology 16/39, S. 5336–5343, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3094877.
- [Si12] Siemens: SIMATIC PROFINET Systembeschreibung, 2012.
- [Si20] Siemens: Industrial 5G. Die Evolution von 1G zu 5G. <https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/industrial-5g.html>, Stand: 05.06.2020.

- [Si24] Siemens: IWLAN – das Wireless LAN für anspruchsvolle Industrieanwendungen. iFeatures: Spezielle Funktionen für industrielles WLAN. <https://www.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/industrial-wireless-lan.html#IndustrielleZusatzfunktionen>, Stand: 18.07.2024.
- [SIV22] Seijo, O.; Iturbe, X.; Val, I.: Tackling the Challenges of the Integration of Wired and Wireless TSN With a Technology Proof-of-Concept. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10/18, S. 7361–7372, 2022. DOI: 10.1109/TII.2021.3131865.
- [SJ21] Schriegel, S.; Jasperneite, J.: A Migration Strategy for Profinet Toward Ethernet TSN-Based Field-Level Communication: An Approach to Accelerate the Adoption of Converged IT/OT Communication. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 4/15, S. 43–53, 2021. DOI: 10.1109/MIE.2020.3048925.
- [SMB19] Striffler, T.; Michailow, N.; Bahr, M.: Time-Sensitive Networking in 5th Generation Cellular Networks - Current State and Open Topics: 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). *IEEE*, S. 547–552, 2019. DOI: 10.1109/5GWF.2019.8911720.
- [SMS23] Sonnberger, M.; Merz, R.; Schmidt, J. F.: Testing the Limits of 5G Communication with Articulated Robots in Various Traffic Conditions, 2023. [https://www.researchgate.net/publication/375610775\\_Testing\\_the\\_Limits\\_of\\_5G\\_Communication\\_with\\_Articulated\\_Robots\\_in\\_Various\\_Traffic\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/375610775_Testing_the_Limits_of_5G_Communication_with_Articulated_Robots_in_Various_Traffic_Conditions).
- [So21a] Song, J. et al.: Time synchronization performance analysis considering the frequency offset inside 5G-TSN network: 2021 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). *IEEE*, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/ISWCS49558.2021.9562179.
- [So21b] Song, F. et al.: Enabling Heterogeneous Deterministic Networks with Smart Collaborative Theory. *IEEE Network* 3/35, S. 64–71, 2021. DOI: 10.1109/MNET.011.2000613.
- [So22] Sossalla, P. et al.: Private 5G Solutions for Mobile Industrial Robots: A Feasibility Study: 2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). *IEEE*, S. 1–6, 2022. DOI: 10.1109/ISCC55528.2022.9912791.
- [SS21] Striffler, T.; Schotten, H. D.: The 5G Transparent Clock: Synchronization Errors in Integrated 5G-TSN Industrial Networks: 2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). *IEEE*, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/INDIN45523.2021.9557468.
- [ST20] Samdanis, K.; Taleb, T.: The Road beyond 5G: A Vision and Insight of the Key Technologies. *IEEE Network* 2/34, S. 135–141, 2020. DOI: 10.1109/MNET.001.1900228.
- [Su21] Sudhakaran, S. et al.: Enabling QoS for Collaborative Robotics Applications with Wireless TSN: 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). *IEEE*, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473897.
- [Su23] Sudhakaran, S. et al.: Zero-Delay Roaming for Mobile Robots Enabled by Wireless TSN Redundancy: 2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). *IEEE*, S. 1–8, 2023. DOI: 10.1109/WFCS57264.2023.10144124.

- [SWG21] Scanzio, S.; Wisniewski, L.; Gaj, P.: Heterogeneous and dependable networks in industry – A survey. *Computers in Industry* 4/125, S. 103388, 2021. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103388.
- [SZ18] Samii, S.; Zinner, H.: Level 5 by Layer 2: Time-Sensitive Networking for Autonomous Vehicles. *IEEE Communications Standards Magazine* 2/2, S. 62–68, 2018. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700079.
- [Ta23] Tang, X. et al.: Simulation Analysis on 5G-TSN Scheduling Algorithms based on OMNeT++: 2023 8th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). *IEEE*, S. 463–468, 2023. DOI: 10.1109/ICCCS57501.2023.10151189.
- [UCN22] Underberg, L.; Cainelli, G.; Neugebauer, T.: Performance Evaluation of a Campus Network emphasizing the ICT-OT-relation: *Automation 2022*, S. 637–650, 2022. DOI: 10.51202/9783181023990-637.
- [Un18] Underberg, L. et al.: Towards hybrid wired-wireless networks in industrial applications: 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). *IEEE*, S. 768–773, 2018. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390804.
- [Un21] Underberg, L.: IT-Trendkongress Session "Infrastruktur". Key Technologies: 5G, LoRaWAN, drahtlose Kommunikation. 6:40 min. <https://www.youtube.com/watch?v=1ePODS2qVM8>, Stand: 06.08.2024.
- [Un22] Unikie: Automated Factory Parking (AFP). <https://www.unikie.com/en/solution/automated-factory-parking>, Stand: 04.04.2022.
- [UW20] Underberg, L.; Willmann, S.: Categorization of industrial communication requirements as key to developing application profiles. *IFAC-PapersOnLine* 2/53, S. 8297–8302, 2020. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1919.
- [Va22] Val, I. et al.: IEEE 802.1AS Clock Synchronization Performance Evaluation of an Integrated Wired–Wireless TSN Architecture. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 5/18, S. 2986–2999, 2022. DOI: 10.1109/TII.2021.3106568.
- [VD20a] VDMA: Use Cases zum Leitfaden 5G im Maschinen- und Anlagenbau. Use Cases zum Leitfaden - ein praxisorientiertes Instrument zu 5G Anwendungen. <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/1293841>, Stand: 06.08.2024.
- [VD20b] VDMA: 5G im Maschinen- und Anlagenbau. Leitfaden für die Integration von 5G in Produkt und Produktion. <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/1307377>, Stand: 06.08.2024.
- [VN20] Viridis, A.; Nardini, G.: 5G New Radio User Plane Simulation Model for INET & OMNeT++. Description. <https://simu5g.org>, Stand: 06.08.2024.
- [Wa23] Wang, X. et al.: Reinforcement Learning-Based Particle Swarm Optimization for End-to-End Traffic Scheduling in TSN-5G Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 6/31, S. 3254–3268, 2023. DOI: 10.1109/TNET.2023.3276363.
- [Wa24] Wang, Z. et al.: Time Synchronization for 5G and TSN Integrated Networking, 2024. <http://arxiv.org/pdf/2401.17721v1>.
- [WB05] Wörn, H.; Brinkschulte, U.: *Echtzeitsysteme. Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005. DOI: 10.1007/b139050.

- [WKK20] Wenning, M.; Kawollek, S.; Kampker, A.: Self-driving chassis for low-invest and highly flexible electric vehicle assembly. *Procedia Manufacturing* 04/43, S. 576–582, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.157.
- [WS20] Wang, D.; Sun, T.: Leveraging 5G TSN in V2X Communication for Cloud Vehicle: 2020 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE). IEEE, S. 106–110, 2020. DOI: 10.1109/EDGE50951.2020.00023.
- [WSJ17] Wollschlaeger, M.; Sauter, T.; Jasperneite, J.: The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 1/11, S. 17–27, 2017. DOI: 10.1109/MIE.2017.2649104.
- [Wü22] Wüsteney, L. et al.: Analyzing and modeling the latency and jitter behavior of mixed industrial TSN and DetNet networks. In (Bianchi, G.; Mei, A. Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies*. ACM, New York, USA, S. 91–109, 2022. DOI: 10.1145/3555050.3569138.
- [Wu23] Wu, J. et al.: Hybrid Traffic Scheduling in 5G and Time-Sensitive Networking Integrated Networks for Communications of Virtual Power Plants. *Applied Sciences* 13/13, S. 7953, 2023. DOI: 10.3390/app13137953.
- [Xu20] Xu, D. et al.: Understanding Operational 5G: A First Measurement Study on Its Coverage, Performance and Energy Consumption: *Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. ACM, New York, USA, S. 479–494, 2020. DOI: 10.1145/3387514.3405882.
- [Xu21] Xu, H. et al.: RAN Enhancement to Support Propagation Delay Compensation of TSN: 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN). IEEE, S. 179–182, 2021. DOI: 10.1109/ICICN52636.2021.9674019.
- [Ya20a] Yang, M. et al.: An Uplink Transmission Scheme for TSN Service in 5G Industrial IoT: 2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE, S. 902–904, 2020. DOI: 10.1109/ICTC49870.2020.9289303.
- [Ya20b] Yang, C. et al.: Software-defined Cloud Manufacturing with Edge Computing for Industry 4.0: 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, S. 1618–1623, 2020. DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148467.
- [Ye18] Ye, Q. et al.: End-to-End Quality of Service in 5G Networks: Examining the Effectiveness of a Network Slicing Framework. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 2/13, S. 65–74, 2018. DOI: 10.1109/MVT.2018.2809473.
- [Yi21] Yin, X. et al.: QoS Flow Mapping Method of Multi-service 5G Communication for Urban Energy Interconnection: 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG). IEEE, S. 75–78, 2021. DOI: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00022.
- [YL14] Yang, M.; Li, G.: Analysis of PROFINET IO Communication Protocol: 2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE, S. 945–949, 2014. DOI: 10.1109/IMCCC.2014.199.
- [YSH19] Yang, X.; Scholz, D.; Helm, M.: Deterministic Networking (DetNet) vs Time Sensitive Networking (TSN), 2019. DOI: 10.2313/NET-2019-10-1\_15.

- [YY22] Yang, J.; Yu, G.: Traffic Scheduling for 5G-TSN Integrated Systems: 2022 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, S. 1–6, 2022. DOI: 10.1109/ISWCS56560.2022.9940254.
- [Za23] Zambouri, K. et al.: A Comprehensive Survey of Wireless Time-Sensitive Networking (TSN): Architecture, Technologies, Applications, and Open Issues, 2023. <http://arxiv.org/pdf/2312.01204v1>.
- [Zh21] Zhang, Y. et al.: QoS-Aware Mapping and Scheduling for Virtual Network Functions in Industrial 5G-TSN Network: 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685749.
- [Zh22] Zhang, Y. et al.: Wireless/wired integrated transmission for industrial cyber-physical systems: risk-sensitive co-design of 5G and TSN protocols. Science China Information Sciences 1/65, S. 5790, 2022. DOI: 10.1007/s11432-020-3344-8.
- [Zh23] Zhang, X. et al.: Integration of 5G and OPC UA for Smart Manufacturing of the Future: 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, S. 1–6, 2023. DOI: 10.1109/SII55687.2023.10039191.
- [Zh24] Zhou, Y. et al.: Predictable Wireless Networked Scheduling for Bridging Hybrid Time-Sensitive and Real-Time Services. IEEE Transactions on Communications, S. 1, 2024. DOI: 10.1109/TCOMM.2024.3359098.
- [Zo19] Zou, J. et al.: Options for time-sensitive networking for 5G fronthaul: 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). Institution of Engineering and Technology, 31, 2019. DOI: 10.1049/cp.2019.0765.
- [Zo20] Zou, J. et al.: Advanced optical access technologies for next-generation (5G) mobile networks [Invited]. Journal of Optical Communications and Networking 10/12, D86-D98, 2020. DOI: 10.1364/JOCN.391033.
- [Zu20] Zunino, C. et al.: Factory Communications at the Dawn of the Fourth Industrial Revolution. Computer Standards & Interfaces 15/71, S. 103433, 2020. DOI: 10.1016/j.csi.2020.103433.

### Eigene Publikationen

- [AAU23] Ambrosy, N.; Abazari, A.; Underberg, L.: Simulations of the 5G-TSN bridge delay: towards a joint QoS model. In (Jumar, U.; Jasperneite, J. Hrsg.): Kommunikation in der Automation: 14. Jahreskolloquium, 21./22.11.2023, Magdeburg: Tagungsband. Otto von Guericke University Library, Magdeburg, Germany, S. 103–114, 2023. DOI: 10.25673/111643.
- [ABL22] Ambrosy, N.; Bülow, F. von; Lehmann, L.: Verfahren zur Kontrolle eines Produktionsprozesses für Kraftfahrzeuge, 2022. DE102022209315A1. Volkswagen AG, 2022.
- [ABL23] Ambrosy, N.; Bülow, F. von; Lehmann, L.: Verfahren zur Optimierung eines Prozessschrittes eines Herstellungs-, Reparatur- oder Wartungsprozesses eines Kraftfahrzeugs, 2023. DE102023200018A1. Volkswagen AG, 2023.
- [Am22a] Ambrosy, N. et al.: Self-Navigating Automotive Production: Using 5G for Automated Driving in Car Assembly: 2022 IEEE 18th International Conference on Factory

- Communication Systems (WFCS). IEEE, S. 1–4, 2022.  
DOI: 10.1109/WFCS53837.2022.9779168.
- [Am22b] Ambrosy, N. et al.: 5G and DetNet: Towards holistic determinism in industrial networks: 2022 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, S. 1–6, 2022. DOI: 10.1109/ICIT48603.2022.10002776.
- [Am23a] Ambrosy, N.: 5G QoS Parameter für die 5G-TSN-Integration, 2023. WO002024037745A1. Volkswagen AG, 2022.
- [Am23b] Ambrosy, N.: System und Verfahren zur Sicherheits-Fernsteuerung, 2023. DE102023203064B3. Volkswagen AG, 2023.
- [Am24] Ambrosy, N. et al.: 5G QoS model for Time-Sensitive Networking. at - Automatisierungstechnik 4/72, S. 308–319, 2024. DOI: 10.1515/auto-2024-0003.
- [AU22] Ambrosy, N.; Underberg, L.: Traffic priority mapping for a joint 5G-TSN QoS model. In (Jasperneite, J.; Jumar, U. Hrsg.): Kommunikation in der Automation. Beiträge des Jahreskolloquiums KomMA 2022, Lemgo. Institut für industrielle Informationstechnik - inIT der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, S. 28–38, 2022. DOI: 10.25644/a4ws-9a49.
- [AU23] Ambrosy, N.; Underberg, L.: 5G packet delay considerations for different 5G-TSN communication scenarios: 2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN). IEEE, S. 1–6, 2023. DOI: 10.1109/INDIN51400.2023.10218051.
- [LAB23] Lehmann, L.; Ambrosy, N.; Bülow, F. von: Verfahren zum Orten eines Fahrzeugs durch eine Person, sowie Fahrzeugortungssystem, 2023. DE102023200046A1. Volkswagen AG, 2023.
- [Pu23] Putter, R.; Ambrosy, N.; Bülow, F. von; Lehmann, L.; Sperber, J.: Verfahren und Steuergerät für ein Kraftfahrzeug, 2023. DE102023200306A1. Volkswagen AG, 2023.

## Glossar

In diesem Glossar werden zentrale Begriffe und Konzepte dieser Dissertation erläutert. Dazu zählen Industrie 4.0, das OSI Schichten-Modell, Echtzeit und Determinismus, Kommunikationsdienst, Dienstgüte (Quality of Service), Datenverkehrsmodell und -konzept, PROFINET sowie OPC UA.

### Industrie 4.0

Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution und nutzt den Fortschritt der digitalen Technologie und des Internets der Dinge (IoT), um hochautomatisierte, intelligente und vernetzte Systeme zu schaffen. Industrie 4.0 ist ein Organisationsgestaltungskonzept mit vier grundlegenden Prinzipien [HPO16]:

- Vernetzung von Maschinen, Geräten, Sensoren und Menschen,
- Informationstransparenz mithilfe von digitalen Zwillingen [Sc15],
- technische Assistenzsysteme zur Entscheidungsunterstützung auf Basis von virtuellen Tests und
- dezentrale Entscheidungen in weitestgehend autonom agierenden cyber-physischen Systemen mit datengestützter Planung, Produktion und Wartung [GGB16].

Die intelligente Vernetzung von Maschinen und Prozessen mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie eröffnet Möglichkeiten für eine flexible Produktion, wandelbare Fabrik, optimierte Logistik, ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft und kundenzentrierte Lösungen [PI24]. Das Fließband-Prinzip mit starr verketteten Prozessen wird durch flexibel konfigurierbare hochautomatisierte bis teilautonome Produktionsprozesse (z. B. Matrixproduktion und modulare Montage mit geschlossenen Regelkreisen) und mobile Maschinen (z. B. fahrerlose Transportsysteme) [Fr22] abgelöst, was eine Losgröße = 1 ermöglicht.

Die heutige industrielle Kommunikation folgt dem Prinzip der Automatisierungspyramide mit einer strikten Trennung von IT und OT. Zeitkritische Maschinenkommunikation wird bislang über Ethernet realisiert. Im Zuge von Industrie 4.0 wandelt sich die Automatisierungspyramide zu einem cyber-physischen System gemäß Abbildung G.1. Weitere Aspekte von Industrie 4.0 enthält das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 [PZ18].

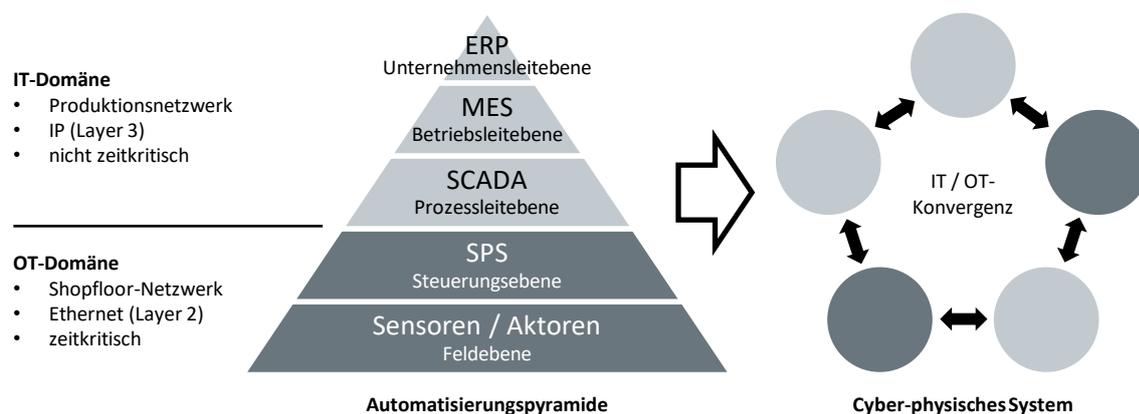


Abbildung G.1: Von der Automatisierungspyramide zum cyber-physischen System (angelehnt an [Am22b])

### OSI Schichten-Modell

Das OSI-Referenzmodell stellt eine Schichtenarchitektur für Netzwerkprotokolle dar. Es definiert sieben übereinanderliegende Schichten (engl. Layers) für klar abgegrenzte Aufgaben.

Netzwerkprotokolle derselben Schicht sind flexibel austauschbar. Das OSI-Modell soll die Kommunikation zwischen unterschiedlichen technischen Systemen beschreiben und eine konsistente Weiterentwicklung von Standards ermöglichen [II94]. Abbildung G.2 zeigt die Schichten des OSI-Modells.

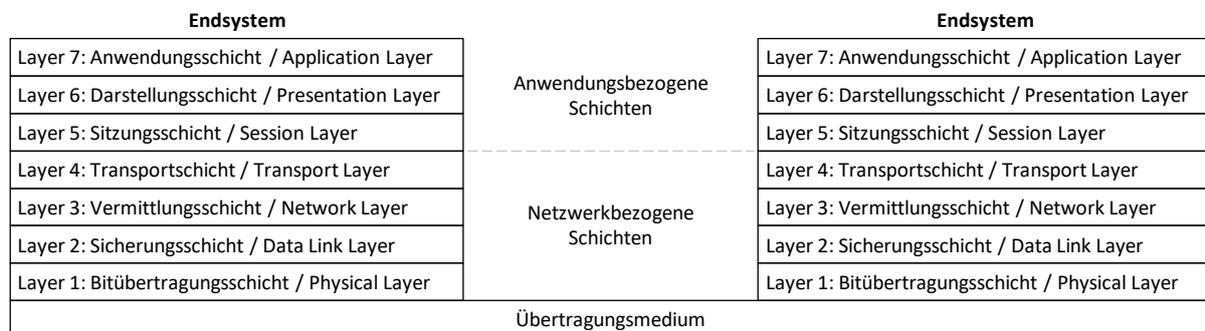


Abbildung G.2: OSI Schichten-Modell (angelehnt an [II94])

## Echtzeit und Determinismus

*Echtzeit* ist ein relativer Begriff und bezieht sich auf die Fähigkeit eines Systems oder Prozesses, zeitnah auf Eingaben oder Ereignisse zu reagieren. Echtzeitsysteme sind so konzipiert, dass sie Aufgaben innerhalb bestimmter Zeitvorgaben ausführen. Je nach Strenge und Qualität der einzuhaltenden Zeitbedingungen lassen sich drei Kategorien von Echtzeitsystemen unterscheiden:

- Harte Echtzeitsysteme unterliegen den strengsten Zeitbedingungen und müssen diese in jedem Fall einhalten, da ansonsten Schaden entstehen kann.
- Feste Echtzeitsysteme brechen bei einer Überschreitung der Zeitbedingungen die durchgeführte Aktion ab, wodurch jedoch kein unmittelbarer Schaden droht. Feste Echtzeitbedingungen liegen meist in Form von Verfallsdaten von Informationen vor.
- Weiche Echtzeitsysteme nutzen die Zeitbedingungen als Richtlinien, welche innerhalb einer gewissen Toleranzgrenze häufig, jedoch nur selten drastisch überschritten werden dürfen.

Allgemeine Anforderungen an ein Echtzeitsystem umfassen die Rechtzeitigkeit, Gleichzeitigkeit und zeitgerechte Reaktion auf spontane Ereignisse, d. h. es gelten die drei folgenden Bedingungen:

- Das Ergebnis für den zu steuernden Prozess muss rechtzeitig vorliegen,
- viele Aufgaben müssen parallel und jede mit ihren eigenen Zeitanforderungen bearbeitet werden und
- das Echtzeitsystem muss auf zufällig auftretende interne oder externe Ereignisse aus dem Prozess innerhalb einer definierten Zeit reagieren [WB05].

*Determinismus* bezeichnet ein vorhersagbares und wiederholbares Systemverhalten. Ein deterministisches System erzeugt immer die gleiche Ausgabe für eine bestimmte Eingabe, unabhängig vom Systemzustand oder externen Faktoren. Es garantiert, dass ein Ereignis innerhalb eines bestimmten, vorhersehbaren Zeitintervalls eintritt, z. B. eine Nachricht unterhalb einer Latenz-Obergrenze übertragen wird. Somit bietet Determinismus eine zuverlässige Dienstgüte, durch die die Kommunikation oder Ausgabe nicht nur korrekt ist, sondern auch in einer bestimmten Zeit erfolgt [Co19a].

Der Hauptunterschied zwischen Echtzeit und Determinismus besteht darin, dass Echtzeit für die Erfüllung bestimmter Zeitanforderungen steht, während Determinismus eine gewisse Vorhersagbarkeit und Wiederholbarkeit bietet. Abhängig von ihrer Auslegung und Implementierung

können Echtzeitsysteme auch deterministisch sein. Ein deterministisches System garantiert jedoch nicht unbedingt ein Echtzeitverhalten, wenn das System zu viel Zeit benötigt, um die gewünschte Ausgabe zu erzeugen.

### Kommunikationsdienst

Ein Kommunikationsdienst ist die von einem Dienstanbieter über einen Dienstzugangspunkt angebotene Fähigkeit, Daten von einem Dienstanutzer zu einem anderen zu übertragen. Der Dienstanbieter arbeitet auf einer OSI-Schicht unterhalb des Dienstanutzers. Ein Kommunikationsdienst stellt Schnittstellen auf der Control Plane und User Plane zur Verfügung [5G22a]. Seine Merkmale beschreiben die Form des Informationsaustauschs: Zwischen den Kommunikationspartnern erfolgt die Kommunikation auf Basis definierter Standards, z. B. von Prozeduren, Sprache und technischen Einrichtungen. Darüber hinaus garantiert der Träger des zugehörigen Kommunikationsnetzwerks eine bestimmte Übertragungsqualität und es existiert ein Verzeichnis der Dienstteilnehmer [LS18]. Folgende Merkmale charakterisieren einen Kommunikationsdienst:

- Menge der beteiligten Kommunikationspartner (Unicast, Multicast, Broadcast oder Multi-Peer),
- Dienstparadigma (verbindungsorientiert oder verbindungslos),
- Dienstprimitive (Request, Indication, Response und Confirmation; abhängig von bestätigt, quittiert oder unbestätigt),
- Übertragungsverfahren/Schnittstellen (seriell oder parallel, z. B. MIMO),
- Nutzungsrichtung (simplex, halb- oder vollduplex),
- Auslieferungsdisziplin (der Reihe nach, priorisiert oder zufällig),
- Protokolle (zur Regelung des Ablaufs von Diensten) sowie
- Dienstgüte.

### Dienstgüte (Quality of Service)

Dienstgüte bzw. Quality of Service (QoS) bezeichnet die Gesamtheit der Performance eines Dienstes, die den Grad der Zufriedenheit eines Dienstanutzers bestimmen. Diese charakteristische Performance kann sich z. B. auf die Übertragungsqualität, Fehlerhäufigkeit und -dauer sowie Ausfälle beziehen [In96]. Als QoS sind alle Verfahren zu verstehen, die den Datenverkehrsfluss in Netzwerken so beeinflussen, dass der Dienst in einer definierten Qualität bereitgestellt wird, d. h. die Datenverkehrsanforderungen verzögerungssensitiver Daten erfüllt und Qualitätseinbußen (z. B. durch starke Verzögerungen oder Paketverluste) verhindert werden. QoS ist unerlässlich, wenn verschiedene Arten von Datenverkehr um Netzwerkressourcen konkurrieren und die Netzwerkbedingungen dynamisch variieren können. Durch die Verwaltung und Optimierung von Netzwerkressourcen mittels QoS können Netzbetreiber sicherstellen, dass das Netzwerk effizient funktioniert, die Anforderungen (ggf. gemäß getroffener sogenannter Service-Level-Vereinbarungen) erfüllt und eine zufriedenstellende Nutzererfahrung bietet. Es handelt sich also um die Charakterisierung eines Dienstes, der für den Nutzer vorhersehbar und dessen Qualität messbar ist. Technisch handelt es sich um eine Parametrisierung von Protokollen zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens für spezifische Dienste [Li17].

Die nachfolgend aufgelisteten QoS-Parameter definieren die Eigenschaften und die Performance eines Netzwerks, Kommunikationssystems oder Dienstes:

- *Latenz* bezeichnet die Übertragungszeit bzw. die zeitliche Verzögerung zwischen dem Sendepunkt und dem Empfangszeitpunkt eines Datenpakets. Existierende Definitionen der Ende-zu-Ende-Latenz sind nicht einheitlich. Sie kann sich auf einen Weg (OWD) oder auf Hin- und Rückweg (RTT) beziehen.
- *Jitter* steht für die Varianz der Latenz, d. h. für die Schwankung der Verzögerung.
- *Verfügbarkeit* bezieht sich auf die Fähigkeit eines Dienstes, den zeitlich und funktionell geforderten Zustand bereitzustellen, wenn alle erforderlichen internen oder externen Bedingungen gegeben sind.
- *Zuverlässigkeit* bezeichnet die Fähigkeit eines Kommunikationssystems, Datenpakete ohne Fehler oder Verluste zu übertragen.
- *Datenrate* oder Durchsatz, oft gleichgesetzt mit Bandbreite, bezieht sich auf die Datenmenge, die in einem bestimmten Zeitraum über eine Kommunikationsverbindung übertragen werden kann.
- *Priorisierung* weist verschiedenen Arten von Datenverkehr unterschiedliche Relevanz zu, um ein vorhersagbares und deterministisches Kommunikationsverhalten zu gewährleisten.
- *Skalierbarkeit* bezeichnet die Fähigkeit eines Kommunikationssystems, eine große Anzahl von Geräten, Knoten oder Benutzern zu vernetzen, ohne die Performance zu beeinträchtigen.

### Datenverkehrsmodell und -konzept

Als Datenverkehr wird der Austausch elektronischer Informationen über ein Netzwerk bezeichnet. Dieser Informationsaustausch erfolgt über diverse Protokolle zwischen den Kommunikationspartnern, d. h. zwischen Sender und Empfänger einer Applikation. Das Netzwerk bildet die Infrastruktur zur Übertragung des Datenverkehrs und kann aus kabelgebundenen und/oder drahtlosen Übertragungsmedien bzw. -technologien bestehen. Anhand der Anforderungen einer Applikation an Parameter wie Datenmenge, Datenrate etc. lässt sich Datenverkehr charakterisieren und in Typen, Klassen sowie Dienste einteilen.

Ein *Datenverkehrsmodell* stellt eine spezifische oder mathematische Beschreibung der Eigenschaften und des Verhaltens von Datenverkehr in einem Netzwerk dar, z. B. Datenmenge und -rate. Es kann deterministisch oder stochastisch sein und auf analytischen oder empirischen Ansätzen basieren. Ein *Datenverkehrskonzept* umfasst abstrakte Prinzipien und Mechanismen zur Analyse und Verwaltung der Datenübertragung in einem Netzwerk, z. B. zur QoS-Steuerung. Ein Datenverkehrsmodell wird in der Regel vom Datenverkehrskonzept abgeleitet oder basiert auf diesem. Sowohl das Modell als auch das Konzept können im Rahmen der Netzwerkplanung zur Bewertung und Vorhersage des Verhaltens von Datenverkehr unter verschiedenen Bedingungen dienen, z. B. im Hinblick auf Architekturen, Topologien und Ressourcenauslastung.

### PROFINET

PROFINET IO (Process Field Network Input Output) ist ein Industrial Ethernet-Standard für die Kommunikation zwischen Steuerungen und Feldgeräten (vgl. Abbildung G.1). Es nutzt zwei logische Kanäle für die Datenübertragung [YL14]:

- den TCP/IP-Kanal zur azyklischen Übertragung von nicht zeitkritischen Daten wie Engineering-, Parametrier-, Konfigurations- sowie Diagnosedaten und
- den Echtzeitkanal zur zyklischen Übertragung von zeitkritischen Prozessdaten und kritischen Alarmen direkt auf Ethernet (Layer 2).

Für den Echtzeitkanal existieren zwei Varianten:

- PROFINET RT (Real-Time) für weiche Echtzeit und ohne Zeitsynchronisation sowie
- PROFINET IRT (Isochronous Real-Time) für harte Echtzeit, das spezielle Hardware-Komponenten erfordert, um eine präzise Zeitsynchronisation und einen Kommunikationsplan (Schedule) zu erstellen.

PROFINET RT verwendet den im Ethernet-Frame enthaltenen VLAN-Tag mit ID = 0 und der zweithöchsten Priorität, d. h. PCP = 6. In Kombination mit dem PROFINET-spezifischen EtherType (0x8892) können diese Frames als zeitkritische Daten identifiziert werden. Relevante PROFINET-Parameter für die zeitkritische Datenübertragung sind die *Aktualisierungszeit* und die *Ansprechüberwachungszeit*. Die Aktualisierungszeit beschreibt ein Zeitintervall, innerhalb dessen ein Gerät oder eine Steuerung von seinem bzw. ihrem Pendant mit neuen Daten versorgt wird. Die Ansprechüberwachungszeit bezieht sich auf das Zeitintervall, das eine Steuerung oder ein Gerät akzeptiert, innerhalb dessen keine neuen Daten empfangen werden [Si12]. Die Ansprechüberwachungszeit ist ein ganzzahliges Vielfaches der Aktualisierungszeit und standardmäßig das Dreifache, d. h. Watchdog-Faktor = 3.

### **PROFINET über TSN**

TSN wurde als zusätzliche Layer 2-Technologie in die PROFINET-Spezifikation V2.4 integriert [PR23]. Im Vergleich zu herkömmlichen Industrial Ethernet-Switches kann der Jitter durch den TAS trotz weiteren IP-Datenverkehrs deutlich verbessert werden. Allerdings ist der Konfigurationsaufwand für TSN hoch und eine Zeitsynchronisation von Endgeräten mittels IEEE 802.1AS unerlässlich. Nur in einem Kommunikationssystem, in dem das Senden von Prozessdaten mit den reservierten Zeitfenstern für den Echtzeit-Datenverkehr synchronisiert wird, können Latenz und Jitter auf ein Minimum reduziert werden [Ke18].

### **PROFINET über WLAN/IWLAN**

Für die zuverlässige drahtlose Übertragung von PROFINET wurde Industrial WLAN eingeführt, welches herkömmliches WLAN um industrierelevante Mechanismen wie echtzeitfähige und deterministische Kommunikation für mobile Clients sowie Redundanz erweitert [Si24]. Hierbei handelt es sich um eine proprietäre Weiterentwicklung des WLAN-Standards durch Siemens.

### **PROFINET über 5G**

Wie bei TSN erfordert die zeitkritische PROFINET-Kommunikation über Layer 2 bei 3GPP Release 15 die Verwendung eines Tunnel-Protokolls, um die Daten über 5G zu übertragen. Aufgrund der noch nicht verfügbaren URLLC-Fähigkeiten für 5G ist die Performance (d. h. zuverlässig erreichbare Aktualisierungs- und Ansprechüberwachungszeiten) im Vergleich zu einer kabelgebundenen Übertragung schlechter, da höhere Latenz- und Jitterwerte bei 5G zu erwarten sind. Zu beachten ist, dass in der 3GPP-Terminologie die Aktualisierungszeit als *Transfer Interval* (des Senders) und die Ansprechüberwachungszeit als *Survival Time* bezeichnet wird. Im Gegensatz zu PROFINET wird die Zeit zwischen zwei empfangenen Paketen am Ziel, d. h. beim Empfänger, als Aktualisierungszeit (engl. *Update Time*) bezeichnet.

### **OPC UA**

OPC UA steht für Open Platform Communication Unified Architecture und ist eine serviceorientierte Architektur. Standardisierte Informationsmodelle liefern eine semantische Beschreibung von Maschinendaten und ermöglichen Interoperabilität beim Informationsaustausch unabhängig von Plattform, Sprache und Hersteller [OP13]. Die Stärken von OPC UA liegen insbesondere in der vertikalen Konnektivität und in der Kommunikation zwischen Maschinen. Die Spezifikationen lassen

sich in die drei übergeordneten Kategorien *Core Specifications* für Basisfunktionen, *Access Type Specifications* für den Informationszugriff und *Utility Type Specifications* für Funktionserweiterungen untergliedern. Für die Datenübertragung nutzt OPC UA Ethernet, TCP/IP oder UDP. Neben der ressourcenintensiven Client/Server-Verbindung erlangt OPC UA mithilfe von PubSub (Publisher/Subscriber-Modell) und TSN auch Echtzeitfähigkeit und Determinismus für die Übertragung von zeitkritischem Datenverkehr.

#### **OPC UA über TSN**

Es gibt Bestrebungen, auch eine zeitkritische Kommunikation mittels OPC UA über TSN zu realisieren, um verschiedene Feldbussysteme abzulösen [Br19], [Pf18]. Die Initiative *Field Level Communications* der *OPC Foundation* hat die ersten vier Teile der OPC UA Field eXchange-Spezifikationen veröffentlicht, die sich auf C2C konzentrieren [OP22]. C2D und D2D werden noch erarbeitet. Im Rahmen dieser Dissertation werden jedoch lediglich TCP/IP-Nachrichten über OPC UA und somit kein zeitkritischer Datenverkehr zur Maschinensteuerung betrachtet.

#### **OPC UA über 5G**

Zhang et al. [Zh23] entwickelten eine Architektur für 5G und OPC UA und validierten diese in einem Versuchsaufbau. Die OPC Foundation und 5G-ACIA arbeiten gemeinsam an der Integration von OPC UA in 5G [OP21] und veröffentlichten dazu bereits ein Whitepaper [5G24b].

## Anhang

Dieser Anhang umfasst Tabellen mit 5G Performance-Anforderungen industrieller Anwendungsfälle.

Tabelle A.1: Performance-Anforderungen industrieller Anwendungsfälle (angelehnt an [3G21])

Anwendungsfall	Charakteristische Parameter				Einflussgrößen		
	Verfügbarkeit [%]	Zuverlässigkeit	EzE-Latenz [ms]	Datenrate [Mbit/s]	Paketgröße [Byte]	Transferintervall (TI) [ms]	Survival time [ms]
<b>Bewegungssteuerung</b>	99,999-99,999 999	~ 10 Jahre	< TI	–	20-50	0,5-2	= TI
• C2C	99,999 9-99,999 999	~ 10 Jahre	< TI		1.000	≤ 10	10
• C2C	99,999 9-99,999 999	~ 10 Jahre	< TI		1.000	≤ 50	50
• Software-Updates		~ 1 Monat		≥ 1 (DL)			
<b>Mobile Roboter</b>	> 99,999 9	1-10 Jahre	< TI	–	0-250	1-500	= TI
• Video-Fernsteuerung	> 99,999 9	~ 1 Jahr	< TI	–	15-250 MB	10-100	= TI
• Kooperativer Transport (Sidelink)	99,999 9-99,999 999	~ 10 Jahre	< TI/2	2,5	250-500	1,7 bis > 5	0-2x TI
• Video-Streaming	> 99,999 9	~ 1 Woche	10	> 10 (UL)	–	aperiodisch	–
• Echtzeit-Video-Streaming				> 10 (UL)			
<b>Bedien-Panel</b>							
• Bewegungssteuerung	99,999 999	1 Tag	< 1	12-16	10-100	1	~ 1
• Robotersteuerung	99,999 9-99,999 999	~ 1 Monat	< TI	–	0-250	4-8	= TI
• Kransteuerung	99,999 9-99,999 999	~ 1 Jahr	< TI	–	40-250	< 12	12
• Safety	99,999 99	1 Tag	< 10	< 1	< 1.024	10	~ 10
• Notaus	99,999 999	1 Tag	< 8	0,25	40-250	8 oder aperiodisch	16
• Steuerung zu Visualisierung	99,999 999	1 Tag	10-100	0,01	10-100	10-100	= TI
• Haptisches Feedback	99,999 999	1 Tag	< 2	0,016 (UL) 2 (DL)	50	2	~ 2
• Produktionsdaten	99,999 9-99,999 99	1 Tag		12	250-1.500		
• parallele Datenübertragung	99,999 9-99,999 999	~ 1 Monat	< 30	> 5	–	aperiodisch	–
<b>Kabelersatz</b>							
• 100 Mbit/s	99,999 9-99,999 999	~ 10 Jahre	< TI < 1	50 25	–	≤ 1 aperiodisch	3x TI –
• 1 Gbit/s	99,999 9-99,999 999	~ 10 Jahre	< TI < 1	250 500	–	≤ 1 aperiodisch	3x TI –
<b>Sonstige</b>							
• Prozessautomation: geschlossener Regelkreis	99,999 9-99,999 999	≥ 1 Jahr	< TI	–	20	≥ 10	0
• Plant Asset Management	99,99	≥ 1 Woche	< TI	–	20-255	100-60.000	≥ 3x TI
• Temperatursensor	99,99	≥ 1 Woche	100-60.000	≤ 1 ≤ 0,2	20 25 MB		3x TI
• Vibrationssensor			≤ 1.000	≤ 2	250 MB		
• Thermal-Kamera			≤ 1.000				
• AR; bidirektionale Übertragung zu Bildverarbeitungs-Server	> 99,9	~ 1 Monat	< 10	–	–	aperiodisch	–

Tabelle A.2: Performance-Anforderungen für multi-modale Kommunikationsdienste (angelehnt an [3G22c])

Anwendungsfall	Charakteristische Parameter			Einflussgrößen			Bemerkung	
	EzE-Latenz [ms]	Datenrate [Mbit/s]	Zuverlässigkeit [%]	Paketgröße [Byte]	UE-Geschwindigkeit	Betriebsbereich [km <sup>2</sup> ]		
Immersive multi-modale VR (UL)	5	0,016-2 (unkomprimiert)	99,9 (unkomprimiert)	1 DoF <sup>10</sup> : 2-8 3 DoFs:	Stationär/Fußgänger	< 100	Haptisches Feedback	
		0,0008-0,2 (komprimiert)	99,999 (komprimiert)	6-24 6 DoFs: 12-48 Mehr DoFs möglich				
	5	< 1	99,99	1.500	Stationär/Fußgänger	< 100	Sensor-information	
Immersive multi-modale VR (DL)	10	1-100	99,9	1.500	Stationär/Fußgänger	< 100	Video	
	10	0,005-0,512	99,9	50	Stationär/Fußgänger	< 100	Audio	
	5	0,016-2 (unkomprimiert)	99,9 (unkomprimiert)	1 DoF: 2-8 3 DoFs:	Stationär/Fußgänger	< 100	Haptisches Feedback	
								6-24 6 DoFs: 12-48
Roboter-Fernsteuerung	1-20	0,016-2 (unkomprimiert)	99,999 (komprimiert)	2-8 (1 DoF)	hoch-dynamisch (≤ 50/h)	≤ 1	Haptisches Feedback	
								20-100
	5	1-100	99,999	1.500	Stationär/Fußgänger	≤ 1	Video	
	5	0,005-0,512	99,9	50-100	Stationär/Fußgänger	≤ 1	Audio	
	5	< 1	99,999	-	Stationär/Fußgänger	≤ 1	Sensor-Information	
	Kollaboration langsamer Roboter (inkl. Teleoperation) C2D	5-10	0,0008-0,2 (komprimiert)	99,999	1 DoF: 2-8 3 DoFs:	Stationär/Fußgänger	100	Haptisch (Position, Geschwindigkeit)
5-10		0,0008-0,2 (komprimiert)	99,999	1 DoF: 2-8 10 DoFs:	Stationär/Fußgänger	100	Haptisches Feedback	
								10
10	0,005-0,512	99,9	50	Stationär/Fußgänger	100	Audio		
Kollaboration hoch-dynamischer/mobiler Roboter (C2D)	1-5	0,016-2 (unkomprimiert)	99,999 (komprimiert)	1 DoF: 2-8 3 DoFs:	hoch-dynamisch	4	Haptisch (Position, Geschwindigkeit)	
								99,9 (unkomprimiert)

<sup>10</sup> Degree of Freedom (DoF); Freiheitsgrad

Anwendungsfall	Charakteristische Parameter			Einflussgrößen			Bemerkung
	EzE-Latenz [ms]	Datenrate [Mbit/s]	Zuverlässigkeit [%]	Paketgröße [Byte]	UE-Geschwindigkeit	Betriebsbereich [km <sup>2</sup> ]	
Kollaboration hoch-dynamischer/mobiler Roboter (D2C)	1-5	0,0008-0,2	99,999 (komprimiert) 99,9 (unkomprimiert)	1 DoF: 2-8 10 DoFs: 20-80 100 DoFs: 200-800	hoch-dynamisch	4	Haptisches Feedback
	1-10	1-10	99,999	2.000-4.000	hoch-dynamisch	4	Video
	1-10	0,1-0,5	99,9	100	hoch-dynamisch	4	Audio
Immersive multi-modale Navigationsanwendung (DL)	50	0,016-2 (unkomprimiert)	99,999	1 DoF: 2-8 10 DoF: 20-80 100 DoF: 200-800	Stationär/Fußgänger	≤ 100	Haptisches Feedback
	< 400	1-100	99,999	1.500	Stationär/Fußgänger	≤ 100	Video
	< 150	0,005-0,512	99,9	50	Stationär/Fußgänger	≤ 100	Audio
	< 300	600	99,9	1.500	Stationär/Fußgänger	≤ 100	VR
	< 300	0,012	99,999	1.500	Stationär/Fußgänger	≤ 100	Biometrisch/affektiv
	< 400	1-100	99,999	1.500	Arbeiter: Stationär/Fußgänger, Flugtaxi 50-500 km/h	≤ 100	Video
Immersive multi-modale Navigationsanwendung (UL)	< 150	0,005-0,512	99,9	50	Stationär/Fußgänger	≤ 100	Audio
	< 300	600	99,9	1.500	Stationär/Fußgänger	≤ 100	VR

Tabelle A.3: Industrielle Anwendungsfälle (angelehnt an [5G19f])

Anwendungsfall	Zykluszeit [ms]	Payload [Byte]
Bewegungssteuerung		
• Druckmaschine	< 2	20
• Werkzeugmaschine	< 0,5	50
• Verpackungsmaschine	< 1	40
Mobile Roboter		
• Kooperative Bewegungssteuerung	1	40-250
• Video-Fernsteuerung	10-100	15-150
Mobile Bedien-Panels mit Safety-Funktionen		
• Montageroboter oder Fräsmaschine	4-8	40-250
• Mobile Kräne	12	40-250

Tabelle A.4: 5G-Anwendungsfälle (angelehnt an [Ly19], basierend auf [3G20])

Anwendungsfall	Zykluszeit	Paketgröße	Anzahl Geräte	Gleichzeitigkeitsfaktor	Geschätzte Datenrate	Kommunikationstechnologie
Drahtloses Sensor-Netzwerk	5-1.000 ms	32-200 Bit	3.000	1	0,6 Mbit/s	WLAN, 5G
Mobiles Bedien-Panel	n. a.	n. a.	300	0,05	75 Mbit/s	WLAN, 5G
C2C	10 ms	1 Byte	100	1	10 Mbit/s	WLAN, 5G
Mobiler Assistent						
• Standardbetrieb	500 ms	250 Byte	> 100	1	250 kbit/s	Alle
• Kooperatives Fahren	5 ms	250 Byte	> 100	0,05	125 kbit/s	Alle Kurzstrecken
• Videostream	10-100 ms	1.500 Byte	> 100	0,05	60 Mbit/s	5G
• unsortiertes Greifen	Burst $\approx$ 50 Nachrichten	1.500 Byte	> 100	0,01	400 Mbit/s	5G

## Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit vollständig ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Alle verwendeten fremden und eigenen Quellen sind als solche kenntlich gemacht und im Falle einer Ko-Autorenschaft, insbesondere im Rahmen einer kumulativen Dissertation, ist der Eigenanteil richtig und vollständig ausgewiesen. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberaterin/eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche der Urheberin/des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen können.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

---

Hamburg, 12.08.2024  
Niklas Ambrosy