

Verringerung der Latenzzeit in einem Mobilfunknetz durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie

Christian Hahn
Matrikelnummer: 51906731



BACHELORARBEIT

eingereicht im
Fachhochschul-Bachelorstudiengang Wirtschaftsinformatik (0470)

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Bachelor of Arts in Business

Betreuung und Beurteilung: DI Dr. Igor Miladinovic

Wiener Neustadt, Juni 2022

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere hiermit,

1. dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Inhalte, die direkt oder indirekt aus fremden Quellen entnommen sind, sind durch entsprechende Quellenangaben gekennzeichnet.
2. dass ich diese Bachelorarbeit bisher weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit zur Beurteilung vorgelegt oder veröffentlicht habe.

Wiener Neustadt, am 7. Juni 2022

Christian Hahn

Matrikelnummer: 51906731

Creative Commons Lizenz

Das Urheberrecht der vorliegenden Arbeit liegt bei beim Autor. Sofern nicht anders angegeben, sind die Inhalte unter einer Creative Commons „Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz“ (CC BY-NC-SA 4.0) lizenziert. Die Rechte an zitierten Abbildungen liegen bei den in der jeweiligen Quellenangabe genannten Urheber*innen.

Die Kapitel 2 und 3 der vorliegenden Bachelorarbeit wurden im Rahmen der Lehrveranstaltung „Bachelor Seminar 1“ eingereicht und am 05.06.2022 als Bachelorarbeit 1 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	i
Kurzfassung	v
Abstract	vi
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Forschungsfrage	1
1.3 Hypothese	1
1.4 Ziel	1
1.5 Nichtziel	2
1.6 Struktur	2
2 Grundlagen	3
2.1 Grundlegende Begriffe im Bereich des Mobilfunks und Evolution des Mobilfunks	3
2.1.1 Standards	4
2.1.2 2G (Mobilfunk der 2. Generation) - GSM (Global System for Mobile Communications)	5
2.1.3 3G (Mobilfunk der 3. Generation) - UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)	5
2.1.4 4G (Mobilfunk der 4. Generation) - LTE (Long Term Evolution)	6
2.1.5 5G (Mobilfunk der 5. Generation) - 5G NR (New Radio)	6
2.2 Aufbau eines Mobilfunknetzes	7
2.2.1 Radio Access Network, RAN (Funkzugangnetz)	10
2.2.2 Funkschnittstelle	13
2.2.3 Corenetwork, CN (Kernnetzwerk))	17
2.2.4 Security und Mobility in Mobilfunknetzen	20
2.2.5 5G Deployment Options	22
2.3 Latenz	24
2.3.1 Datenübertragung über das Internet	24
2.3.2 Messung der Latenz	28
2.3.3 Latenz in Mobilfunknetzen	29
2.4 Untersuchungen zur Latenz in 4G und 5G Mobilfunknetzen	32
2.4.1 RTR Internet Monitor 2. Quartal 2021 (17.12.2021)	32

2.4.2	Bundesnetzagentur Jahresbericht 2019/2020	34
2.4.3	Latenzvergleich von 4G und 5G Non-Standalone (NSA)	36
2.4.4	Latenzvergleich von 5G Non-Standalone (NSA) und 5G Standalone (SA)	37
2.4.5	Mobile Gaming und der Einsatz von Network Slicing und Multi-access Edge Computing (MEC) in einem 5G Standalone Netz	38
3	Konzeptioneller Vorgehens- und Lösungsansatz	44
3.1	Ausgewähltes Forschungsdesign	44
3.1.1	Auswahlkriterien für das Forschungsdesign	44
3.2	Anforderungen an das Forschungsdesign	45
3.2.1	Definieren des Messaufbaus	45
3.2.2	Vorgehensweise für die Datenerhebung	46
3.2.3	Vorgehensweise für die statistische Auswertung	46
4	Anwendung des Lösungsvorschlags	47
4.1	Untersuchungsumgebung	47
4.1.1	Eingesetztes 4G System von spusu	47
4.1.2	Eingesetztes 5G Standalone System von spusu	48
4.1.3	Nicht betrachtetes System: 5G Non-Standalone	49
4.1.4	Auswahl des UEs	50
4.1.5	Latenzzeitmessung mittels RTR-Netztest	51
4.1.6	Messaufbau	52
4.2	Erhebung der Messdaten	53
4.3	Statistische Auswertung der Messdaten	56
4.3.1	Auswertung der Daten	56
5	Analyse der Ergebnisse	57
5.1	Bewertung der Umsetzung in der Praxis	57
5.2	Ergebnisse	58
5.3	Interpretation der Ergebnisse	59
5.4	Vergleich der Ergebnisse mit der Hypothese	60
5.5	Erkenntnisse	61
6	Schlussfolgerungen	62
6.1	Beantwortung der Forschungsfrage	62
6.2	Bewertung der Hypothese	62
6.3	Nutzen der Ergebnisse	63
7	Zusammenfassung und Ausblick	64
7.1	Zusammenfassung	64
7.2	Ausblick	65
	Quellenverzeichnis	66
	Literatur	66
	Online-Quellen	70

Inhaltsverzeichnis	iv
Messergebnisse im .csv-Format für die Weiterverarbeitung	73
R-Skript für die statistische Auswertung	74

Kurzfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Frage, in welchem Ausmaß der Einsatz der 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der Latenzzeit gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf führt. Hierzu wurde ein Messaufbau definiert, welcher repräsentativ und reproduzierbar ist. Die Auswertung erfolgte mittels statistischer Auswertung der Daten, um einen Vergleich ziehen zu können. Die Latenz wird als Round Trip Time mittels Ping-Messung im 5G Standalone Mobilfunknetz und im 4G Mobilfunknetz von spusu ermittelt. Im Kontext eines Mobilfunksystems und des Messaufbaus bedeutet dies, dass die Übertragungszeit eines Datenpakets vom Endgerät über das Mobilfunknetz bis hin zu einem Server im Internet und wieder zurück zum Endgerät gemessen wird. Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führte im Vergleich zur 4G Technologie demnach zu einer Verringerung von 20,94 %. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Einsatz der 5G Standalone Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf im Mobilfunknetz von spusu ein geeignetes Mittel ist, um die Latenz für Mobilfunknetzteilnehmer zu reduzieren.

Schlagwörter: Latenz, Mobilfunk, 5G Standalone, 4G, 5G, Ping

Abstract

This bachelor thesis deals with the question of the extent to which the use of 5G standalone technology leads to a reduction in latency compared to 4G technology in the mobile network of the mobile provider spusu in the business park A5 Mistelbach-Wilfersdorf. For this purpose, a measurement setup was defined that is representative and reproducible in order to be able to draw a comparison by means of statistical evaluation of the data. The latency is measured as round trip time by means of ping measurement in the 5G standalone and in the 4G network of spusu. In the context of a mobile network, this means that the transmission time of a data packet from the User Equipment via the mobile network to the measurement server on the Internet and back to the User Equipment is measured. The use of 5G standalone technology thus led to a reduction of 20.94 % compared to 4G technology. This result shows that the use of 5G standalone technology in the spusu mobile network at the A5 Mistelbach-Wilfersdorf business park is a suitable means of reducing latency for mobile network subscribers.

Keywords: latency, mobile network, 5G Standalone, 4G, 5G

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Die durchschnittliche Latenzzeit im 4G Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf soll für zukünftige Anwendungen der Industrie 4.0 verbessert werden. Die Firma Mass Response Service GmbH, Eigentümer der Marke spusu, ist im Besitz von 5G Frequenzen im Bereich 3,4 – 3,8 GHz und hat den Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf mit der 5G Standalone Technologie versorgt. Es liegen noch keine fundierten Daten vor, ob eine Verringerung der Latenzzeit im Mobilfunknetz durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie gegenüber der 4G Technologie erreicht wurde.

1.2 Forschungsfrage

Die konkrete Forschungsfrage, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden soll, lautet: *In welchem Ausmaß führt der Einsatz der 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der Latenzzeit gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf?*

1.3 Hypothese

Die Hypothese zu der obigen Forschungsfrage lautet: *Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führt gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf zu einer Verringerung der Latenzzeit um 25 Prozent.*

1.4 Ziel

Es soll erforscht werden, in welchem Ausmaß die Latenzzeit durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie im Vergleich zur 4G Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf für Endgeräte im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu verringert werden konnte. Für die Beantwortung der Forschungsfrage wird das Forschungsdesign der *Feldforschung* angewandt.

1.5 Nichtziel

Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, die Durchsatzraten von 4G und 5G Standalone im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf zu vergleichen.

1.6 Struktur

Kapitel 1 ist die Einleitung der Arbeit und erläutert die Problemstellung, die Forschungsfrage, die Hypothese sowie die das Ziel und Nichtziel dieser Arbeit. Kapitel 2 beschäftigt sich mit den Grundlagen des Mobilfunks und den Grundlagen der Latenz. Des Weiteren werden in Kapitel 2 Untersuchungen zur Latenz in 4G und 5G Mobilfunknetzen vorgestellt. In Kapitel 3 wird der konzeptionelle Vorgehens- und Lösungsansatz beschrieben. In Kapitel 4 der vorliegenden Arbeit geht es um die Beschreibung der Durchführung und Umsetzung des Konzepts aus dem 3. Kapitel. Die Beschreibung der Durchführung dient vor allem der Nachvollziehbarkeit der erzielten Ergebnisse. Nach der Beschreibung der Durchführung im Kapitel 4, werden in Kapitel 5 die Ergebnisse dargestellt und analysiert. In Kapitel 6 werden Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen aus Kapitel 5 gezogen und die Hypothese bewertet. In Kapitel 7 steht eine Zusammenfassung der Arbeit und es wird ein Ausblick gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen und derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen und der derzeitige Stand von Wissenschaft und Technik definiert. Dabei wird auch auf Untersuchungen und Studien eingegangen, welche sich mit der Messung von Latenzzeiten in 4G und 5G Mobilfunknetzen beschäftigt haben.

2.1 Grundlegende Begriffe im Bereich des Mobilfunks und Evolution des Mobilfunks

Die Entwicklung des Mobilfunks kann in der Form von Mobilfunkgenerationen beschrieben werden. Eine Generation kennzeichnet jeweils eine bestimmte Technologie. Die Zählung wird üblicherweise mit der 2. Mobilfunk-Generation (2G) begonnen. Aber auch bereits zuvor gab es Mobilfunknetze, zuerst die analogen B- und C-Netze und das etwas stärker verbreitete D-Netz. Diese analogen Netze könnten aus heutiger Sicht als Netze der ersten Generation bezeichnet werden [82]. In Österreich wurde das erste Mobilfunknetz, das B-Netz, 1974 in Betrieb genommen. Dieses analoge Mobilfunksystem hatte bereits Selbstwählverbindungen, jedoch musste man die geografische Rufzone des Gesprächspartners kennen, um im Mobilnetz verbunden zu werden. Als dieses mit seinen 1.770 Teilnehmern an seine Kapazitätsgrenzen stieß, wurde 1985 das zellulare C-Netz eingeführt. Nun waren eine einheitliche landesweite Vorwahl und die Möglichkeit des unterbrechungsfreien Wechsels von einer Funkstation zur nächsten möglich. 1990 startete das D-Netz, die letzte analoge Mobilfunkgeneration vor dem GSM-Netz. Das GSM-Netz ist der erste Standard der zweiten Generation (2G) (vgl. [5]).

Somit begann die Einführung der digitalen Mobilfunknetze in den 1990er Jahren mit dem Mobilfunkstandard 2G und wurde von der Groupe Spéciale Mobile Association (GSMA) in den 1980er Jahren als europäisches Projekt entwickelt (vgl. [78]). Damit der Nachfolgerstandard 3G von Beginn weg weltweit funktionierte, wurde Ende der 1990er Jahre die Organisation 3GPP gegründet, die von sieben regionalen Telekomverbänden (Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), China Communications Standards Association (CCSA), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Telecommunications

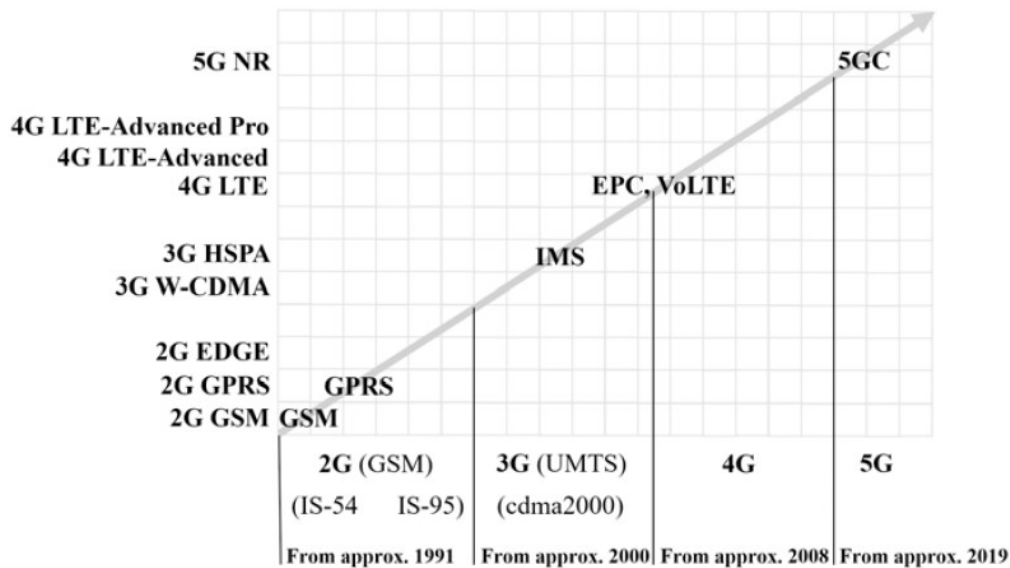


Abbildung 2.1: Evolution digitaler Mobilfunkgenerationen, Quelle: [64]

Standards Development Society, India (TSDSI), Telecommunications Technology Association (TTA), Telecommunication Technology Committee (TTC)) getragen wird (vgl. [69]). Dieses Gremium hatte auch die Federführung bei der Standardisierung von 4G und 5G. Der Mobilfunk benötigt länderübergreifende Standards. Diese stellen sicher, dass die Komponenten der einzelnen Hersteller sowohl untereinander als auch in den verschiedenen Ländern funktionieren. In der Regel dauert ein Standardisierungsprozess mehrere Jahre, wobei es auch innerhalb eines Mobilfunkstandards Weiterentwicklungen gibt. Die großen Verbesserungen kommen aber nur alle paar Jahre, und 5G markiert den jüngsten dieser Technologiesprünge (vgl. [39]). In Abbildung 2.1 sieht man die Entwicklung der einzelnen Mobilfunkgenerationen. Bei den einzelnen Mobilfunkgeneration kam es auch zu Weiterentwicklungen innerhalb der Generationen.

2.1.1 Standards

Da sich im weltweiten Markt für Telekommunikations- und Mobilfunknetzwerke viele Firmen um Aufträge der Netzbetreiber bemühen, ist eine Standardisierung der Schnittstellen und technischen Vorgänge notwendig. Ohne diese Standards, die unter anderem von der International Telecommunication Union (ITU) definiert wurden, wäre eine länderübergreifende Telefonie nicht möglich, und Netzbetreiber wären fest an einen Netzklieraufbieter gebunden. Viele ITU Standards repräsentieren jedoch nur den kleinsten gemeinsamen internationalen Nenner. Jedes Land behält sich vor, nationale Erweiterungen vorzunehmen. Dies verursacht in der Praxis enorme Kosten bei der Softwareentwicklung, da für jedes Land spezielle Erweiterungen nötig sind. Auch der Übergang zwischen Netzen unterschiedlicher Länder wird dadurch sehr erschwert. Mit GSM wurde zum ersten Mal ein einheitlicher Standard in Europa für die mobi-

le Kommunikation geschaffen, der später auch weltweit übernommen wurde. Diesem Umstand ist es zu verdanken, dass Teilnehmer heute weltweit in allen GSM-Netzen, die ein sogenanntes Roamingabkommen mit seinem Heimatnetz abgeschlossen haben, telefonieren und mobil Daten übertragen können. Auch wurde es so möglich, die Entwicklungskosten wesentlich zu reduzieren, da die Systeme ohne große Modifikationen in alle Welt verkauft werden können. Dem European Telecommunication Standards Institute (ETSI), das neben GSM auch noch viele weitere Telekommunikationsstandards für Europa spezifiziert hat, kam dabei eine wesentliche Rolle bei der Erarbeitung dieser Standards zu. Die ETSI GSM Standards umfassen dabei eine Vielzahl von unterschiedlichen Standarddokumenten, auch Technical Specifications (TS) genannt, die jeweils einen Teil des Systems beschreiben. Da GSM heute international verwendet wird und es zu Beginn der UMTS-Standardisierung absehbar war, dass auch dieser über Europa hinaus große Bedeutung erlangen würde, gründete ETSI zusammen mit weiteren internationalen Standardisierungsgremien aus aller Welt das 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Dieses Gremium kümmert sich seither um die Standardisierung von GSM, UMTS, LTE und 5G. Diese Spezifikationen können auf <http://www.3gpp.org> kostenlos abgerufen werden [55].

2.1.2 2G (Mobilfunk der 2. Generation) - GSM (Global System for Mobile Communications)

GSM war die erste Mobilfunktechnologie bei der die Sprache digital übertragen wurde. GSM wurde ab Ende 1993 eingeführt und löste die früheren analogen Netze ab. GSM-Geräte konnten neben Sprache auch Daten übertragen. Diese sehr langsame Datenübertragung (GPRS: 53,6 kbit/s) war ursprünglich verbindungsorientiert, es wurde das Verhalten eines Wählleitungsmodems nachgebildet. Damit war auch die mobile Übertragung von Fax möglich. GPRS (General Packet Radio Service), ein Dienst innerhalb von GSM ermöglichte ab ca. 1999 erstmals die Übertragung von paketorientierten Daten. Heute geht die Nutzung von GSM kontinuierlich zurück. Sprache kann mit moderneren Technologien in besserer Qualität und Daten können mit viel höherer Geschwindigkeit übertragen werden. Trotzdem hat GSM auch noch heute Bedeutung. Die GSM-Netze haben immer noch die höchste Reichweite, GSM ist weiterhin fast weltweit verbreitet und kann daher für Roaming genutzt werden. Dazu kommt eine Vielzahl einfacher Geräte (z.B. Getränkeautomaten, Fahrzeuge) welche GSM für die Übertragung von Maschine-zu-Maschine (M2M) nutzen. GSM nutzt in Europa die 900 und 1800 MHz Bänder. Diese Bänder sind heute jedoch nicht mehr exklusiv für GSM reserviert. Vielmehr teilt sich GSM diese Bänder mit moderneren Technologien, damit wird die für GSM verfügbare Funkbandbreite im Lauf der Zeit geringer [82].

2.1.3 3G (Mobilfunk der 3. Generation) - UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)

Die anfänglichen Erwartungen in die Technologie der dritten Generation UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) waren hoch, wie oft, wenn neue Technologien eingeführt werden. 3G sollte Videotelefonie und schnelle Datenübertragung ermöglichen. Doch die Erwartungen in 3G-Videotelefonie wurden nicht erfüllt. Die Datenübertragung mit anfänglich nur circa 144kBit/s erfüllte die Anforderungen an mobiles Breit-

band nicht. Die Situation änderte sich erst mit der Einführung von HSPA (High Speed Packet Access). Diese in mehreren Schritten eingeführte Verbesserung von 3G ermöglichte Datenraten von bis ca. 30 MBit/s im Downlink und ca. 5 MBit/s im Uplink. Damit war die für Smartphones (ab ca. 2008) notwendige Breitband-Technologie geschaffen, die Basis für einen grundlegenden Wandel der Nutzung des Internets.

UMTS wurde ab circa 2001 im 2100 MHz Band eingeführt. Heute wird diese Band zunehmend für LTE genutzt, 3G wird heute aber auch im 900 MHz Band genutzt. Damit wird eine an GSM annähernd hohe Reichweite erzielt [82].

2.1.4 4G (Mobilfunk der 4. Generation) - LTE (Long Term Evolution)

LTE gestaltet sowohl das Funknetz als auch das Kernnetz neu, um die Einschränkungen früherer Netzstandards zu überwinden (vgl. [28]). Ziele waren höhere spektrale Effizienz, höhere Datenraten wie auch geringere Latenz. Das Netz sollte nur mehr paketerorientierte Datenübertragung ermöglichen, damit konnte Sprachtelefonie als VoLTE (Voice over LTE) eingeführt werden. Die Technologie CDMA (Code Division Multiple Access) - ein wichtige Technologie von 3G wurde durch OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) ersetzt. Das Ergebnis war ein System, welches schnelle Datenübertragung mit geringer Latenz ermöglicht. Die Frequenzkanäle sind bis zu 20 MHz breit, mehrere Frequenzkanäle, auch in unterschiedlichen Frequenzbändern können gemeinsam genutzt werden (CA, Carrier Aggregation). Damit ermöglicht man Datenraten von über 1Gbit/s. Diese Datenraten setzen natürlich eine Aggregation einer Vielzahl an 20 MHz-Kanälen und sehr gute Versorgung voraus. Aber auch in der Praxis sind Datenraten von über 100 MBit/s problemlos erreichbar [82]. LTE reduziert die Anzahl der Netzknoten um Kosten und Latenzzeiten im Vergleich zu GSM (2G) und UMTS (3G) zu verringern (vgl. [28]).

2.1.5 5G (Mobilfunk der 5. Generation) - 5G NR (New Radio)

Die neue Generation von Mobilfunknetzen, 5G, gilt als mehr als nur ein weiteres „G“. Im Gegensatz zu den vorherigen Evolutionsschritten bei den Mobilfunknetzen, wie 3G und 4G, geht es bei 5G mehr als nur eine Erhöhung der Datenrate für mobiles Internet (vgl. [67]). Die Entwicklung von 5G konzentriert sich auf acht wichtige Anforderungen (vgl. [6]):

- (1) Datenraten bis zu 10 Gbit/s
- (2) Latenzzeiten von 1 ms
- (3) hohe Bandbreite pro Flächeneinheit
- (4) sehr große Anzahl von angeschlossenen Geräten
- (5) eine Verfügbarkeit von 99,999 %,
- (6) nahezu vollständige Netzabdeckung
- (7) bis zu 90 % reduzierter Energieverbrauch und
- (8) lange Batterielebensdauer der angeschlossenen Geräte

Mit diesen Anforderungen sollte 5G in der Lage sein, nicht nur Endgeräte für Menschen, sondern auch IoT-Anwendungen optimal zu bedienen, um somit die ultimative Zugangstechnologie für das Internet der Dinge (IoT) zu werden (vgl. [37]).

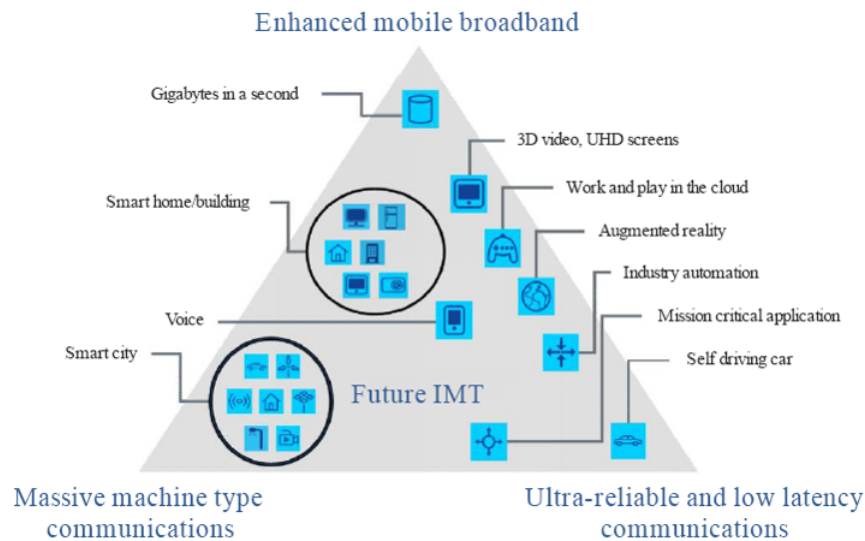


Abbildung 2.2: ITU Triangle. Quelle: ITU

Die Anfänge der Standardisierung von 5G reichen ins Jahr 2015 zurück, wo mit einem Grundsatzdokument der International Telecommunication Union (ITU) mit den grundlegenden Designkriterien von 5G die Eckpfeiler der neuen Technologie eingeschlagen wurden. Der Fokus wurde auf folgende drei große Anwendungskategorien für 5G gelegt [57]:

- **Enhanced Mobile Broadband (eMBB)** zur Bewältigung hoher Datenraten und hoher Nutzerdichte.
- **Massive Machine Type Communications (mMTC)** für das Internet der Dinge (IoT), das einen geringen Stromverbrauch und niedrige Datenraten für eine sehr große Zahl verbundener Geräte erfordert.
- **Ultra Reliable Low Latency Communications (uRLLC)** für sicherheitskritische und zeitkritische Anwendungen.

Einzelne Anwendungsfälle der Anwendungskategorien sind abgebildet auf Abbildung 2.2. Die Anwendungskategorien erfordern unterschiedliche Anforderungen gemäß ITU-R M.2083, siehe Abbildung 2.3.

2.2 Aufbau eines Mobilfunknetzes

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Komponenten eines Mobilfunknetzes beschrieben. Es konzentriert sich auf die Komponenten, die sowohl 4G als auch 5G gemeinsam sind, und schafft so eine Grundlage für das Verständnis der Funktionsweise von 4G und 5G Mobilfunknetzen und die Entstehung von Latenzen im Mobilfunknetz.

Ein Mobilfunknetz besteht aus zwei unterschiedlichen Netzen, dem Mobilvermittlungsnetz (auch genannt Kernnetz (engl. Corenetwork)), in dem die Übertragung und Vermittlung der Signale zwischen den ortsfesten Einrichtungen des Mobilfunknetzes stattfinden, sowie dem Funkzugangnetz (RAN (Radio Access Network)), in dem die

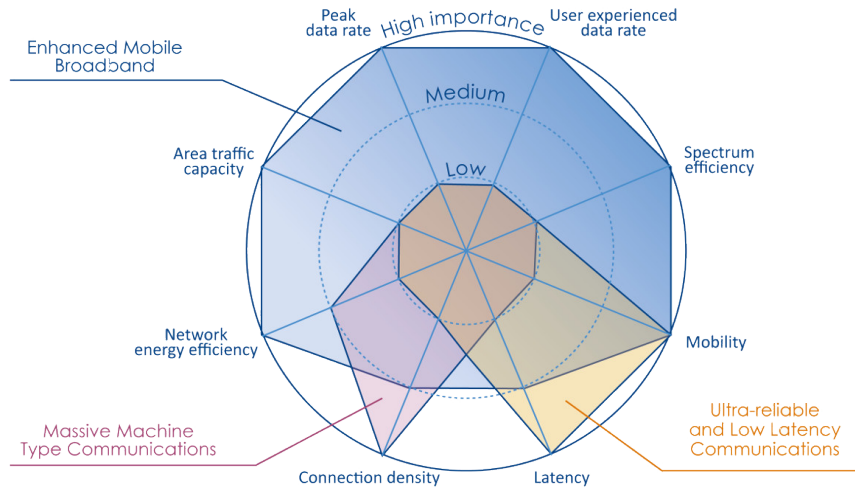


Abbildung 2.3: 5G Anforderungen an die 5G Anwendungskategorien. Quelle: ITU

Signale zwischen einer Mobilfunkantenne und dem Mobiltelefon (UE (User Equipment)) übertragen werden (vgl. [12]). Ein UE kann entweder ein Mobiltelefon, ein Computer oder ein beliebiges Gerät sein, welches eine Mobilfunkantenne hat [26]. Die Kommunikation im Mobilvermittlungsnetz ist typischerweise kabelgebunden, erst das Zugangsnetz ist das eigentliche Funknetz (vgl. [12]). Ein Mobilfunknetz besteht somit aus:

- User Equipment (Endgerät), UE
- Radio Access Network (Funkzugangsnetz), RAN
- Corenetwork (Kernnetzwerk), CN

Abbildung 2.11 zeigt die Grundlegenden Komponenten eines Mobilfunknetzes und deren Zusammenschaltung grafisch. UE und RAN sind mittels Funkschnittstelle miteinander verbunden. Zu den Endgeräten, die als User Equipment (UE) bezeichnet werden, gehören traditionell Smartphones, aber zunehmend auch Autos, Drohnen, Industrie- und Landwirtschaftsmaschinen, Roboter, Haushaltsgeräte, medizinische Geräte und vieles mehr. Das RAN verwaltet das Funkspektrum und sorgt dafür, dass es effizient genutzt wird und die Anforderungen jedes Nutzers erfüllt. Das RAN entspricht einer verteilten Ansammlung von Basisstationen (vgl. [45]). Eine Basisstation besteht aus einer analogen Komponente, der Antenne, und einer digitalen Komponente, der Baseband Unit (BBU) sowie der Remote Radio (RRU), die zwischen den digitalen Signalinformationen, die von den BBUs über ein Glasfaserkabel bereitgestellt werden, und dem analogen Signal für die Antennen umwandeln. Die RRUs sind auch erforderlich, um das erzeugte HF-Signal auf Werte zwischen 10 und 200 Watt zu verstärken, je nach Frequenzbandbreite und gewünschter Zellreichweite. Anstelle von passiven Flachantennen und RRUs werden bei modernen 5G-Implementierungen Active Antenna System (AAS) Panels mit 32 bis 64 kleinen Antennenelementen anstelle von einer passiven Flachantenne und RRUs imple-

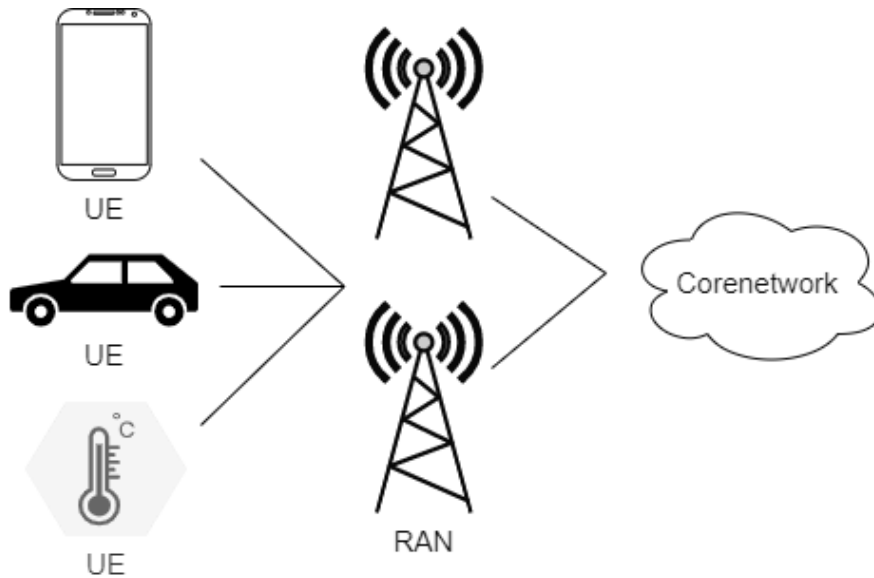


Abbildung 2.4: Grundlegende Komponenten eines Mobilfunknetzes: Grundlegende Darstellung der Zusammenschaltung zwischen UE, RAN und dem Coenetwork. Quelle: Eigene Darstellung

mentiert. Dies ist erforderlich, um die Reichweite und den Gesamtdurchsatz der Zelle mit Beamforming und Multi-User-MIMO-Übertragungen zu erhöhen. Zusätzlich zu den kleinen Antennenelementen enthalten die aktiven Antenneneinheiten auch die RRUs. Dies ist notwendig geworden, da es unpraktisch ist, eine so große Anzahl von Antennenelementen über Koaxialkabel mit einem RRU zu verbinden. Solche Antennen sind zwar im Vergleich zu passiven Flachantennen deutlich schwerer (AAS 40 kg, RRU 20 kg, Antenne 5-10 kg), dafür müssen sie nur mit Glasfaserkabeln und Strom verbunden werden, statt mit einem Dutzend oder mehr an Koaxialkabeln, wie sie heute typischerweise für Multiband-Antennen verwendet werden, welche zwei oder vier gleichzeitige Datenströme auf einem Frequenzträger (MIMO) unterstützen, um die Datenraten zu erhöhen. Es ist auch möglich, Flachantennen für 5G zu verwenden. In der Regel werden dann 8×8 Antennen für höhere Frequenzbänder wie das 3,5-GHz-Band verwendet, um zumindest eine grundlegende Reichweitenerweiterung und Multi-User-MIMO-Fähigkeiten bieten zu können. In niedrigeren Bändern nutzt 5G in der Regel die bereits installierten Multiband-Antennen für 2G, 3G und 4G. (vgl. [54]). Das Backhaul verbindet RAN und CN. Das Backhaul ist in der Regel kabelgebunden, und wird häufig aus Standardkomponenten aufgebaut, die anderswo im Internet zu finden sind. Ein Glasfasernetz als Fiber-to-the-Home implementiert (in diesem Fall Fiber-to-the-Basestation), ist zum Beispiel eine häufige Implementierung des RAN-Backhaul für 4G und 5G Basisstationen. Alternativ werden entlegene Basisstationsstandorte mittels Richtfunk angebunden. Das Backhaul-Netz ist notwendiger Bestandteil des RAN, aber es ist eine Implementierungsentscheidung der Netzbetreiber und wird nicht durch den 3GPP-Standard vorgeschrieben (vgl. [45]). Das Corenetwork oder Kernnetzwerk genannt, enthält alle Komponenten für die Vermittlung von Gesprächen, für die Teilnehmerverwaltung, bietet Internet bzw.

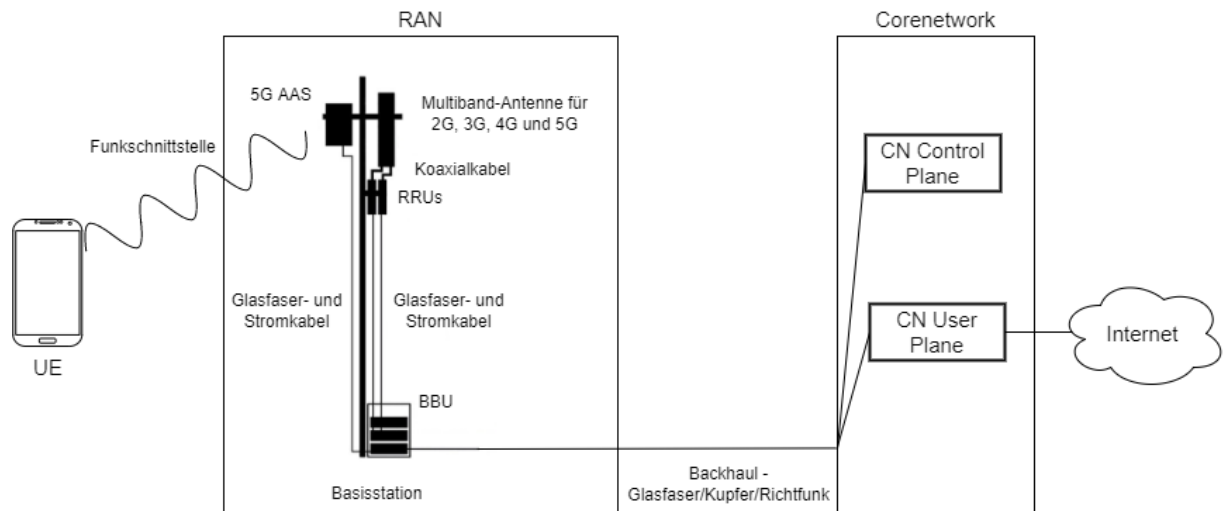


Abbildung 2.5: Grundlegende Komponenten eines Mobilfunknetzes: Detaillierte Darstellung der Zusammenschaltung zwischen UE, RAN und dem Corenetwork. Quelle: Eigene Darstellung

IP-Konnektivität für Daten- und Sprachdienste, die Sicherstellung der Einhaltung der QoS-Anforderungen (Quality of Service, Dienstqualität) und das Mobilitätsmanagement ([55, Kapitel 1.5]). Das Corenetwork ist unterteilt in Control Plane und User Plane Funktionalitäten, welches notwendig ist, um Signalisierung und Nutzdaten zu trennen, um diese Quality of Service mäßig unterscheiden zu können (vgl. [45]). Abbildung 2.5 zeigt die Grundlegenden Komponenten eines Mobilfunknetzes und deren Zusammenschaltung grafisch.

Ein Mobilfunknetz ist zellular (daher kommt auch der im US-amerikanischen Raum gebräuchliche Begriff für Mobiltelefon: cell phone) aufgebaut (siehe Abbildung 2.6) und setzt sich aus einzelnen Funkzellen zusammen, die jeweils von einer fest installierten Sendestation (der Mobilfunkbasisstation) versorgt werden. Die Größe der Zellen sind von der Frequenz und deren Reichweite abhängig, sodass für eine flächendeckende Versorgung mit niedrigen Frequenzen (wie vorwiegend im ländlichen Raum) weniger Sendestationen pro Fläche benötigt werden als für hohe Frequenzen. Allerdings steht bei den niedrigeren Frequenzen meist weniger Spektrum zur Verfügung und damit dann auch entsprechend eine geringere Datenrate zur Verfügung. Für die sehr hohen Frequenzbereiche ab 24 GHz, welche die extrem hohen Datenraten bei 5G erst ermöglichen, sind hingegen engmaschige Netzwerke (wenige Meter bis wenige hundert Meter) notwendig. Insbesondere deshalb, weil die Gebäudedurchdringung bei diesen Frequenzen sehr niedrig ist. Frequenzen jenseits der 24 GHz können keine steinernen Hauswände durchdringen und können sogar von Bäumen oder starkem Regen absorbiert werden [33].

2.2.1 Radio Access Network, RAN (Funkzugangsnetz)

In 2G bestand das RAN aus zwei Hauptkomponenten: Base Transceiver Stations (BTS) und Base Station Controller (BSC). Um eine gute Abdeckung zu gewährleisten, müssen



Abbildung 2.6: Darstellung von Mobilfunkzellen. Quelle: informationszentrum-mobilfunk.de

oft mehrere BTS eingesetzt werden, um ein Gebiet abzudecken. Jede BTS hat ein bestimmtes Gebiet, das von den Antennen abgedeckt wird und als Zellstandort bezeichnet wird. Die Bezeichnungen Makro, Mikro und Pico werden verwendet, um die Größe des von den Zellstandorten abgedeckten Bereichs zu beschreiben (vgl. [41, Kapitel 3.2.3]). In 3G wurde die RAN-Struktur in NodeB (NB) und Radio Network Controller (RNC) geändert. Der NB entspricht der BTS im 2G-RAN und der RNC entspricht dem BSC. Die Anweisungen, die der NB ausführt, werden vom RNC berechnet. (vgl. [26]). In 4G wurde die Struktur erheblich verändert. Die NB wurde gegen die eNodeB (eNB) ausgetauscht und die Funktionen der NC wurden aufgeteilt, wobei einige Funktionen in den 4G Core und einige Funktionen in die eNB verlegt wurden. Das Ergebnis ist, dass das 4G-RAN nur aus miteinander verbundenen eNBs besteht. Da die eNBs zusammenschaltet sind, wird die Mobilität direkt zwischen den eNBs abgewickelt (vgl. [41, Kapitel 3.2.3]). Während die Kombination aus Antenne, Funkmodul und Basisbandeinheit bei LTE als eNodeB oder eNB bezeichnet wird, wird die gleiche Kombination bei 5G New Radio als gNodeB oder gNB bezeichnet. Diese Bezeichnung für eine Basisstation hat ihren Ursprung in der UMTS-Spezifikation, in der die Basisstation als NodeB bezeichnet wurde. In LTE wurde die Bezeichnung wiederverwendet und der Buchstabe „e“ hinzugefügt, der sich auf die „Evolution“ in Long Term Evolution (LTE) bezieht. Für 5G wurde der Buchstabe „e“ durch ein „g“ ersetzt und steht für „next Generation“, um die nächste Generation zu symbolisieren (vgl. [91]). Folgend werden die Funktionalität des RAN erläutert (vgl. [45]):

- Zunächst richtet jede Basisstation den Funkkanal für das UE ein. In der 3GPP-Terminologie wird dieser drahtlose Kanal als Bearer Service bezeichnet. Der Begriff „Bearer“ wurde in der Telekommunikation (einschließlich früher drahtgebundener Technologien wie ISDN (Integrated Services Digital Network)) traditionell zur Bezeichnung eines Datenkanals verwendet, im Gegensatz zu einem Kanal, der

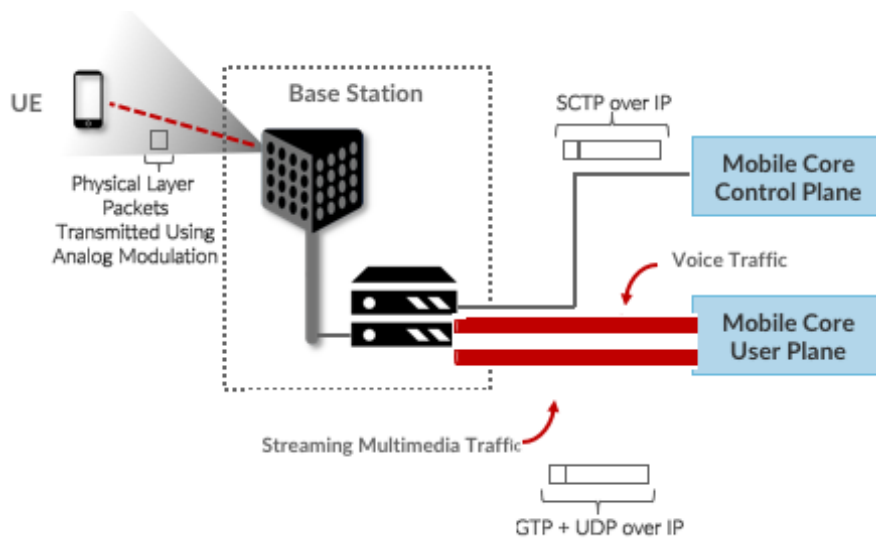


Abbildung 2.7: Die Control Plane zwischen Basisstation und Core (und zwischen Basisstation und Basisstation) wird über SCTP/IP getunnelt und die User Plane über GTP/UDP/IP getunnelt. Die Basisstation kann einen oder mehrere Tunnel zwischen jedem UE und der User Plane aufbauen. Quelle: [45]

Signalisierungsinformationen trägt.

- Zweitens stellt jede Basisstation eine „3GPP Control Plane“-Konnektivität zwischen dem UE und der entsprechenden Corenetwork Control Plane Komponente her und leitet den Signalisierungsverkehr zwischen den beiden weiter. Dieser Signalisierungsverkehr ermöglicht die UE-Authentifizierung, Registrierung und Mobilitätsverfolgung.
- Drittens baut die Basisstation für jedes aktive UE einen oder mehrere Tunnel (Bearer) zwischen der entsprechenden Corenetwork User Plane Komponente auf.
- Viertens leitet die Basisstation sowohl Kontroll- als auch Nutzerpakete zwischen dem Corenetwork und dem UE weiter. Diese Pakete werden über SCTP/IP bzw. GTP/UDP/IP getunnelt. SCTP (Stream Control Transport Protocol) ist eine zuverlässige Alternative zu TCP, die auf die Übertragung von Signalisierungs-Informationen für Telefondienste zugeschnitten ist. GTP (ein verschachteltes Akronym, GPRS (General Packet Radio Service) Tunneling Protocol) ist ein 3GPP-spezifisches Tunneling-Protokoll, das für den Betrieb über UDP entwickelt wurde. Die Konnektivität zwischen dem RAN und dem Corenetwork ist IP-basiert (Packet Switched). Dies wurde als eine der wichtigsten Änderungen zwischen 3G und 4G eingeführt. Vor 4G waren die Interneta des Mobilfunknetzes leitungsbasiert (Circuit Switched).
- Fünftens koordiniert jede Basisstation den UE-Handover mit benachbarten Basisstationen, indem die Basisstationen eine direkte Station-zu-Station-Verbindungen nutzen. Diese Verbindungen werden verwendet, um sowohl Pakete der User Plane (SCTP über IP) als auch der Control Plane (GTP über UDP/IP) zu übertragen.
- Sechstens koordinieren die Basisstationen die drahtlose Mehrpunktübertragung an

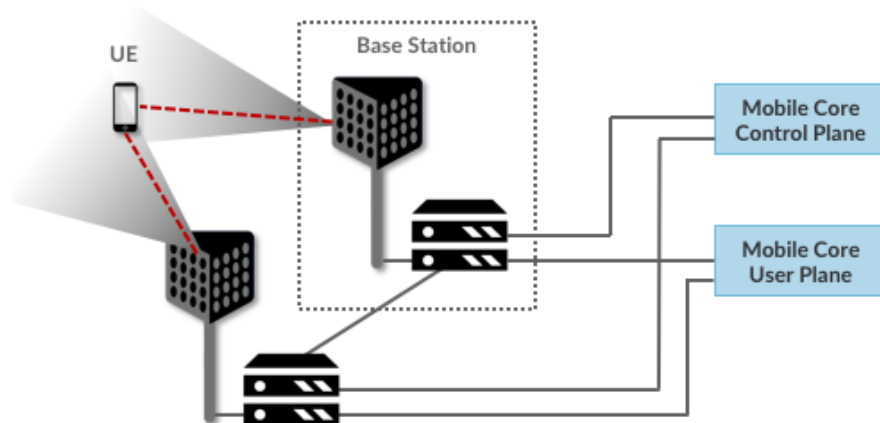


Abbildung 2.8: Basisstationen arbeiten zusammen, um eine Carrier Aggregation zu den UEs zu realisieren. Quelle: [45]

ein Endgerät von mehreren Basisstationen, die Teil eines UE-Handovers von einer Basisstation zu einer anderen sein kann oder für Carrier Aggregation (CA), also der Bündelung von mehreren Funkbändern, um den Datendurchsatz zu erhöhen.

Die wichtigste Erkenntnis ist, dass die Basisstation als spezialisierter Forwarder betrachtet werden kann. In der Richtung Internet zu UE fragmentiert sie ausgehende IP-Pakete in Segmente der physikalischen Schicht und plant sie für die Übertragung über das verfügbare Funkspektrum ein. In der Richtung UE-zu-Internet setzt sie Segmente der physikalischen Schicht zu IP-Paketen zusammen und leitet sie (über einen GTP/UDP/IP-Tunnel) an User Plane Corenetwork Komponenten weiter. Basierend auf der Beobachtung der Qualität des Funkkanals und der Policies für jeden Teilnehmer entscheidet es, ob es (a) ausgehende Pakete direkt an das UE weiterleitet, (b) Pakete indirekt über eine benachbarte Basisstation an das UE weiterleitet oder (c) mehrere Pfade nutzt, um das UE zu erreichen. Im Fall (c) besteht die Möglichkeit, die physischen Nutzdaten entweder auf mehrere Basisstationen oder auf mehrere Trägerfrequenzen einer einzigen Basisstation zu verteilen. Mit anderen Worten, das RAN als Ganzes (d. h. nicht nur eine einzelne Basisstation) unterstützt nicht nur Handover (eine Voraussetzung für Mobilität in Mobilfunknetzen), sondern auch Link-Aggregation und Load-Balancing, also Konzepte, die aus dem Internet bekannt sind (vgl. [45]).

2.2.2 Funkschnittstelle

Die Funkschnittstelle, bei 5G bezeichnet als 5G New Radio (5G NR) und bei 4G bezeichnet als Long Term Evolution (LTE), wird von der 3rd Generation Partnership Project (3GPP) standardisiert und bezeichnet die Technologie, die zur Übertragung von Daten mittels elektromagnetischer Wellen in von Mobilfunksystemen verwendet wird. Diese Schnittstelle dient zum Datenaustausch eines User Equipment (UE) und dem Radio Access Network (RAN). Die 5G Funkschnittstelle baut auf etablierten LTE-Technologien auf und verbessert die spektrale Effizienz, erhöht die Anzahl an Endgeräten pro Zelle, reduziert Latenzzeiten und ist flexibel, um in gewissen Maßen

individuell anpassbar zu sein, um den diversen technischen Anforderungen, welche die verschiedenen 5G Anwendungen mit sich bringen, gewährleisten zu können [20]. Die 5. Mobilfunkgeneration (5G) bewirkt einen großen Wandel in der Mobilfunklandschaft. Sie zielt darauf ab, eine Vielfalt an Anwendungen zu unterstützen, jede mit unterschiedlichen Prioritäten und Leistungsanforderungen. Zum Beispiel erfordern Enhanced Mobile Broadband (eMBB) und Broadcast/Multicast Services (BMS) hohen Durchsatz und spektrale Effizienz, Vehicular to Everything (V2X) benötigt hohe Mobilität und niedrige Latenzzeiten, und Machine-Type Communication (MTC) muss eine lange Batterielebensdauer gewährleisten können (vgl. [7], vgl. [61]). Deshalb wurde die 5G Funkschnittstelle gegenüber der 4. Generation (4G) Long Term Evolution (LTE) dahingehend angepasst, flexibel für die große Vielfalt an Anwendungsfällen zu sein (vgl. [56]). Es gibt viele wichtige Unterschiede zwischen der Funkschnittstelle von LTE und 5G New Radio (5G NR). Der wahrscheinlich wichtigste Unterschied ergibt sich durch die eben genannten verschiedenen möglichen Anwendungsfälle, welche 5G bietet. Anhand dieser Anwendungsfälle wurden die Designkriterien und Leistungsanforderungen an die 5G Funkschnittstelle von der 3GPP angepasst. Im Fall von 4G wurde die Funkschnittstelle darauf ausgelegt, dass der Datenverkehr hauptsächlich von Menschengesteuerten-Endgeräten generiert wird (vgl. [58], z. B. Streaming, Dateiübertragung, Voice over IP (VoIP)). Dabei waren die wichtigsten Leistungsmetriken, ähnlich des Nachfolgers 5G: Hohe Datenraten, Latenzzeiten, spektrale Effizienz. Diese grundsätzliche Ähnlichkeit inspirierte zu einem Lösungsansatz für die Funkschnittstelle, welcher darauf ausgelegt ist, so viele dieser Anforderungen wie möglich zu unterstützen und zu verbessern. Dazu kommt, dass 5G mit viel Datenverkehr zu tun hat, der keinen direkten menschlichen Eingriff erfordert, wie IoT Geräte und vernetzte Fahrzeuge (vgl. [30]). Diese können sehr unterschiedliche Anforderungen an die Funkschnittstelle haben und somit muss sich die Funkschnittstelle gegenüber LTE weiterentwickeln. Darüber hinaus könnte auch der menschenbasierte Datenaustausch gänzlich andere Anforderungen haben als bei LTE. Dies ist z. B. bei VR-Anwendungen der Fall, wo eine extrem niedrige Latenz und ein reduzierter Jitter definitiv wichtiger sind als die Maximierung der Datenraten (vgl. [13]). Durch diese außergewöhnliche Variation der Anforderungen ist es nicht mehr möglich, alle Anwendungsfälle mit einer einzigen Lösung abzudecken. Aus diesem Grund gibt es bei 5G nicht eine einzige Luftschnittstelle, die von allen Mobilfunkbetreibern einheitlich umgesetzt wird, sondern definierte Rahmenbedingungen, die für einzelne Anwendungsfälle angepasst werden können (vgl. [11]).

Frequenzbereiche

NR ist die erste Mobilfunktechnologie, die für den Betrieb in einem beliebigen Frequenzbande zwischen 450 MHz und 52,6 GHz standardisiert wurde. Die unteren Bänder werden für die Flächenabdeckung benötigt, während die höheren Bänder hohe Datenraten und Kapazität bieten. Konkret definiert 3GPP zwei Frequenzbereiche: Der erste (Frequency Range 1) deckt die Frequenzen zwischen 450 MHz und 7,125 GHz ab, während der zweite (Frequency Range 2) die Frequenzen im Bereich von 24,250-52,600 GHz abdeckt. Diese Frequenzbereiche werden üblicherweise als sub-6 GHz (Frequency Range 1) und millimeter-Waves (mmW) (Frequency Range 2) bezeichnet. Laut den Spezifikationen [9] verwenden die ersten 5G-Implementierungen TDD zwischen 2,5 und 5,0 GHz,

Frequency Division Duplex (FDD) kann unter 2,7 GHz eingesetzt und TDD wird ebenfalls für die sogenannten millimeter-Waves bei 24,250-52,600 GHz eingesetzt (vgl. [1]). In Österreich wurden die Frequenzen für 5G NR in den Bereichen 700/1500/2100 (2020) und 3,4-3,8 GHz (2019) versteigert [81]. Das 26 GHz Mobilfunkband ist als NR-Band n258 für 5G in Österreich als millimeter-Wave vorgesehen. Es umfasst den Frequenzbereich 24.250 - 27.500 MHz [83]. Bei LTE werden in Österreich die Frequenzen 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz und 2600 MHz im FDD Modus, ebenfalls im 2600 MHz Bereich wird der TDD Modus bei LTE verwendet [81].

Im Detail sind die Bandspezifikationen und Bandbezeichnungen unter folgenden 3GPP Technical Specifications nachzulesen:

- LTE-Bandbezeichnung nach 3GPP TS 36.101
- NR-Bandbezeichnung nach 3GPP TS 38.101

Eine Übersicht über die in Österreich verwendeten Frequenzbereiche für Mobilfunktechnologien findet man unter: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/bands/FRQ_spectrum.de.html

Orthogonal Frequency Division Multiplexing und Rahmenstruktur

Das Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) hat sich bereits in den letzten Jahren für LTE bewährt. Es wurde jedoch weiter optimiert, um den 5G-Anforderungen gerecht zu werden um beispielsweise eine geringere Latenz im Vergleich zu 4G zu ermöglichen. Bei LTE haben die OFDM-Subcarrier einen Abstand von 15 kHz, und 12 Subcarrier im Frequenzbereich definieren die grundlegende Funkressource, den sogenannten Resource Block (RB). Obwohl auch in 5G ein RB 12 Subcarrier hat, führt 3GPP im NR-Standard die Idee der flexiblen Numerologie ein, die durch eine Reihe von unterstützten Größen von Subcarrierspacing und Cyclic Prefix Length gekennzeichnet ist [3]. 5G unterstützt Subcarrierspacing von 15 (wie in LTE), 30, 60, 120 und 240 kHz, d. h. Resource Blocks von 180, 360, 720, 1440 bzw. 2880 kHz können übertragen werden. Während alle diese Abstände die normale Cyclic Prefix Length unterstützen, unterstützt nur der 30-kHz-Abstand auch die extended Cyclic Prefix Length, sodass es insgesamt sechs verschiedene unterstützte Numerologien gibt. Das 240 kHz-Subcarrierspacing wird nur für die Synchronisation verwendet und unterstützt keine Datenübertragung. Im Zeitbereich versucht die 5G Funkschnittstelle, eine gewisse Abwärtskompatibilität zu LTE zu erhalten. Folglich ist die NR Rahmenstruktur ähnlich wie bei LTE 10 ms lang und setzt sich aus 10 Subframes von je 1 ms zusammen. Zu sehen auf Abbildung 1. Dennoch wird jeder Subframe entsprechend der gewählten Numerologie in eine variable Anzahl von Slots aufgeteilt, die mit dem Subcarrierspacing zunimmt. Dementsprechend ist die Slotlänge bei höheren Subcarrierspacings kleiner. Jeder Slot enthält dann eine feste Anzahl von OFDM-Symbolen: 14 Symbole für die normale Cyclic Prefix Length und 12 für die extended Cyclic Prefix Length. Diese Architektur ermöglicht eine flexible NR Rahmenstruktur, die eine unterschiedliche Anzahl an Slots pro Subframes sowie unterschiedliche OFDM-Symbol- und Slot-Länge erlaubt [2].

Scalable 5G NR slot duration for diverse latency/QoS

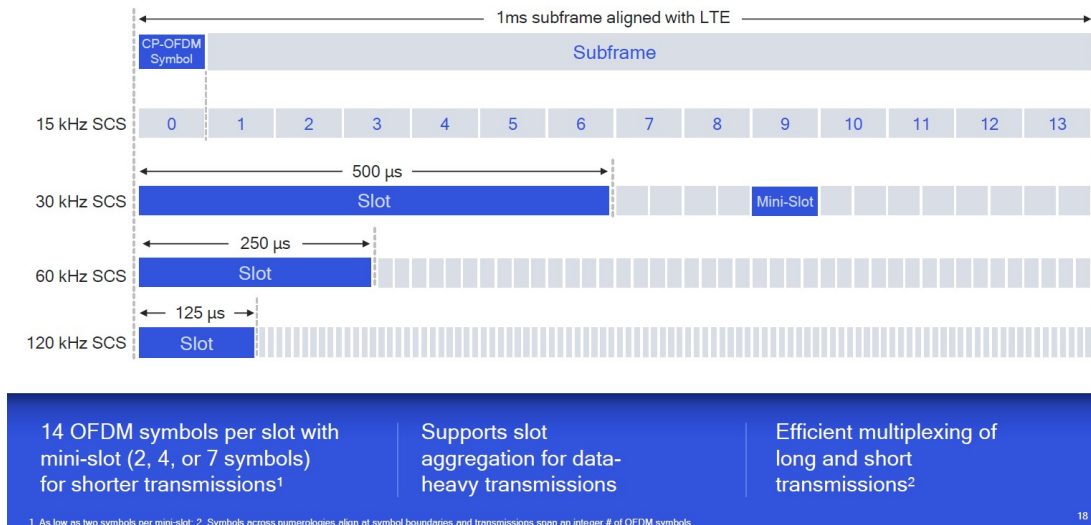


Abbildung 2.9: Funkschnittstelle Rahmenstruktur. Quelle: Qualcomm

Massive MIMO und Beamforming

Massive MIMO ist eine weitere Schlüsseltechnologie für 5G und war von Anfang an Teil der NR-Spezifikationen und -Einführungen. MIMO steht für Multiple Input Multiple Output (engl. Für Mehrfach-Eingabe Mehrfach-Ausgabe) und ist eine Antennentechnologie, die mit der Nutzung von Hunderten von Antennen in einer einzigen Basisstation Datentransferraten von bis zu 10 Gbit/s erreichen kann. Je mehr Antennen an der Basisstation verwendet werden, desto mehr Datenströme können verarbeitet und desto mehr Endgeräte können gleichzeitig bedient werden (vgl. [44]). Im Gegensatz zu den MIMO-Systemen in den aktuellen 4G-Standards basiert Massive MIMO auf aktiven 2D-Antennen-Arrays mit einer großen Anzahl von Antennen an den Basisstationen. Diese zweidimensionale Struktur impliziert, dass das Funksignal sowohl in der vertikalen als auch in der horizontalen Ebene gleichzeitig durch einen Mechanismus namens 3D-Beamforming gesteuert werden kann, was die spektrale Effizienz und die Netzabdeckung erheblich steigern kann. Ein Problem von MIMO sind die Interferenzen zwischen den Signalen der verschiedenen Antennen, die sich mit steigender Antennenanzahl bemerkbar machen. Daher kommen die Vorteile von massive MIMO erst durch das eben genannte Beamforming (engl. für Strahlformung) zum Tragen. Eine einzelne Antenne weist eine flache, unidirektionale Abstrahlkeule auf, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, kann durch zweidimensionale Anordnung der Antennen und die Kombination ihrer Signale eine sehr viel mehr gerichtete Abstrahlung in einer spitzen Abstrahlkeule mit höherer Sendeleistung erreicht werden. Auf diese Weise lassen sich Signale sowohl vertikal als auch horizontal auf ein bestimmtes Endgerät ausrichten. Selbst dann, wenn es sich bewegt, da die Antennenfelder in der Lage sind, das Endgerät mit dem Strahl zu verfolgen. Interferenzen und sonstige Störungen werden deutlich reduziert und die für

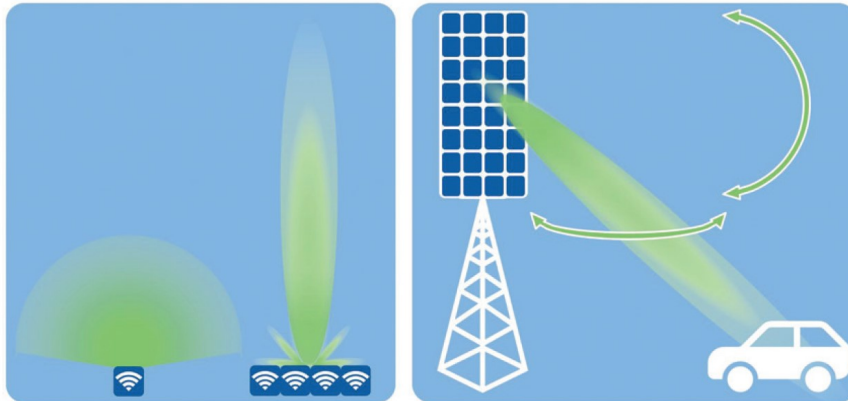


Abbildung 2.10: Verdeutlichung von horizontalem und vertikaalem (3D) Beamforming bei 5G-Antennenfeldern zur gezielten Adressierung einzelner Endgeräte. Quelle: Center Connected Industry

den einzelnen Nutzer verfügbare Datenrate erhöht (vgl. [25]).

2.2.3 Corenetwork, CN (Kernnetzwerk)

Die Hauptfunktion des mobilen Kerns besteht darin, die Konnektivität an externe Paketdatennetze (z.B. das Internet) für die Mobilfunkteilnehmer bereitzustellen und gleichzeitig die Authentifizierung und die Quality of Service sicherzustellen. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Corenetwork ist, dass er die Mobilität aller Teilnehmer verwalten muss, indem er ihren letzten Aufenthaltsort auf der Granularität der bedienenden Basisstation festhält. Die Tatsache, dass das Corenetwork die einzelnen Teilnehmer trackt, erhöht es die Komplexität des Aufbaus des Corenetworks, vor allem wenn man bedenkt, dass diese Teilnehmer mobil sind. Während die Gesamtfunktionalität beim Übergang von 4G zu 5G weitgehend gleich bleibt, ändert sich die Art und Weise, wie diese Funktionalitäten in den einzelnen Komponenten integriert wird. Der 5G Core wird stark von der Entwicklung der Cloud hin zu einer Microservice-basierten (Cloud Native) Architektur beeinflusst. Dieser Wandel hin zu einer Cloud Native-Architektur, welche Möglichkeiten zur Anpassung und Spezialisierung bietet. Anstatt nur Sprach- und Datenkonnektivität zu unterstützen, kann der 5G Core beispielsweise auch mMTC oder uRLLC unterstützen, welche andere Latenzanforderungen und ein anderes Nutzungsverhalten haben als herkömmliche Breitbandanwendungen (vgl. [45]).

4G Core - EPC (Evolved Packet Core)

Der 4G Mobile Core, den 3GPP offiziell als Evolved Packet Core (EPC) bezeichnet, besteht aus fünf Hauptkomponenten, von denen die ersten drei in der Control Plane (CP) und die zweiten beiden in der User Plane (UP) laufen (vgl. [45]).

- MME (Mobility Management Entity): Behandelt die Signalisierung in Bezug auf Mobilität und Sicherheit für die E-UTRAN Verbindung. Die MME ist verantwortlich für das Tracking und das Paging von UEs im Idle-Modus (wenn das

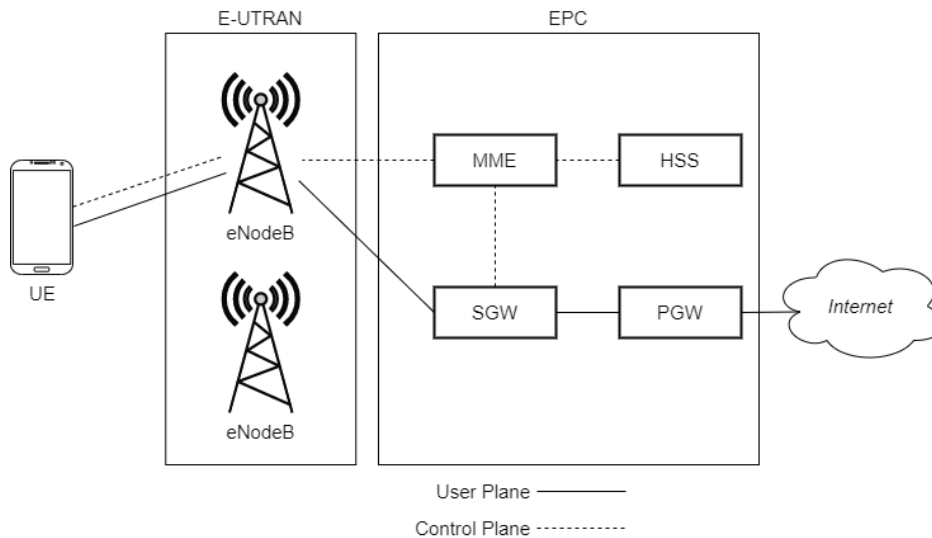


Abbildung 2.11: Netzwerkarchitektur der 4. Generation Mobilfunk. Quelle: Eigene Darstellung

UE nicht aktiv ist) (vgl. [74]). Die MME ist der Endpunkt im Netz für die Verschlüsselung/Integritätssicherung der UE<->EPC Signalisierung und verwaltet die Sicherheitsschlüssel (vgl. [70]).

- **HSS (Home Subscriber Server):** Das HSS ist eine Datenbank, die benutzer- und teilnehmerbezogene Informationen enthält. Sie bietet auch Unterstützungsfunktionen für Mobilitätsmanagement, Anruf- und Sessionaufbau, Benutzerauthentifizierung und Zugangsberechtigung (vgl. [74]).
- **PCRF (Policy & Charging Rules Function):** Verfolgt und verwaltet Richtlinienregeln und zeichnet Abrechnungsdaten zum Teilnehmerverkehr auf (vgl. [45]).
- **SGW (Serving Gateway):** Dieses Gateway dient dem UE indem es die eingehenden und ausgehenden IP-Pakete weiterleitet. Beim SGW endet im Corenetwork der Bearer mit dem ein UE bedient wird und ist somit bei Handovers von einer Basisstation zu einer anderen beteiligt (vgl. [74]).
- **PGW (Packet Data Network Gateway):** Das PGW ist der Verbindungspunkt zwischen dem EPC und den externen IP-Netzen. Diese Netze werden von der 3GPP als PDN (Packet Data Network) bezeichnet. Ein Beispiel für ein PDN ist das Internet. Der PGW leitet Pakete zu und von den PDNs weiter. Der PDN GW führt auch verschiedene Funktionen aus, wie z. B. die Zuweisung von IP-Adressen/ IP-Präfixen oder Policy Control und Charging (vgl. [74]).

Es ist zu beachten, dass das 3GPP Spezifikation hinsichtlich geografischen Deployment der Core-Komponenten flexibel ist. So könnte beispielsweise ein einzelnes MME/PGW-Paar einen Ballungsraum versorgen, wobei die SGWs an 10 über die Stadt verteilten Randstandorten eingesetzt werden, von denen jeder 100 Basisstationen versorgt. Die Spezifikation lässt jedoch auch andere Einsatzkonfigurationen zu (vgl. [74]).

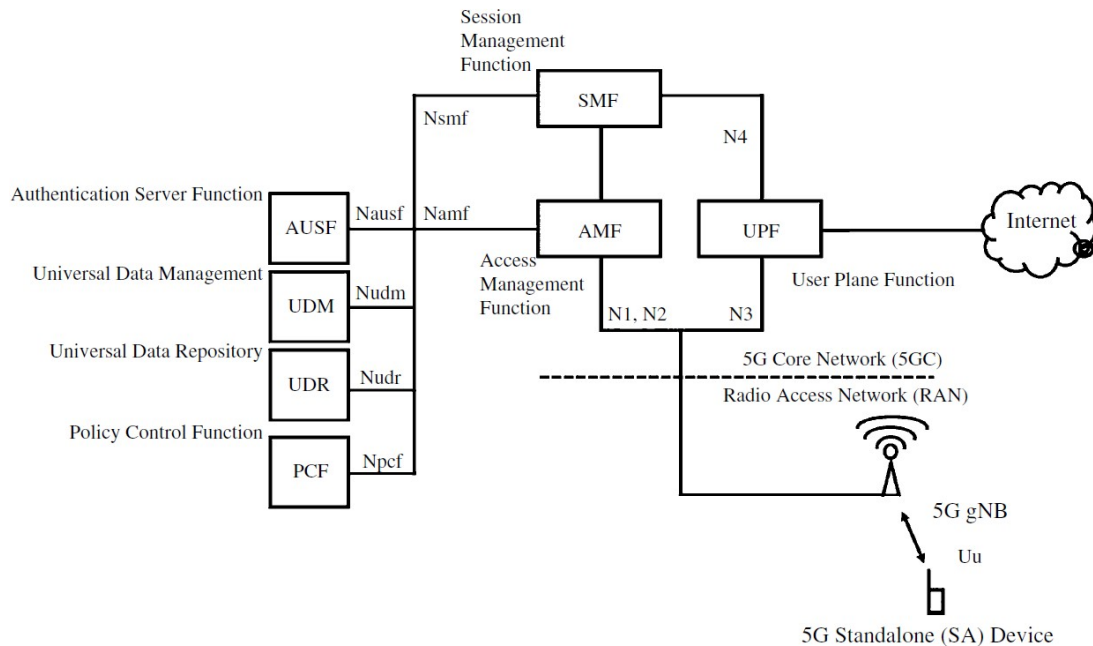


Abbildung 2.12: Netzwerkarchitektur der 5. Generation Mobilfunk. Quelle: [54]

5G Core

Der 5G Core, verwendet eine Microservice-ähnliche Architektur, wobei die Betonung auf Microservice-ähnlich liegt, weil das 3GPP-Spezifikation zwar diesen Grad der Disaggregation vorgibt, aber eigentlich nur eine Reihe von Funktionsblöcken und keine Implementierung vorschreibt. Eine Reihe von Funktionsblöcken unterscheidet sich stark von den technischen Entscheidungen, die bei der Entwicklung eines Microservice-basierten Systems getroffen werden. Dennoch ist es eine geeignete Betrachtungsweise, die in Abbildung 2.12 dargestellte Sammlung von Komponenten als eine Reihe von Microservices zu betrachten (vgl. [45]). Im Folgenden werden die Core Komponenten der Control Plane (CP) aufgelistet (vgl. [45]):

- **AMF (Access and Mobility Management Function):** Verantwortlich für Verbindungs- und Erreichbarkeitsmanagement, Mobilitätsmanagement, Zugangsauthentifizierung und -autorisierung sowie Standortdienste. Verwaltet die mobilitätsbezogenen Aspekte, welche im EPC das MME übernimmt.
- **SMF (Session Management Function):** Verwaltet jede UE-Session, einschließlich IP-Adresszuweisung, Auswahl der zugehörigen User Plane-Funktion, Kontrollaspekte der QoS und Kontrollaspekte des User Plane-Routings. Entspricht in etwa einem Teil der MME des EPC und den kontrollbezogenen Aspekten des PGW des EPC.
- **PCF (Policy Control Function):** Verwaltet die Policies, die dann von anderen Control Plane-Funktionen durchgesetzt werden. Entspricht in etwa der PCRF des EPC.
- **UDM (Unified Data Management):** Verwaltet die Benutzeridentität, einschließlich

der Erstellung von Authentifizierungsnachweisen. Enthält einen Teil der Funktionalität des HSS des EPC.

- AUSF (Authentication Server Function): Im Wesentlichen ein Authentifizierungsserver. Enthält einen Teil der Funktionalität des HSS des EPC.

Die User Plane (UP) besteht bei 5G nur mehr aus einer Core-Komponente (vgl. [45]):

- UPF (User Plane Function): Leitet den Verkehr zwischen dem RAN und dem Internet weiter, entsprechend der SGW und PGW im EPC. Neben der Weiterleitung von Paketen ist das UPF für die Durchsetzung von Policies, Lawful Interception (Telekommunikationsüberwachung), Traffic Usage und die QoS-Überwachung zuständig.

Zu beachten ist, dass die Komponenten der Control Plane mittels APIs (Application Programming Interface) miteinander verbunden sind (vgl. [45]).

2.2.4 Security und Mobility in Mobilfunknetzen

Im Folgenden werden zwei einzigartige Merkmale des Mobilfunknetzes näher betrachtet, die Security- und Mobility-Mechanismen. Dabei werden auch einige Details darüber erläutert, wie sich jedes einzelne Endgerät mit dem Netz verbindet.

Security

Die Sicherheitsarchitektur beruht auf zwei Vertrauensannahmen. Erstens vertraut jede Basisstation darauf, dass sie mit dem Core über ein sicheres privates Netzwerk verbunden ist, über das sie zum einen den GTP/UDP/IP-Tunnel zur User Plane des Core aufbaut und zum anderen den SCTP/IP-Tunnel zur Control Plane des Core aufbaut. Zweitens hat jedes UE eine vom Betreiber bereitgestellte SIM-Karte, die den Teilnehmer eindeutig identifiziert (z. B. mittels IMSI (International Mobile Subscriber Identity)) und die Funkparameter (z. B. Frequenzband) festlegt, die für die Kommunikation mit den Basisstationen des Betreibers erforderlich sind. Die SIM-Karte enthält auch einen geheimen Schlüssel, mit dem sich das UE authentifiziert. (vgl. [45]). Eine Sonderform der SIM ist die eSIM. Durch die Verwendung der embedded SIM (eSIM), welche in einem Chipsatz integriert wird, wird kein physischer SIM-Kartensteckplatz benötigt. Genauer gesagt wird die eSIM vom Hersteller des Endgeräts entwickelt und implementiert. Sie macht die physische SIM-Karte überflüssig und vereinfacht den Wechsel von Anbietern (vgl. [34]). Die eSIM macht das UE potenziell kompakter und benutzerfreundlicher, da der physische SIM-Kartensteckplatz entfällt, was nicht nur für ein 5G UE, sondern auch für IoT-Geräte und Wearables von Bedeutung ist (vgl. [22]). Abbildung 2.13 zeigt die Verbindungssequenz für ein UE. Wenn ein UE zum ersten Mal aktiv wird, kommuniziert es mit einer nahegelegenen Basisstation über eine temporäre (unauthentifizierte) Funkverbindung (Schritt 1). Die Basisstation leitet die Anfrage über den bestehenden Tunnel an die Core Control Plane Komponenten weiter, und es wird vom Core (insbesondere die MME in 4G und die AMF in 5G) ein Authentifizierungsprotokoll mit dem UE (Schritt 2) initiiert. Das 3GPP sieht eine Reihe von Optionen für die Authentifizierung und Verschlüsselung vor, wobei die tatsächlich verwendeten Protokolle von der Implementierung abhängen. Der Advanced Encryption Standard (AES) ist zum Beispiel eine der Optionen für die Verschlüsselung. Zu beachten ist, dass dieser Authentifizie-

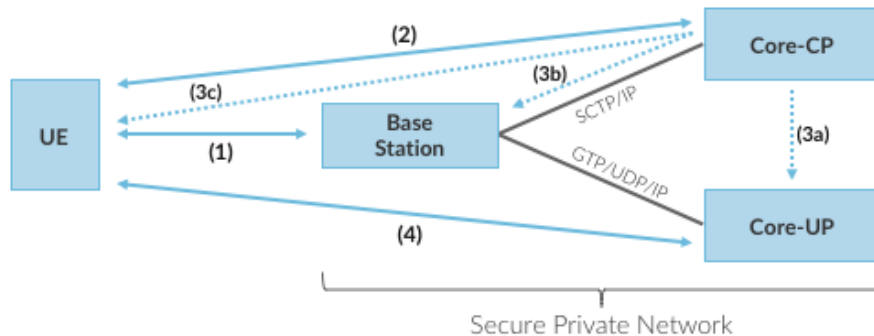


Abbildung 2.13: Abfolge der Schritte zum Aufbau sicherer Control Plane und User Plane Verbindungen. Quelle: [45]

rungsaustausch zunächst im Klartext erfolgt, da die Verbindung zwischen Basisstation und Endgerät noch nicht verschlüsselt ist.

Sobald das UE und die Core Control Plane Komponenten die Authentifizierung abgeschlossen haben, signalisieren die Control Plane Komponenten die benötigten Parameter zum Bedienen des UEs an die Core User Plane Komponenten, um das Endgerät zu bedienen (Schritt 3). Dies beinhaltet: (a) die Anweisung an die Core-CP, die User Plane zu initialisieren (d. h. dem UE eine IP-Adresse zuzuweisen und die entsprechenden QCI-Parameter (Quality of Service Class Identifier) einzustellen); (b) die Anweisung an die Basisstation, einen verschlüsselten Tunnel zum UE aufzubauen; und (c) die Übergabe des symmetrischen Schlüssels an das UE, den es zur Nutzung der verschlüsselten Verbindung mit der Basisstation benötigt. Der symmetrische Schlüssel wird mit dem öffentlichen Schlüssel des UE verschlüsselt (sodass nur das UE die Daten mit seinem geheimen Schlüssel entschlüsseln kann). Sobald die Verschlüsselung abgeschlossen ist, kann das UE den Ende-zu-Ende User Plane Tunnel über die Core User Plane (Schritt 4) nutzen. Diese vier Schritte sind in Abbildung 2.13 veranschaulicht.

Bei diesem Verfahren sind drei weitere Details zu beachten (vgl. [45]):

- Erstens bleibt der sichere Control Plane Tunnel zwischen dem Endgerät und der Core Control Plane, der in Schritt 2 eingerichtet wurde, verfügbar und wird vom Core-CP verwendet, um zusätzliche Kontrollanweisungen an das Endgerät im Verlauf der Session zu senden.
- Zweitens wird der in Schritt 4 eingerichtete Tunnel der User Plane als Default Bearer Service bezeichnet. Es können zusätzliche Tunnel zwischen dem Endgerät und der Core User Plane Komponenten eingerichtet werden, welche auch verschiedene QCI-Werte haben können. Unterschiedliche QCI-Werte werden auf anwendungsspezifischer Basis vergeben, z. B. wird für einen Tunnel für Sprachpakete im 4G (VoLTE (Voice over LTE)) ein QCI-Wert von 1 vergeben und für einen Tunnel fürs Videostreaming ein QCI-Wert von 9 vergeben. Die von der 3GPP standardisierten QCI-Werte und deren Charakteristik sind in folgenden 3GPP TS (Technical Specification) zu finden:

- 4G: 3GPP - 23.203 - Table 6.1.7
- 5G: 3GPP - 23.501 - Table 5.7.4-1

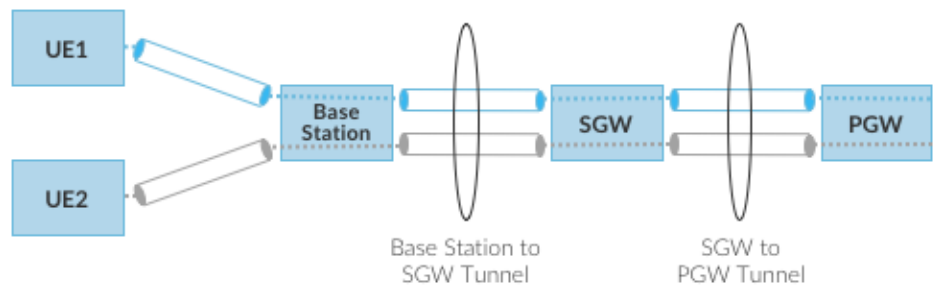


Abbildung 2.14: Abfolge der Tunnel eines User Plane Bearer. Quelle: [45]

- Drittens sind die resultierenden User Plane Tunnel zwar logisch gesehen durchgängig, werden aber tatsächlich als eine Folge von Tunneln implementiert, wie in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Abbildung zeigt den SGW und PGW aus dem 4G Core, um das Beispiel zu verdeutlichen.

Mobility

Die Unterstützung der Mobilität kann als Prozess verstanden werden, bei dem einer oder mehrere der in Abbildung 2.13 dargestellten Schritte erneut ausgeführt werden, wenn sich das UE im gesamten RAN von Basisstation zu Basisstation bewegt. Die in (1) angegebene unauthentifizierte Verbindung ermöglicht es dem UE bei allen Basisstationen in Reichweite in Verbindung und bekannt zu sein. Basierend auf dem gemessenen CQI (Channel Quality Indicator) des Signals kommunizieren die Basisstationen direkt miteinander, um eine Handover-Entscheidung zu treffen. Sobald die Entscheidung getroffen ist, wird sie an den Core übermittelt, der die in (3) angegebenen Einrichtungs-funktionen erneut auslöst, die wiederum den in 2.14 gezeigten Tunnel auf der User Plane zwischen der Basisstation und dem SGW (oder entsprechend zwischen der Basisstation und dem UPF in 5G) neu aufbauen. Eines der einzigartigsten Merkmale des Mobilfunknetzes besteht darin, dass die User Plane Komponente des Cores (z. B. UPF in 5G) die Daten während des Handovers puffert, wodurch Paketverluste und anschließende Ende-zu-Ende-Neuübertragungen vermieden werden. Das Mobilfunknetz hält somit die UE-Session trotz Mobilität aufrecht (entsprechend den Control Plane und User Plane Tunneln, die in 2.13 mit (2) bzw. (4) dargestellt sind). Das UE verliert seine Session, wenn es für eine gewisse Zeit inaktiv ist. Wenn das UE wieder aktiv wird, wird eine neue Session eingerichtet und eine neue IP-Adresse zugewiesen. (vgl. [45]).

2.2.5 5G Deployment Options

Das Hauptaugenmerk bei allen 3GPP-Releases liegt darauf, das System so weit wie möglich rückwärts- und vorwärtskompatibel zu machen, um sicherzustellen, dass die Endgeräteunterstützung gewährleistet ist. Für den Rollout von 5G beginnen viele Betreiber mit einer dualen Konnektivität (EN-DC (E-UTRAN - New Radio - Dual Connectivity)) zwischen LTE- und 5G NR-Netzwerkequipment, unter Verwendung der Non-Standalone-Architektur, die zu Beginn von Release 15 abgeschlossen wurde. Bei der Fertigstellung von Release 15 wurde darauf geachtet, dass das Non-Standalone NR-Netzwerkequipment

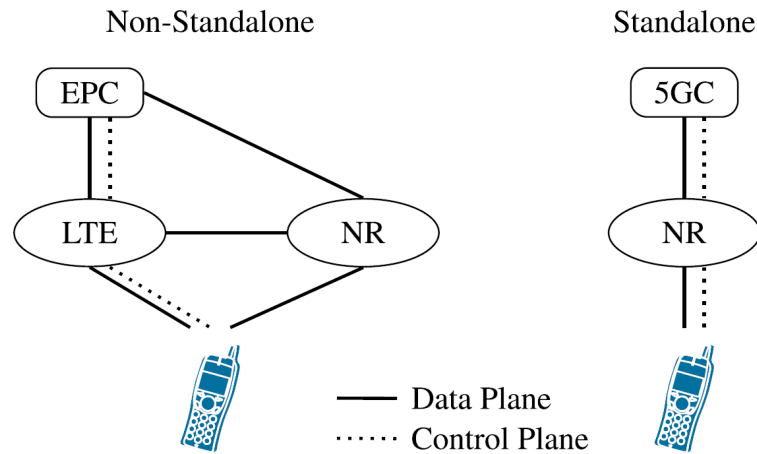


Abbildung 2.15: Abbildung der 5G Non-Standalone (NSA) und 5G Standalone- (SA) Architektur gemäß 3GPP-Spezifikation 21.915. Quelle: [49]

vorwärtskompatibel ist, um sicherzustellen, dass das Netzwerkequipment für den Einsatz in Standalone 5G NR Systemen geeignet ist (vgl. [69]). Die 5G Non-Standalone- und 5G Standalone-Architektur sind abgebildet unter 2.15.

5G Non-Standalone

Non-Standalone 5G-Netz bedeutet, dass 5G-NR-Basisstationen in Verbindung mit LTE-Basisstationen mit EPC als Core verbunden sind [71]. Die 5G Funkschnittstelle und Basisstationen werden mit der User Plane des EPC verbunden, die Control Plane läuft über die 4G Luftschnittstelle und Basisstationen. Diese Option ist besonders beliebt bei Mobilfunkbetreibern, welche günstig und rasch 5G-Funkressourcen unter Nutzung bestehender LTE-Installationen bereitstellen wollen. NSA ermöglicht jedoch keine echten 5G NR-Funktionen, wie Network Slicing, uRLLC ultra-Reliable and Low Latency Communications (uRLLC) und Unterstützung hoher Kapazitäten für das Internet der Dinge (IoT), wie mMTC (massive Machine Type Communications). Die NSA Implementierung wird von vielen Mobilfunkbetreibern auf der ganzen Welt als der erste Schritt zur Einführung von 5G durchgeführt [48].

5G Standalone

5G Standalone Netze sind eigenständige 5G-Netze mit 5G RAN und 5G Core, ohne bestehende 4G Komponenten und Infrastruktur nutzen zu müssen. Das 3GPP hat 2018 den eigenständigen 5G Standard fertiggestellt, der neben dem Non-Standalone 5G NR Standard existiert. 5G Standalone wird die Anwendungsfälle enhanced Mobile Broadband (eMBB), ultra-Reliable and Low Latency Communications (uRLLC) und mMTC (massive Machine Type Communications) unterstützen, um Multi-Gigabit-Datenraten mit verbesserter Effizienz und geringeren Kosten bereitzustellen. Es wird sowohl über die 5G Funkschnittstelle, New Radio (NR), als auch über den 5G Core verfügen. Ein eigenständiges 5G Netz bietet dem Nutzer ein durchgehendes 5G Erlebnis [48].

2.3 Latenz

Unter Latenz versteht man den Zeitraum, den ein Datenpaket vom Endgerät (Handy, Laptop, etc.) zu einem Server im Internet und zum Endgerät zurück benötigt. Gemessen wird die Latenzzeit in Millisekunden (ms). Die Latenz ist ein wesentlicher Indikator bei Online-Spielen, aber auch beim ganz normalen Internet Surfen wirkt sich die Latenzzeit deutlich auf die Trägheit des Zugangs aus. Die Verzögerung wird sowohl durch die Technologie des Internetzugangs als auch durch dessen Auslastung maßgeblich beeinflusst [51]. Die Latenzzeit wird auch als Round Trip Time (RTT) bezeichnet und entspricht der Zeit, die vom Absenden der Anfrage bis zum Erhalt der Antwort vergangen ist [18].

Auf dem Weg eines Datenpakets vom Absender zu nachfolgenden Routern oder einem Empfänger erfährt ein Datenpaket verschiedene Arten von Verzögerungen bei der Netzverbindung. Zu diesen Verzögerungen gehören 1) processing delay, 2) queuing delay, 3) transmission delay und 4) propagation delay. Ein Netzwerkteilnehmer oder ein Router benötigt Zeit, um ein eingehendes Paket zu verarbeiten (processing delay), damit es weitergeleitet werden kann, z. B. durch das Lesen eines Paket-Header und das Durchsuchen der Routing-Tabelle, um den nächsten Hop zu bestimmen. Oft muss das Paket auch in der Warteschlange warten, bis es auf die Verbindung übertragen wird (queuing delay). Transmission delay (auch bekannt als Speicher- und Weiterleitungsverzögerung) ist die Zeit, die entsteht, bis eine Netzwerkkomponente alle Bits des Pakets auf die Leitung überträgt. Propagation delay ist die Zeit, die ein Bit benötigt, um sich über die Leitung von einer Netzwerkkomponente zu einer anderen bewegen kann (z. B. bei einer Glasfaserübertragung in Lichtgeschwindigkeit) (vgl. [29]). Niedrige Latenzzeiten sind ein wichtiger Faktor für die Benutzerfreundlichkeit. Ein Netz mit niedriger Latenz verbessert nicht nur das Erlebnis bei herkömmlichen Diensten wie Videospiele und Videokonferenzen, sondern ermöglicht auch neue Dienste wie Cloud XR (extended Reality), industrielle Steuerung, vernetzte und autonome Vehicle [19].

2.3.1 Datenübertragung über das Internet

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie Daten über das Internet transportiert werden. Zunächst wird eine kurze Beschreibung des TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) gegeben, welches das Rückgrat der gesamten Internetkommunikation ist. Dabei wird auch auf zwei Anbietertypen von Breitbandverbindungen eingegangen, den Internet Service Providern (ISPs) und Mobile Network Operatoren (MNOs). Es wird kurz darauf eingegangen, wie TCP/IP und die Anbieter die Latenzzeit und das gesamte Netz beeinflussen.

TCP/IP

Das Internet verwendet das TCP/IP-Protokoll für die Kommunikation zwischen seinen Komponenten. Das sind die Hosts (Sender und Empfänger) am Netzrand und die Router im Netzkern. An der Internet-Kommunikation sind noch weitere Protokolle (außer TCP und IP) beteiligt, TCP und IP gelten als die wichtigsten Protokolle. Die ursprüngliche Entwicklung von TCP/IP wurde von der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), einer Behörde des US-Verteidigungsministeriums, in den Jahren 1960-70

finanziert (z.B. wurde das ARPANET 1966 gestartet). Heute ist die IETE (Internet Engineering Task Force) zuständig für TCP/IP und verwandte Protokolle, deren Einzelheiten in RFCs (Request for Comments) niedergeschrieben sind. Das Hauptziel von TCP/IP ist die Bereitstellung der Kommunikation zwischen zwei Hosts in verschiedenen Netzen. Zu den Entwurfsprinzipien gehören 1) Paketvermittlung, 2) Autonomie (keine internen Änderungen erforderlich, um Netze miteinander zu verbinden), 3) das End-to-End-Prinzip, 4) Minimalismus, 5) zustandslose Router und 6) dezentrale Steuerung. Das End-to-End-Prinzip besagt, dass Komplexität und Intelligenz an den Netzrändern (Hosts) und nicht im Netzkern angesiedelt sein sollten. TCP/IP definiert die heutige Internet-Architektur und legt fest, wie Daten zu adressieren sind, wie eine Ende-zu-Ende-Verbindung bereitgestellt wird und wie Pakete weitergeleitet werden. Um die Komplexität des Netzsystems in den Griff zu bekommen, hat das TCP/IP-Protokoll eine Schichtstruktur mit abstrahierten Diensten eingeführt. Jede Schicht kapselt einen Service, welcher von anderen Schichten isoliert ist und deren Details verbirgt. Damit wird der Entwurf und die Wartung wesentlich einfacher. Folgende TCP/IP Schichten gibt es (von oben nach unten):

- Anwendungsschicht
- Transportschicht
- Internetschicht
- Netzzugriffsschicht

In der Anwendungsschicht führt ein Benutzer Netzwerkanwendungen und Protokolle der Anwendungsschicht wie FTP (File Transfer Protocol) und HTTP (HyperText Transfer Protocol) aus. Die Transportschicht sorgt für die Ende-zu-Ende-Zustellung von Nachrichten (auch Segmente genannt), mithilfe der Protokolle TCP (Transmission Control Protocol) oder UDP (User Datagram Protocol). Je nachdem, ob es sich um eine zuverlässige (TCP, verbindungsorientiert, automatische Erkennung von Datenverlusten und bidirektionaler Datenaustausch) oder unzuverlässige (UDP, verbindungslos, keine automatische Erkennung von Datenverlusten und direktonaler Datenaustausch) Datenübertragungen handelt. Die Internetschicht ist für die Übertragung von Paketen (auch Datagramme genannt) von einem Knoten zum anderen (entweder Hosts oder Router) zuständig, sodass ein Datagramm von der Quelle zum Ziel durch eine Reihe von Routern geroutet werden kann. Die Netzzugriffsschicht ist für die Übertragung von Datagrammen über die Verbindungen innerhalb eines Netzes zuständig. Wenn ein Paket diesen Protokollstapel beim Sender von oben nach unten durchläuft, fügt jede Schicht zusätzliche Informationen (Header) hinzu. Dieser Header wird entfernt, wenn das Paket beim Empfänger ankommt und den Protokollstapel rückwärts durchläuft (vgl. [29]).

Request for Comments (RFC)

Für die Definition des TCP/IP-Protokoll und die vorliegende Arbeit sind besonders die folgenden Standards, die in RFCs definiert wurden, von Bedeutung:

- RFC 791 – Internet Protocol (IP) [24]: Das Internet Protocol stellt als Netzwerkprotokoll die Grundlage des Internets dar. Es handelt sich um ein verbindungsloses Protokoll, das für die Adressierung von Rechnern in einem Netzwerk sorgt und damit das Routing ermöglicht.

- RFC 792 – Internet Control Message Protocol (ICMP) [23]: Das ICMP dient zum Austausch von Informations- und Fehlermeldungen. Das Protokoll ist ein Bestandteil von IPv4, wird jedoch als eigenständiges Protokoll behandelt.
- RFC 793 – Transmission Control Protocol (TCP) [63]: Neben IP stellt TCP das Herzstück der Internetprotokollfamilie dar. TCP sorgt für eine zuverlässige, verbindungsorientierte und paketvermittelte Datenübertragung zwischen den Rechnern in einem Netzwerk.
- RFC 768 – User Datagram Protocol (UDP) [65]: Das UDP ist ein minimales, verbindungsloses Netzwerkprotokoll, dessen Aufgabe es ist, Daten über das Internet zu übertragen. UDP stellt, anders als TCP, eine nicht-zuverlässige und ungesicherte Datenübertragung bereit, die den Empfang des Datenpaketes nicht garantieren kann.

Latenz bei TCP/IP Datenübertragungen

Die Internetschicht, insbesondere das IP-Protokoll, in der Internet-Protokoll-Suite hat zwei Hauptfunktionen, die zur Verringerung der Netzwerk-Latenzzeit beitragen, nämlich Weiterleitung und Routing. Bei der Weiterleitung leitet ein Router ein an der Eingangsverbindung ankommendes Paket an die entsprechende Ausgangsverbindung zum nächsten Hop (entweder Router oder Host) weiter. Um das Paket weiterzuleiten, muss der Router in einer Weiterleitungstabelle nach dem ausgehenden Ziel (next hop) suchen und dabei die Ziel-IP-Adresse als Keyword verwenden (processing delay). Diese Suche muss schnell durchgeführt werden, idealerweise schneller als die Verbindungsgeschwindigkeit, andernfalls werden ankommende Pakete in eine Warteschlange gestellt oder gedropped, wenn die Warteschlange voll ist (queuing delay). Da eine Verbindungsbandbreite von 10-100 Gbit/s in den Backbone-Netzen nicht unwahrscheinlich ist, sollten die Router in der Lage sein, Pakete mindestens mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit zu verarbeiten und weiterzuleiten. Auch Routing-Algorithmen verringern die Latenzzeit im Netz, da sie die kürzesten Wege von der Quelle zum Ziel berechnen. Beliebte Protokolle sind OSPF (RFC 2328) und RIP (RFC 2453). Bei diesen Protokollen kommuniziert jeder Router mit benachbarten Routern und findet gemeinsam die kürzesten Pfade von sich selbst zu allen anderen Zielen, indem er den Dijkstra-Algorithmus [21] für kürzeste Pfade oder das Distance-Vector-Routing [36] verwendet. TCP läuft nur auf Hosts (Sender oder Empfänger) am Rande des Netzes und trägt zur Verringerung der Latenzzeit bei, da es beginnende Netzüberlastungen vorhersagt, indem TCP die Senderate steuert. TCP erhält Informationen über die Netzbedingungen, indem es die Geschwindigkeit der vom Zielort zurückgesandten Bestätigungen analysiert. Insbesondere gleicht der Sender seine Senderate mit der Bestätigungsrate ab (self-clocking), um seine Senderate mit der Rate des Bottlenecks zu synchronisieren. Darüber hinaus ändert TCP die Datenmenge, die es auf einmal senden kann (sliding window), je nach vermuteter Netzüberlastung - anfangs schneller, dann langsamer, wenn es sich der vollen Kapazität nähert (vgl. [29]).

Internet Service Providers (ISPs) und Mobile Network Operators (MNOs)

Endgeräte (in Netzwerken auch Hosts genannt) sind über Internet Service Providers (ISP) mit dem Internet verbunden. Beispiele für ISPs in Österreich sind A1, Magen-

ta, spusu, Kabelplus und Drei. Es gibt ISPs auf verschiedenen Ebenen - ISPs, die die Backbone-Netzwerke betreiben, ISPs in Unternehmen, ISPs an Universitäten, ISPs in Privathaushalten und ISPs, die WiFi-Hotspots in Flughäfen, Cafés, Hotels und sogar auf der Straße bereitstellen. In vielen Fällen handelt es sich bei diesen ISPs um Telekommunikationsunternehmen. Die Internetanbieter der unteren Ebene ermöglichen Privatkunden den Zugang zum Breitbandnetz über FTTH (Fiber-To-The-Home), DSL, Kabelmodem, WiFi oder sogar den relativ langsamen Zugang über ein Einwahlmodem, den Zugang zu lokalen Hochgeschwindigkeitsnetzen. Diese Diensteanbieter der unteren Ebene sind mit den Diensteanbietern der oberen Ebene verbunden, die in der Regel für den Betrieb des Internet-Kernnetzes verantwortlich sind, in dem Hochgeschwindigkeits-Glasfaserverbindungen (1-10 Gbit/s) über Hochgeschwindigkeits-Router auf nationaler und internationaler Ebene verbunden sind (Backbones). Wie erwähnt, sind die Internet-Diensteanbieter hierarchisch organisiert, da sie den Zugang zum Internet bereitstellen. Ein Tier-1-ISP betreibt Internet-Backbones, ein Tier-2-ISP ist für die regionale oder nationale Abdeckung zuständig und benötigt einen Dienst von einem Tier-1-ISP, ein Tier-3-ISP deckt ein kleineres Gebiet ab und ist ein Kunde eines Tier-2-ISP. Ein solches lokales Netz kann ein Glasfasernetz oder ein lokales drahtgebundenes Telefonnetz sein, um den Zugang zum Internet zu ermöglichen. Zu den drahtgebundenen Zugangstechnologien gehört DSL (Digital Subscriber Line). DSL nutzt Telefonleitungen für den Zugang zu den Netzen der ISPs. Wenn ein Haushalt einen DSL-Anschluss hat, nutzt er das Telefonnetz sowohl für Daten als auch für Sprachsignale. Ein ISP ist mit anderen ISPs über einen Point of Presence (POP) verbunden, d. h. eine Reihe von Routern, mit denen die Router eines anderen ISP eine Verbindung herstellen können. Wenn ein ISP ein größeres Gebiet erschließen will, schließt er im Allgemeinen einen Vertrag mit einem höherrangigen ISP ab, mietet Kommunikationsverbindungen und verbindet seine Router über POPs mit den Routern des höherrangigen ISP. In diesem Vertrag wird der höherrangige ISP zum Anbieter und der unterrangige Diensteanbieter zum Kunden. Wenn zwei ISPs des gleichen Tier-Levels verbunden sind, sind sie zueinander Peers [29]). Die Vielzahl an Routern und Verbindungen, welche die ISPs für einen Zusammenschluss benötigen, sind eine Quelle für Latenz. Bei der Rundfunk und Telekomregulierungsbehörde (RTR) kann man eine Liste aller ISPs in Österreich abrufen. Das Telekommunikationsgesetz 2021 sieht in verschiedenen Bereichen Verpflichtungen von Unternehmen, die im Bereich der elektronischen Kommunikation tätig sind, vor. Unter anderem besteht eine Anzeigeverpflichtung für Bereitsteller bzw. Betreiber von öffentlichen Kommunikationsnetzen bzw. Anbietern von Kommunikationsdiensten bei der RTR [89]. Die Liste aller ISPs in Österreich findet man unter: <https://www.rtr.at/TKP/service/agg-verzeichnis/Uebersichtseite.de.html> Ein Mobile Network Operator (MNO) verwendet die Mobilfunktechnologien 2G/3G/4G/5G und stellt eine Verbindung zwischen Mobilfunknetz und ISPs her, um deren Mobilfunkkunden einen mobilen Breitbandzugang zu ermöglichen. Bei den Komponenten und Schnittstellen (z.B. Backhaul, Funkschnittstelle) des Mobilfunknetzes treten Latenzen auf. Beispiele für MNOs sind in Österreich spusu, A1, Magenta und Drei. Einige der MNOs in Österreich sind auch ISPs. Eine Liste aller MNOs in Österreich findet man unter: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/konsumentenservice/information/informationen_fuer_konsumenten/TKKS_BetreiberMN.de.html

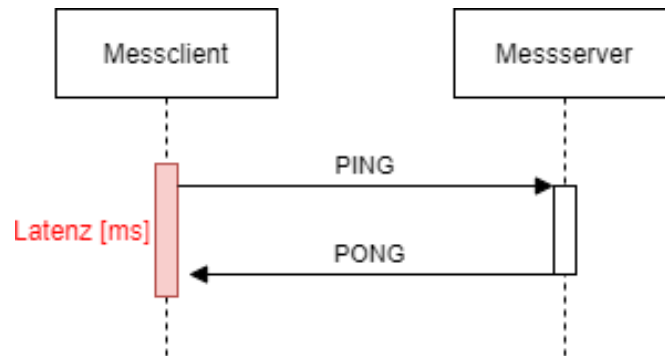


Abbildung 2.16: Messung der Latenz. Quelle: Eigene Darstellung

2.3.2 Messung der Latenz

Das Prinzip der Latenzzeitmessung basiert auf der Zeitdifferenz des Versendens einer Nachricht (Ping) und dem Erhalt einer Nachricht (Pong). Dabei wird beim Versenden ein WebSocket Control Frame auf den definierten Ports 80 und 443 vom Messclient zum Messserver gesendet. Diese Anfrage wird von den auf der Übertragungsstrecke beteiligten Netzknoten weitergeleitet und vom angesprochenen System in umgekehrter Richtung beantwortet. Die Latenzzeit entspricht somit der Zeit, die vom Absenden der Anfrage bis zum Erhalt der Antwort vergangen ist, und wird auch als Round Trip Time (RTT) bezeichnet (vgl. [15]), vgl. [18]). Der Messwert der Latenz ist im Kontext dieses Dokumentes als die Zeit definiert, die vom Absenden des WebSocket PING bis zum Eintreffen des WebSocket PONG vergeht, siehe Abbildung 2.16.

WebSocket PING

PING ist ein definiertes Control Frame nach RFC 6455 um die Gegenstelle auf Verfügbarkeit zu testen (vgl. [15]).

WebSocket PONG

PONG ist ein definierte Control Frame nach RFC 6455, welches nach einem PING Control Frame als Antwort versendet werden muss (vgl. [15]).

Latenzmessung nach Guidelines der Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC)

Bezugnehmend auf die BEREC (Body of European Regulators for Electronic Communications) Net Neutrality Regulatory Assessment Methodology, Dokumentnummer BoR (17) 178 (vgl. [8]), wird es empfohlen, eine Latenzmessung folgend durchzuführen:

- Verwendung von UDP mit ICMP oder TCP als Fallback-Option
- mindestens 10 Messungen
- Durchschnittsberechnung der aufgezeichneten Zeitwerte (normalerweise in Millisekunden).

Der Messserver sollte jede UDP-Paketnutzlast sofort zurückgeben, damit der Client die Verzögerung berechnen kann und könnte dazu das Echo-Protokoll unterstützen, damit der Server mit der identischen Kopie der empfangenen Daten antworten kann (vgl. [8]).

2.3.3 Latenz in Mobilfunknetzen

Mobilfunknetze der 5. Generation streben erhebliche Leistungs- und Zuverlässigkeitsverbesserungen im Vergleich zu Mobilfunknetzen der 4. Generation an. Neben einem hohen Datendurchsatz, Zuverlässigkeit und der Unterstützung einer großen Anzahl von Endgeräten ist eine sehr geringe Latenz ein wichtiger Aspekt von 5G (vgl. [40]).

Anforderungen an die Latenzzeiten

Die Anforderungen an die Latenzzeit von 5G-Netzen liegen bei nur 1 ms. Anwendungsbeispiele, die solch niedrige Latenzen erfordern, sind autonomes Fahren, taktile Internet [35] (z. B. Fernoperationen oder Fernsteuerung von Drohnen) und virtuelle Realität (VR). Beim automatisierten Platooning ([92]), bewegen sich die Fahrzeuge nahe beieinander. Der Gesamtkraftstoffverbrauch kann gesenkt und eine effizientere Straßennutzung erreicht werden, wenn LKWs koordiniert eng beieinander fahren. Um dieses Maß an Kraftstoffeinsparung zu erreichen, müssen die Fahrzeuge etwa 1 Meter voneinander entfernt sein. Für eine derartig eng koordinierte Bewegung von Fahrzeugen müssen innerhalb kurzer Zeit viele Informationen zwischen allen Fahrzeugen ausgetauscht werden. Diese Nachrichten sorgen dafür, dass alle Fahrzeuge über den Status der anderen Fahrzeuge informiert sind und der erforderliche Abstand zwischen den einzelnen Fahrzeugen eingehalten wird. Ein sehr geringer Abstand zwischen den einzelnen Fahrzeugen bedeutet auch, dass ein sehr kurzer Reaktionsweg erforderlich ist. Sollte eines der Fahrzeuge in eine Notsituation geraten, muss das Netz reaktionsschnell genug sein, um sicherzustellen, dass die übrigen Fahrzeuge sofort bremsen und eine Kollision vermeiden. Um die Sicherheit beim Platooning mit einem Abstand von einem Meter zwischen den Fahrzeugen zu gewährleisten, sollte der Reaktionsweg bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h etwa 0,025 Meter betragen. Mit dem derzeitigen 4G-Netz und einer RTT von etwa 50 ms hätte sich das Fahrzeug in dem Moment, in dem die Sensoren des kollisionsgefährdeten Fahrzeugs ein Hindernis erkennen und der Bremsbefehl an die übrigen Fahrzeuge ergeht, bereits 1,4 Meter entfernt. Bei einer angestrebten Latenz von weniger als 10 ms für 5G würden sich die Fahrzeuge jedoch nur etwa 0,025 Meter Reaktionsweg benötigen. Daher ist eine Latenzzeit, die so niedrig ist wie die 5G-Latenzzeitziele, für das automatisierte Fahrzeugplatooning unerlässlich (vgl. [92]).

Ein weiterer Anwendungsfall, der sehr geringe Latenzzeiten erfordert, ist das taktile Internet ([79]). Die Idee hinter dem taktilen Internet ist die Steuerung von Maschinen aus der Ferne in Echtzeit. Mit dem taktilen Internet können Benutzer reale und virtuelle Objekte drahtlos steuern. Eine solche Technologie kann große praktische Vorteile haben. Wenn beispielsweise ein Auto mitten im Nirgendwo eine Panne hat, kann das taktile Internet es einem Mechaniker an einem entfernten Ort ermöglichen, das Auto zu reparieren, indem der Mechaniker die notwendigen Werkzeuge für die Reparatur des Autos steuert. Ein weiteres Beispiel ist die Fernchirurgie. Ein Chirurg kann einen Patienten aus der Ferne operieren, indem er die Werkzeuge für die Operation fernsteuert. Für diese Anwendungsfälle muss das Netz reaktionsschnell genug sein, um ein sehr präzises und

reaktionsschnelles Manövrieren der Werkzeuge zu ermöglichen. Ein solches Netz sollte eine Latenz im Bereich von 1 ms haben (vgl. [79]).

Einem Whitepaper von Ericsson [72] zufolge lassen sich die 5G-Anwendungsfälle in drei Kategorien einteilen: massive machine type communication (MMTC), critical machine type communication (CMTC) und enhanced mobile broadband (eMBB). Die bereits erwähnten Anwendungsfälle von 5G fallen in die Kategorie CMTC (im 3GPP als uRLCC - ultra-Reliable and Low Latency Communication bezeichnet). Für diese Anwendungsfälle ist es sehr wichtig, dass die Paketzustellung innerhalb der vorgegebenen Latenzzeiten erfolgt, da dies sonst zu einer Katastrophe führen kann. Ein weiterer Anwendungsfall, der eine ähnlich niedrige Latenzzeit erfordert, ist Virtual Reality (VR). Die Nichteinhaltung der Latenzvorgaben in VR verursacht jedoch keine Katastrophen, und fällt damit nicht in die Kategorie der CMTC. Ein wichtiger Aspekt bei VR ist die Gewährleistung einer niedrigen Latenzzeit zwischen Motion To Photon (MTP). MTP ist die Verzögerung zwischen der Kopfbewegung des Nutzers und der Aktualisierung des Bildschirminhalts als Reaktion auf die Kopfbewegung. Bei nicht interaktiven Inhalten ist eine Pufferung kein Problem, wie z. B. bei gestreamten 360°-Videos. Bei interaktiven Inhalten, wie z. B. einem Ego-Shooter-Online-Spiel mit VR, kann die Latenzzeit des Netzes jedoch darüber entscheiden, ob man schießt oder vom Gegner erschossen wird. Für solche Anwendungen sollte die Bereitstellung der Inhalte unmittelbar erfolgen, was eine sehr geringe Latenzzeit erfordert (vgl. [27]). Außerdem sollte sich das Sichtfenster des Benutzers auf dem VR-Headset bei solchen Anwendungen sofort als Reaktion auf die Kopfbewegung bewegen. Eine hohe MTP-Latenzzeit kann zu Desorientierung und Schwindelgefühlen beim Benutzer führen. Daher ist es wichtig, eine niedrige Latenzzeit für solche Anwendungen zu gewährleisten, sodass die Anwendung ein umfassendes Erlebnis bietet und gleichzeitig der Komfort für die Benutzer gewahrt bleibt. Der Anwendungsfall VR erfordert eine Latenzzeit von 10 ms (vgl. [31]).

Gründe für Latenz in Mobilfunknetzen

Um die Latenz zu verbessern (d. h. die Zeitverzögerung zu verringern), muss man zunächst die Latenz in Mobilfunknetzen verstehen. Das heißt, zu verstehen, welchen Beitrag die verschiedenen Komponenten zur Gesamtnetzlatenz leisten, was die Hauptgründe für das Auftreten von Latenz in den verschiedenen Komponenten sind und wie die Latenz in den derzeitigen Netzen verbessert werden kann (vgl. [27]).

In den 4G und 5G Mobilfunknetzen kann die Latenz in zwei Hauptteile unterteilt werden:

- User Plane Latenz
- Control Plane Latenz

Die Messung der Control Plane Latenz erfolgt nur durch eine direktionale Messung (One-Way Delay, OWD) der Sendezeit eines Pakets in der IP-Schicht zwischen dem UE und dem RAN. Die Control Plane Latenz ist definiert als die Übergangszeit eines UE, um vom Ruhezustand (idle state) in den aktiven Zustand (aktive state) zu wechseln. Im Ruhezustand ist ein UE nicht mit Radio Resource Control (RRC) der Basestation verbunden. Nachdem die RRC-Verbindung aufgebaut wurde, wechselt das UE vom idle state in den connected state und geht dann in den active state über. Die User Plane steht im Mittelpunkt des Interesses für eine Kommunikation mit geringer Latenz, da

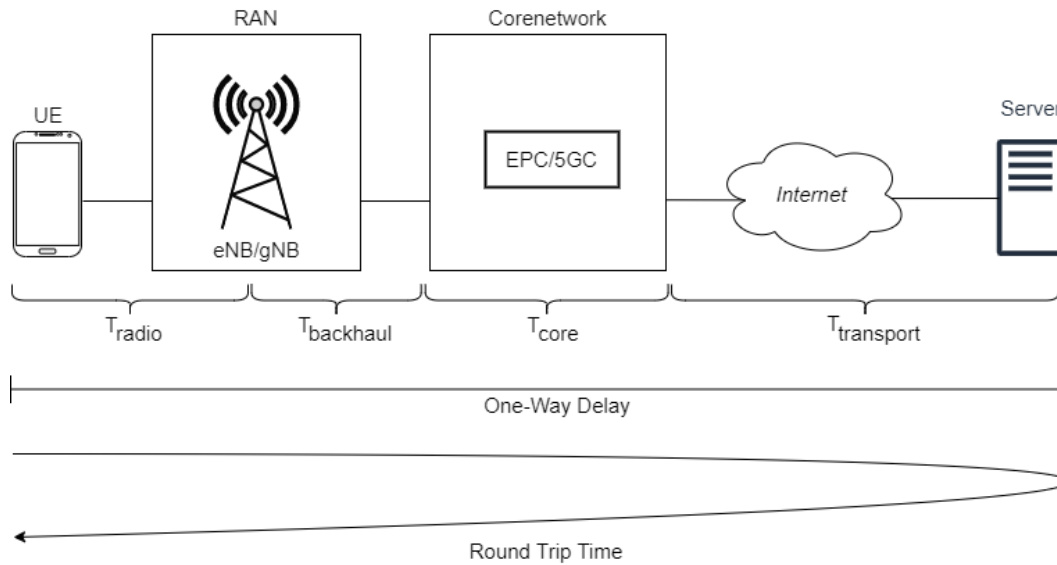


Abbildung 2.17: Darstellung der Latenz im Mobilfunknetz. Quelle: Eigene Darstellung

die Übertragungsverzögerung der Nutzdaten hauptsächlich von der User Plane abhängt (vgl. [42]). Die Verzögerung bei der Übertragung eines Pakets von einem Mobilfunknetzteilnehmer kann durch den Weg des Datenpakets über RAN, Backhaul, Corenetworks, Internet und Server gezeigt werden, siehe Abbildung 2.17.

Nach Analyse der Abbildung 2.17 kann der gesamte One-Way Delay der 4G und 5G Mobilfunknetze geschrieben werden als [48]:

$$\bullet T = T_{radio} + T_{backhaul} + T_{core} + T_{transport}$$

Dabei gilt für die Round Trip Time:

$$\bullet T_{rtt} = T_{radio} + T_{backhaul} + T_{core} + T_{transport} + T_{transport} + T_{core} + T_{backhaul} + T_{radio}$$

Wobei:

- T_{radio} ist die Zeit für die Übertragung eines Pakets zwischen eNB/gNB und UEs und ist hauptsächlich auf die Kommunikation der physikalischen Schicht auf der Funkschnittstelle zurückzuführen. T_{radio} ergibt sich aus der Summe der Übertragungszeit, der Ausbreitungslatenz, der Verarbeitungszeit für die OFDM-Signalerzeugung, der Kodierungs- und Dekodierungszeit und der Zeit für die Retransmissions (aufgrund von Paketverlusten). Die Ausbreitungslatenz hängt von Hindernissen (z. B. Gebäuden, Bäumen, Hügeln usw.) auf dem Ausbreitungsweg und der Gesamtstrecke des Signals ab (vgl. [42]).
- $T_{backhaul}$ ist die Zeit für die Datenübertragung zwischen eNB/gNB und dem EPC/5GC. Im Allgemeinen sind EPC/5GC und eNB/gNB über Kupferleitungen, Richtfunk oder Glasfaser angebunden (vgl. [42]). Aufgrund der enormen Anzahl an Basisstation, Endgeräten und latenzkritischen Dienste, welche von 5G unterstützt werden, ist die Backhaul-Kapazität ein Bottleneck für das Erreichen niedriger Latenzzeiten. Bei 5G erfordert das Backhaul eine hohe Kapazität (> 10 Gbit/s),

geringe Latenz (< 1 ms) und Ausfallsicherheit (vgl. [48]).

- T_{core} ist die vom Corenetwork benötigte Verarbeitungszeit. Die einzelnen Komponenten im Corenetwork benötigen eine gewisse Verarbeitungszeit wie Mobility Management Entity, Serving Gateway und Packet Gateway im 4G, sowie Access and Mobility Management Function und User Plane Function im 5G. Die Verarbeitungsschritte des Corenetworks umfassen Verschlüsselung, Bearer Steuerung, Mobility, Zuweisung von UE-IP-Adressen und Paketfilterung (vgl. [42]).
- $T_{\text{transport}}$ ist die Verzögerung bei der Datenkommunikation zwischen dem Corenetwork und dem Zielsystem im Internet. Im Allgemeinen beeinflusst die Latenz zwischen dem Corenetwork und dem Server, die geografische Entfernung, die Bandbreite und das Kommunikationsprotokoll [42]), entspricht also der Latenz der TCP/IP Datenübertragung, siehe 2.3.1.

2.4 Untersuchungen zur Latenz in 4G und 5G Mobilfunknetzen

2.4.1 RTR Internet Monitor 2. Quartal 2021 (17.12.2021)

Die Rundfunk und Telekomregulierungsbehörde (RTR) veröffentlicht quartalsweise den RTR Internet Monitor. Der Internet Monitor und weitere Publikationen der RTR sind abzurufen unter: <https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/Uebersichtseite.de.html> Die im RTR Internet Monitor präsentierten Daten werden in Form interaktiver Online-Visualisierungen bereitgestellt. Die präsentierten Daten für die Latenz stammen aus dem RTR-Netztest. Die RTR stellt den Nutzerinnen und Nutzern mit dem RTR-Netztest Informationen über die aktuelle Dienstqualität (ua. Upload, Download, Ping, Signalstärke) ihres Internetzugangs zur Verfügung. Darüber hinaus sind eine Kartendarstellung sowie Statistiken der bisherigen Tests abrufbar <https://www.netztest.at/de/>. Der RTR-Netztest ist verfügbar als:

- Browser-Test: <https://www.netztest.at/de/>
- iOS-App: <https://apps.apple.com/at/app/rtr-netztest/id724321403>
- Android-App: <https://play.google.com/store/apps/details?id=at.alladin.rmbt.android>

Der RTR-Netztest ist ein Open Source Projekt, der Quellcode steht auf Github zur Verfügung [86]. Der RTR-Netztest misst Qualitätsparameter des Internetzugangs durch Testübertragungen vom PC oder Smartphone auf den RTR-Server. Daraus werden die individuellen Testergebnisse berechnet. Der RTR-Netztest besteht aus verschiedenen Tests [88]:

- Zu Beginn wird eine Messung mit dem „RTR Multithreaded Broadband Test“ (RMB-Test) durchgeführt, der Download, Upload, Ping und in der mobilen Version für Android die Signalstärke (abhängig vom Endgerät) misst.
- In den Apps werden überdies Merkmale der Dienstqualität (Quality of Service, QoS) (durchgeführte QoS-Tests siehe https://www.rtr.at/TKP/service/rtr-netztest/help/test_result/netztestfaq_qos.de.html) geprüft.

Eine ausführliche Dokumentation der Testmethodik steht hier zur Verfügung: <https://www.netztest.at/doc/>. In der Dokumentation wird auch die Durchführungsmethodik der Latenzmessung festgehalten. Basierend auf dem Open-Data-Prinzip werden die Daten

Ping in Millisekunden

(W)LAN 3G 4G 5G

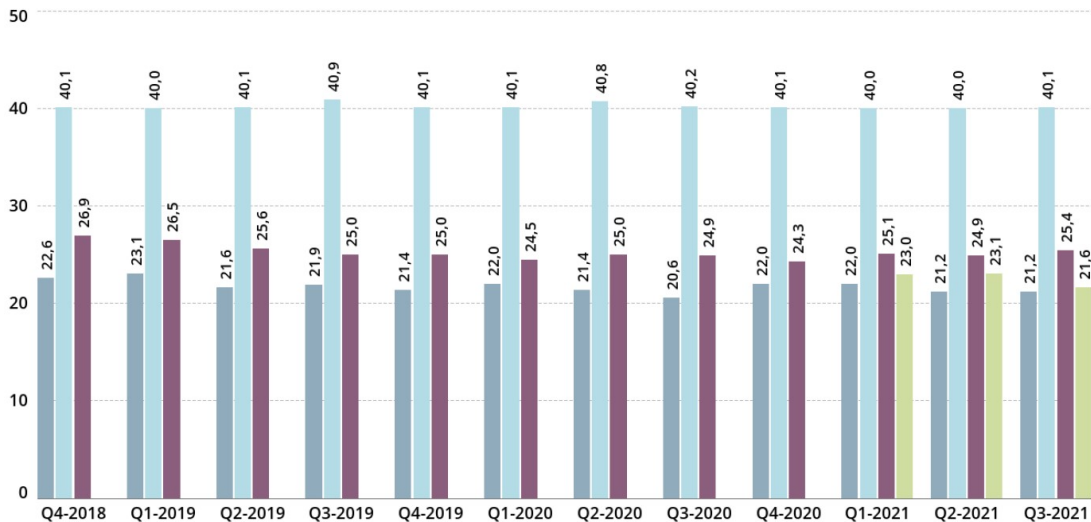


Abbildung 2.18: Latenzzeiten im Quartalsvergleich. Quelle: [50]

des RTR-Netztests als Datei auf der RTR-Netztest-Website unter <https://www.netztest.at/de/OpenData> veröffentlicht und so unter Verwendung der Creative Commons Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0) Lizenz der Allgemeinheit zur Information, Nutzung, Weiterverbreitung und Weiterverwendung frei zugänglich gemacht [87]. Der RTR Internet Monitor 2. Quartal 2021, veröffentlicht am 17.12.2021, berücksichtigt bereits Messungen aus dem 3. Quartal 2021. Abbildung 2.18 zeigt, dass im 3. Quartal 2021 mit 5G eine deutlich geringere Latenzzeit (21,6 Millisekunden im Median) als mit 3G (40,1 Millisekunden im Median) und 4G (25,4 Millisekunden im Median) gemessen wurde. Ping bezeichnet dabei die Latenz als Round Trip Time. Die Ping Messungen mittels der 5G-Technologie werden ab dem 1. Quartal 2021 dargestellt und erfolgten mittels RTR-Netztest. Im Vergleich bedeutet dies für die Messungen im 3. Quartal 2021:

- Mit 5G wurde eine um 46,13 % geringere Latenzzeit als mit 3G gemessen.
- Mit 5G wurde eine um 14,96 % geringere Latenzzeit als mit 4G gemessen.

Die Veränderung der Median 5G Latenzzeit vom 3. Quartal 2021 zum 2. Quartal 2021 beträgt -1,5 Millisekunden und ist damit um 6,49351 % gesunken, siehe 2.19. Des Weiteren sieht die RTR einen klaren Trend in Richtung 5G, denn die Zahlen des RTR-Netztest zeigen, dass im 3. Quartal 2021 die Anzahl der Messungen mit 3G um 37,6 % und mit 4G um 32,6 % zurückgegangen sind. Rasch zugenommen haben hingegen Messungen über die 5G-Technologie (plus 16,2 % gegenüber dem Vorquartal). Dies lässt klar darauf schließen, dass 5G von immer mehr Endkundinnen und Endkunden nachgefragt und verwendet wird (vgl. [52]).

Veränderung von Quartal zu Quartal in Millisekunden

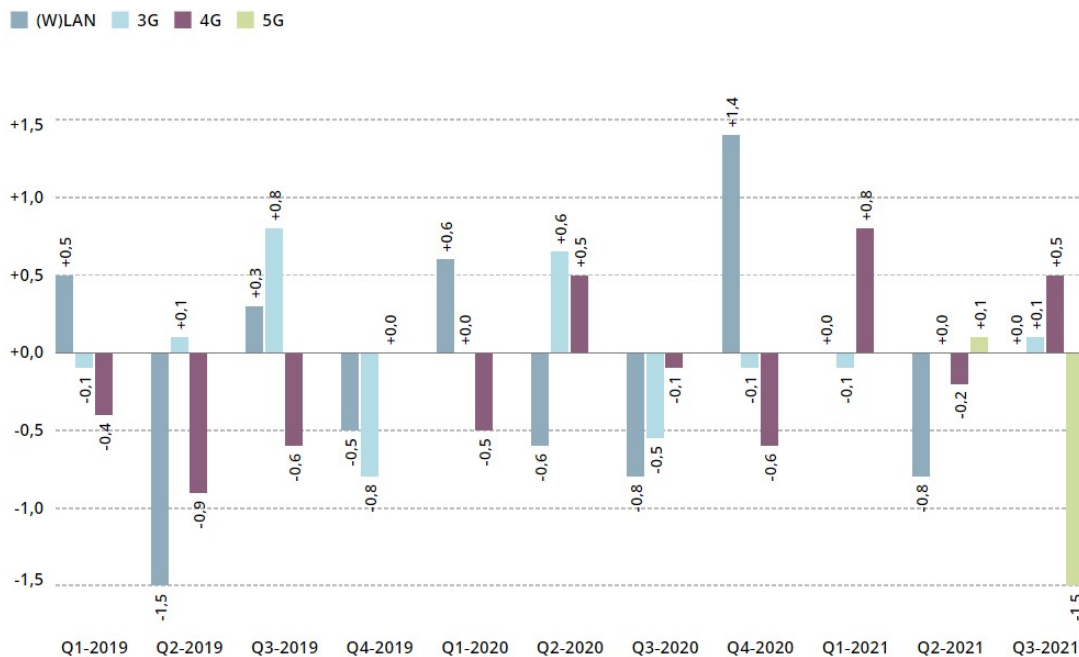


Abbildung 2.19: Latenzzeiten im Quartalsvergleich. Quelle: [50]

2.4.2 Bundesnetzagentur Jahresbericht 2019/2020

Am 22. April 2021 wurde der fünfte Jahresbericht der Breitbandmessung der Bundesnetzagentur Deutschland veröffentlicht. Die veröffentlichten Jahresberichte findet man unter <https://breitbandmessung.de/archiv-jahresberichte>. Der Jahresbericht 2019/220 umfasst den Zeitraum 1. Oktober 2019 bis zum 30. September 2020. Insgesamt wurden für stationäre Breitbandanschlüsse 949.414 und für mobile Breitbandanschlüsse 448.058 valide Messungen berücksichtigt [16]. Die Messungen wurden mittels Breitbandmessung von Endkunden durchgeführt. Die Durchführung der Breitbandmessung ist folgend verfügbar:

- Desktop-App: <https://breitbandmessung.de/desktop-app>
- Browsermessung: <https://breitbandmessung.de/test>
- iOS-App: <https://apps.apple.com/de/app/breitbandmessung/id1037354483?l=de>
- Android-App: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.zafaco.breitbandmessung>

Eine ausführliche Beschreibung des Messkonzepts, der Eigenschaften einer aus Endkundenmessungen resultierenden Stichprobe, der Darstellungsweise der Messergebnisse sowie der Validierungsschritte, der die konkrete Stichprobe unterzogen wurde, kann man unter https://download.breitbandmessung.de/bbm/Breitbandmessung_Jahresbericht_Material_Methoden_Datengrundlage_2019_2020.pdf herunterladen.

Die Latenz wird von der Bundesnetzagentur als Laufzeit bezeichnet und gibt die Zeit in Millisekunden an, die ein Datenpaket benötigt, um von einem Sender zu einem Empfänger und zurück zu gelangen [16]. Das Prinzip der Laufzeitmessung basierte auf

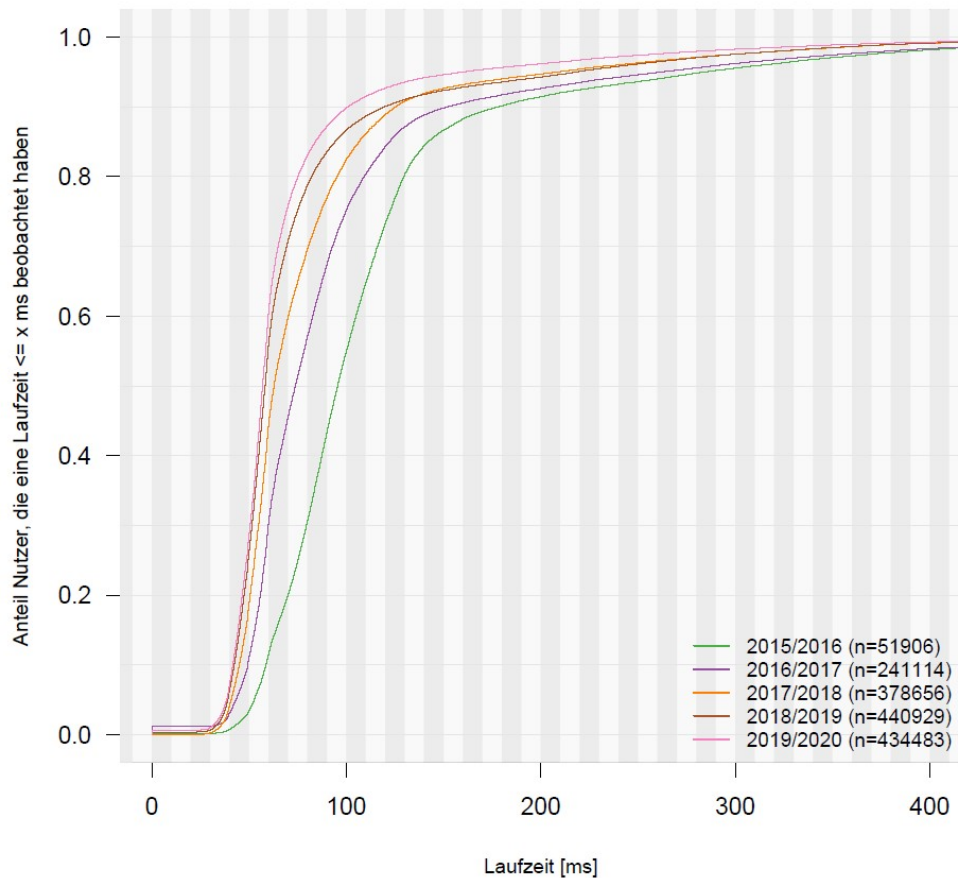


Abbildung 2.20: Empirische Verteilungsfunktion der Laufzeit im Mobilfunk Jahresvergleich von der deutschen Bundesnetzagentur. Quelle: [16]

dem Versenden von WebSocket Control Frames auf dem definierten Port 80 vom Messserver. Diese Anfrage wird von den auf der Übertragungstrecke beteiligten Netzknoten weitergeleitet und vom angesprochenen System in umgekehrter Richtung beantwortet. Die Laufzeit entspricht der Zeit, die vom Absenden der Anfrage bis zum Erhalt der Antwort vergangen ist (Round Trip Time, RTT). Eine Laufzeitmessung bestand aus 10 hintereinander im Abstand von jeweils einer Sekunde ausgeführten WebSocket Requests vom Messserver zu einem Messclient. Mit dem Laufzeit-Mittelwert wurde die mittlere Antwortzeit aller einzelnen Laufzeiten einer Laufzeitmessung in Millisekunden dargestellt [17]. Eine kürzere Laufzeit ist aus Sicht des Endkunden immer verbunden mit einem besseren Nutzungserlebnis. Geringe Laufzeiten sind insbesondere im Bereich der Videokonferenzen, Collaboration Tools und für Online-Spiele von entscheidender Bedeutung [16].

Im Jahresbericht 2019/2020 von der Bundesnetzagentur ist zu lesen, dass generell bei mobilen Breitbandanschlüssen deutlich höhere Laufzeiten als bei stationären Breitbandanschlüssen ermittelt wurden. Der positive Trend aus den Vorjahren zu weiter abnehmenden Laufzeiten hat sich aber fortgesetzt. Eine Laufzeit von 40 ms oder weniger wurde im aktuellen Berichtszeitraum von 7,2 % der Nutzer bei mobilen Breitband-

anschlüssen erreicht (6,4 % 2018/2019). Laufzeiten von 100 ms oder weniger wurden von 89,9 % der Nutzer gemessen - gegenüber 86,7 % in 2018/2019. Mit Blick auf die Laufzeit konnten sich die Anbieter zum fünften Mal in Folge verbessern. Es fällt auf, dass die Zahl der mobilen Messungen in den drei von der Corona-Pandemie betroffenen Quartalen 2020 im Vergleich zu den Vorjahrsquartalen stark zurückgegangen ist. Eine Pandemie-bedingte Veränderung der beobachteten Datenübertragungsraten im Download, im Upload und für die Laufzeit konnte in der Quartalsdarstellung nicht beobachtet werden [16]. Bei den Messdaten liegt zwar keine Unterscheidung der Mobilfunktechnologien vor, allerdings ist ein Trend Richtung geringerer Latenzzeiten in Mobilfunknetzen erkennbar, wie die empirische Verteilungsfunktion der Laufzeit im Mobilfunk Jahresvergleich der deutschen Bundesnetzagentur in Abbildung 2.20.

2.4.3 Latenzvergleich von 4G und 5G Non-Standalone (NSA)

Das Whitepaper von Xu et al. (vgl. [68]) handelt von einer Feldforschung zu einem der ersten kommerziellen 5G-Netze der Welt. Die Messungen werden auf dem Sub-6-GHz-Spektrum in einer dicht besiedelten Stadt in China durchgeführt, welche eine der ersten Regionen mit 5G-Abdeckung weltweit ist (Rollout im April 2019). Die meisten der Experimente konzentrieren sich auf einen $0,5 \text{ km} \times 0,92 \text{ km}$ großen Campus, umgeben von hohen Gebäuden und Bäumen auf dem sich sechs 5G-Basisstationen (gNBs) befinden. Der 5G-Einsatz erfolgt Non-Standalone (NSA), bei der eine 5G-gNB gemeinsam mit einer bestehenden 4G-Basisstation (eNB) kommunizieren muss. Im Rahmen von NSA verbindet sich das 5G-UE nur in der User Plane auf die 5G gNB und verbindet sich für die Control Plane auf die 4G eNB. Sowohl 5G gNBs als auch 4G eNBs nutzen den 4G Evolved Packet Core (EPC) (vgl. [32]).

Xu et al. (vgl. [68]) messen die RTTs von 80 zufälligen Pfaden, durch das 5G Non-Standalone Netz. Konkret werden dabei vier 5G gNBs (mit den verbundenen 4G eNBs) ausgewählt, welche räumlich über die Stadt verteilt sind, sowie 20 Internetserver im ganzen Land. Die Standorte (Breitengrad, Längengrad) dieser Server findet man in Anhang C des Whitepapers [68]. Für jedes Paar an gNB/eNB und einem Server wird Traceroute auf dem 5G-Smartphone ausgeführt, um die RTT zu messen. Um sicherzustellen, dass die Traceroute-Probing-Pakete im Router nicht fragmentiert werden, wird die Nutzlast auf einen Mindestwert von 1 Byte gesetzt. um zu verhindern, dass die Pakete von einigen Routern herausgefiltert werden, wird UDP-Probing anstelle des Standard-ICMP verwendet. Diese Messung wird für jeden Pfad 30 mal wiederholt. Das Streudiagramm in Abbildung 2.23 zeigt die 4G und 5G Round Trip Time für jede Messung.

Dabei wurden zwei Beobachtungen gemacht [68]:

- (i) 5G-Netzwerkpfade erreichen eine Round Trip Time von durchschnittlich 42,6 ms. Das 3GPP schreibt vor, dass für interaktive Echtzeitanwendungen wie VR die End-to-End-Latenz auf 10 ms begrenzt werden sollte. Die End-to-End-Latenz ist die Zeit die für das durchlaufen des Systems in eine Richtung (One-Way Delay) benötigt wird, in diesem Fall 21,8 ms. Es ist zu erkennen, dass die derzeitige End-to-End-Latenz von 5G NSA für Echtzeitanwendungen nicht ausreicht.
- (ii) Dennoch reduzieren die getesteten 5G-Pfade die RTT im Durchschnitt um 22,3 ms (31,86 %) im Vergleich zu 4G.

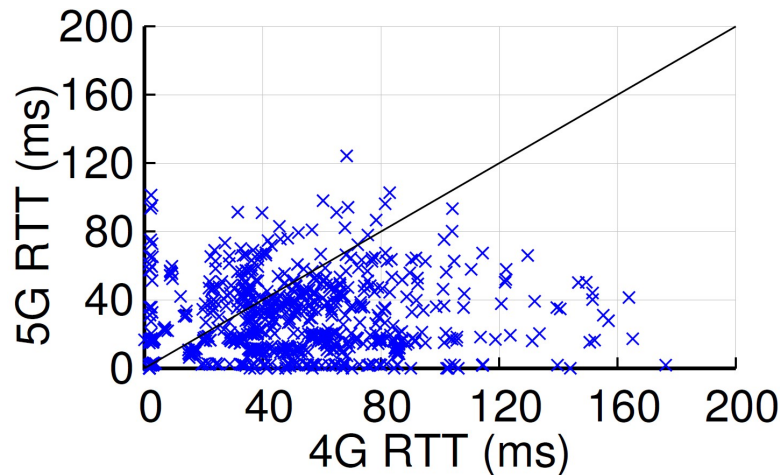


Abbildung 2.21: Latenzdaten von 4G und 5G Non-Standalone Messungen Quelle: [68]

2.4.4 Latenzvergleich von 5G Non-Standalone (NSA) und 5G Standalone (SA)

Rischke et al. [49] haben 5G Non-Standalone und 5G Standalone Latenzen in einem 5G Campus Netzwerk im Frequenzbereich 3.7 Ghz bis 3.8 Ghz untersucht. Dabei wurde der in Abbildung 2.22 ersichtliche Messaufbau verwendet.

Abbildung 2.23 zeigt den One-Way Delay (OWD) für verschiedene Paketraten für 128-Byte-Pakete mittels Empirical Cumulative Distribution Function (Ein ECDF-Diagramm stellt den Anteil der gesamten Stichproben dar, die einen Wert aufweisen, der kleiner oder gleich einem auf der horizontalen Achse dargestellten Wert ist. Im ECDF-Diagrammen wird das Ergebnisse des OWD für die Pakete auf der horizontalen Achse dargestellt und der Anteil der Gesamtzahl der Pakete, die eine Ende-zu-Ende-Latenz haben, die kleiner oder gleich einem bestimmten Wert auf der horizontalen Achse ist, auf der vertikalen Achse. In den ECDF-Diagrammen zeigt eine Kurve nach links an, dass die Paketlatenz über alle Perzentilstufen hinweg geringer ist. Daher würde eine solche Kurve in der Analyse als bessere Kurve in Bezug auf die Verteilung der Paketlatenz angesehen werden (vgl. [27])). Zum Unterschied zu Round-Trip Time (RTT) basierenden Messungen (z. B. mittels Ping) wird bei der OWD nur die Zeit in eine Richtung, also vom Sender zum Empfänger, gemessen und nicht wieder zurück. Aus Abbildung 2.23 geht hervor, dass die OWD für eine bestimmte Technologie (SA oder NSA) bei den verschiedenen Paketraten nach einem scheinbar kontra-intuitiven Muster variiert: Ausgehend von einer Paketrate von 10 Paketen pro Sekunde steigt der OWD tendenziell leicht an, wenn die Paketrate auf 100 Pakete pro Sekunde erhöht wird, und macht dann einen deutlichen Sprung, wenn die Paketrate auf 1000 und 10000 Pakete pro Sekunde erhöht wird, während eine Erhöhung der Paketrate auf 100000 Pakete pro Sekunde den OWD erheblich reduziert, sogar leicht unter das OWD-Niveau für 10 Pakete pro Sekunde für SA. Dieses scheinbar kontra-intuitive OWD-Verhalten scheint auf Stapelverarbeitungsmechanismen im RAN-Scheduling und der Core-Paketverarbeitung zurückzuführen zu sein. Es scheint, dass niedrige Paketraten (10-100 Pakete/s) relativ schnell verarbeitet werden, während mäßig hohe Paketraten (1000-10000 Pakete/s) die Erstellung größerer Paketstapel auszulösen scheinen, die die Verzögerungen der einzelnen Pakete erhöhen.

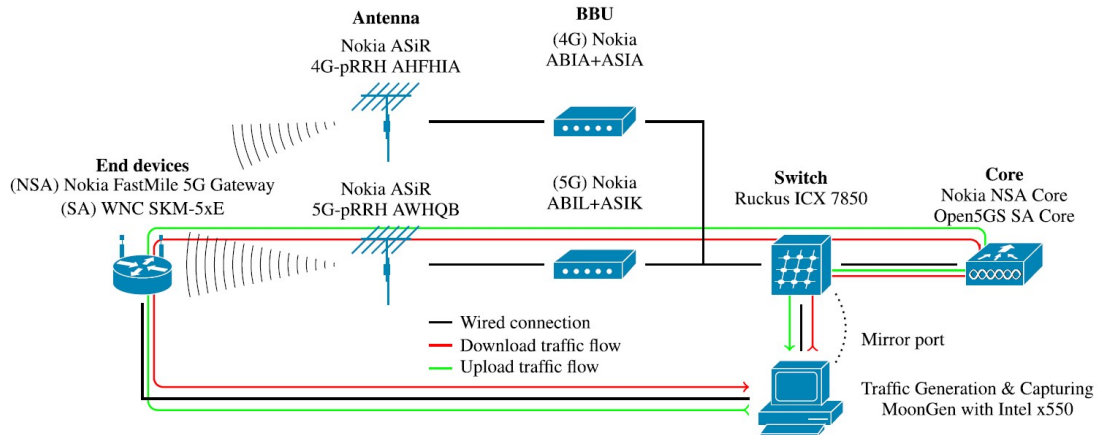


Abbildung 2.22: Die Abbildung zeigt das 4G-LTE-Funkzugangsnetz (RAN) bestehend aus der 4G-Antenne und der 4G-BBU, die für das 5G-NSA-Netz verwendet werden. Das 5G NR RAN besteht aus der 5G-Antenne und der 5G BBU, die für das 5G SA-Netz genutzt werden. Der Nokia NSA-Core implementiert die 4G EPC-Funktionalität, während der Open5GS SA-Core die 5GC-Funktionalität implementiert. Der Download-Verkehrfluss geht vom Traffic Generator aus und durchläuft das 5G-Netz in Richtung Core zum Endgerät, wobei der vom Endgerät empfangene Paketverkehr vom Traffic Generation und Capturing Node erfasst wird. Im Gegensatz dazu durchläuft der Upload-Verkehr das 5G-Netz in Richtung Endgerät zum Core. Quelle: [49]

Andererseits scheinen bei extrem hohen Paketraten (in der Größenordnung von 100000 Paketen/s) die für die Verarbeitung gebildeten Stapel sehr schnell zu sein, sodass die einzelnen Pakete nicht übermäßig verzögert werden. Aus Abbildung 2.23 geht auch hervor, dass SA im Allgemeinen eine um etwa 2-8 ms kürzere OWD als NSA erreicht. Dies deutet darauf hin, dass SA im Allgemeinen besser geeignet zu sein scheint, eine OWD unter 10 ms zu erreichen. In weiteren Auswertungen von Rischke et al. [49], geht hervor, dass die OWD für feste Paketraten in Abhängigkeit von der Paketgröße zwischen 128 Byte und 1280 Byte keinen wesentlichen Einfluss auf die OWD hat. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Soós et al. [59] überein und ist plausibel, da die Paketgröße hauptsächlich die Übertragungsverzögerung (Paketgröße geteilt durch die Übertragungsbitrate) beeinflusst, die bei den hohen 5G Datenraten vernachlässigbar ist (vgl. [49]).

2.4.5 Mobile Gaming und der Einsatz von Network Slicing und Multi-access Edge Computing (MEC) in einem 5G Standalone Netz

Network Slicing und Multi-access Edge Computing (MEC) sind viel diskutierte Technologien, die bereits mit 4G umsetzbar waren, und nun bei der Standardisierung der 5G Standalone-Technologie eine wichtige Rolle einnehmen. Der Einsatz beider Technologien eignet sich zur Verringerung der Latenz in Mobilfunknetzen. Folglich werden diese beiden Technologien erklärt, sowie ein Case Study im Bereich Mobile Gaming vorgestellt.

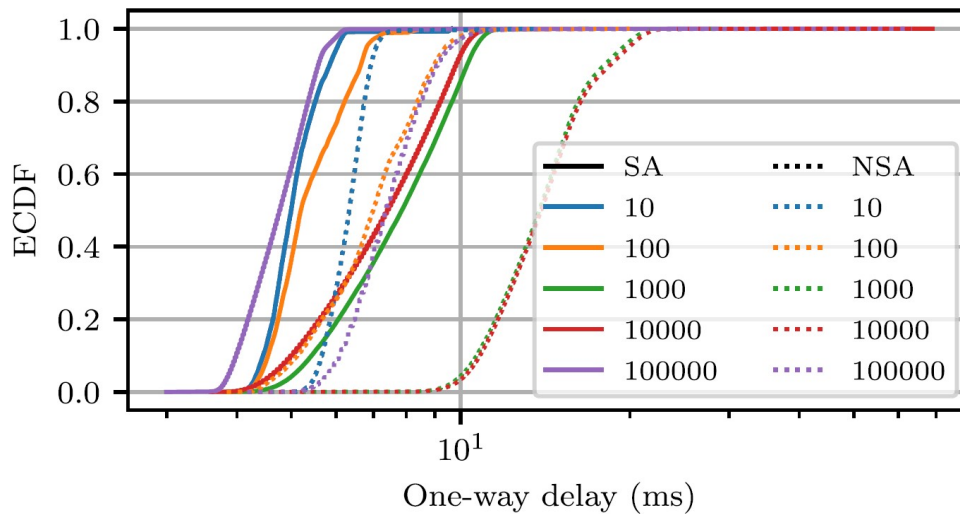


Abbildung 2.23: Empirical Cumulative Distribution Function (ECDF) des Ende-zu-Ende Download One-Way Delay (OWD) für verschiedene Paketraten in Paketen/s; feste Paketgröße von 128 Bytes. Quelle: [49]

Network Slicing

Das Konzept des Network Slicing hatte einen großen Einfluss auf die Gestaltung des 5G Core. Network Slicing wurde entwickelt, um die Verbindung einer bestimmten RAN-Konfiguration mit einer einzelnen Corenetwork Slice zu ermöglichen. Wenn sich ein Gerät an das 5G-Funknetz anschließt, muss der gNB entscheiden, an welchen Corenetwork-„Slice“ Signalisierungsnachrichten gesendet werden sollen. Dies ist vergleichbar im 4G, wenn NB-IoT parallel zu LTE in der Funkschnittstelle verwendet wird. Je nachdem, ob das UE auf den LTE- oder den NB-IoT-Slice zugreift, verbindet der eNB das Gerät entweder mit dem Corenetwork (MME/S-GW) für LTE oder mit einem anderen Corenetwork für NB-IoT. Beim 5G Network Slicing ist das Konzept der Nutzung verschiedener Cores wesentlich flexibler geworden. Die Entscheidung, mit welchem Core eine Verbindung hergestellt werden soll, basiert nicht mehr nur auf der von einem UE verwendeten Funkschnittstelle. Stattdessen kann ein UE dem gNB mitteilen, mit welchem Slice es einen Bearer verbinden möchte. Anstatt sich wie bei LTE jeweils nur mit einem einzigen Slice zu verbinden, kann ein UE auch eine Verbindung zu bis zu 8 verschiedenen Slices gleichzeitig haben (vgl. [54]).

Das 3GPP hat drei Nutzungsszenarien für Dienstarten standardisiert. Diese Szenarien sind eng mit einer Vielzahl von Funktionen und Anwendungen verknüpft, und können je in einem Slice abgebildet werden [14]:

- 1. Slice, geeignet für die Verarbeitung von mit 5G verbessertem mobilem Breitband. Die steigende Nachfrage nach mobiler Bandbreite wird die Qualitätsverbesserung des mobilen Netzes weiter fördern. Das verbesserte Szenario der mobilen Breitbandnutzung wird mit neuen Anwendungsbereichen und Anforderungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Benutzerfreundlichkeit einhergehen. Dieses Nutzungsszenario umfasst eine Reihe von Fällen, vor allem Flächendeckung

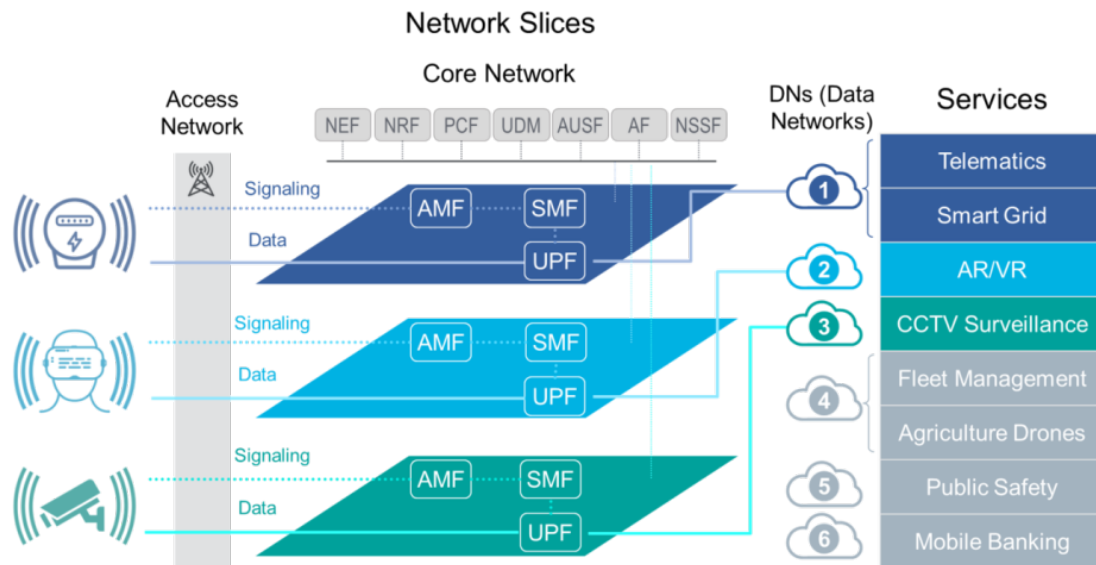


Abbildung 2.24: Network Slicing Architektur. Quelle: [76]

und Hotspots, die unterschiedliche Anforderungen haben. Für den Hotspot-Fall, d.h. für ein Gebiet mit hoher Nutzerdichte, ist eine sehr hohe Verkehrskapazität erforderlich, während der Mobilitätsbedarf gering ist und die Nutzerdatenrate höher ist als bei einer großflächigen Abdeckung. Für den Fall der Flächenabdeckung und dem zur Verfügung stellen von hoher Bandbreite sind eine nahtlose Abdeckung und eine mittlere bis hohe Mobilität erwünscht, wobei die Benutzerdatenrate im Vergleich zu den bestehenden Datenraten deutlich verbessert wird.

- 2. Slice, geeignet für die Verarbeitung von hochzuverlässiger Kommunikation mit niedriger Latenzzeit. Dieser Anwendungsfall stellt hohe Anforderungen an Fähigkeiten wie Durchsatz, Latenz und Verfügbarkeit. Einige Beispiele sind die drahtlose Steuerung von industriellen Fertigungs- oder Produktionsprozessen, medizinische Fernchirurgie, Distributionsautomatisierung in einem Smart Grid, Transportsicherheit usw.
- 3. Slice, geeignet für die Handhabung von IoT und mMTC. Dieser Anwendungsfall zeichnet sich durch eine sehr große Anzahl von angeschlossenen Geräten aus, die typischerweise ein relativ geringes Volumen an unverzögerten vertraulichen Daten übertragen. Die Geräte müssen kostengünstig sein und eine sehr lange Akkulaufzeit haben [4].

Das 3GPP hat die Systemarchitektur für Netzwerk-Slicing standardisiert und näher erläutert (siehe 3GPP TS 23.501 Version 15.3.0 Release 15).

Multi-access Edge Computing (MEC)

Multi-Access Edge Computing (MEC) wurde entwickelt, um die Quality of Experience (QoE) zu verbessern und den Netzverkehr sowie die Latenz zu reduzieren (vgl. [62]). Durch die Verlagerung von Anwendungen aus der Cloud in die Nähe der Endnutzer ist

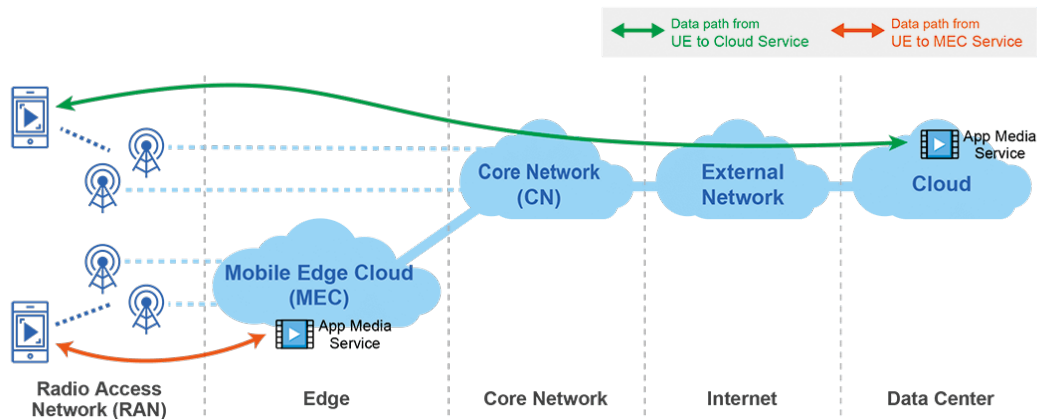


Abbildung 2.25: MEC Netzwerktopologie. Quelle: [76]

MEC in der Lage, zeitkritische Anwendungen zu bedienen, welche aufgrund zu hoher Latenz für eine Cloud-Lösung nicht in Frage kommen. Gleichzeitig reduziert MEC auch den Netzwerkverkehr, da nicht der gesamte Kommunikationsverkehr in die Cloud geleitet werden muss. MEC ist jedoch keine reine 5G-Technologie, sondern kann auch in bestehenden 4G-Netzen eingesetzt werden, denn die MEC-Referenzarchitektur ist (vgl. [9]) unabhängig von der Mobilfunkgeneration. Mit dem Ziel, die Latenzzeit von Anwendungen in Mobilfunknetzen zu verbessern, spezifizierte die MEC Industry Specification Group (ISG) des European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (vgl. [9]) eine neue Technologie namens Multi-access Edge Computing (MEC) (vgl. [66]). Das Konzept von MEC besteht darin, Cloud-Computing-Funktionen innerhalb des RAN in unmittelbarer Nähe zu Endkunden und IoT-Geräten anzubieten (vgl. [47]). Dies reduziert die Latenzzeit und den Netzwerkverkehr im Vergleich zum Cloud-Ansatz und erhöht die Verfügbarkeit, da dieselbe Anwendung mehrmals auf verschiedenen RANs eingesetzt werden kann (vgl. [53]). MEC kann durch mehrere Eigenschaften charakterisiert werden, darunter (vgl. [46], [43]):

- Geringere Latenz als beim Cloud Computing, da die Anwendung in der Nähe des Endnutzers ist.
- On-premises Betrieb und kann unabhängig von der Verfügbarkeit des restlichen Netzes betrieben werden
- Die geografische Nähe zum Endnutzer ermöglicht es dem MEC, geografisch gezielte Informationen von Endnutzern für weitere Analysen zu erhalten, ohne einen anderen Standortdienst zu nutzen.

Insbesondere aus den ersten beiden Eigenschaften lassen sich die wichtigsten Vorteile von MEC im Vergleich zum Cloud Computing zusammenfassen: (1) geringere Latenzzeit, (2) Reduzierung des Netzwerkverkehrs und (3) höhere Verfügbarkeit. Die Vorteile (2) und (3) können bis zu einem gewissen Grad ohne MEC kompensiert werden, und zwar durch geeignete Dimensionierung der Anbindung des Core an das Internet sowie durch die Standort- und Geo-Redundanz von kritischen Netzwerkkomponenten. Im Gegensatz dazu bleibt der Nutzen der geringeren Latenz (1) mit der herkömmlichen Netzwerkar-

chitektur unerreichbar (vgl. [38]). Abbildung 2.25 zeigt die Netzwerktopologie und Idee hinter MEC grafisch. Im Grunde geht es bei MEC darum, Cloud-Anwendungen (z.B. einen Medienserver) näher an die Endgeräte zu bringen, damit die Datenpakete weniger Netzwerkkomponenten durchlaufen und so eine geringere Latenz möglich ist. Folgend wird ein Anwendungsbeispiel von MEC beschrieben, welches sich die Vorteile der niedrigen Latenz zu nutze macht.

Case Study Network Slicing und Multi-access Edge Computing (MEC)

In der Case Study [77] wird dargestellt, wie Cloud-Spiele von der Tencent Cloud an das lokale MEC (Multi-Access Edge Computing) im 5G-Netz von China Mobile verteilt werden. MEC integriert herkömmliche Mobilfunknetze mit Internetdiensten, um die Latenzzeit der Benutzerdienstinteraktion zu reduzieren und die Benutzererfahrung zu verbessern. Im Hinblick auf Cloud-Spiele erfordert MEC nicht nur die Fähigkeit des Kommunikationsnetzes, sondern auch die Fähigkeit des Cloud-Computing. Darüber hinaus bieten die low latency Slices eines 5G-Netzes hohe Bandbreiten und niedrige Latenzzeiten für Cloud-Spiele. Um die kommerzielle Implementierung von MEC zu beschleunigen, hat China Mobile zusammen mit ZTE und Tencent Cloud-Spiele in der 5G-Umgebung getestet und damit eine potenzielle Anwendung für 5G-MEC geschaffen. Das lokale MEC beschleunigt das Rendering von Bildern und sendet die gerenderten Medienströme direkt an die Endgeräte. Auf diese Weise erreicht das MEC eine Entlastung des Datenverkehrs, optimiert die Nutzung der Netzwerkbandbreite und reduziert die Latenzzeit. Die Spieler können ein 4K- und 60-Bildraten-Ultra-HD-Erlebnis genießen, ohne die Spiele herunterzuladen. Die gemessene Downloadrate beträgt 40 Mbps, und die RTT-Latenz (Round Trip Time) liegt bei 10-20 ms (vgl. [77]). Diese innovative Cloud-Game-Praxis wurde im 5G-Pilotnetz China Mobile in Guangzhou mit der kommerziellen 5G-End-to-End-Systemlösung von ZTE demonstriert, welche 5G Basisstationen, 5G Core, MEC-Plattformen und UEs umfasst. Tencent stellte TSEC (Tencent Smart Edge Connector) zur Verfügung, um die Verlagerung von Cloud-Spielen in den Edge-Bereich zu ermöglichen. Die Architektur für die 5G MEC-basierte Cloud-Game-Lösung sieht wie folgt aus 2.26: Die 5G Core UPF (User Plane Function) wird in das lokale MEC verlagert, um die Auslagerung des Datenverkehrs für Cloud-Spiele zu ermöglichen. Die MEP (Multi-access Edge Platform) stellt Netzwerkfähigkeiten für Cloud-Spiele und RAN-Awareness-Fähigkeiten zur Verfügung, einschließlich RNIS (Radio Network Information Service), TCPO (TCP Optimization) und VO (Video Optimization). Sie bietet auch PaaS-Fähigkeiten auf Netzwerkebene für die Optimierung von Cloud-Spielen. Darüber hinaus stellt die Edge-Cloud Cloud-Spiele mit VM (Virtual Machine), Containern, Bare-Metal-Ressourcen und Beschleunigungsfunktionen bereit. Sie weist Ressourcen dynamisch in Abhängigkeit von der Spiellast zu und plant Ressourcen nach Bedarf, um die gemeinsame Nutzung von Ressourcen zu implementieren und wertvolle Edge-Ressourcen vollständig auszuschöpfen. In Kombination mit der von ZTE entwickelten Slicing-Channel-Bearertechnologie lassen sich Trägerbandbreite und Latenz nach Bedarf anpassen. Durch Prioritätsplanung und selbstanpassende Kanalcodierung werden die Uplink- und Downlink-Rate und die Latenzanforderungen von Slices garantiert, und Netzwerk-Slices mit hoher Bandbreite und niedriger Latenz werden für Cloud-Spiele bereitgestellt, um die Latenz von Cloud-Spielen weiter zu reduzieren. Tencent hat das

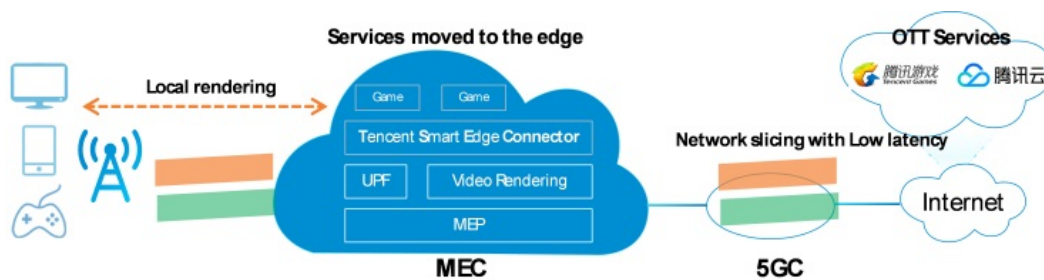


Abbildung 2.26: 5G MEC-basierte Cloud Game Architektur. Quelle: [77]

TSEC im MEP PaaS implementiert, um eine nahtlose Koordination mit dem Edge-Netzwerk und den Cloud-Diensten zu realisieren und so die On-Demand-Verteilung von Cloud-Spielen von der Cloud zum Edge zu ermöglichen. Das Cloud-Spiel beschleunigt das Bild-Rendern auf dem MEC, das die gerenderten Medienströme direkt an die UEs sendet. Durch die Implementierung von lokalem MEC-Offloading können auch die Netzwerkbandbreite und die Latenzzeit reduziert werden (vgl. [77]).

Die Vorteile dieser Lösung sind wie folgt (vgl. [77]):

- Geringere Latenzzeit: Cloud-Spiele-Services werden direkt am Edge des Core mit lokalem Rendering und kurzer Übertragungsstrecke bereitgestellt. Kombiniert mit Slices mit niedriger Latenz ist die Übertragungsgarantie für niedrige Latenz möglich. Die RTT-Latenzzeit wird von 120 ms auf weniger als 20 ms reduziert, was das Benutzererlebnis erheblich verbessert.
- Einsparung von Übertragungskosten: Das Cloud-Spiel muss das Video in der Cloud rendern und dann das gerenderte Video an das UE senden. Jedes UE beansprucht bis zu 30 Millionen Übertragungsressourcen. Mit dem MEC-Einsatz am Edge muss ein Cloud-Spiel nur eine Spielsteuerungsanweisung von der Cloud an das MEC senden, das Video auf dem MEC rendern und den Videostrom an das UE senden. Dies erfordert nur einige tausend Übertragungsressourcen. Die MEC-basierte Cloud-Game-Lösung kann die Übertragungsressourcen von MEC zum 5G Core erheblich einsparen, und die Bandbreite kann weniger als 1/1000 beanspruchen.
- Senkung der Einstiegshürden für Spieler: Das Video-Rendern von MEC-basiertem Cloud-Gaming wird am MEC-Edge implementiert, was die Anforderungen von Cloud-Games an die Leistung des UE erheblich reduziert, da nur die Codierung/-Decodierung durch das UE erfolgt. Ein Spieler kann Spiele direkt auf vorhandenen Geräten spielen, ohne für leistungsstärkere Endgeräte zu bezahlen, was die Kosten für die Spielwerbung und die Kundenakquise erheblich reduziert. In der 5G-Ära können zahlreiche Dienste, die derzeit nur auf einem PC (Personal Computer) betrieben werden können, auf Mobiltelefone migriert werden.

Kapitel 3

Konzeptioneller Vorgehens- und Lösungsansatz

Aufbauend auf der Hypothese: *Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führt gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf zu einer Verringerung der Latenzzeit um 25 Prozent* und den Erkenntnissen des Kapitels 2, wird im Kapitel 3 ein Lösungsvorschlag konzipiert und eine Vorgehensweise aufgezeigt, die für die Beantwortung der Forschungsfrage benötigt wird. Es braucht also noch eine oder mehrere Methoden, mit der man überprüfen kann, ob die Hypothese stimmt oder nicht. Die Gesamtheit der Methoden, die man zur Erreichung des Forschungsziels der wissenschaftlichen Arbeit anwendet, nennt man auch das Forschungsdesign (vgl. [60]).

3.1 Ausgewähltes Forschungsdesign

Es besteht das Ziel dieser Arbeit darin, es zu erforschen, in welchem Ausmaß die Latenzzeit durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie im Vergleich zur 4G Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf für Endgeräte im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu verringert werden konnte. Für die Beantwortung der Forschungsfrage wird das Forschungsdesign der Feldforschung angewandt. Die Feldforschung ist eine empirische Forschungsmethode zur Erhebung empirischer Daten mittels Beobachtung oder Befragung im natürlichen Kontext. Dabei wird die Latenzzeit der eingeführten 5G Standalone Technologie im Vergleich zur Latenzzeit der 4G Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf mittels Ping gemessen und dokumentiert. Dabei werden die Latenzunterschiede statistisch ausgewertet und miteinander verglichen. Anschließend soll eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine Reduktion der Latenzzeit um mindestens 25 Prozent erreicht werden konnte.

3.1.1 Auswahlkriterien für das Forschungsdesign

Forschungsergebnisse, welche in einer natürlichen Umwelt gewonnen wurden, haben klare Vorteile. Sie sind gültig für die Situation vor Ort, damit ist die Übertragbarkeit in die Anwendungssituation (externe Validität) gewährleistet. Im Gegensatz zur Feldforschung

steht die Laborforschung, welche vor allem oftmals eine schlechte Entsprechung zur natürlichen Umwelt der eingesetzten Technologien hat und daher können die Ergebnisse nicht ohne weiteres in das Anwendungsfeld übertragen werden. Die Generalisierbarkeit von Ergebnissen der Laborforschung ist gering (vgl. [75]). Die Forschungsfrage, *In welchem Ausmaß führt der Einsatz der 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der Latenzzeit gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf?*, erfordert eine Messung der Latenz in natürlicher Umgebung im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf. Hierzu eignet sich das Forschungsdesign der Feldforschung.

3.2 Anforderungen an das Forschungsdesign

Für die Untersuchungen der Feldforschung müssen die Umwelt- und Rahmenbedingungen der vorhandenen Mobilfunktechnologien im Bereich des Wirtschaftsparks A5 klar sein, um den Messaufbau folgerichtig definieren zu können. Dabei sind folgende Umweltparameter ausschlaggebend, um beispielsweise ein UE mit den technisch benötigten Anforderungen auszuwählen und um die Vorgehensweise für die Datenerhebung zu definieren:

- Mobilfunknetzabdeckung (4G und 5G Standalone) von spusu
- Verwendete Frequenzbänder im Untersuchungsbereich
- Standorte Basisstationen

3.2.1 Definieren des Messaufbaus

Der Messaufbau besteht aus einem UE, einem 4G- und einem 5G Standalone-Netz und einem Server im Internet. Darüber hinaus gilt es, eine Latenzzeit-Messmethodik zu wählen. Bestandteile der Messmethodik ist eine UE-Applikation zum Starten der Messung (Ping), sowie einem Server im Internet, welcher dem UE mittels Pong antwortet, um die Round Trip Time messen und anschließend vergleichen zu können.

Auswahl des UEs

Die Messung in den beiden unterschiedlichen Mobilfunktechnologien soll mit demselben UE erfolgen, um eine bessere Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Verschiedene UEs könnten zum Beispiel aufgrund deren unterschiedlichen Modems oder Antennen zu unterschiedlichen Grundvoraussetzungen der Messungen führen. Außerdem muss das UE sowohl 4G als auch 5G Standalone unterstützen.

Auswahl der Latenzzeit-Messmethodik zur Datensammlung

Die Anforderung an die Messmethodik ist, dass sie beliebig oft wiederholbar ist und vergleichbare Ergebnisse liefert, um die Messungen im 4G- und 5G Standalone-Netz an verschiedenen Standorten und unter verschiedenen Umweltbedingungen wiederholbar im Wirtschaftspark A5 durchführen zu können. Die Applikation muss auf dem gewählten UE ausführbar sein und die Round Trip Time messen. Die Messung erfolgt in Millisekunden.

3.2.2 Vorgehensweise für die Datenerhebung

Die Datenerhebung soll mit dem ausgewählten UE und der dazugehörigen Messmethodik stattfinden. Die Messmethodik soll dabei für mehrere Messungen je Umweltparameter (geographischer Standort/Tageszeit/Signalstärke) und je Mobilfunktechnologie (4G/5G Standalone) ausgeführt werden. Die Daten der Messung müssen in einem für die elektronische Weiterverarbeitung geeignetem Text oder Tabellenformat gespeichert sein und müssen mindestens folgende Werte enthalten:

- Ping (Round Trip Time) in Millisekunden
- Zeitpunkt der Messung
- verwendete Mobilfunktechnologie
- verwendeter Server
- Standort
- Signalstärke
- Mobilfunkbetreiber

3.2.3 Vorgehensweise für die statistische Auswertung

Für die ermittelten Latenzzeiten im 4G- und 5G Standalone-Netz soll jeweils der Durchschnittswert ermittelt werden. Der Durchschnittswert soll dabei je Technologie, als auch je Technologie und je Messstandort ermittelt werden. In Vergleichen sollen Veränderungen prozentuell dargestellt werden, um die Forschungsfrage beantworten zu können und um die Hypothese bewerten zu können.

Kapitel 4

Anwendung des Lösungsvorschlags

Das Forschungsdesign der Feldforschung wird angewandt, um zu untersuchen, ob eine Verringerung der Latenz durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie im Mobilfunknetz von spusu im Wirtschaftspark A5 in Mistelbach-Wilfersdorf gegenüber der 4G Technologie um 25 % erreicht wird.

4.1 Untersuchungsumgebung

Im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf ist es möglich, als Mobilfunkteilnehmer von spusu sowohl ein 4G Mobilfunknetz als auch ein 5G Standalone Mobilfunknetz zu nutzen. Ein Lageplan des Wirtschaftsparks ist abgebildet auf Abbildung 4.1, derzeit ist die auf der Abbildung gezeigte Ausbaustufe 1 für die Besiedelung von Unternehmen vorgesehen. Auch die Untersuchung der Latenzzeiten wird sich auf diese geografische Lage beschränken.

4.1.1 Eingesetztes 4G System von spusu

spusu tritt seit 2015 als Full MVNO (Mobile Virtual Network Operator) am österreichischen Mobilfunkmarkt auf. Ein Full MVNO verfügt über ein eigenes Corenetwork und eigene SIM-Karten und eigenen Networkidentifiern (Mobile Country Code (MCC) und Mobile Network Code (MNC)) (vgl. [84]). Ein Full MVNO muss sich mit einem Host MVNO, welcher das Radio Access Network und Teile des Corenetworks zur Verfügung stellt, zusammenschalten. Dabei kann ein MVNO mit einem eigenständigen Corenetwork als das Home-Network betrachtet werden, während der MNO (Mobile Network Operator) als Visited-Network betrachtet wird. Dieses Modell hat den Vorteil, dass dabei etablierte Roaming-Verfahren und -Schnittstellen wiederverwendet werden und dabei kein erhöhter Integrationsaufwand erforderlich ist, als bei einer Zusammenschaltung mit anderen Roaming-Partnern (vgl. [10]). Host MNO von spusu ist Hutchison Drei Austria. Die Architektur des 4G Systems von spusu ist abgebildet auf Abbildung 4.2. Somit ist spusu bei der Netzabdeckung im Wirtschaftspark A5 abhängig von ihrem Host MNO, sowie die Funkschnittstellen- und Backhaul-Latenz kann nicht von spusu beeinflusst werden.

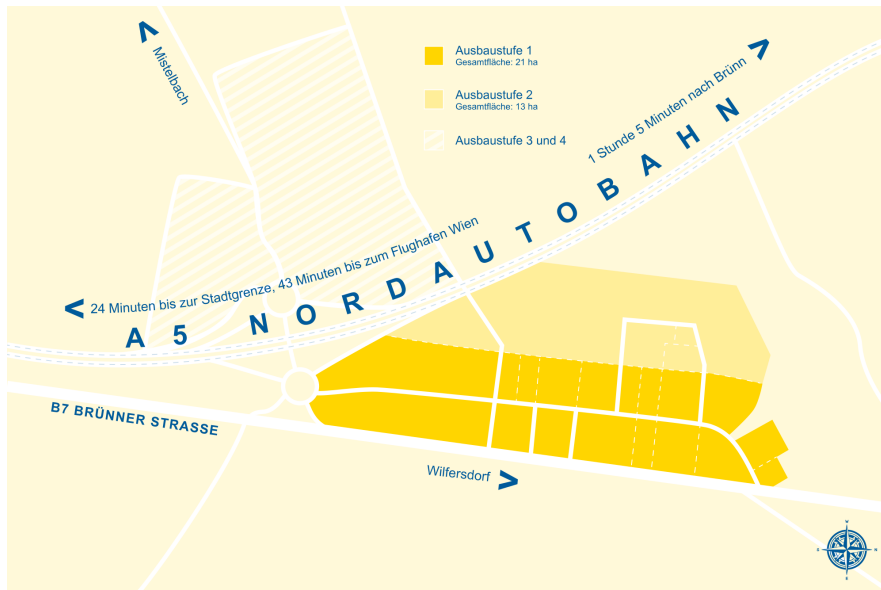


Abbildung 4.1: Übersichtsplan Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf. Quelle: [94]

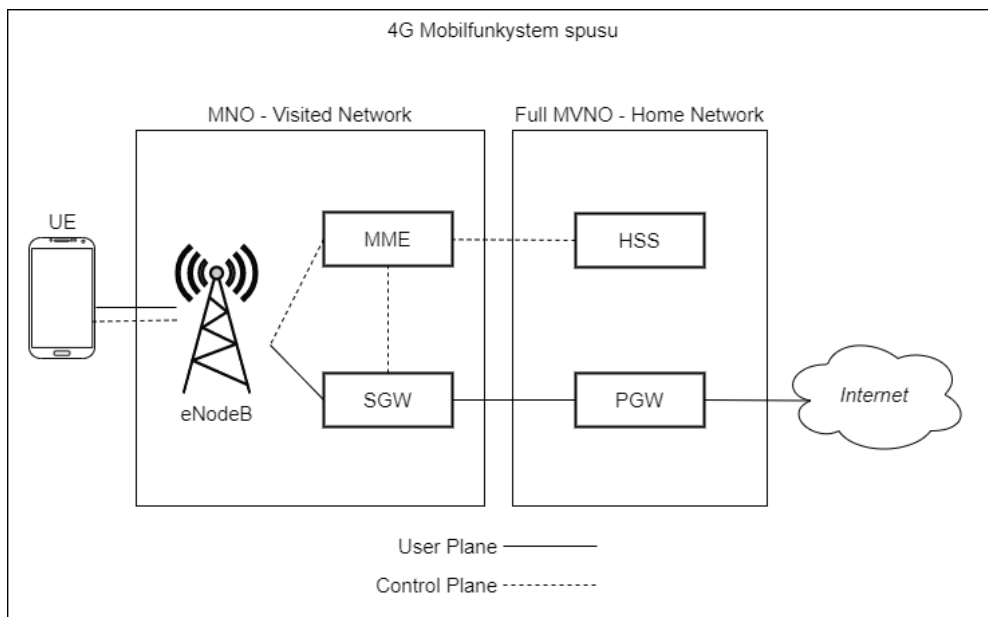


Abbildung 4.2: 4G Mobilfunksystem von spusu. Quelle: Eigene Darstellung

4.1.2 Eingesetztes 5G Standalone System von spusu

Seit Anfang 2021 zählt der Wirtschaftspark A5 in den Gemeinden Mistelbach und Wilfersdorf zum ersten 5G Wirtschaftspark Österreichs. Ausschlaggebend dafür, war die Kooperation zwischen dem Mobilfunkanbieter spusu, der ecoplus Wirtschaftsagentur des Landes Niederösterreich und den umliegenden Gemeinden, mit dem Ziel vor allem



Abbildung 4.3: 5G Sendestation im Wirtschaftspark A5 Miselbach-Wilfersdorf. Quelle: Eigene Aufnahme (15.05.2022)

Start-ups mit der neuen innovativen Technologie auszustatten. Das rund 221.000 m² große Areal wurde mit insgesamt 11 Sendemasten ausgerüstet. Dabei wurde auf besonders kleine 5G Sender gesetzt, die auf den vorhandenen Straßenlaternen angebracht wurden [73]. Eine Abbildung einer Laterne mit Antenne und Remote Radio Unit (RRU) ist auf Abbildung 4.3 zu sehen. Der Wirtschaftspark A5 wurde dabei mit der 5G Standalone Technologie ausgestattet, und spusu tritt somit als eigenständiger MNO auf. Damit hat spusu die Kontrolle über alle Netzwerkkomponenten und somit die Controller über alle Latenzquellen. Um das RAN selbstständig betreiben zu können, ist spusu seit 1.1.2020 im Besitz von 30 MHz Spektrum im Bereich 3,4 - 3,8 GHz [90].

4.1.3 Nicht betrachtetes System: 5G Non-Standalone

Zu erwähnen gilt es, dass spusu als Full Mobile Virtual Network Operator ebenfalls ein 5G Non-Standalone Netzwerk betreibt. Aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit von 5G Non-Standalone Netzwerkabdeckung am Standort Wirtschaftspark A5, konnte kein Vergleich durchgeführt werden. Da der 5G Non-Standalone Rollout abhängig von den Basisstationen und des RAN ist, welche vom Host MNO betrieben werden, kann spusu als Full

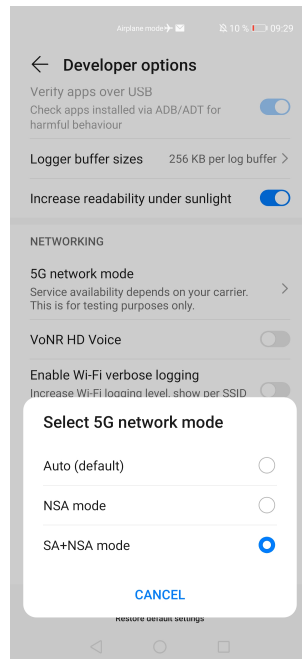


Abbildung 4.4: 5G Standalone Netzwerkmodus am UE aktivieren. Quelle: Eigene Aufnahme, Huawei P40 Pro

MVNO nur bedingt auf die Verfügbarkeit von 5G Non-Standalone im Wirtschaftspark A5 Einfluss nehmen.

4.1.4 Auswahl des UEs

Die Messung in den beiden unterschiedlichen Mobilfunktechnologien erfolgt mit demselben UE, um eine bessere Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Verschiedene UEs können aufgrund unterschiedlicher Modems oder Antennen zu unterschiedlichen Grundvoraussetzungen der Messungen führen. Um ein UE für 4G und 5G Standalone verwenden zu können, muss das UE 4G als auch 5G Standalone unterstützen.

Eckdaten des UEs:

- Bezeichnung: Huawei P40 Pro
- Model: ELS-NX9
- Software Version: 11.0.0.176
- Chipset: Huawei Kirin 990 5G
- Android Version: 10

5G Standalone ist allerdings nicht standardmäßig aktiviert auf dem Endgerät, und muss in den Android-Entwickleroptionen von aktiviert werden, siehe Abbildung 4.4.

In das UE, welches dualsim-fähig ist, sind zwei SIM-Karten mit folgenden spusu Tarifen eingelegt:

- 4G Tarif: spusu daten only
 - Download bis zu 40 Mbit/s

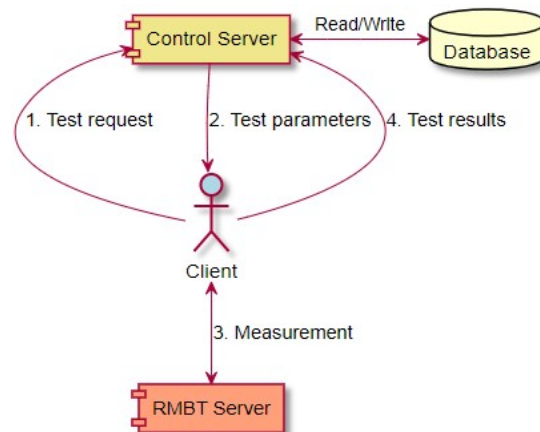


Abbildung 4.5: RMBT System Überblick. Quelle: [93]

- Upload bis zu 10 Mbit/s
- Link zum Tarif: <https://www.spusu.at/spusudatenonly>
- 5G Tarif: spusu 5G XL
 - Download bis zu 200 Mbit/s
 - Upload bis zu 50 Mbit/s
 - Link zum Tarif: <https://www.spusu.at/spusu5gxl>

4.1.5 Latenzzeitmessung mittels RTR-Netztest

Die Latenzzeitmessung wird mittels RTR-Netztest durchgeführt. Der RTR-Netztest steht als Applikation für das ausgewählte UE zur Verfügung. Der RTR-Netztest basiert auf dem RTR Multithread Broadband Test (RMBT). Der RMBT definiert den Ablauf der Messungen. Die RMBT Dokumentation ist abrufbar unter: <https://www.netztest.at/doc/>. Auf Abbildung 4.5 wird das RMBT System gezeigt und man erkennt, dass das Messkonzept auf einer Client-Server-Architektur basiert und dass der Client die Messungen auslöst. Die Messergebnisse werden basierend auf dem Open-Data-Prinzip auf der RTR-Netztest-Website unter <https://www.netztest.at/de/Opendata> veröffentlicht und so unter Verwendung der Creative Commons Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0) Lizenz der Allgemeinheit zur Information, Nutzung, Weiterverbreitung und Weiterverwendung frei zugänglich gemacht [87].

Bei der Latenzmessung sendet der Client in kurzen Abständen Pings an den RMBT-Server, um die Latenz der Verbindung zu testen. Ein Ping besteht aus der Übertragung von kurzen Zeichenfolgen über eine TCP-Verbindung zum Server, der Server sendet kurze Zeichenfolgen als Bestätigung zurück. Der Client misst die Zeit zwischen dem Senden und dem Empfang der Rückmeldung, während der Server die Zeit zwischen dem Senden seiner Rückmeldung und dem Empfang der Antwort des Clients misst. Der Client speichert alle Messungen, und der Median aller Messungen wird als Ergebnis verwendet [93], siehe auch Abbildung 4.6. Es ist sinnvoll, beim Vergleich von Testergebnissen den Endpunkt des Tests, also den Serverstandort, zu berücksichtigen. Im Falle des RTR-

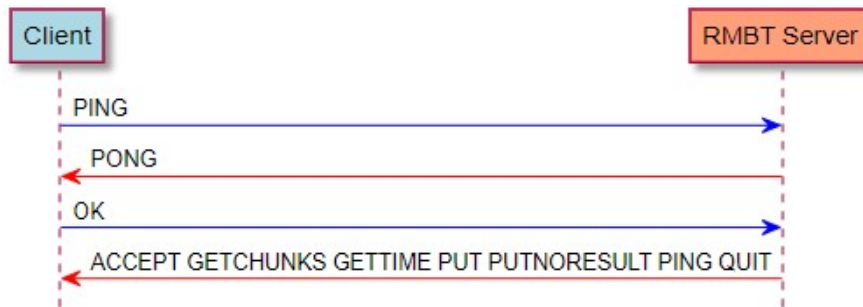


Abbildung 4.6: RMBT System Überblick. Quelle: [93]

Netztests befindet sich der RMBT-Server in Wien im VIX (Vienna Internet eXchange) [95].

Der große Vorteil der Messung mit dem RTR-Netztest ist, dass es eine frei verfügbare Messmethode mit breiter Endgeräteunterstützung (Browser, Android- sowie iOS-App) ist. Aufgrund dessen ist die Vorgangsweise wiederholbar und die Ergebnisse reproduzierbar. Zum Beispiel kann der RTR-Netztest in unterschiedlichsten Untersuchungsumgebungen mit unterschiedlichsten UEs eingesetzt werden.

4.1.6 Messaufbau

Bei der Betrachtung der Latenz wird die Round Trip Time mittels Ping (Pong) im 5G Standalone und im 4G Netz von spusu gemessen. Im Kontext eines Mobilfunksystems bedeutet dies, dass die Verzögerung vom UE zum Messerver im Internet bis wieder zurück zum UE (in Millisekunden) gemessen wird. Das schließt eine Betrachtung der Verzögerungszeit einzelner Komponententeile (z.B. Latenz der Funkschnittstelle, Latenz im Corenetwork) der Mobilfunksysteme aus. Zusammengefasst lässt sich der Messaufbau folglich darstellen (siehe auch Grafik 4.7):

- 4G
 - UE: Huawei P40 Pro
 - * RTR-Netztest App
 - * spusu daten only Tarif: <https://www.spusu.at/spusudatenonly>
 - RAN/Core: 4G Full MVNO Architektur
 - * Host Network: Hutchison 3 Austria (H3A)
 - * Home Network: spusu
 - Internet
 - * Verbindung zum RMBT Server
 - RMBT Server
 - * Messerver
 - RTR-Netztest Open-Data

- * Speicherung der Messwerte als Open-Data
- 5G Standalone
 - UE: Huawei P40 Pro
 - * RTR-Netztest App
 - * spusu 5G XL Tarif: <https://www.spusu.at/spusu5gxl>
 - RAN/Core: 5G Standalone von spusu
 - Internet
 - * Verbindung zum RMBT Server
 - RMBT Server
 - * Messserver
 - RTR-Netztest Open-Data
 - * Speicherung der Messwerte als Open-Data

Der Test wird mittels Ping durchgeführt und entspricht der Methodik des RTR-Netztests, siehe <https://www.netztest.at/doc/> und Abschnitt 4.1.5. E

4.2 Erhebung der Messdaten

Mittels des beschriebenen Messaufbaus (siehe Abschnitt 4.1.6/Abbildung 4.7) werden die Messdaten erhoben. Da sich der Wirtschaftspark A5 über 221.000 m² erstreckt, werden an drei verschiedenen Standorten im Wirtschaftspark Messungen durchgeführt, um ein möglichst gutes Abbild der Latenzsituation in der Untersuchungsumgebung zu erhalten. Die Messstandorte sind in Abbildung 4.8 abgebildet. Es werden an jedem Messstandort fünf RTR-Netztest-Messungen je Technologie durchgeführt. Die Startseite des RTR-Netztests für die 4G Messungen sowie für die 5G Standalone Messungen siehe ebenfalls Abbildung 4.8. Die Messungen der beiden Technologien erfolgen innerhalb weniger Stunden je Messstandort, um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten.

Die RTR-Netztest App zeigt für die 5G Standalone Verbindung keine Signalstärke an, auf der RTR-Netztest-Webseite steht hierzu, dass die Möglichkeit besteht, dass einzelne Geräte falsche bzw. nicht aktuelle Werte der Mobilfunknetz-Signalstärke liefern. In diesen Fällen zeigt die App keine Messwerte für die Signalstärke an bzw. verwirft diese [85]. Die Testergebnisse können unter <https://www.netztest.at/de/Opentests> mit dem Filter auf die Client-UUID (Universally Unique Identifier) U0dab431b-84e3-40b6-b5cc-4ac4bf2f9854, welche man in der App am UE ablesen kann, aufgerufen und als .csv oder .xlsx als Open-Data heruntergeladen werden. Weiters können die Daten von <https://www.netztest.at/de/Opendata> heruntergeladen werden. In den Tabellen 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 und 4.6 sind die für die Betrachtung der Latenz wichtigen Ergebnisse tabellarisch angegeben. Die einzelnen Ergebnisse haben eine Open-Test-UUID, welche die Messung eindeutig identifizieren und nach denen ebenfalls gefiltert werden kann. In den Tabellen ist ebenfalls der Link zum Test angegeben, welcher die Open-Test-UUID beinhaltet und die Testergebnisse im Browser grafisch darstellt. Zu beachten gilt es, dass eine RTR-Netztest-Ping-Messung aus zehn einzelnen Messungen besteht, von denen der Durchschnittswert berechnet wird und als Ergebnis der Latenzmessung dargestellt wird

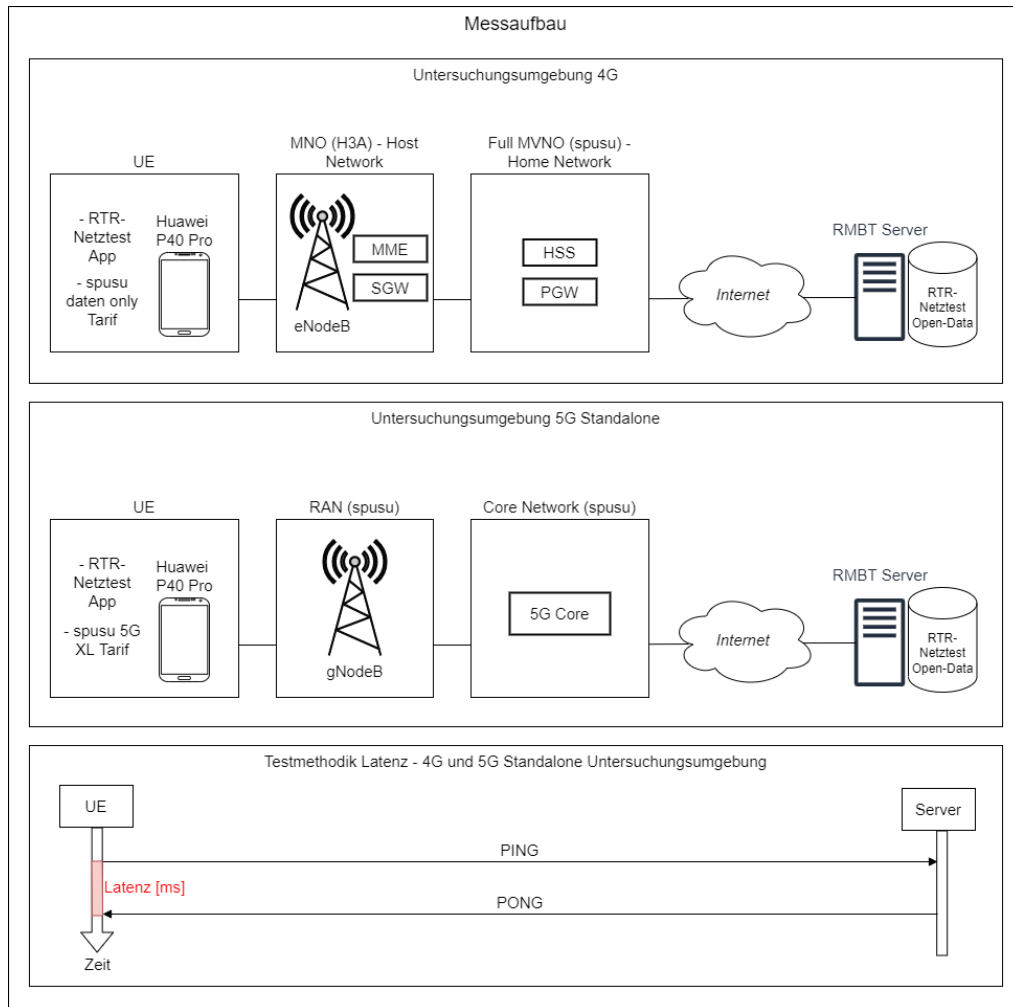


Abbildung 4.7: Überblick Messaufbau. Quelle: Eigene Darstellung

(vgl. [93]). Somit sind je Technologie und je Standort 50 Ping-Messungen durchgeführt worden. Damit ergeben sich gesamt 300 Ping-Messungen, wobei 150 4G und 150 5G Standalone Ping-Messungen durchgeführt worden sind. In den Tabellen 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 und 4.6 sind jedoch je Technologie 15 abgebildet, welche sich aber wie beschrieben aus dem Durchschnittswert aus je zehn einzelnen Ping-Messungen ergeben.

Zeit (UTC)	Technologie	Ping [ms]	Link zur Messung (Open-Test-UUID)
2022-05-15 15:04:41	4G	23.997419	https://www.netztest.at/de/Openest?O10618fe0-88a7-4802-8341-fc21573a1d47
2022-05-15 15:03:59	4G	29.901192	https://www.netztest.at/de/Openest?O1fd4150c-01a9-404c-9a03-bbdfb602091c
2022-05-15 15:03:30	4G	29.939707	https://www.netztest.at/de/Openest?Oc840e607-35b9-40dc-9f60-dd870fcb3516
2022-05-15 15:02:50	4G	29.946799	https://www.netztest.at/de/Openest?O3ebb50f3-ee11-43fc-bdad-4af7c573a1fb
2022-05-15 15:01:52	4G	27.389659	https://www.netztest.at/de/Openest?O63f4799c-629c-4f21-be35-bc63e5cfb997

Tabelle 4.1: 4G Messdaten am Messstandort 1. Quelle: <https://www.netztest.at/de/Openest>

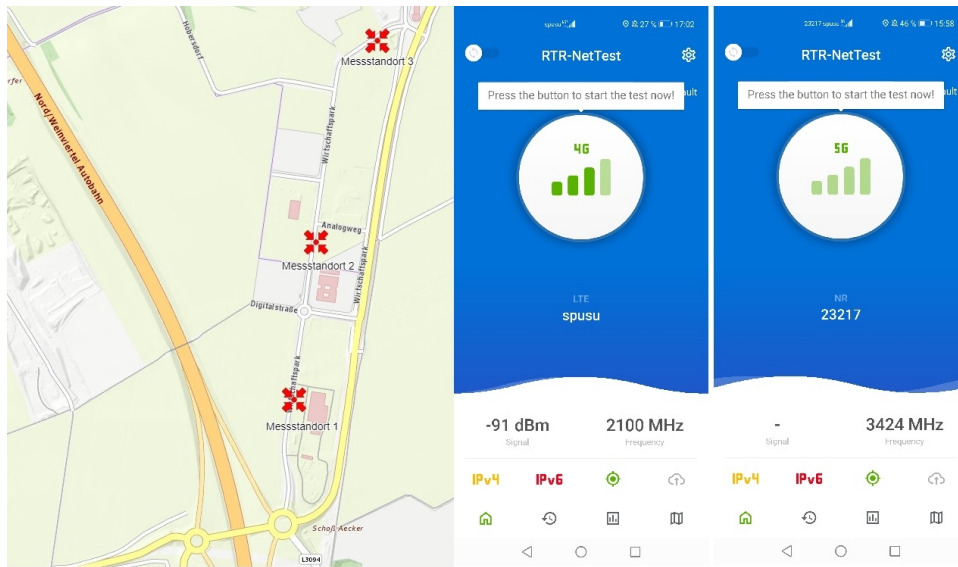


Abbildung 4.8: Überblick Messstandorte und RTR-Netztest App. Quelle: Eigene Darstellung, Geoland.at, RTR-Netztest

Zeit (UTC)	Technologie	Ping [ms]	Link zu Messung (Open-Test-UUID)
15.05.2022 14:05	5G	19.981287	https://www.netztest.at/de/Opentest?O53abc158-c06d-4f8d-80aa-6257dbb72c24
15.05.2022 14:04	5G	32.888661	https://www.netztest.at/de/Opentest?Ofc9615e9-fc64-4a52-8f33-c947e8dc822d
15.05.2022 14:02	5G	19.951792	https://www.netztest.at/de/Opentest?O1672c71a-3b91-45e0-976a-4c2cbf50ad9d
15.05.2022 14:01	5G	19.980102	https://www.netztest.at/de/Opentest?O7c7f7074-f240-4cff-91f7-d0b4b0499d94
15.05.2022 13:59	5G	19.926523	https://www.netztest.at/de/Opentest?O9c3c7855-5309-4f6a-932a-e52cb6175dd8

Tabelle 4.2: 5G Standalone Messdaten am Messstandort 1. Quelle: <https://www.netztest.at/de/Opendata>

Zeit (UTC)	Technologie	Ping [ms]	Link zur Messung (Opent-Test-UUID)
15.05.2022 15:15	4G	23.468052	https://www.netztest.at/de/Opentest?O6f2ee2fb-85d4-4b7a-8716-f5e7d74c2737
15.05.2022 15:14	4G	29.413748	https://www.netztest.at/de/Opentest?Ob2da001b-fcce-4013-b6e0-c33105d2cc0e
15.05.2022 15:13	4G	18.007346	https://www.netztest.at/de/Opentest?O3e4cb5e9-864a-4c4e-b552-32e667bd7cdf
15.05.2022 15:12	4G	17.089255	https://www.netztest.at/de/Opentest?Oed7b0325-e007-4d6c-8913-2a45a98d5aee
15.05.2022 15:11	4G	25.074271	https://www.netztest.at/de/Opentest?Off9e1a92-3210-410c-bb3e-a4ee290ba885

Tabelle 4.3: 4G Messdaten am Messstandort 2. Quelle: <https://www.netztest.at/de/Opendata>

Zeit (UTC)	Technologie	Ping [ms]	Link zur Messung (Open-Test-UUID)
15.05.2022 14:22	5G	19.986169	https://www.netztest.at/de/Opentest?O3e1369d5-1d2c-4da6-816a-12a7b6f9efa6
15.05.2022 14:21	5G	19.926729	https://www.netztest.at/de/Opentest?O18018870-cf9d-4b74-9cba-6d3e5bd40ed9
15.05.2022 14:20	5G	19.976535	https://www.netztest.at/de/Opentest?O203037c0-80da-4e8f-b8d4-2c6891d4ed3d
15.05.2022 14:20	5G	19.969915	https://www.netztest.at/de/Opentest?O3b3f2160-8fa5-48fe-a021-7130097231bc
15.05.2022 14:19	5G	20.013737	https://www.netztest.at/de/Opentest?O29d50677-85d3-47fa-8260-df5e68613344

Tabelle 4.4: 5G Standalone Messdaten am Messstandort 2. Quelle: <https://www.netztest.at/de/Opendata>

Zeit (UTC)	Technologie	Ping [ms]	Link zur Messung (Open-Test-UUID)
15.05.2022 15:25	4G	24.515473	https://www.netztest.at/de/Opentest?O18c2a860-9457-4444-835a-070f9a9df726
15.05.2022 15:24	4G	24.908127	https://www.netztest.at/de/Opentest?O6d3617fc-31c9-40b9-92a0-61c55c32fb32
15.05.2022 15:24	4G	26.565242	https://www.netztest.at/de/Opentest?O146c4b8b-40a4-467d-ad01-35f49848949c
15.05.2022 15:23	4G	27.427097	https://www.netztest.at/de/Opentest?Oe8120126-6479-4ef0-bb45-ff549ce1075d
15.05.2022 15:23	4G	50.035561	https://www.netztest.at/de/Opentest?O525dec5a-fb94-4e3d-8e3f-a196c2d17dff

Tabelle 4.5: 4G Messdaten am Messstandort 3. Quelle: <https://www.netztest.at/de/Opentest>

Zeit (UTC)	Technologie	Ping [ms]	Link zur Messung (Open-Test-UUID)
15.05.2022 14:37	5G	29.933239	https://www.netztest.at/de/Opentest?O55f0516d-71e9-4ae5-a4eb-aaabb3efc9c1
15.05.2022 14:37	5G	19.934929	https://www.netztest.at/de/Opentest?Oc673b59a-f8ad-42e0-bf26-6239da7be791
15.05.2022 14:36	5G	19.983824	https://www.netztest.at/de/Opentest?O5cb1b3b9-24ba-4528-a2e4-60a56326dc87
15.05.2022 14:35	5G	19.936244	https://www.netztest.at/de/Opentest?O7f123089-4757-4c33-a7a7-0fd065f05fef
15.05.2022 14:34	5G	19.925766	https://www.netztest.at/de/Opentest?O045f0b0c-86e4-44b7-8bef-6b074d169e09

Tabelle 4.6: 5G Standalone Messdaten am Messstandort 3. Quelle: <https://www.netztest.at/de/Opentest>

4.3 Statistische Auswertung der Messdaten

Um die Forschungsfrage, in welchem Ausmaß führt der Einsatz der 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der Latenzzeit gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf, zu beantworten, ist eine statistische Auswertung der Messdaten erforderlich. Die für die Beantwortung der Frage relevanten Daten sind je Messstandort im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf ersichtlich in den Tabellen 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 und 4.6. Diese Daten müssen also je Technologie zusammengeführt werden und anschließend kann man die 4G und 5G Standalone Latenz, welche an drei Messstandorten im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf gemessen wurde, vergleichen. Die für den Vergleich und die Beantwortung der Forschungsfrage relevanten Daten sind somit:

- Technologie (4G oder 5G Standalone)
- Ping [ms]

4.3.1 Auswertung der Daten

Die Round Trip Time (Ping [ms]) je Technologie werden von den drei Messstandorten mittels Texteditor in einer .csv-Datei (Comma-Separated-Value-Datei) zusammengefügt. Der Inhalt der dabei entstehende .csv-Datei siehe 7.2.

Es wird der Durchschnittswert je Technologie ermittelt und mittels Säulendiagramm grafisch dargestellt. Ebenso werden die Daten je Messstandort aufbereitet. Die Aufbereitung der Daten erfolgt mittels Programmiersprache R in R Studio [80]. Ebenfalls in R berechnet wird der prozentuale Unterschied der Durchschnittswerte der Latenzzeiten im 4G- und 5G Standalone Mobilfunknetz von spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf. Die Unterschiede werden tabellarisch dargestellt und für die Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen. Den Inhalt des R-Skripts siehe 7.2

Kapitel 5

Analyse der Ergebnisse

Nach der Beschreibung der Durchführung im vorigen Kapitel 4 werden in diesem Kapitel nun die gefundenen Ergebnisse dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse werden im Zuge dessen diskutiert und analysiert.

5.1 Bewertung der Umsetzung in der Praxis

Für die Beantwortung der Forschungsfrage wurde das Forschungsdesign der Feldforschung gewählt. Dabei wurde die Latenzzeit der eingeführten 5G Standalone Technologie im Vergleich zur Latenzzeit der 4G Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf mittels Ping gemessen und dokumentiert. Der vorher definierte Messaufbau konnte in der Praxis erfolgreich durchgeführt werden. Die Durchführung der Messungen mittels RTR-Netztest an mehreren Standorten in der Untersuchungsumgebung konnten ohne Einschränkung durchgeführt werden. Die umgesetzte Messungen haben dabei die Round Trip Time, also die Übertragungszeit eines Datenpakets vom UE über das Mobilfunknetz bis zu einem Server im Internet (in Falle der Umsetzung bis zum RTR-Netztest Messserver) und wieder zurück gemessen. Die Round Trip Time für das UE in einem 4G und 5G Standalone Mobilfunknetz ergibt sich aus der Summe der Verzögerung auf dem Übertragungsweg der Funkschnittstelle, des Backhaul, dem Core sowie der Internetübertragung zum Server. Die Anwendung in der Praxis hat sich für diese Arbeit als geeignet erwiesen, da hierdurch nachvollziehbare und vergleichbare Daten für die Auswertungen generiert werden konnten. Vor allem ist die Umsetzung einfach reproduzierbar, so kann die Generierung der Daten mit demselben Messaufbau in unterschiedlichen Untersuchungsumgebungen nachgestellt werden. So könnte man beispielsweise in Zukunft denselben Messaufbau an unterschiedlichen Wirtschaftsparks durchführen und die 5G Standalone Latenzen einzelner Wirtschaftsparks vergleichen. Anzumerken ist, dass die gewählte Umsetzung die gesamte Round Trip Time misst und nicht die Latenz einzelner Datenübertragungstrecken (Funkschnittstelle, Backhaul, Core, Internetübertragung) aufnimmt. So handelt es sich bei der Umsetzung um ein anwendernahes Szenario, da auch die Anwenderinnen und Anwender in der Regel eine Datenübertragung zu Anwendungen im Internet haben. Damit lässt sich für Kunden und Kundinnen die Latenz ihrer Internetverbindung erheben und daraus deren Nutzungserlebnis ableiten. Der Mobilfunknetzbetreiber kann ebenfalls ablesen, mit welcher Latenzzeit ihre Kunden

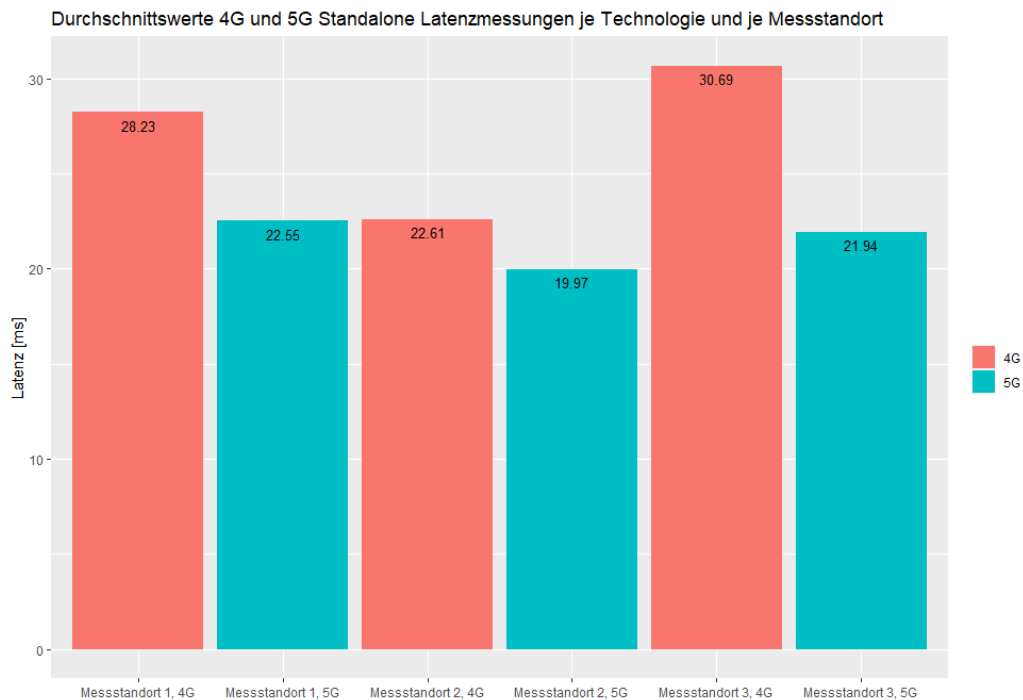


Abbildung 5.1: Darstellung der Durchschnittswerte der 4G und 5G Stalalone Latenzmessung je Technologie und je Messstandort im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf. Daten: RTR-Netztest, Quelle: Eigene Darstellung

und Kundinnen Daten übertragen können, jedoch lässt sich nicht ablesen, an welchem Übertragungsweg im Mobilfunknetz sich die Latenzunterschiede ergeben.

5.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Latenzzeitmessungen von 4G und 5G Stalalone im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf vorgestellt. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Unterschiede der 4G und 5G Stalalone Latenzzeiten festzustellen und deren Ausmaß zu bestimmen. Diese Untersuchung wird zum einen für die gesamten aufgenommenen Daten je Technologie durchgeführt, zum anderen werden die aufgenommenen Daten je Technologie und je Standort getrennt betrachtet, um standortabhängige Unterschiede in der Untersuchungsumgebung festzustellen.

Die Aufnahme der Daten erfolgte an drei Messstandorten im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf (Standorte siehe 4.8, mit je 50 Ping-Messungen. Die Durchschnittswerte je Technologie und je Messstandorte sind als Säulendiagramm abgebildet auf Abbildung 5.1. Die Ergebnisse für die Latenzzeiten wurden durch die Ermittlung des Durchschnittswertes der Messungen ermittelt. Am Messstandort 2 konnten sowohl die niedrigsten durchschnittlichen 4G (22,61 Millisekunden) als auch 5G Stalalone (19,97 Millisekunden) Latenzzeiten aufgenommen werden.

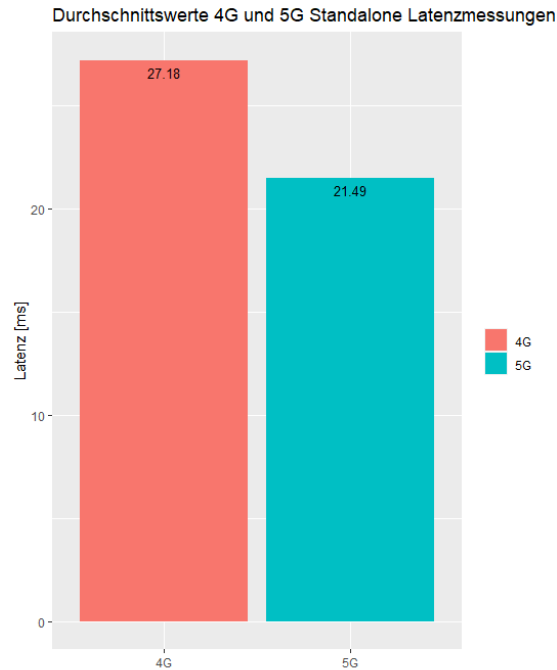


Abbildung 5.2: Darstellung der Durchschnittswerte der 4G und 5G Standalone Latenzmessung im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf. Daten: RTR-Netztest, Quelle: Eigene Darstellung

Für das Gesamtergebnis wurden die Daten aller Messungen ausgewertet. Dabei handelt es sich um 300 Ping-Messungen, wobei 150 4G und 150 5G Standalone Messungen durchgeführt wurden. Der Einsatz der 5G Standalone Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Vergleich zur 4G Technologie führt demnach zu einer Verringerung um 20,94 %. Dabei wurden die Durchschnittswerte der Messungen verglichen. In Abbildung 5.2 sind die Latenzzeiten grafisch als Säulendiagramm dargestellt.

Die Ergebnisse in tabellarischer Form sind auf Abbildung 5.3 zu sehen. In der Spalte *Prozentualer_Unterschied* wird farblich hervorgehoben, ob eine Verringerung um 25 % der Latenzzeit erreicht wurde. Deshalb ist der Wert des prozentualen Unterschieds in der Zeile *Messstandort 3* farblich grün (=Verringerung um mehr als 25 %) hervorgehoben und die restlichen Werte sind rot (=Verringerung um weniger als 25 %) hervorgehoben.

5.3 Interpretation der Ergebnisse

Der Einsatz der 5G Standalone Technologie konnte gegenüber der 4G Technologie die Latenzzeit um 20,94 % reduzieren. Daraus kann geschlossen werden, dass der Einsatz der 5G Standalone Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf im Mobilfunknetz von spusu ein sehr gutes Mittel ist, um die Latenz zu reduzieren. Dabei handelt es sich um die gesamten Durchschnittswerte an allen drei Messstandorten. Die Ergebnisse zeigen auch, dass an den unterschiedlichen Messstandorten im Wirtschaftspark

Untersuchungsumgebung	Latenzen_4G_in_Millisekunden	Latenzen_5G_in_Millisekunden	Prozentualer_Unterschied
Gesamt	27.17860	21.48770	-20.93890
Messstandort 1	28.23496	22.54567	-20.14978
Messstandort 2	22.61053	19.97462	-11.65792
Messstandort 3	30.69030	21.94280	-28.50249

Abbildung 5.3: Darstellung der Durchschnittswerte der 4G und 5G Standalone Latenzmessung je Technologie und je Messstandort im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf in tabellarischer Form. Daten: RTR-Netztest, Quelle: Eigene Darstellung

unterschiedliche Latenzzeiten zu erwarten sind. Gleichbleibend dahingehend ist, dass das 5G Standalone Netz an allen drei Messstandorten, im Vergleich zum 4G Netz niedrigere Latenzzeiten bietet. Ein möglicher Grund für die Unterschiede an den einzelnen Messstandorten könnte die Funkschnittstellen-Latenz sein. Diese hängt zum großen Teil von den lokalen Radiobedingungen ab. So wurde an Messstandort 2 nur eine Verringerung von 11,66 % ausgewertet und an Messstandort 3 wurde eine Verringerung der Latenzzeit gegenüber dem 4G Netz von 28,50 % ausgewertet. Auffallend ist, dass die ausgewerteten 5G Standalone Latenzzeiten an den drei Messstandorten innerhalb von drei Millisekunden liegen. Gleichbleibende Latenzzeiten sind vor allem für Anwendungen von Bedeutung, welche eine zuverlässige Zeitsynchronisation benötigen. Im Gegensatz dazu betragen die Unterschiede der ausgewerteten durchschnittlichen 4G Latenzzeiten an den unterschiedlichen Messstandorten in etwa acht Millisekunden. In absoluten Zahlen betrachtet, sind die 5G Standalone Latenzzeiten von rund 20 Millisekunden mindestens zehn Millisekunden davon entfernt, dass Anwendungen wie Platooning umsetzbar wären. Hierzu wird es weitere 5G Standalone Funktionen wie Network Slicing und/oder Multi-access Edge Computing (MEC) benötigen. Aktuell werden diese Technologien vom 5G Standalone Netz von spusu nicht unterstützt. Dennoch ist anhand der Ergebnisse erkennbar, dass die Latenzzeiten durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie verringert werden konnten.

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit der Hypothese

Die anfangs aufgestellte Hypothese lautet: Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führt gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf zu einer Verringerung der Latenzzeit um 25 Prozent. Es geht somit um die Frage, um wie viel Prozent die Latenzzeit durch den Einsatz der 5G Standalone Technologie gegenüber der 4G Technologie reduziert werden kann. Es wurde der prozentuale Unterschied in den Ergebnissen dieses Kapitels ermittelt. Damit ist eine fundierte Bewertung der Hypothese möglich.

5.5 Erkenntnisse

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mithilfe der 5G Standalone Technologie im Mobilfunknetz von spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf die Latenz gegenüber der 4G Technologie verringert wird. Weiters haben die Auswertungen anhand der Messstandorte gezeigt, dass die Verringerung gegenüber der 4G Technologie vom Standort im Wirtschaftspark abhängig ist. Die ausgewerteten 5G Standalone Latenzen waren an den unterschiedlichen Standorten bedeuten eine Verbesserung der Latenzsituation im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf im Mobilfunknetz von spusu.

Kapitel 6

Schlussfolgerungen

6.1 Beantwortung der Forschungsfrage

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen und der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik betrachtet, sowie die Ausarbeitung und Umsetzung eines Lösungsvorschlags festgehalten. Nach der Analyse der Ergebnisse kann nun die ursprünglich gestellte Forschungsfrage beantwortet werden: *In welchem Ausmaß führt der Einsatz der 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der Latenzzeit gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf?*

Die Ergebnisse im Abschnitt 5.2 haben gezeigt, dass der Einsatz der 5G Standalone Technologie gegenüber der 4G Technologie zu einer Reduktion der Latenzzeit um 20,94 % im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf führt. Somit kann die Forschungsfrage, in welchem Ausmaß es zu einer Verringerung der Latenzzeit gekommen ist, beantwortet werden. Die Forschungsfrage kann somit wie folgt beantwortet werden: **Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führt zu einer Verringerung der Latenzzeit im Ausmaß von 20,94 % gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf.**

6.2 Bewertung der Hypothese

Des Weiteren kann an dieser Stelle die zu Beginn gestellte Hypothese bewertet werden: *Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führt gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf zu einer Verringerung der Latenzzeit um 25 Prozent.*

Die Ergebnisse im Abschnitt 5.2 haben gezeigt, dass der Einsatz der 5G Standalone Technologie gegenüber der 4G Technologie zu einer Reduktion der Latenzzeit um 20,94 % im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf führt. Es handelt sich dabei um den Vergleich der Durchschnittswerte aller 4G und 5G Standalone Messungen im Wirtschaftspark. Aus diesem Grund kann gesagt werden, dass die Hypothese nicht bestätigt werden kann. Denn es hat sich herausgestellt, dass die Hypothese nicht auf die untersuchte Gesamt-Latenzsituation im

Wirtschaftspark zutrifft. Dafür wurde an einem bestimmten Standort (Messstandort 2) eine Verringerung der Latenz um 28,50 % festgestellt, wie in Abbildung 5.3 ersichtlich ist. Die Hypothese trifft somit nicht auf die ausgewertete Latenzsituation im gesamten Wirtschaftspark zu, sondern kann nur am Messstandort 2 bestätigt werden.

6.3 Nutzen der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die von spusu eingesetzte 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der eingesetzten 4G Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf führt. Dieses Wissen kann nun dazu verwendet werden, an weiteren Standorten, welche eine Verbesserung der Latenzsituation benötigen, 5G Standalone auszurollen. Anhand der Erkenntnisse der Grundlagen zu dem Thema ist erkennbar, dass das 5G Standalone Mobilfunknetz im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf nicht den Anforderungen für Anwendungen mit extrem niedrigen Latenzanforderungen (< 10 ms), wie das autonome Fahren oder Anwendungen aus dem Bereich des taktilen Internets (z. B. medizinische Eingriffe aus der Ferne) entspricht. Hier bedarf es weiterer Anpassungen des 5G Netzes von spusu. Die Messung der Latenzzeiten erfolgte als Round Trip Time, wobei das Mobilfunknetz sowie die Datenübertragung bis zum Server und wieder zurück, als eine Art Black-Box betrachtet werden kann. Somit lässt sich aus den Ergebnissen nicht eindeutig erschließen, an welchen Komponenten es Potenzial für weitere Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich der Latenz gibt. Anzumerken ist somit, dass die Latenz in den durchgeführten Messungen aus der Summe der Latenzen im Mobilfunknetz (inklusive der Verzögerungen im UE) und des Internet (inklusive Verzögerung beim Server) bestehen. Die 5G Standalone Technologie kann somit nur Einfluss auf die Latenz eines Teils der Datenübertragung nehmen, nämlich dem Teil des Mobilfunknetzes. Das bedeutet, es ist durchaus möglich und auch sehr wahrscheinlich, dass die angestrebte Latenz-Reduktion von 25 % im Mobilfunknetz erreicht wurde, jedoch nicht immer im Ende-zu-Ende Szenario.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, die folgende Forschungsfrage zu beantworten: *In welchem Ausmaß führt der Einsatz der 5G Standalone Technologie zu einer Verringerung der Latenzzeit gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf?* Für die Beantwortung der Forschungsfrage wurde das Forschungsdesign *Feldforschung* angewandt. Dabei wurde zuerst ein Konzept für die Untersuchung entwickelt, dass anschließend in die Praxis umgesetzt wurde.

Die in dieser Arbeit abgehandelte Untersuchung wurde im Wirtschaftspark A5 Mistelbach Wilfersdorf im 4G- und 5G Standalone Mobilfunknetz von spusu durchgeführt. Bei der Betrachtung der Latenz wurde die Round Trip Time mittels Ping (Pong) im 5G Standalone und im 4G Netz von spusu gemessen. Die Latenzzeitmessung ist mittels RTR-Netztest an drei verschiedenen Standorten im Wirtschaftspark durchgeführt worden, um ein möglichst gutes Abbild der Latenzsituation in der Untersuchungsumgebung zu erlangen. Anschließend standen die Messergebnisse als Open-Data für die Auswertung zur Verfügung. Es wurde der Durchschnittswert je Technologie ermittelt und mittels Säulendiagramm grafisch dargestellt. Ebenso wurden die Daten je Messstandort aufbereitet. Die Aufbereitung der Daten erfolgte mittels Programmiersprache R in R Studio. Ebenfalls in R berechnet wurde der prozentuale Unterschied der Durchschnittswerte der Latenzzeiten im 4G und 5G Standalone Mobilfunknetz von spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf. Die Unterschiede sind tabellarisch dargestellt und wurden für die Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen. Für die Beantwortung der Forschungsfrage wurden die Daten aller durchgeführten Messungen im Wirtschaftspark ausgewertet. Dabei handelt es sich um 300 Ping-Messungen, wobei 150 4G- und 150 5G Standalone Messungen durchgeführt wurden. Der Einsatz der 5G Standalone Technologie im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Vergleich zur 4G Technologie führt demnach zu einer Verringerung von 20,94 %. Die Hypothese, *Der Einsatz der 5G Standalone Technologie führt gegenüber der 4G Technologie im Mobilfunknetz des Mobilfunkanbieters spusu im Wirtschaftspark A5 Mistelbach-Wilfersdorf zu einer Verringerung der Latenzzeit um 25 Prozent.*, konnte somit nicht bestätigt werden.

7.2 Ausblick

Der erarbeitete Lösungsvorschlag kann in unterschiedlichen Mobilfunknetzen angewandt werden und ist standortunabhängig und könnte somit in weiteren Wirtschaftsparks oder anderen Standorten umgesetzt werden. Die Messungen der Latenzzeiten erfolgte als Round Trip Time, wobei das Mobilfunknetz sowie die Datenübertragungswege bis zum Server und wieder zurück, als eine Art Black-Box betrachtet werden kann. Eine zukünftige Arbeit könnte die einzelnen Latenzwege (Funkschnittstelle, Backhaul, Core, Internetübertragung) der Datenübertragung untersuchen. Hierzu bedarf es aber Zugang zu den einzelnen Komponenten, um Messungen an den einzelnen Datenübertragungspunkten durchführen zu können. In absoluten Zahlen betrachtet, sind die 5G Standalone Latenzzeiten von rund 20 Millisekunden noch mindestens 10 Millisekunden davon entfernt, um den Anforderungen von Anwendungen wie autonomes Fahren und taktiles Internet zu entsprechen. Hierzu wird es weitere 5G Standalone Funktionen wie Network Slicing und Multi-access Edge Computing (MEC) benötigen. Aktuell werden diese Technologien vom 5G Standalone Netz von spusu nicht unterstützt. Es würde sich anbieten, dass wenn eine dieser Funktionen verfügbar sind, dass die Untersuchung wiederholt wird.

Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] 3GPP. *Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15)*. TS. 2018 (siehe S. 15).
- [2] 3GPP. *Overall description (Release 15)*. TS. 2020 (siehe S. 15).
- [3] 3GPP. *Physical channels and modulation (Release 15)*. TS. 2020 (siehe S. 15).
- [4] 3GPP. *System Architecture for the 5G System (5GS)*. TS. 2022 (siehe S. 40).
- [5] „A1 Mobilfunk und Technik“ (2019) (siehe S. 3).
- [6] Mamta Agiwal, Abhishek Roy und Navrati Saxena. „Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey“. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18.3 (2016), S. 1617–1655 (siehe S. 6).
- [7] NGMN Alliance. „5G white paper“. *Next generation mobile networks, white paper 1.2015* (2015) (siehe S. 14).
- [8] BEREC. *Net Neutrality Regulatory Assessment Methodology, BoR (17) 178*. BEREC, 2017. URL: https://bereg.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/bereg/download/0/7295-bereg-net-neutrality-regulatory-assessme_0.pdf (siehe S. 28, 29).
- [9] Mobile Edge Computing. *Framework and Reference Architecture, document ETSI GS MEC 003*. 2019 (siehe S. 41).
- [10] Rebecca Copeland und Noël Crespi. „Resolving ten MVNO issues with EPS architecture, VoLTE and advanced policy server“. In: *2011 15th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*. IEEE. 2011, S. 29–34 (siehe S. 47).
- [11] Erik Dahlman u. a. „5G wireless access: requirements and realization“. *IEEE Communications Magazine* 52.12 (2014), S. 42–47 (siehe S. 14).
- [12] ao. Univ.-Prof. tit. Univ.-Prof. DI Dr. Erich Schikuta Dieter Brennsteiner B.A. *Netzwerke und verteilte Systeme*. 201907c. FernFH, 2019 (siehe S. 8).
- [13] Mohammed S Elbamby u. a. „Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality“. *IEEE Network* 32.2 (2018), S. 78–84 (siehe S. 14).
- [14] Ahmed Elbanna. *5G Status Studie–Herausforderungen, Standardisierung, Netzarchitektur und geplante Netzentwicklung*. Techn. Ber. WIK Diskussionsbeitrag, 2019 (siehe S. 39).

- [15] Ian Fette und Alexey Melnikov. *The websocket protocol*. 2011 (siehe S. 28).
- [16] zafaco GmbH. *Breitbandmessung Jahresbericht*. zafaco GmbH, 22. Apr. 2021. URL: https://download.breitbandmessung.de/bbm/Breitbandmessung_Jahresbericht_2019_2020.pdf (siehe S. 34–36).
- [17] zafaco GmbH. *Breitbandmessung Jahresbericht 2019/20 Material, Methoden und Datengrundlage*. zafaco GmbH, 20. Apr. 2021. URL: https://download.breitbandmessung.de/bbm/Breitbandmessung_Jahresbericht_Material_Methoden_Datengrundlage_2019_2020.pdf (siehe S. 35).
- [18] zafaco GmbH. *Technische Spezifikation der Breitbandmessung*. zafaco GmbH, 2021. URL: https://download.breitbandmessung.de/bbm/Technische_Spezifikation_der_Breitbandmessung.pdf (siehe S. 24, 28).
- [19] GSMA. *Network Experience Evolution to 5G*. GSMA, 2019. URL: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2020/02/Network-Experience-Evolution-to-5G_GSMA.pdf (siehe S. 24).
- [20] Christian Hahn. „5G Funkschnittstelle“. *Unpublished* (2021). URL: <https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.30733.20963> (siehe S. 14).
- [21] Gilbert Helmberg. „Optimale Wege—der Dijkstra-Algorithmus“. In: *77-mal Mathematik für zwischendurch*. Springer, 2020, S. 265–267 (siehe S. 26).
- [22] Yiming Huo, Xiaodai Dong und Wei Xu. „5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design“. *IEEE Access* 5 (2017), S. 13992–14010 (siehe S. 20).
- [23] *Internet Control Message Protocol*. RFC 792. Sep. 1981. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc792> (siehe S. 26).
- [24] *Internet Protocol*. RFC 791. Sep. 1981. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc791> (siehe S. 25).
- [25] Meenal G Kachhavay und Ajay P Thakare. „5G technology-evolution and revolution“. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 3.3 (2014), S. 1080–1087 (siehe S. 17).
- [26] Sumit Kasera und Nishit Narang. *3G Networks*. Tata McGraw-Hill Education, 2004 (siehe S. 8, 11).
- [27] Ashish Kurian. „Latency analysis and reduction in a 4G network“ (2018) (siehe S. 30, 37).
- [28] Bc Matej Kušnier. „Security issues of VoLTE and VoWiFi technologies“ (2019) (siehe S. 6).
- [29] Minseok Kwon. „A tutorial on network latency and its measurements“. *Enabling real-time mobile cloud computing through emerging technologies* (2015), S. 272–293 (siehe S. 24–27).
- [30] Mads Lauridsen u. a. „From LTE to 5G for connected mobility“. *IEEE Communications Magazine* 55.3 (2017), S. 156–162 (siehe S. 14).
- [31] P. Lawlor. „VR and AR pushing connectivity limits“ (2017) (siehe S. 30).

- [32] Juho Lee u. a. „5G standard development: technology and roadmap“. *Signal Processing for G 5* (2016), S. 561–576 (siehe S. 36).
- [33] Vasco und Maasern Christian Leidinger Christine und Seilmann. „5G – Evolution oder Revolution?“ *Whitepaper* (2019) (siehe S. 10).
- [34] Li Li, Arun G Mathias und Ben-Heng Juang. *Provisioning an embedded subscriber identity module*. US Patent 8,843,179. Sep. 2014 (siehe S. 20).
- [35] Martin Maier. „The Tactile Internet: where do we go from here?“ In: *Asia Communications and Photonics Conference*. Optical Society of America. 2018, Su4E–1 (siehe S. 29).
- [36] Mahesh K Marina und Samir R Das. „On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks“. In: *Proceedings ninth international conference on network protocols. ICNP 2001*. IEEE. 2001, S. 14–23 (siehe S. 26).
- [37] Igor Miladinovic, Sigrid Schefer-Wenzl und Heimo Hirner. „Curriculum of a Telecommunications Study Program—A Matter of Trends?“ In: *2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*. IEEE. 2019, S. 1–6 (siehe S. 6).
- [38] Igor Miladinovic u. a. „Multi-Access Edge Computing: An Overview and Latency Evaluation“. In: *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Bd. 1. IEEE. 2021, S. 744–748 (siehe S. 42).
- [39] Jürg Müller und Basil Ammann. „Was ein 5G-Moratorium für die Schweiz bedeuten würde“ (April 2020) (siehe S. 4).
- [40] B Murara. „imt-2020 network high level requirements, how african countries can cope“. In: *Retrieved from ITU website: https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/standardization/20170402/Documents/S2_4.%20Presentation_IMT*. Bd. 202020. 2017 (siehe S. 29).
- [41] Joel Olsson und Junior Asante. *5G Simulation Framework*. 2018 (siehe S. 11).
- [42] Imtiaz Parvez u. a. „A survey on low latency towards 5G: RAN, core network and caching solutions“. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.4 (2018), S. 3098–3130 (siehe S. 31, 32).
- [43] Milan Patel u. a. „Mobile-edge computing introductory technical white paper“. *White paper, mobile-edge computing (MEC) industry initiative* 29 (2014), S. 854–864 (siehe S. 41).
- [44] Klaus Pedersen u. a. „Agile 5G scheduler for improved E2E performance and flexibility for different network implementations“. *IEEE Communications Magazine* 56.3 (2018), S. 210–217 (siehe S. 16).
- [45] Larry Peterson und Oğuz Sunay. „5G mobile networks: A systems approach“. *Synthesis Lectures on Network Systems* 1.1 (2020), S. 1–73 (siehe S. 8–13, 17–22).
- [46] Quoc-Viet Pham u. a. „A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art“. *IEEE Access* 8 (2020), S. 116974–117017 (siehe S. 41).

- [47] Pawani Porambage u. a. „Survey on multi-access edge computing for internet of things realization“. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.4 (2018), S. 2961–2991 (siehe S. 41).
- [48] Mouadh Recioui. „master thesis: reducing latency in 5G networks“. Magisterarb. Okt. 2020 (siehe S. 23, 31, 32).
- [49] Justus Rischke u. a. „5G Campus Networks: A First Measurement Study“. *IEEE Access* 9 (2021), S. 121786–121803 (siehe S. 23, 37–39).
- [50] RTR-GmbH. *RTR Internet Monitor 2. Quartal 2021*. RTR, 17. Dez. 2021. URL: <https://exports.23degrees.io/jTZpcim5lw5Gcvv2-report-rtr-internet-monitor.pdf?v=1639400530593> (siehe S. 33, 34).
- [51] RTR-GmbH. *RTR Internet Monitor 3. Quartal 2021 (29.03.2022)*. RTR, 2022. URL: <https://exports.23degrees.io/RsBMk0WXG1wCMwtJ-report-rtr-internet-monitor.pdf?v=1645436946837> (siehe S. 24).
- [52] RTR-GmbH. *Telekom und Post Newsletter 04/2021 (20.12.2021)*. RTR, 2021. URL: https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/publikationen/Newsletter/TK_Newsletter_04_2021.pdf (siehe S. 33).
- [53] Dario Sabella u. a. „Mobile-edge computing architecture: The role of MEC in the Internet of Things“. *IEEE Consumer Electronics Magazine* 5.4 (2016), S. 84–91 (siehe S. 41).
- [54] Martin Sauter. *From GSM to LTE-advanced Pro and 5G: An introduction to mobile networks and mobile broadband*. John Wiley & Sons, 2017 (siehe S. 9, 19, 39).
- [55] Martin Sauter. *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*. Springer, 2018 (siehe S. 5, 10).
- [56] Frank Schaich u. a. „FANTASTIC-5G: 5G-PPP project on 5G air interface below 6 GHz“. In: *European Conference on Network and Communications*. 2015 (siehe S. 14).
- [57] M Series. „IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond“. *Recommendation ITU 2083* (2015), S. 21 (siehe S. 7).
- [58] Erfan Soltanmohammadi, Kamran Ghavami und Mort Naraghi-Pour. „A survey of traffic issues in machine-to-machine communications over LTE“. *IEEE Internet of Things Journal* 3.6 (2016), S. 865–884 (siehe S. 14).
- [59] Gábor Soós u. a. „Practical 5G KPI measurement results on a non-standalone architecture“. In: *Noms 2020-2020 IEEE/IFIP network operations and management symposium*. IEEE. 2020, S. 1–5 (siehe S. 38).
- [60] Martin Staudinger. *Grundlagen wissenschaftlichen Schreibens*. 2.6. FernFH, 2021 (siehe S. 44).
- [61] *Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects (Release 14)*. TS. 2017 (siehe S. 14).

- [62] Tarik Taleb u. a. „On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration“. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.3 (2017), S. 1657–1681 (siehe S. 40).
- [63] *Transmission Control Protocol*. RFC 793. Sep. 1981. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc793> (siehe S. 26).
- [64] Ulrich Trick. *5G: An Introduction to the 5th Generation Mobile Networks*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021 (siehe S. 4).
- [65] *User Datagram Protocol*. RFC 768. Aug. 1980. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc768> (siehe S. 26).
- [66] Shuo Wang u. a. „A survey on mobile edge networks: Convergence of computing, caching and communications“. *Ieee Access* 5 (2017), S. 6757–6779 (siehe S. 41).
- [67] D Warren und D Calum. „Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, GSMA Intelligence, 2014“. *Dostupnos: https://gsmaintelligence.com/research* () (siehe S. 6).
- [68] Dongzhu Xu u. a. „Understanding operational 5G: A first measurement study on its coverage, performance and energy consumption“. In: *Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. 2020, S. 479–494 (siehe S. 36, 37).

Online-Quellen

- [69] *3GPP About*. 23. Dez. 2021. URL: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp> (siehe S. 4, 23).
- [70] GSM Association. *VoLTE Service Description and Implementation Guidelines*. 2014. URL: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2014/10/FCM.01-VoLTE-Service-Description-and-Implementation-Guidelines-Version-2.0.pdf> (besucht am 28.02.2022) (siehe S. 18).
- [71] H. Ekström. *Non-standalone and Standalone: two paths to 5G*. URL: <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/7/standalone-and-non-standalone-5g-nr-two-5g-tracks> (besucht am 11.04.2022) (siehe S. 23).
- [72] Ericsson. *5G Systems*. URL: <https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g-systems.pdf> (besucht am 11.04.2022) (siehe S. 30).
- [73] *Erster 5G Wirtschaftspark in Österreich eröffnet*. 26. März 2021. URL: <https://www.spusu.at/files?f=Erster%205G%20Wirtschaftspark%20in%20%C3%96sterreich%20er%C3%B6ffnet.pdf> (besucht am 04.05.2022) (siehe S. 49).
- [74] Frédéric Firmin. *The Evolved Packet Core*. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core> (besucht am 28.02.2022) (siehe S. 18).
- [75] Wirtschaftspsychologische Gesellschaft. *Feldforschung und Laborstudien: Der Ort der Untersuchung*. URL: <https://wpgs.de/fachtexte/forschungsdesigns/feldforschung-laborstudien-ort-der-untersuchung/> (besucht am 06.05.2022) (siehe S. 45).

- [76] GIGABYTE. *5G MEC Networking Platform*. URL: <https://www.gigabyte.com/Solutions/5g-imec-networking-platform> (besucht am 01.05.2022) (siehe S. 40, 41).
- [77] GSMA. *5G MEC – Based Cloud Game Innovation Practice*. URL: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/5g-mec-based-cloud-game-innovation-practice/> (besucht am 03.05.2022) (siehe S. 42, 43).
- [78] *GSMA History*. URL: <https://www.gsma.com/aboutus/history> (besucht am 23.12.2021) (siehe S. 3).
- [79] Huawei. *huawei.com*. URL: <http://www.huawei.com/minisite/5g/en/touch-internet-5G.html> (besucht am 24.04.2022) (siehe S. 29, 30).
- [80] *R Studio*. URL: <https://www.rstudio.com/> (besucht am 15.05.2022) (siehe S. 56).
- [81] *RTR Frequenzversteigerungen*. URL: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/procedures/FRQ_procedures.de.html (besucht am 23.04.2022) (siehe S. 15).
- [82] *RTR Mobilfunktechnologien*. 23. Dez. 2021. URL: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/framework/mobile_technologies.de.html (siehe S. 3, 5, 6).
- [83] *RTR Spektrum 26 GHz*. URL: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/bands/26GHz/26GHz-band.de.html (besucht am 23.04.2022) (siehe S. 15).
- [84] RTR-GmbH. *Anhang 2 zur Konsultation zum Vergabeverfahren 700/1500/2100 MHz*. 20. Dez. 2018. URL: https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen/Konsultation_Vergabe_700_1500_2100_MHz_20122018_Anhang_Wettb.pdf (besucht am 10.05.2022) (siehe S. 47).
- [85] RTR-GmbH. *Ich habe Probleme mit der Messung der Signalstärke...* URL: https://www.rtr.at/TKP/service/rtr-nettest/help/test_result/netztestfaq_testergebnis_1600.de.html (besucht am 15.05.2022) (siehe S. 53).
- [86] RTR-GmbH. *RTR - Ist der Source Code verfügbar?* URL: https://www.rtr.at/TKP/service/rtr-nettest/help/technology/netztestfaq_technik_0600.de.html (besucht am 30.04.2022) (siehe S. 32).
- [87] RTR-GmbH. *RTR - Open Data*. URL: https://www.rtr.at/TKP/service/rtr-nettest/help/legal_aspects/netztestfaq_rechtlich_500.de.html (besucht am 30.04.2022) (siehe S. 33, 51).
- [88] RTR-GmbH. *RTR - Wie funktioniert der RTR Netztest?* URL: https://www.rtr.at/TKP/service/rtr-nettest/help/technology/netztestfaq_technik_0100.de.html (besucht am 30.04.2022) (siehe S. 32).
- [89] RTR-GmbH. *RTR Anbieterservice*. URL: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/anbieterservice/startseite.de.html (besucht am 30.04.2022) (siehe S. 27).
- [90] RTR-GmbH. *RTR Telekom Monitor Jahresbericht 2020*. URL: https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/procedures/5G_Frequenzvergabe_3_4-3_8GHz/5G-Auction-Outcome.de.html (besucht am 10.05.2022) (siehe S. 49).

- [91] Martin Sauter. *3GPP 5G NR – What’s the ‘g’ in gNB all about – Part 2*. 2016. URL: <http://web.archive.org/web/20080207010024/http://www.808multimedia.com/winnt/kernel.htm> (besucht am 28.02.2022) (siehe S. 11).
- [92] T. K. Sawanobori. *The Next Generation of Wireless: 5G Leadership in the U.S.* 2016. URL: https://www.ctia.org/docs/default-source/default-document-library/5g_white-paper_web2.pdf (besucht am 24.04.2022) (siehe S. 29).
- [93] Christoph Sölder u. a. *RTR Multithreaded Broadband Test (RMBT): Specification*. 2017. URL: https://www.netztest.at/doc/#_communication_protocol (besucht am 30.04.2022) (siehe S. 51, 52, 54).
- [94] *Wirtschaftspark Mistelbach-Wilfersdorf*. URL: <https://www.ecoplus.at/wirtschaftsparks/wirtschaftspark-mistelbach-wilfersdorf/#> (besucht am 04.05.2022) (siehe S. 48).
- [95] Dietmar Zlabinger. *LTE Forum*. 2020. URL: <https://www.lteforum.at/mobilfunk/rtr-netztest-karte-nicht-aussagekraeftig.16216/seite-2.html> (besucht am 30.05.2022) (siehe S. 52).

Messergebnisse im .csv-Format für die Weiterverarbeitung

Listing 1: Messergebnisse im .csv-Format für die Weiterverarbeitung

```
Technologie,Latenz,Messstandort
4G,23.997419,1
4G,29.901192,1
4G,29.939707,1
4G,29.946799,1
4G,27.389659,1
4G,23.468052,2
4G,29.413748,2
4G,18.007346,2
4G,17.089255,2
4G,25.074271,2
4G,24.515473,3
4G,24.908127,3
4G,26.565242,3
4G,27.427097,3
4G,50.035561,3
5G,19.981287,1
5G,32.888661,1
5G,19.951792,1
5G,19.980102,1
5G,19.926523,1
5G,19.986169,2
5G,19.926729,2
5G,19.976535,2
5G,19.969915,2
5G,20.013737,2
5G,29.933239,3
5G,19.934929,3
5G,19.983824,3
5G,19.936244,3
5G,19.925766,3
```


R-Skript für die statistische Auswertung

Listing 2: R-Skript für die statistische Auswertung der Messergebnisse .csv-Datei (.csv siehe 7.2)

```
1 #Einlesen der .csv
2 Messungen <- read.csv("4G5GMessdaten.csv")
3
4 #Subset an 4G Messungen
5 Messungen4G <- subset(Messungen, Technologie == "4G", select=c(Latenz,Messstandort))
6 #Subset an 4G Messungen je Messstandort
7 Messungen4G_1 <- subset(Messungen, Technologie == "4G" & Messstandort == 1, select=c
  (Latenz,Messstandort))
8 Messungen4G_2 <- subset(Messungen, Technologie == "4G" & Messstandort == 2, select=c
  (Latenz,Messstandort))
9 Messungen4G_3 <- subset(Messungen, Technologie == "4G" & Messstandort == 3, select=c
  (Latenz,Messstandort))
10
11 #Subset an 5G Messungen
12 Messungen5G <- subset(Messungen, Technologie == "5G", select=c(Latenz,Messstandort))
13 #Subset an 5G Messungen je Messstandort
14 Messungen5G_1 <- subset(Messungen, Technologie == "5G" & Messstandort == 1, select=c
  (Latenz,Messstandort))
15 Messungen5G_2 <- subset(Messungen, Technologie == "5G" & Messstandort == 2, select=c
  (Latenz,Messstandort))
16 Messungen5G_3 <- subset(Messungen, Technologie == "5G" & Messstandort == 3, select=c
  (Latenz,Messstandort))
17
18 #Latenz an 4G Messungen - Durchschnittsberechnung
19 mean_4G <- mean(Messungen4G$Latenz)
20 #Latenz an 4G Messungen je Standort - Durchschnittsberechnung
21 mean_4G_1 <- mean(Messungen4G_1$Latenz)
22 mean_4G_2 <- mean(Messungen4G_2$Latenz)
23 mean_4G_3 <- mean(Messungen4G_3$Latenz)
24
25 #Latenz an 5G Messungen - Durchschnittsberechnung
26 mean_5G <- mean(Messungen5G$Latenz)
27 #Latenz an 5G Messungen je Standort - Durchschnittsberechnung
28 mean_5G_1 <- mean(Messungen5G_1$Latenz)
29 mean_5G_2 <- mean(Messungen5G_2$Latenz)
30 mean_5G_3 <- mean(Messungen5G_3$Latenz)
31
32
33 #Erstellung Data.Frame je Technologie mit Durchschnittslatenzwerten
34 DFjeTechnologie <- data.frame(
35   technologie = rep(c("4G",
```

```
36         "5G")),
37   daten = rep(c("4G",
38               "5G")),
39   latenz = c(mean_4G,
40             mean_5G))
41
42 #Laden der Library für die Ploterstellung
43 library(tidyverse)
44
45 #Ausgabe Balkendiagramm je Technologie mit Durchschnittslatenzwerten
46 ggplot(data=DFjeTechnologie, aes(x=daten, y=latenz, fill=technologie))+
47   geom_bar(stat="identity",
48           position = position_dodge()+
49   geom_text(aes(label= round(latenz,2)), vjust=1.6, color="black",
50           position = position_dodge(0.9), size=3.5)+ xlab("") +
51   ylab("Latenz [ms]") +ggtitle("Durchschnittswerte 4G und 5G Standalone
   Latenzmessungen je Technologie")
52
53
54 #Erstellung Data.Frame je Technologie und je Messstandort mit
   Durchschnittslatenzwerten
55 DFjeTechnologieUndStandort <- data.frame(
56   technologie = rep(c("4G",
57                       "5G",
58                       "4G",
59                       "5G",
60                       "4G",
61                       "5G")),
62   daten = rep(c("Messstandort 1, 4G",
63               "Messstandort 1, 5G",
64               "Messstandort 2, 4G",
65               "Messstandort 2, 5G",
66               "Messstandort 3, 4G",
67               "Messstandort 3, 5G")),
68   latenz = c(mean_4G_1,
69             mean_5G_1,
70             mean_4G_2,
71             mean_5G_2,
72             mean_4G_3,
73             mean_5G_3))
74
75 #Ausgabe Balkendiagramm je Technologie und je Standort mit Durchschnittslatenzwerten
76 ggplot(data=DFjeTechnologieUndStandort, aes(x=daten, y=latenz, fill=technologie))+
77   geom_bar(stat="identity",
78           position = position_dodge()+
79   geom_text(aes(label= round(latenz,2)), vjust=1.6, color="black",
80           position = position_dodge(0.9), size=3.5)+ xlab("") +
81   ylab("Latenz [ms]") +ggtitle("Durchschnittswerte 4G und 5G Standalone
   Latenzmessungen je Technologie und je Messstandort")
82
83 #Prozentuale Veränderung berechnen
84 #Änderung in % = ((Endwert - Anfangswert) / Anfangswert ) * 100
85 prozentualeVeränderung4G5G <- ((mean_5G-mean_4G)/mean_4G)*100
86
87 #Prozentuale Veränderung berechnen je Standort
88 prozentualeVeränderung4G5G_1 <- ((mean_5G_1-mean_4G_1)/mean_4G_1)*100
89 prozentualeVeränderung4G5G_2 <- ((mean_5G_2-mean_4G_2)/mean_4G_2)*100
```

```
90 prozentualeVeränderung4G5G_3 <- ((mean_5G_3-mean_4G_3)/mean_4G_3)*100
91
92 #Erzeugung des Data.Frames für die grafische Darstellung
93
94 DFtable <- data.frame("Untersuchungsumgebung" = c("Gesamt",
95           "Messstandort 1",
96           "Messstandort 2",
97           "Messstandort 3"),
98   Latenzen_4G_in_Millisekunden = c(mean_4G,
99   mean_4G_1,
100  mean_4G_2,
101  mean_4G_3),
102  Latenzen_5G_in_Millisekunden = c(mean_5G,
103  mean_5G_1,
104  mean_5G_2,
105  mean_5G_3),
106  Prozentualer_Unterschied = c(prozentualeVeränderung4G5G,
107                               prozentualeVeränderung4G5G_1,
108                               prozentualeVeränderung4G5G_2,
109                               prozentualeVeränderung4G5G_3))
110
111 ###Grafische Darstellung im Tabellenformat
112 library(formattable)
113
114 #Formatierung für Spalte Prozentuale Veränderung
115 sign_formatter <- formatter("span",
116                             style = x ~ style(color = ifelse(x > -25, "red",
117                                                             ifelse(x < -25, "green",
118                                                             "black"))))
119
120 formattable(DFtable, list(
121   Untersuchungsumgebung = color_tile("transparent", "lightpink"),
122   Latenzen_4G_in_Millisekunden = color_bar("orange"),
123   Latenzen_5G_in_Millisekunden = color_bar("cyan"),
124   Prozentualer_Unterschied = sign_formatter))
```