

# **Transformation der Filmbranche durch 5G Mobilfunk**

## **Bachelor-Thesis**

zur Erlangung des wissenschaftlichen Grades Bachelor of Science  
(B.Sc.)

**Tim Hoffmann**

Matrikelnummer



Erstprüfer: Prof. Dr. Jan Mietzner

Zweitprüfer: Finn Jäger



Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Design, Medien und Information

Department Medientechnik

Studiengang Medientechnik

Hamburg, den 01.06.2022

# Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potential von 5G-Mobilfunklösungen für die Filmbranche im Detail beleuchtet werden. Dazu soll zunächst eine Recherche zu aktuellen Use Cases und den damit verbundenen Anforderungen erfolgen sowie aktuelle Lösungen basierend auf LTE(-A) dargestellt werden. Derzeitige Einschränkungen sollen auf Basis von Messungen mit verfügbaren Equipment aufgezeigt und zukünftig interessante Use Cases entwickelt und diskutiert werden. Dabei sollen die spezifischen Randbedingungen in der Filmbranche möglichst genau erfasst werden. Im zweiten Schritt soll dann eine Detailrecherche zum neuen 5G NR-Standard erfolgen, welche die für die Filmbranche relevanten technischen Neuerungen im Vergleich zu LTE(-A) aufzeigen soll. Abschließend soll eine Bewertung erfolgen, inwieweit 5G NR Verbesserungen bringen bzw. aufgrund neuartiger Use Cases einen Beitrag zur Transformation der Filmbranche leisten könnte. Mögliche Themen für neuartige Use Cases könnten im Bereich der Produktion Netzwerke am Set, Remote-Gerätesteuerung und Virtual Production, und im Bereich der Post-Produktion das Cloudbasierte Editing sein.

In this paper, the potential of 5G mobile communications solutions for the film industry will be examined in detail. For this purpose, current use cases and the associated requirements will be researched and current solutions based on LTE(-A) will be presented. Current limitations will be highlighted on the basis of measurements with available equipment, and interesting use cases for the future will be developed and discussed. In doing so, the specific boundary conditions in the film industry are to be recorded as precisely as possible. In a second step, a detailed research on the new 5G NR standard will be conducted, which will show the technical innovations relevant for the film industry in comparison to LTE(-A). Finally, an assessment will be made of the extent to which 5G NR could bring about improvements or contribute to the transformation of the film industry on the basis of novel use cases. Possible topics for novel use cases could be on-set networks, remote device control and virtual production in the production area, and cloud-based editing in the post-production area.

# INHALTSVERZEICHNIS

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>              | <b>5</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>                       | <b>7</b>  |
| 1.1 Motivation                            | 7         |
| 1.2 Aufbau der Arbeit                     | 7         |
| <b>2 Anforderungen für Film und Video</b> | <b>7</b>  |
| 2.1 Digitales Videosignal                 | 7         |
| 2.2 Codierung                             | 10        |
| 2.2.1 Vordierung                          | 11        |
| 2.2.2 Intermediate Codecs                 | 12        |
| 2.2.4 Raw Codecs                          | 14        |
| 2.3 Latenz                                | 15        |
| 2.3.1 Latenzursachen                      | 16        |
| 2.3.2 Jitter                              | 18        |
| 2.4 Netzwerkprotokolle                    | 19        |
| 2.4.1 SRT                                 | 20        |
| 2.4.2 Videostandards                      | 21        |
| 2.4.2.1 NDI                               | 22        |
| 2.4.2.2 TICO                              | 23        |
| 2.5 Setarbeit                             | 24        |
| <b>3 Aktuelle Use Cases</b>               | <b>26</b> |
| 3.1 Monitoring                            | 26        |
| 3.2 Streaming                             | 31        |
| 3.3 Filetransfer                          | 33        |
| <b>4 Grenzen von 4G Mobilfunk</b>         | <b>34</b> |
| <b>5 5G NR</b>                            | <b>37</b> |
| 5.1 Spektrum                              | 40        |
| 5.2 massive MIMO                          | 43        |
| 5.3 Networklicing                         | 46        |
| 5.4 Abdeckung                             | 47        |
| 5.5 Status                                | 48        |
| <b>6 Messung</b>                          | <b>50</b> |
| 6.1 Aufbau                                | 50        |
| 6.2 Hardware                              | 51        |
| 6.3 Software                              | 52        |
| 6.4 Durchführung                          | 53        |
| 6.4.1 Messreihe 1 (Unna Park)             | 54        |
| 6.4.2 Messreihe 2 (Neue Mitte Altona)     | 58        |
| 6.5 Probleme                              | 60        |

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| 6.6 Zusammenfassung der Messergebnisse              | 61        |
| <b>7 Uses Cases 5G New Radio</b>                    | <b>62</b> |
| 7.1 Camera to Cloud Production                      | 63        |
| 7.2 Monitoring                                      | 67        |
| 7.2.1 Monitoring mit Fernsteuerung                  | 67        |
| 7.2.2 5G vs Teradek Bolt                            | 70        |
| 7.2.3 Nachteile von Remotearbeit                    | 71        |
| 7.3 VFX                                             | 72        |
| <b>8 Fazit</b>                                      | <b>74</b> |
| <b>Abbildungs-, Tabellen- und Formelverzeichnis</b> | <b>76</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                         | <b>76</b> |
| <b>Anhang</b>                                       | <b>86</b> |

# Abkürzungsverzeichnis

|         |                                                    |
|---------|----------------------------------------------------|
| EBU:    | European Broadcasting Union                        |
| ITU:    | International Telecommunication Union              |
| HD:     | High Definition                                    |
| UHD:    | Ultra High Definition                              |
| HDR:    | High Dynamic Range                                 |
| RGB:    | Rot, Grün, Blau                                    |
| DCT:    | Discrete Cosine Transform                          |
| DCPM:   | Differential Pulse Code Modulation                 |
| ISO:    | International Standardization Organization         |
| IEC:    | International Electrotechnical Commission          |
| VLC:    | Variable Length Coding                             |
| JPEG:   | Joint Photographic Experts Group                   |
| DOP:    | Director of Photography                            |
| LOS:    | Line of Sight                                      |
| WHDI:   | Wireless HDMI                                      |
| MSB:    | Most Significant Bit                               |
| LSB:    | Least Significant Bit                              |
| DFS:    | Dynamic Frequency Selection                        |
| LDPC:   | Low Density Parity Check                           |
| 5G SA:  | 5G Standalone                                      |
| 5G NSA: | 5G Non Standalone                                  |
| 5G CN:  | 5G Core Network                                    |
| 5G RAN: | 5G Radio Access Network                            |
| MIMO:   | Multiple Input Multiple Output                     |
| eMBB:   | enhanced Mobile Broadband                          |
| URLLC:  | Ultra Reliable Low Latency Communication           |
| mMTC:   | massive Machine Type Communication                 |
| ETSI:   | European Telecommunications Standards Institute    |
| SMPTE:  | Society of Motion Picture and Television Engineers |
| SRT:    | Secure Reliable Transport                          |
| RTSP:   | Realtime Streaming Protocol                        |
| ISP:    | Internet Service Provider                          |
| DL:     | Downlink                                           |
| UL:     | Uplink                                             |

|       |                   |
|-------|-------------------|
| LOS:  | Line of Sight     |
| NLOS: | Non Line of Sight |
| RTT:  | Round Trip Time   |
| WAN:  | Wide Area Network |
| AC:   | Assistant Camera  |
| MP:   | Messpunkt         |
| AP:   | Accesspoint       |
| BS    | Basisstation      |

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Seit der Einführung digitaler Kameras gehen Fortschritte drahtloser Übertragungstechniken und neue Workflows im Filmbereich Hand in Hand. kabelgebundene Lösungen ermöglichten erstmals das Betrachten des Kamerabildes auf Monitoren. So wurde die gesamte Crew mehr in den Schaffungsprozess der Filmproduktion eingebunden. Neue Kanalcodierungsverfahren, MIMO und OFDM legten bald die Grundsteine für latenzfreie Videoübertragung über Funk und ermöglichte es an einigen Stellen auf Kabel zu verzichten. Die Arbeit am Set wurde effizienter und flexibler.

4G-LTE-Hochgeschwindigkeitsnetze haben Filmemachern bereits neue Möglichkeiten eröffnet, Daten zu übertragen und Filmmaterial vom Drehort zu teilen. Die Entwicklung zu 5G wird die Übertragungsgeschwindigkeiten drastisch erhöhen und die Latenzzeit auf ein fast nicht mehr wahrnehmbares Niveau senken, wodurch die Messlatte für die vernetzte Produktion höher gelegt wird.

Statt Proxies oder blockartig transkodierten Dateien könnten Rohdaten von der Kamera direkt in die Cloud gestreamt werden. Editing und VFX Arbeit kann während der Produktion stattfinden: "Fix it in Pre" statt "Fix it in Post".

5G Mobilfunk wurde 2019 in Deutschland eingeführt und es braucht einige Zeit bis die Infrastruktur ausgereift genug ist, aber die verfügbaren Datenraten steigen stetig. Die Vision für 5G ist Allgegenwärtigkeit. Schnelle Konnektivität, wo auch immer man hinget. Egal, ob man mit einem Kamerawagen eine Landstraße hinauf- und hinunterfährt oder einen Dokumentarfilm auf dem Bauernhof dreht. Niedrige Latenzzeiten im gesamten Netz, d. h. ein 1.AC kann den Fokus ziehen, ohne in der Nähe der Kamera zu sein. Und der sofortige Zugriff auf das Originalmaterial der Kamera bringt jedes autorisierte Teammitglied direkt mit ans Set.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 und 3 werden zunächst die videotechnischen Grundlagen erklärt sowie die Gegebenheiten der Filmproduktion beschrieben, die für diese Arbeit von Wichtigkeit sind. Kapitel 4 und 5 beinhalten eine Detailrecherche zu 4G und 5G Mobilfunktechnik und stellen diese gegenüber. Darauf folgt in Kapitel 6 eine Messung, die den aktuellen Status von kommerziell verfügbarem 5G Mobilfunk festhalten und 4G gegenüberstellen soll. Dafür werden die verwendete Hardware und Software vorgestellt und die wichtigsten Messergebnisse herausgearbeitet. Anschließend werden in Kapitel 7 die mögliche Entwicklungen in der Filmbranche durch 5G NR beleuchtet. Inhaltlich endet diese Thesis mit einem Fazit. In Abbildungs-, Literaturverzeichnis und Anhang befinden sich alle verwendeten Quellen, Abbildungen und zusätzliche Messergebnisse.



## 2 Anforderungen für Film und Video

### 2.1 Digitales Videosignal

Die Datenrate von digitalen Videosignalen wird durch mehrere technische Aufnahmeeigenschaften der Kameras bestimmt, von denen sie erzeugt werden. Moderne Film und Fernsehproduktionen werden heutzutage in verschiedenen Auflösungen aufgezeichnet. Von Full High Definition (FullHD - 1920x1080 Pixel) über Ultra High Definition 1 (UHD1 - 3840x2160 Pixel) bis hin zu Ultra High Definition 2 (UHD2 - 7680x4320) sind verschiedene Formate vertreten. Abhängig von Kameramodell und Sensorgröße sind Auflösungen oder Seitenverhältnisse möglich, die von den Standardformaten nach EBU abweichen. Kameraspezifische Bildformate, die durch die Sensorbauform bestimmt werden erweitern das Feld der möglichen Auflösungen, zumindest während der Produktion und Postproduktion. Für die Distribution wird meist eins der erstgenannten Formate gewählt wobei dort die Seitenverhältnisse 16:9 und 21:9 und die Standardauflösungen FullHD und UHD die gängigsten sind.

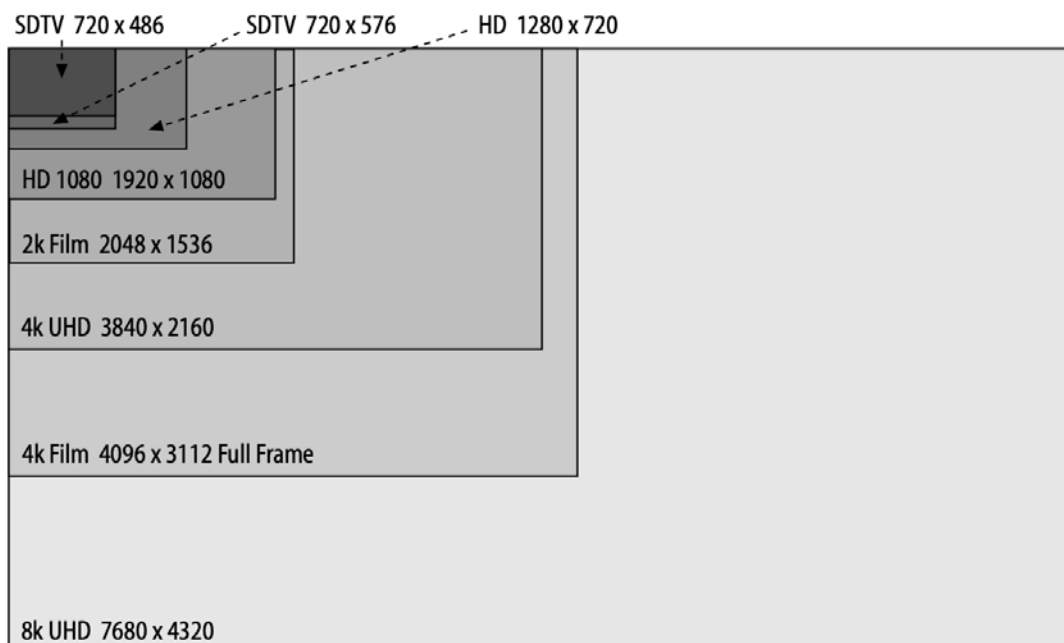


Abbildung 1: Verschiedene Bildauflösungen für Videosignale [1]

Die Amplitudenwerte von HD-Signalen werden mit 8 oder 10 Bit digitalisiert. Als Bildfrequenzen sind in ITU-R BT.709 die weltweit dominanten Bildwiederholraten

von 25 Bilder/s und 30 Bilder/s erlaubt. Hinzu kommen die in der Filmwelt gebräuchlichen 24 Bilder/s. Pro Bildpunkt gibt es typischerweise drei Farbkanäle in der Form RGB oder  $YC_R C_B$  (1 Luminanz und 2 Farbdifferenzkomponenten). Für die Abtastrate der Farbdifferenzkomponenten ist die Hälfte der Luminanzkomponenten erlaubt, ausgedrückt wird dies in der Bezeichnung 4:2:2. Für hohe Qualitätsansprüche kann auch im Verhältnis 4:4:4 abgetastet werden. In diesem Fall erfolgt keine Unterabtastung und die Datenrate ist um  $\frac{1}{3}$  höher als 4:2:2 [2]. Ein FullHD Signal (1920x1080 Pixel - mit Austastlücke 2200x1125 Pixel) mit 25 Vollbildern pro Sekunde, 10 Bit Quantisierung pro Pixel und einer Farbunterabtastung von 4:2:2 erzeugt laut EBU eine Netto-Datenrate von **1,04 Gbit/s** [3]. Die Brutto-Datenrate (mit Einbeziehung der Austastlücken) beträgt **1,24 Gbit/s**.

UHD1 ist in der ITU-R BT.2020 [4] definiert und beinhaltet die Verdoppelung der Bildauflösung gegenüber HD (UHD1) in beiden Bilddimensionen auf 3820x2160 Pixel, also die Vervierfachung der Bildpunkte insgesamt. UHD2 impliziert eine weitere Verdoppelung der Spalten- und Zeilenzahlen im Gegensatz zu UHD1 auf 7640x4320 Pixel, also eine Vervierfachung der Bildauflösung in jeder Dimension gegenüber FullHD. Für die Abtastwerte der Pixel sind bei UHD eine Quantisierung von 12 Bit und 10 Bit vorgesehen. Nach ITU-R BT.2020 sind die Muster für die Farbkomponenten 4:4:4, 4:2:2 und 4:2:0 erlaubt, also die volle Auflösung für alle Komponenten RGB/ $YC_R C_B$  oder eine Farbunterabtastung von  $YC_R C_B$  [4]. Ein UHD1 Signal hat bei 25 Vollbildern pro Sekunde, 10 Bit Abtastwerttiefe pro Pixel und einer Farbunterabtastung von 4:2:2 eine Netto-Datenrate von **4147,2 Mbit/s**, also das vierfache eines FullHD Signals. Für ein UHD2 Signal entsteht nochmal das vierfache an Datenrate - **16,5 Gbit/s**.

Da professionelle Kameras bei der Wahl von Bittiefe, Auflösung, Farbkomponentenunterabtastung und Bildwiederholfrequenz flexibel einstellbar sind, ergeben sich Kombinationen außerhalb der ITU-R Normen. Die resultierende Datenrate lässt sich wie folgt berechnen:

$$R = \text{Bildhöhe} \cdot \text{Bildbreite} \cdot \text{Farbtiefe} \cdot \text{Bildwiederholungsrate}$$

Formel 1: Datenrate R eines Videosignals

Die Farbtiefe pro Pixel berechnet sich aus der Wortbreite der Abtastwerte multipliziert mit den Farbkanälen pro Pixel (typischerweise 3 - RGB, bei zusätzlichem Alphakanal 4 - RGBA). Wenn eine Unterabtastung der Farbkomponenten erfolgt, werden nur noch die Hälfte ihrer Abtastwerte in horizontaler Richtung (4:2:2) oder zusätzlich die Hälfte ihrer Abtastwerte in vertikaler Richtung (4:2:0) verwendet. Dadurch sinkt folglich die Farbtiefe pro Pixel.

Mittels dem seriellen digitalen Interface (SDI), das in ITU-R BT.656 standardisiert ist, sind Übertragungen von unkomprimierten digitalen Videosignalen möglich. Zusätzlich dazu können Tonsignale und Zusatzdaten (Ancillary-Data) wie Timecode, Recording Flags und Metadaten innerhalb der Austastlücken der Videosignale übertragen werden. Zur Übertragung wird die Standardkoaxialleitung mit 75Ω Wellenwiderstand mit robusten Bayonett Neill Concelman (BNC) Steckern verwendet. Die Datenrate von SDI nach SMPTE 259M entspricht 270 Mbit/s. Aufgrund der höheren Anforderungen von HD, UHD1 und UHD2 wurde in den folgenden Standards für SDI an einer stetigen Erhöhung der Datenrate gearbeitet:

| Standard                    | Datenrate       |
|-----------------------------|-----------------|
| SMPTE 292M                  | 1485 Mbit/s [5] |
| SMPTE 424M (HD-SDI, 3G SDI) | 2970 Mbit/s [6] |
| SMPTE ST 2081 (6G SDI)      | 6 Gbit/s [7]    |
| SMPTE ST 2082 (12G SDI)     | 12 Gbit/s [8]   |

Tabelle 1: Datenraten verschiedener SDI Standards [5][6][7][8]

Die maximal mögliche Distanz der Übertragung einer SDI Übertragung richtet sich nach Dämpfungsgrad des verwendeten Kabels und seiner Grenzfrequenz. Da Kupferkabel bei höheren Frequenzen typischerweise eine höhere Dämpfung aufweisen, sinkt mit der übertragenen Datenrate die maximale Kabellänge. Für höhere Datenraten müssen deshalb Kabel mit geringerer Dämpfung eingesetzt werden, um eine praktikable Kabellänge erreichen zu können. Der mögliche Dämpfungsausgleich beträgt bei SDI 40 dB [1].

## 2.2 Codierung

Um auch Langstreckenübertragungen, Funkübertragung und Speicherung von Videodaten mit geringem Aufwand praktisch und wirtschaftlich realisieren zu können, müssen die unkomprimierten Videodaten einer Quellencodierung unterzogen werden. Hierfür werden diverse Techniken eingesetzt, um die Datenrate verlustfrei (Daten können bei der Decodierung perfekt rekonstruiert werden) oder verlustbehaftet zu reduzieren. Das Ziel dabei ist eine größtmögliche Reduzierung der Datenrate bei möglichst geringem Codieraufwand und möglichst geringen visuellen Qualitätseinbußen. Häufig steigt für eine niedrige Datenrate bei hoher visueller Qualität (Coding Efficiency) jedoch der Codieraufwand und damit der Zeitaufwand der Codierung.

Unterschieden wird dabei allgemein zwischen Redundanz-, Relevanz- und Irrelevanzreduktion. Bei professionellen Filmproduktionen ist für die initiale Speicherung und Sichtung häufig die bestmögliche Qualität bei geringem Codier- und Decodieraufwand gewünscht, um die technische Qualität der Aufnahmen bewerten zu können und eine Sichtung in Echtzeit zu garantieren. Am Anfang der Produktionskette sollte für die weiteren Schritte (Postproduktion, Distribution) die bestmögliche Qualität bereitgestellt werden, da sich etwaige Verluste auf dem Weg zur Distribution durch mehrere Codiergenerationen ggf. akkumulieren können [1]. Deshalb wird bei professionellen Filmproduktionen auf Codierungsverfahren gesetzt, die eine Redundanz- und/oder Irrelevanzreduktion durchführen (Intermediate Codecs).

Redundanzreduktion bezeichnet die Verwerfung von Daten, die im Original mehrfach vorliegen. Ein Standbild kann beispielsweise nur einmal übertragen werden, anstatt es mehrere Sekunden lang zu senden. Aus dem redundanzreduzierten Signal kann das Originalsignal ohne Informationsverluste rekonstruiert werden.

## 2.2.1 Vorcodierung

Irrelevanzreduktion bezeichnet die Verwerfung von Daten, wodurch für Betrachtende keine oder kaum wahrnehmbare visuelle Fehler erzeugt werden. Man spricht auch von “visually lossless” Codierung. Ein gängiges Beispiel ist die verminderte Auflösung der Farbdifferenzkomponenten gegenüber dem Luminanzsignal. Darüber hinaus kann abgewägt werden, ob beispielsweise ein 10 Bit-Signal auf 8 Bit reduziert werden kann, wodurch die Datenrate nochmal um 20% reduziert werden kann. Gerade bei HDR ist jedoch eine Quantisierung mit 10 oder sogar 12 Bit gewünscht.

Durch eine Unterabtastung der Farbdifferenzkomponenten - auf 4:2:2 statt 4:4:4, weglassen der Austastlücke und die Reduzierung von 10 Bit auf 8 Bit bei HD Signalen (von 12 Bit auf 10 Bit bei UHD Signalen) kann durch Vorverarbeitung mit geringem Rechenaufwand die Datenrate bereits um ca. die Hälfte reduziert werden. Die Abkürzung 1080p/25 beschreibt die vertikale Auflösung des Videosignals (1080 Pixel), die Art der Abtastung p (progressiv) und die Bildwiederholungsrate (25 Bilder/s).

| Verarbeitungsschritt                    | 1080p/25           | 2160p/25           | 4320p/25           |
|-----------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Datenrate bei 4:4:4 10 Bit (UHD 12 Bit) | 1,86 Gbit/s        | -                  | -                  |
| Datenrate ohne Austastlücke             | 1,55 Gbit/s        | 7,46 Gbit/s        | 29,86 Gbit/s       |
| <b>Datenrate 4:2:2</b>                  | <b>1,04 Gbit/s</b> | <b>4,98 Gbit/s</b> | <b>19,9 Gbit/s</b> |
| Datenrate bei 8 Bit (UHD 10 Bit)        | 0,83 Gbit/s        | 4,15 Gbit/s        | 16,59 Gbit/s       |
| Datenrate 4:2:0                         | 0,62 Gbit/s        | 3,1 Gbit/s         | 12,44 Gbit/s       |

Tabelle 2: Datenraten verschiedener Videoauflösung nach Vorverarbeitungsschritten [1]

Durch Algorithmen wie DCT (Discrete Cosine Transform), Wavelet-Transformation, DPCM (Differential Pulse Code Modulation) und anschließender Redundanzcodierung mittels VLC (Variable Length Coding) sind Reduktionsfaktoren von **50:1** möglich [1]. Darüber hinaus werden visuelle Fehler jedoch immer deutlicher sichtbar und ggf. aus ökonomischen Gründen (wenig

verfügbare Bandbreite/ Speicherplatz) in Kauf genommen. Sobald die visuelle Qualität sichtbar leidet, wird dies als Relevanzreduktion bezeichnet, die jedoch eher bei der Distribution und nicht im professionellen Produktionsumfeld anzutreffen ist [1].

### 2.2.2 Intermediate Codecs

Intermediate-Standards werden innerhalb der Signalkette zwischen Akquisition und Distribution verwendet und weisen eine sehr geringe, rein intraframebasierte Datenreduktion auf, um die Signalqualität bei angemessener Datenreduktion nicht sichtbar zu verschlechtern (visually lossless). Häufig werden diese auch als Aquisitionscodec genutzt, um bei der Produktion bereits von den niedrigeren Datenraten und dadurch weniger verbrauchtem Speicherplatz zu profitieren. Bis zu welcher Datenreduktion von einem Visually Lossless Codec gesprochen werden kann ist in der ISO/IEC 29170-2 [9] festgelegt und wird durch einen sogenannten Flickertest bestimmt. Originalbild sowie die komprimierte Kopie werden dabei übereinander gelegt. Für Betrachtende eröffnet sich dadurch die Möglichkeit zwischen beiden Bildern hin und her wechseln. Sobald Betrachtende einen Unterschied wahrnehmen, ist das komprimierte Bild nicht mehr visually lossless.

Die Datenreduktion liegt typischerweise zwischen 2:1 und 6:1 bis zu 10:1. Zu den Hauptvertretern von Intermediate-Codecs gehören ProRes von der Firma Apple und DNxHD von Avid. Beide arbeiten nur mit Intra-Frame codierten Bildern und sind sehr latenzarm. Vor allem der ProRes Standard hat sich als Aufnahme-Codec etabliert und kann bei vielen professionellen digitalen Videokameras (Arri, Red, Sony) als Aufnahmeformat verwendet werden. ProRes unterstützt unterschiedlichste Auflösungen von 720x486 bis 8K, 12-Bit Quantisierung und Farbräume nach ITU-R BT.2020. ProRes 4444 und ProRes 4444 XQ unterstützen zusätzlich zu Luminanz- und den 2 Farbkomponenten einen Alphakanal mit 16 Bit.

| Format                | ProRes 422 LT | ProRes 422 | ProRes 422 HQ | ProRes 4444                   | ProRes 4444 XQ                |
|-----------------------|---------------|------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Bittiefe              | 10 Bit        | 10 Bit     | 10 Bit        | 12 Bit<br>(16 Bit Alphakanal) | 12 Bit<br>(16 Bit Alphakanal) |
| Sampling              | 4:2:2         | 4:2:2      | 4:2:2         | 4:4:4:4                       | 4:4:4:4                       |
| Bitrate<br>(1080p/25) | 85 Mbit/s     | 122 Mbit/s | 184 Mbit/s    | 275 Mbit/s                    | 413 Mbit/s                    |
| Bitrate<br>(2160p/25) | 342 Mbit/s    | 492 Mbit/s | 737 Mbit/s    | 1106 Mbit/s                   | 1659 Mbit/s                   |

Tabelle 3: Datenraten verschiedener ProRes Varianten [10]

JPEG XS ist ein vom JPEG Committee entwickelter Standard für „visually lossless“, „low latency“ und „low complexity“ Codierung, der als intermediate Codec im AV-Markt vorgesehen ist [11]. Die Hauptfeatures des Standards sind eine subjektiv verlustfreie Komprimierung bei Reduktionsraten bis 10:1, eine Latenzzeit von 2-32 Videozeilen im Vergleich zu unkomprimierten Videodaten und ein sehr geringer Rechenaufwand, für die Integration auf CPU, GPU, ASIC oder FPGA. Verschiedene Profile des Codecs unterstützen 4:2:0, 4:2:2 und 4:4:4 sowie bis zu 12 Bit Farbtiefe pro Pixel. Der Codec bietet bei den meisten Bildinhalten eine bessere oder ähnliche Bildqualität wie ProRes bei niedriger Komplexität und Codierungslatenz [11].

## 2.2.4 Raw Codecs

Eine weitere Form der Erstellung von Videosignalen, ist serielle unveränderte Auslesung von den Digitaldaten des Kamerasensors. Diese Rohdaten, auch Raw, liegen nicht in 4:2:2 oder 4:4:4 vor, sondern in einem Farbmuster, das nach dem Bayer-Pattern oder ähnlichen Mustern bestimmt ist. Dadurch ergibt sich pro Pixel nur ein einziger Abtastwert mit entsprechender Quantisierung (12 Bit bei ArriRaw, 16 Bit bei RedCode Raw). Außerdem sind diese Daten weder Gamma vorverzerrt, noch verstärkt und ohne Weißabgleich. Um Raw Daten darstellen zu können, muss das Bayer-Pattern zu einem konventionellen RGB Bild konvertiert werden.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R | G | R | G | R | G | R | G |
| G | B | G | B | G | B | G | B |
| R | G | R | G | R | G | R | G |
| G | B | G | B | G | B | G | B |
| R | G | R | G | R | G | R | G |
| G | B | G | B | G | B | G | B |
| R | G | R | G | R | G | R | G |
| G | B | G | B | G | B | G | B |

Bayer pattern

|     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |
| RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB | RGB |

Conventional RGB

Abbildung 2: Bayer Pattern im Vergleich zu Full RGB [10]

Einen gute technische Bildqualität bieten Codecs, die Raw Kameradaten mit Redundanz- und Relevanzreduktion kombinieren. Herstellerabhängige Formate wie ArriRaw in Verbindung mit HDE (High Density Encoding) von der Firma Arri, REDCODE RAW von der Firma Red und BRAW von Blackmagic Design konkurrieren mit dem herstellerübergreifenden Codec ProRes RAW. Alle greifen auf unterschiedliche Codierungsmethoden zurück, um die Datenrate der rohen Sensordaten zu reduzieren. ArriRaw HDE verwendet dabei ausschließlich Redundanzreduktion, Redcode Raw und ProRes Raw hingegen Relevanzreduktion mittels DWT (Discrete Wavelet Transform) [14] [15] [17].



|                                     | ArriRaw HDE<br>(12 Bit) [14] | REDCODE RAW<br>(16 Bit) [15] | ProRes RAW [17]          |
|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Höchste<br>Qualitätsstufe<br>UHD    | 1554 Mbit/s<br>(3,8K)        | 1272 Mbit/s<br>(2:1)         | ca. 622 Mbit/s<br>(4:1)  |
| Niedrigste<br>Qualitätsstufe<br>UHD | -                            | 112 Mbit/s<br>(22:1)         | ca. 355 Mbit/s<br>(7:1)  |
| Höchste<br>Qualitätsstufe<br>HD     | 860,2 Mbit/s<br>(2,8K)       | 320 Mbit/s<br>(2K, 2:1)      | ca. 155 Mbit/s<br>(7:1)  |
| Niedrigste<br>Qualitätsstufe<br>HD  | -                            | 24 Mbit/s<br>(2K, 22:1)      | ca. 88,9 Mbit/s<br>(7:1) |

Tabelle 4: Vergleich der Datenraten verschiedener RAW-Codecs

Die Performance von Bildcodierungsverfahren mittels DCT oder DWT ist vom Bildinhalt abhängig. Um mögliche Qualitätsverluste bei anspruchsvollen Bildinhalten zu vermindern, nutzen viele Videocodierungsverfahren eine Codierung mit variabler Datenrate.

Die EBU definiert die minimalen Eigenschaften für hochwertige HDTV Produktionen in EBU R132. So sollte die Farbunterabtastung nicht unter 4:2:2, die Farbtiefe sollte mindestens 10 Bit betragen und es sollten nur progressive Bilder verwendet werden. Als Kompression werden all-I Codecs mit mindestens 100 Mbit/s Datenrate empfohlen, um visuelle Artefakte zu vermeiden [17].

## 2.3 Latenz

Latenz beschreibt die Zeit, die ein Video- oder Audiosignal benötigt, um ein System oder Gerät zu durchlaufen. Die Anforderungen für die Latenz bei Videoübertragungen sind vor allem produktionsintern und für bestimmte Anwendungen sehr hoch. Laut [18] wird ein visuelles Feedback zwischen 20-42 ms nach dem Drücken eines Knopfes als ein simultan eintretendes Ereignis wahrgenommen. Bis zu einer Latenz von 70 ms gibt es zudem keinen signifikanten Unterschied, ob ein visuelles Feedback gleichzeitig mit dem Tastendruck wahrgenommen wird.

Welche Video-Verzögerungen bei latenzkritischer Arbeit wie Focus Pulling, Drohnen- und Remoteheadsteuerung oder Stunt Koordination vertretbar sind, ist nicht klar definiert. Um anwendungsspezifische Aussagen treffen zu können wären Studien nötig, die die vertretbare Latenz für diese Anwendungen untersuchen. Durch bisher genutzte Übertragungstechniken wie SDI, welches gewissermaßen latenzfrei ist oder gängige Funksysteme für die Videoübertragung lässt sich auf jedoch auf die Ansprüche schließen. Die Bolt Serie der Firma Teradek versucht beispielsweise die Latenz für Codierung und Luftschnittstelle so gering wie möglich zu halten. Geworben wird mit einer Latenz von <1 ms [31]. Wobei sich diese nur auf die Funkübertragung bezieht und keine Ende zu Ende Latenz darstellt. Diese kann durch Komponenten wie die Kamera (Debayering, Framerate) und das Display (Inputlag, Refreshrate) höher ausfallen. Als Ziel wird häufig eine end-to-end Latenz von unter einem Frame genannt, die dann abhängig von der Bildrate 40 ms (25 fps) oder 20 ms (50 fps) betragen kann.

Für eine Verteilung der Videosignale auf Monitore zu KundInnen, Crew und Regie kann die Latenz höher sein. Sollte aber dennoch, zumindest für Arbeiten mit Zwei-Wege-Kommunikation (zB. Kommunikation mit SchauspielerInnen), nach [82] niedrig gehalten werden (<150ms).

### 2.3.1 Latenzursachen

Durch jedes Gerät in der Signalkette, komplexe Codier- und Decodiervorgänge oder ungeeignete Netzwerkprotokolle sowie -infrastrukturen kann die Latenzzeit erhöht werden. Eine typische end-to-end Latenz setzt sich aus folgenden Verzögerungszeiten zusammen. [19]

- Codierung  $T_{Enc}$ : Die Datenreduktion verursacht je nach Art und Stärke der Reduzierung eine Latenz. Codecs wie JPEG XS können mit einer Latenz von wenigen Videozeilen arbeiten (Mikrosekunden Bereich). Distributionscodecs (AVC, HEVC, VVC, AV1, VP9 etc.) besitzen bei steigender Effizienz bzw. Generation, eine immer höher werdende Kodierzeit [20]

- Transport  $T_{Tx}$ : Die Übertragung von Daten über Funk oder Netzwerk benötigt eine Verarbeitung seitens des Senders.
- Decodierung  $T_{Dec}$ : Wie die Codierung benötigt auch die Decodierung eines komprimierten Datenstroms eine gewisse Zeit.

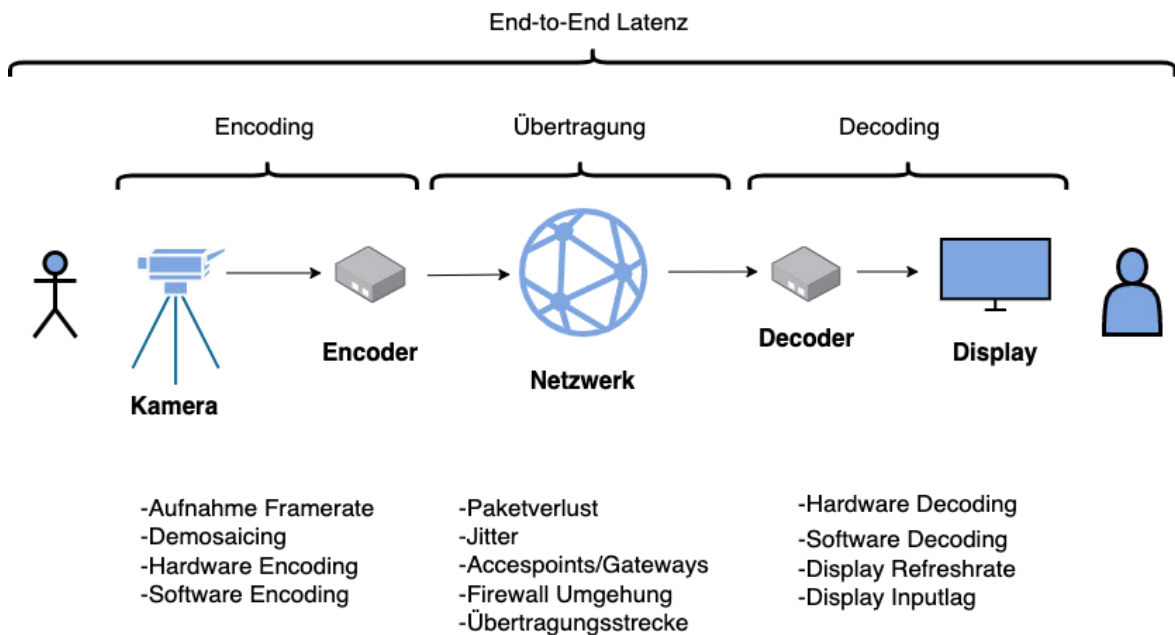


Abbildung 3: End-to-End Latenz einer Videoübertragung und mögliche Ursachen

Die gesamte Latenz  $T_{ges}$  des Signalwegs ergibt sich aus der Summe der einzelnen Latenzkomponenten des Systems  $T_{Ges} = T_{Enc} + T_{Tr} + T_{Dec}$ . Durch die Natur einer Videoaufnahme (Aufnahme in einzelnen Bildern) entsteht bei 25 fps Bildwiederholungsrate und 60 Hz Refreshrate des Monitors bereits bis zu  $T_{Rec} + T_{Dis} = 40\text{ ms} + 16,67\text{ ms} = 56,67\text{ ms}$  Latenz zwischen Ereignis und Betrachtung. Bezogen auf [18], dürfen dann von den restlichen Latenzursachen (Codierung, Übertragung, Decodierung) nur noch 13,33 ms Latenz in das System gegeben werden. Ab welcher Latenz bestimmte Arbeiten bei Filmproduktionen beeinträchtigt werden, ist jedoch nicht festgelegt. Für die Steuerung von Geräten (Follow Focus, Drohnen, Remote Heads, U-Arm) wird durchaus eine end-to-end Latenz angestrebt, die subjektiv nicht wahrnehmbar ist. Die Latenz von bei einem Telefon- bzw Videotelefoniegespräch (mouth-to-ear delay) sollte laut ITU-T G.114

150 ms nicht übersteigen. Für Monitoring ohne direkten Bezug zu den Dreharbeiten (Livestream Monitoring, Broadcasting) kann die Latenz entsprechend höher sein.

### 2.3.2 Jitter

Jitter beschreibt in digitalen Systemen Zeitbasisschwankungen bzw. zeitliche Abweichungen vom Takt. Bei digitalen Übertragungstechniken wie SDI führt Jitter zu einem Symbolübersprechen, welches in Extremfällen dazu führen kann, dass Symbole nicht mehr eindeutig ausgelesen werden können. In Netzwerken wird auch die Varianz der Netzwerklatenz zwischen IP-Paketen (Packet Delay Variation) als Jitter bezeichnet [21].

Besonders bei Echtzeit-Übertragungen wie Voice- oder Video-over-IP spielt Netzwerkjitter eine wichtige Rolle. In einem Netzwerk ohne Jitter kommen alle Pakete in der richtigen Reihenfolge beim Empfänger an und können Taktgerecht digital-analog gewandelt werden. Benötigen aufeinanderfolgende Pakete unterschiedlich viel Zeit (Latenz), um beim Empfänger anzukommen, kann es passieren, dass Daten, die später gesendet wurden, früher gesendete Daten überholen und deswegen verworfen werden müssen. [22]

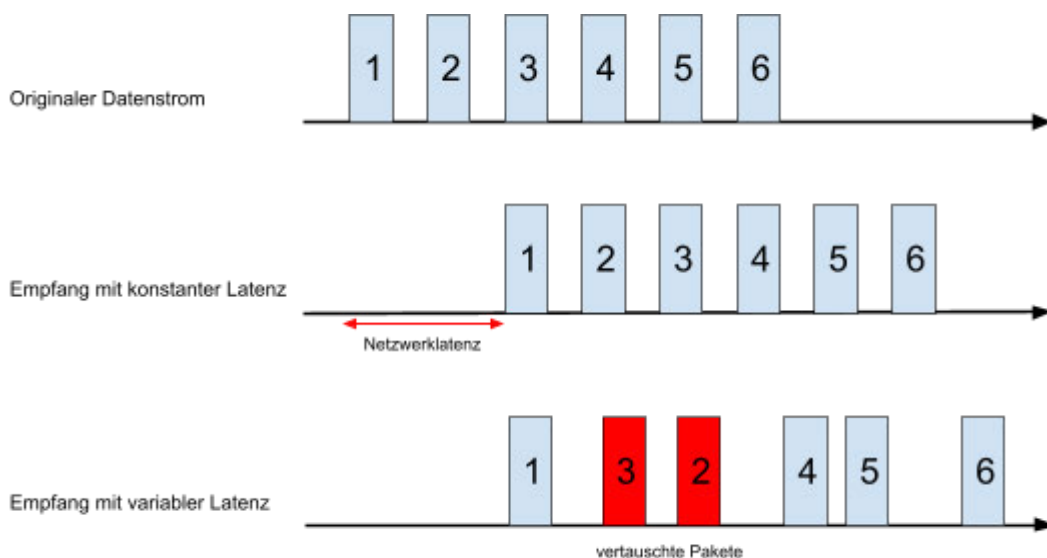


Abbildung 4: Auswirkungen von Jitter auf IP-Pakete

Insbesondere bei WAN (Wide Area Networks) entsteht Jitter hauptsächlich dadurch, dass Knotenpunkte (z.B. Router) kurzzeitig ausgelastet sein können

(Congestion) und Pakete in der Verarbeitungsreihenfolge hinten angestellt oder ganz verworfen werden müssen.

Da WAN durch die Nutzer nicht kontrollierbar sind, müssen Protokolle Abhilfe schaffen, die den vorhandenen Jitter kompensieren. Protokolle wie RTP [23] versehen einzelne IP Pakete mit Nummern und Zeitstempel, um sie im Falle vom Empfang in falscher Reihenfolge wieder richtig anordnen zu können. Die Anwendung muss, um sich diese Nummerierung zu Nutze zu machen, einen Jitter Buffer integrieren. Der Jitter Buffer verzögert das Playback um eine gewisse Zeit  $t_d$ , um die Anordnung von vertauschten Paketen zu gewährleisten und auf zu späte Pakete zu "warten". Je länger  $t_d$  ist, desto mehr Jitter kann kompensiert werden. Gleichzeitig steigt dann die Latenz um  $t_d$ . [22]

## 2.4 Netzwerkprotokolle

Datennetze sind heutzutage ein essentieller Bestandteil von Studioinstallationen und Broadcastanwendungen. Sie werden einerseits zu Steuerung und Administration von Geräten genutzt, andererseits als Übertragungsmedium für Video- und Audiodaten. Während bei Filmproduktionen SDI-Kabel und dedizierte Videofunksysteme mit direkter Funkverbindung Industriestandard sind, benötigt ein zukünftiger Übergang zu 5G oder Wifi Übertragungen Netzwerklösungen, die die gleiche oder mehr Sicherheit, Verlässlichkeit, Mobilität und Flexibilität bieten, um als Alternative akzeptiert werden zu können.

Als Anwendung lässt sich grundsätzlich zwischen dem einfachen Filetransfer und der Echtzeitübertragung (Streaming) unterscheiden. Beim Filetransfer kommt es hauptsächlich auf die fehlerfreie Übertragung an. Deshalb wird dafür das Transportprotokoll TCP verwendet. Bei solchen asynchronen Übertragungen können fehlerhafte Datenpakete neu versendet werden, bis eine Datei vollständig angekommen ist.

Die Echtzeitbezogene (synchrone) Übertragung hat besondere Anforderungen an die Übertragungslatenz, -sicherheit und Taktstabilität [1]. TCP und UDP alleine sind als Transportprotokolle für eine sichere Übertragung von Video- und

Audiodaten in Echtzeit ungeeignet. Die Neuversendung von verlorenen Paketen durch TCP ist für den Dateiaustausch essentiell. Bei synchronen Übertragungen wie Livestreaming, würde der Einsatz von TCP zu hohen Latenzen durch viel Overhead und das benötigte Buffering führen [83]. UDP alleine ist als Transportprotokoll zu unsicher, da die Verbindung beim IP-Rerouting kurzzeitig aussetzen kann und Paketverluste zu störenden Bildaussetzern führen [84].

Deshalb gibt es heutzutage einen Fächer an Protokollen auf der Anwendungsschicht, die TCP oder UDP als Basis verwenden und eine zuverlässige Übertragung von Videodaten über IP-Netzwerke gewährleisten sollen. Beispiele dafür sind: RTMP, RTSP, HTTP Live Streaming, MPEG-DASH, CMAF for DASH, Adobe HDS, SRT oder WebRTC.

#### 2.4.1 SRT

SRT ist ein OpenSource Video-Transport-Protokoll, das von Haivision entwickelt wurde. Es versucht die gleichen Verbindungs- und Kontrolleigenschaften wie TCP zu bieten. Es befindet sich in der Anwendungsschicht mit UDP als Basis in der Transportschicht. Dadurch können Paketverluste ausgeglichen werden, bei vergleichsweise niedriger Latenz (default: 120 ms). Zudem gibt es ähnliche Methoden für erhöhte Zuverlässigkeit wie bei TCP: eine Verbindungsherstellung zwischen zwei TeilnehmerInnen (Caller & Listener), Sequenznummern, Acknowledgments, Negative Acknowledgements, sowie Paket Neu-Übermittlung [24].

Abseits von dem Verbindungsaufbau durch "Caller" und "Listener", gibt es den Rendezvous-Modus. Hierdurch kann eine direkte Verbindung zwischen zwei Geräten auch hinter mehreren Firewalls hergestellt werden. Das ist vor allem praktisch bei Außenberichterstattungen, wenn ein Sender (Kamera) nur eine Mobilfunkverbindung hat und keine Geräte wie Switcher, Ü-Wagen, oder andere Verbindungsmöglichkeiten vor Ort existieren [25].

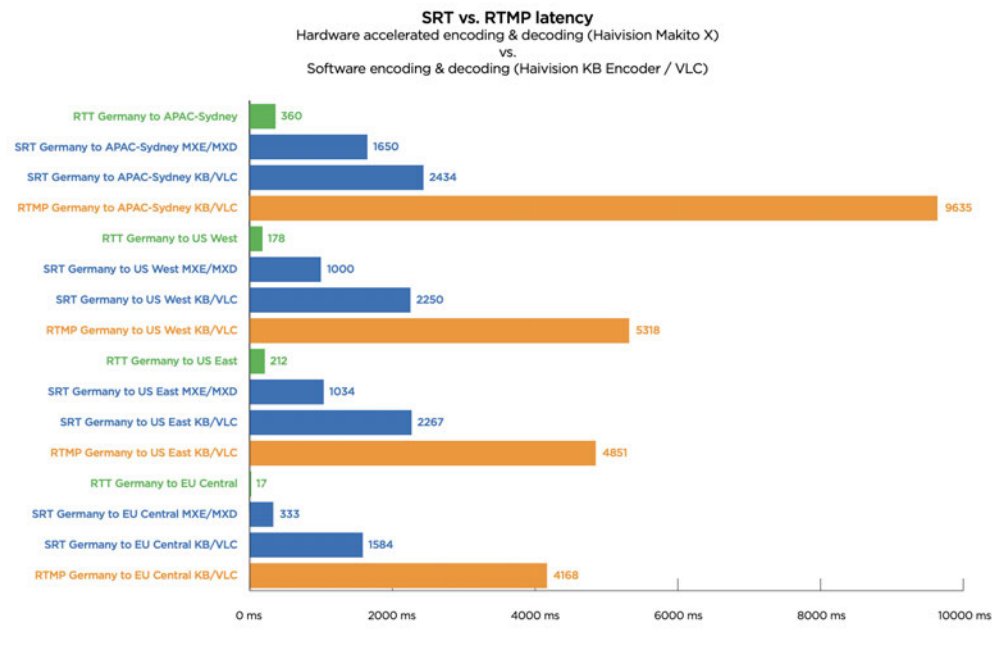


Abbildung 5: Vergleich End-to-End Latency mit Hardware- und Software Encoding & Decoding, SRT vs. RTMP sowie RTT [26]

Im Vergleich zu RTMP, einem auf TCP basierenden Streaming Protokoll, können mit SRT eine Latenz-Reduktion (end-to-end) von >2:1 erreicht werden. Bei Hardware Encoding ist diese sogar noch geringer, wobei die Latenzreduktion dann durch geringere Codierungszeit zustande kommt. [26]

## 2.4.2 Videostandards

Obwohl unkomprimierte Videosignalübertragungen über IP-Netzwerke technisch möglich und realisierbar sind, ist der ökonomische Faktor nicht zu vernachlässigen. Während HD-Signale in Netzwerken relativ günstige 10 GbE Schnittstellen benötigen, werden für UHD1- und UHD2-Signale (vor allem bei Mehrkamera-Produktionen) teure 25 GbE, 40 GbE oder 100 GbE Schnittstellen benötigt.

Für komprimierte Übertragungen spricht, dass Daten bei reiner Redundanzreduktion mathematisch perfekt rekonstruiert werden können und bei Relevanzreduktion (visually lossless compression) subjektiv kein Unterschied zwischen Originalbild und dem komprimierten Bild erkennbar ist.

#### 2.4.2.1 NDI

NDI ist ein lizenzoffener Standard für netzwerkbasierte sowie komprimierte Videosignalübertragungen bei (semi-)professionellen Anwendungen. Insbesondere für kleinere Installationen und Livestreaming konnte sich der Standard etablieren. NDI benötigt keine dedizierte Hardware und kann in gängige PC-Systeme (Windows, Mac OS) implementiert werden. Die Erkennung von Signalquellen und -senken erfolgt durch multicast Domain Name System (mDNS) vollautomatisch. Dadurch ist die bei NDI benötigte Hardware, im Vergleich von SMPTE ST-2110 günstiger, und in der Konfiguration sowohl zeitsparender und einfacher, was abermals die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.

NDI stellt diverse Programme zur Verwaltung von NDI-Systemen kostenfrei zur Verfügung. So ermöglicht der "NDI Access Manager" die Verwaltung von Geräten, Signalen und Signalgruppen und "NDI Bridge" die Verbindung der NDI Quellen von physisch getrennten Netzwerken.

Full NDI nutzt ausschließlich intraframebasierte Datenreduktion mit einem Reduktionsfaktor von ca. 15:1. Es unterstützt laut NewTek alle Auflösungen und Framerates. NDI ist also formatunabhängig und unterstützt eine Farbtiefe bis zu 16 Bit mit bei einer Farbunterabtastung von bis zu 4:4:4. Der für NDI genutzte Codec SpeedHQ hat laut NewTek eine Codier-/Decodierlatenz von 16 Videozeilen, mit Hardwareimplementation sogar nur 8 Zeilen, bei einem PSNR von 70 dB [29]. Der Standard unterstützt zudem eine Übertragung mittels TCP oder UDP und seit Version 5 Reliable UDP.

NDI | HX und NDI | HX2 bieten eine ähnliche Videoqualität wie NDI, bei reduzierter Datenrate durch interframe Kompression. Sie sind für Anwendungen vorgesehen bei denen wenig Bandbreite verfügbar ist.



| Format   | Maximale Datenrate Full NDI | Maximale Datenrate NDI   HX |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1080p/25 | 105 Mbit/s                  | 9,6 Mbit/s                  |
| 1080p/50 | 125 Mbit/s                  | 14,2 Mbit/s                 |
| 2160p/25 | 158 Mbit/s                  | 19,1 Mbit/s                 |
| 2160p/50 | 223 Mbit/s                  | 26,8 Mbit/s                 |

Tabelle 5: Verschiedene Datenrate von NDI [29]

#### 2.4.2.2 TICO

Der Hersteller intoPIX bietet mit seinem Standard TICO eine produktionstaugliche Möglichkeit der datenreduzierten Videoübertragung über SDI oder Netzwerk. Die erste Generation des TICO Codecs wurde von der SMPTE unter der Bezeichnung RDD 35 registriert. RDD35 basiert für Netzwerkübertragung auf SMPTE 2022-6 in Verbindung mit einer Datenreduktion durch Wavelet-Transformation. Der für die SDI und IP Übertragung bei Broadcast-Liveproduktionen entwickelte Codec ermöglicht eine visuell verlustlose Datenreduktion von 4:1. Dadurch kann ein UHD1 Signal bis zu 2160p/60 über eine einzige 3G-SDI Verbindung übertragen werden. Bei Netzwerkübertragungen können mehrere UHD1 Signale über eine 10 GbE Schnittstelle gesendet werden [30].

TICO unterstützt Bildauflösungen bis 10240 x 10240 Pixeln bei einer Farbtiefe von bis zu 12 Bit und 120 Bildern pro Sekunde. Dabei wird entweder 4:2:2, 4:4:4 (YCbCr) oder 4:4:4 (RGB) als Farbabtastung unterstützt und der Codec arbeitet ausschließlich mit progressiven Signalen [1].

TICO XS ist die zweite Generation des Übertragungsstandards und verwendet zur Datenreduktion den nach ISO/IEC 21122 definierten Standard JPEG XS und als Transportmechanismus SMPTE ST-2110-22.

| Format   | Datenrate       | Streams pro 10 GbE |
|----------|-----------------|--------------------|
| 1080p/30 | 70-195 Mbit/s   | 50-140             |
| 1080p/60 | 150-390 Mbit/s  | 25-66              |
| 2160p/30 | 250-750 Mbit/s  | 13-40              |
| 2160p/60 | 500-1400 Mbit/s | 7-20               |

Tabelle 6: Verschiedene Datenraten von TICO XS [76]

## 2.5 Setarbeit

Filmproduktionen haben als Use Case für Datenübertragungen besondere Anforderungen an Mobilität, Flexibilität, Sicherheit sowie Verlässlichkeit von Funk- und Kabelübertragungen.

Arbeiten am Set werden vor allem durch zwei Dinge bestimmt: Zeit und Geld. Beides sind begrenzte Ressourcen, die beispielsweise durch das festgesetzte Budget für die Produktion, verfügbares Tageslicht, die Einhaltung gesetzlicher Arbeitszeiten, Genehmigungen für Drehorte oder andere äußere Faktoren bestimmt werden. Das Ziel der verschiedenen Arbeitspositionen einer Filmproduktion ist es, alle möglichen Mittel für Regie und DOP bereitzustellen, damit ihre künstlerische Vision innerhalb der vorgeetzten Zeit und mit dem begrenzten Budget umgesetzt werden kann.

Die daraus resultierenden Anforderungen an die eingesetzten Geräte werden im Folgenden vorgestellt:

- **Zuverlässigkeit:** Ausfälle der Geräte können eine Verzögerung für das gesamte Team bedeuten. Deshalb ist es wichtig, dass die benutzte Technik sehr zuverlässig und im Falle eines Fehlers Einstellungsmöglichkeiten sowie Statusinformationen bietet, um diesem auf den Grund zu gehen und ihn schnell zu beheben. Um Ausfälle noch besser zu verhindern, kann wie bei Broadcast Anwendungen Redundanz in der Signalkette eingebaut werden [1].

- **Schnelles Setup:** Da es an Drehtagen meist wenig Vorbereitungs- und Aufbauzeit gibt ist es wichtig, dass die Geräte schnell und mit wenig Aufwand an den Drehort gebracht und funktionsfähig gemacht werden können. Bei Umbauphasen ist es umso wichtiger, dass diese in der vorgegebenen Zeit bewerkstelligt werden können, da die restliche Crew sonst warten muss und sich Verzögerungen über den Tag akkumulieren können.
- **Flexibilität:** Die Vielfalt der möglichen Drehorte und Bildgestaltungstechniken führen zu besonderen Flexibilitätsanforderungen für die eingesetzte Technik. Innenbereiche zeichnen sich vor allem durch wenig Platz und viele Hindernisse und Reflexionen bei Funkübertragungen aus, dafür gibt es typischerweise geringe Distanzen und Drehstromanschlüsse für die Stromversorgung und Internetanschlüsse. Außenbereiche haben häufig LOS, brauchen aber Akkus zur Stromversorgung, müssen weitere Distanzen überbrücken und sind allen Wetterbedingungen ausgesetzt.  
Die kreative Arbeit von Regie und DOP kann außerdem ungeplante Szenen oder Einstellungen entstehen lassen. Deshalb müssen Geräte besonders flexibel und modular sein und zusätzlich mit allen gängigen Kameras und ihren Ausgabeformaten kompatibel sein.
- **Größe:** Anbauten an Kameras, Fahrzeugen, Monitoren oder Drohnen müssen möglichst klein sein, um die Arbeit nicht einzuschränken und mit wenig Aufwand angebaut werden zu können.
- **Sicherheit:** Übertragungssysteme für Filmproduktionen müssen abhörsicher und verschlüsselt sein, da das Endprodukt vor der Veröffentlichung nicht gesehen werden darf. Besonders wichtig ist dies bei Werbespots für Produkte, die während der Produktion noch nicht auf dem Markt sind.

- **Kosten:** Die Kosten müssen gering genug sein, dass die Geräte innerhalb des Produktionsbudgets verliehen werden können. Gleichzeitig können Produktionsfirmen dazu bereit sein, einen höheren Preis zu bezahlen, wenn die Systeme einen gewissen Mehrwert für die Produktion bieten, oder einen gewünschten Use Case abdecken.

## 3 Aktuelle Use Cases

Die aktuellen Use Cases für die Video-Signalübertragung bei Filmsets können aufgeteilt werden in das Monitoring am Set und immer häufiger vorkommendem Streaming des Kamerabildes an Personen außerhalb des Sets. Für die Durchführung und die Überwachung beider Anwendungen ist der/die VideooperatorIn zuständig.

Für die Signalverteilung am Set sind 2 Technologien verbreitet. Der SDI Standard für Kabelübertragungen und dedizierte Videofunksysteme für Funkübertragung. IP basierte Übertragung wird im Broadcast Bereich und vereinzelt bereits bei Filmproduktionen verwendet [1].

### 3.1 Monitoring

Bei Videofunksystemen hat sich besonders die Bolt Serie der Firma Teradek durchgesetzt, die heute an jedem größeren professionellen Filmset anzutreffen ist.

Teradek Bolt basieren auf der von Amimon entwickelten WHDI (Wireless Home Digital Interface). Sie nutzen OFDM und MIMO in Kombination mit einer Form des Joint Source Channel Coding (JSCC). Dafür werden 20 oder 40 MHz Kanäle im Bereich von 5 GHz für die Übertragung von Full HD oder 4K Videosignalen genutzt. Sender und Empfänger werden jeweils als einzelne Geräte hergestellt und im Multicast Verfahren betrieben. Abhängig vom Modell kann ein Sender zwischen 6 und unbegrenzt viele Empfänger auf einer maximalen Entfernung von 230 m, 460 oder >1500 m (750ft, 1500ft, 5000ft+) mit einem Signal versorgen [31].



Abbildung 8: Teradek Bolt Funkstrecke [31]

Das JSCC (Joint Source Channel Coding) des WHDI (Wireless HDMI) Standards macht sich zu Nutze, dass bei einem Videosignal nicht alle Informationen gleichwertig relevant für eine hochwertige Darstellung sind. Dadurch entsteht eine Hierarchie, wobei die most significant bits (MSBs) eines Pixels den least significant bits (LSBs) übergeordnet werden. Zudem sind die tieferen Bildfrequenzen wichtiger als die höheren Bildfrequenzen und die Luminanzkomponenten wichtiger als die Chrominanzkomponenten. Während traditionelle Funksysteme alle Informationen mit dem gleichen Fehlerschutz versehen, bekommen die relevanteren Informationen bei WHDI einen besseren Fehlerschutz als die weniger wichtigen. So werden beispielsweise MSBs, hohe Bildfrequenzen und Luminanzkomponenten mit besserer Kanalcodierung (lower rate) übertragen. Weiterhin werden die wichtigen Komponenten mit engeren Symbol-Konstellationen, auf OFDM-Trägern mit besserem SNR sowie mit Space-Time-Coding (Diversity Gain) gesendet [32].

Diese Art der Übertragung bietet einige Vorteile:

- **Sehr geringe Latenz:** Die Latenz für die Funkübertragung, kann durch JSCC und wenig Verarbeitung auf  $<1$  ms gehalten werden.
- **Kleine Geräte:** Durch die niedrige Codierkomplexität, Simplex-Kommunikation und geringe Sendeleistung, können die Geräte klein gehalten werden. Dadurch lassen sie sich einfach an Kameras oder Monitoren anbringen, ohne bei der Arbeit zu stören.
- **Zuverlässigkeit:** Durch die JSCC in Verbindung mit OFDM und MIMO, entsteht eine robuste Funkverbindung. Bei traditionellen Systemen bei denen eine feste, an die Kanalkapazität angepasste Bitrate eingestellt wird, kann die Verbindung bei zu hoher Fehlerrate abbrechen. Mit JSCC können die wichtigsten Informationen (MSB, Luminanz, tiefe Frequenzen) bei schlechteren Kanaleigenschaften immer noch fehlerfrei übertragen werden. Dadurch sinkt zwar mit SNR die Bildqualität ein Monitoring ist jedoch immer noch möglich.

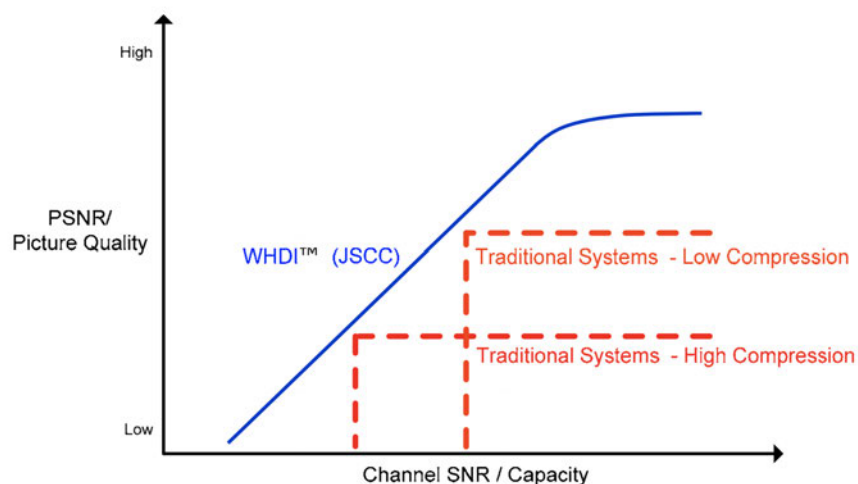


Abbildung 9: Bildqualität in Abhängigkeit zum SNR, WHDI vs. traditionelle Videofunk-Systeme

Während das Design der Teradek Funksysteme sehr effizient für eine Videodatenübertragung ist und sie in den meisten Fällen aufgrund der oben genannten Vorteile am Set die beste Wahl sind, gibt es auch einige Nachteile.

- **Frequenzzuteilung:** Teradek Bolt nutzen für die Übertragung die in Deutschland verfügbaren ISM-Bänder, die jedoch einigen Einschränkungen unterliegen. Die im 5,15-5,725 GHz Bereich verfügbaren Bandbreiten müssen mit Wlan Geräten, Wetterradar und militärischen Anwendungen geteilt werden [77]. Den letzteren beiden Anwendungen muss im Extremfall über DFS ausgewichen und neue Kanäle ausgewählt werden. In DFS Kanälen dauert eine neue Kanalwahl mindestens eine Minute [78]. Zusätzlich ist die Sendeleistung bei diesen Frequenzen auf 20 mW beschränkt. Die Frequenzen im 5 GHz Bereich führen, vor allem bei Filmproduktionen, zu Problemen. Da der Sender meistens direkt an der Kamera befestigt ist, die sich häufig zwischen 1-1,8 m Höhe befindet, wird das Signal oft durch zwischen Sender und Empfänger stehende Menschen absorbiert. Durch die Absorptionseigenschaften dieser Frequenzen von Wasser und Wandmaterialien wird die Verbindungsqualität durch Regen, Nebel, Wälder und bei Innendrehn ohne LOS verschlechtert [79].
- **Antennen:** Die mitgelieferten Dipolantennen senden nur linear polarisierte Wellen [80]. Im Optimalfall stehen alle Antennen an Sender und Empfänger orthogonal zum Boden, um die Richtcharakteristik der Dipolantennen auszunutzen und eine gleiche Polarisation an Sende- und Empfangsantenne zu gewährleisten. Da der befindliche Sender aber oft geneigt wird, kann es passieren, dass die Sendeantennen nicht mehr in die gleiche Richtung wie die Empfangsantennen zeigen und ein Signalschwund durch unterschiedliche Polarisation entsteht. Um diesem Effekt entgegenzuwirken vertreibt Teradek Antennen mit horizontaler Polarisierung, mit denen man Sender und Empfänger ergänzen kann. Verbesserungen bringt auch der Einsatz von Richtantennen mit höherem Antennengewinn, für weite Übertragungsstrecken mit LOS oder zirkular polarisierte Antennen, die den Mehrwegeempfang verbessern [33].

- Reichweite:** Die Reichweite von Teradek Bolt reicht für eine Signalübertragung innerhalb des Sets, wenn LOS besteht in den meisten Fällen aus [31]. Es kann aber häufig passieren, dass einzelne Szenen etwas weiter weg vom eigentlichen Setup, bspw. in einer Parallelstraße oder im Vorgarten statt im Garten eines Hauses, passieren. Wenn in diesen Fällen kein LOS besteht oder die Entfernung zu groß ist, müssen neben dem gesamten Monitoring auch die Funkgeräte umgebaut werden. Ggf. müssen neue Kabel verlegt oder die VTR-Station verschoben werden. Bei kurzen Umbauzeiten, kann dies zu Verzögerungen oder bei Arbeit unter Zeitdruck zu Fehlern führen.

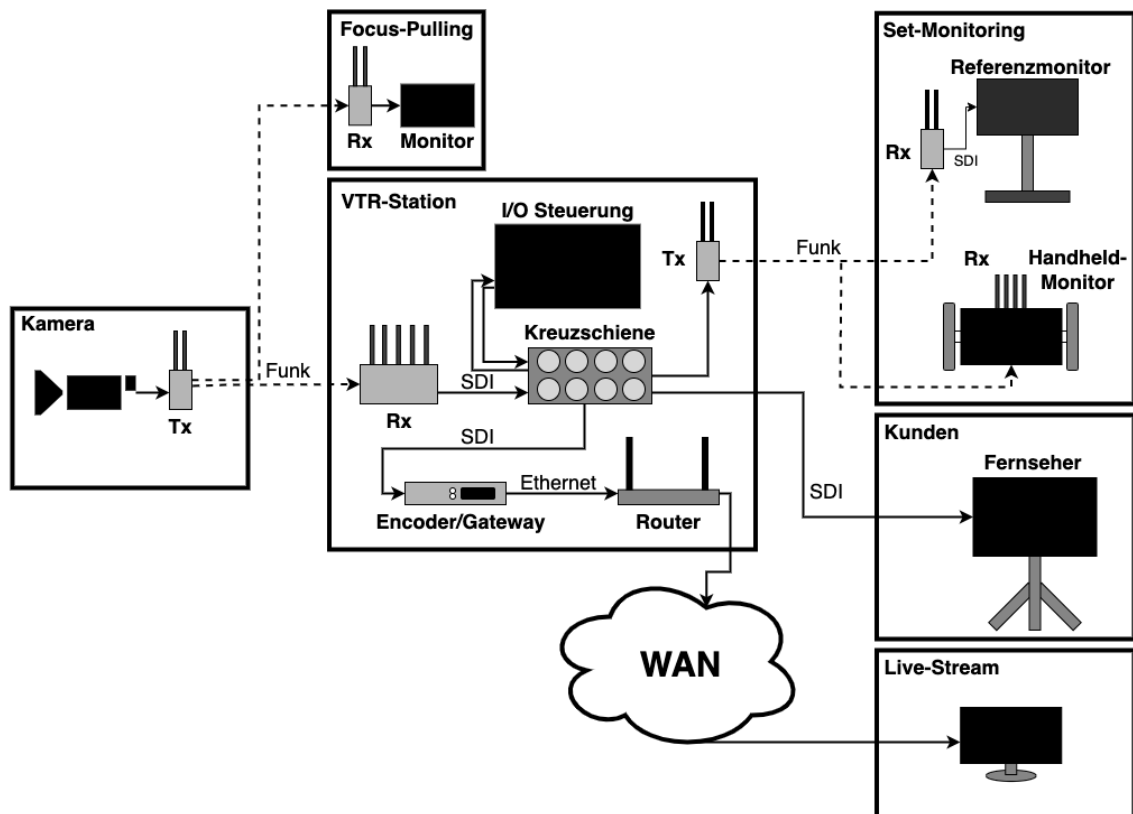


Abbildung 10: Beispielaufbau des Monitorings an einem Filmset mit Teradek Funkstrecken



## 3.2 Streaming

Um große Distanzen (außerhalb der Reichweite der Videofunksysteme) zu überbrücken oder um Personen in die Produktion einzubinden, die sich nicht vor Ort befinden, muss für die Bereitstellung eines Kamerabildes auf eine Streaming-Lösung zurückgegriffen werden. Die Verbindung kann über eine Anbindung an ein WAN (Wide Area Network), durch Wifi, Kabel, Glasfaser oder Mobilfunk umgesetzt werden.

Beim Streaming wird aufgrund von niedrigen UL und DL Datenraten auf Distributionscodecs mit hoher Kompression zurückgegriffen. In Studios kann auf die verfügbare Internetverbindung über Kabel oder Wlan zurückgegriffen werden. Für Drehorte ohne eine fest installierte Internetanbindung bietet Mobilfunk die Chance, trotzdem ein Streaming bereitzustellen. Datenrate, Latenz, Zuverlässigkeit und damit die Qualität des Videostreams werden dann durch die Mobilfunksituation am Set bestimmt. Die verfügbare Downloadrate der Internetverbindung der Betrachtenden muss jedoch auch berücksichtigt werden.

Die aktuell (2022) erreichbaren Uplink Datenraten über LTE können sehr unterschiedlich sein. Laut einer Studie der Firma Open Signal, betragen die durchschnittlichen Upload Datenraten für Mobilfunk in Deutschland 2021 bei 9,6 Mbit/s (Vodafone), 10,4 Mbit/s (Telefonica) und 13,1 Mbit/s (Telekom) [34]. Die Datenrate der Mobilfunkverbindung kann, durch schlechte Abdeckung, Fading, Pfadverlust oder Zellauslastung deutlich niedriger ausfallen.

Die Downloadraten von Kabel- oder Glasfaseranschlüssen sind vertragsabhängig. So gibt es typischerweise Anschlüsse von 16-1000 Mbit/s [85]. Wenn das Endgerät über Wifi mit einem Wlan verbunden ist, kann Fading, Abstand zum Router, Dämpfung durch Wände innerhalb des Gebäudes oder eine hohe Anzahl von Endgeräten zu viel niedrigeren Datenraten führen. Daher sollten Empfänger eines Videostreams entweder über Ethernet mit dem Internet verbunden sein, oder für eine ausreichende WiFi Verbindung sorgen.

Aufgrund dieser Datenraten in Uplink beim Sender und Downlink beim Empfänger, müssen heutzutage beim Streaming über Mobilfunk Distributionscodecs (H.264/AVC) mit hoher Kompression ( $<50:1$ ) eingesetzt werden. H.264/AVC bietet einen Kompromiss aus Rechenaufwand und Codiereffizienz bei gleichzeitig universeller Clientunterstützung. Neuere Codecs wie HEVC, AV1 oder VVC bieten eine höhere Codiereffizienz als H.264 (Faktor 2-4), benötigen dafür aber mehr Rechenaufwand und werden noch nicht universell von Endgeräten oder Anwendungen unterstützt. Ein Full HD Signal erzeugt mit H.264 im Main Profil auf Level 4 maximal 20 Mbit/s [1]. Die Videodaten sollten über geeignete Protokolle wie RTMP oder SRT übertragen werden. Durch die Datenreduktion mittels Interframe-Codierung ist es wichtig, genügend Buffer für die erneute Übermittlung von verlorenen Paketen einzuplanen. Denn sonst kann es zu starken Bildartefakten kommen, wenn I- oder P-Frames am Empfänger für die Decodierung nicht bereitstehen.

Eine große Herausforderung beim Streaming über öffentliche Mobilfunknetze ist es, vor allem in einer professionellen Umgebung genügend Zuverlässigkeit zu garantieren. In der Festlegung "Technische-Produktions-Richtlinien-Fernsehen" wird deshalb bei Übertragungen über öffentliche Mobilfunknetze ohne QOS (Quality of Service) die Anwendung von Netzwerkbonding empfohlen [81]. Ein 5G Streaming Router der Firma TVU aggregiert bspw. die Verbindungen von bis zu 6 Modems mit 5G Empfang. Das Gerät ist für Broadcasting und öffentliche Sicherheitsanwendung konzipiert und wurde bei den Olympischen Winterspielen 2022 in China für die Videodatenübertragung verwendet [35].

Solche Bonding Router sind sehr kostenintensiv und können möglicherweise das Budget von kleineren Filmproduktionen übersteigen. Dafür gibt es All-in-One Lösungen wie VidiU Go der Firma Teradek, womit Ethernet, Wlan und bis zu 2 LTE Modems verbunden verwendet werden können. Diese Streaming Lösung agiert gleichzeitig als Encoder und Gateway, kann SDI oder HDMI als Input verarbeiten und über RTMP an einen Server streamen [36].

### 3.3 Filetransfer

Für den Datenaustausch ist eine besonders sichere Verbindung wichtig. Deshalb kommt dort das Transportprotokoll TCP zum Einsatz. Damit können IP-Pakete, die den Empfänger gar nicht oder fehlerhaft erreicht haben, erneut gesendet werden. Da vor allem bei der Speicherung der Kameradaten sehr große Datenraten entstehen (siehe Abschnitt 2.2.2 und 2.2.4), würde ein Upload über die meisten Internetverbindungen zu lange dauern.

Bei einem Drehtag mit einem Drehverhältnis von 1:10 angenommen bei einer geplanten Szenenlänge von 10 min, entstehen 100 min Material. Wird mit der Arri Alexa Mini in Full HD und 25 fps mit ProRes 4444 aufgezeichnet, entstehen dann ca. 232,2 GByte Videodaten. Bei einer Verbindung mit 50 Mbit/s würde der Upload dieser Daten 25,7 Stunden dauern. Deshalb werden die Daten am Set durch DIT oder Data Wrangler zunächst auf Festplatten oder SSDs gesichert. Am Ende des Drehtages werden die Daten an produktionsinterne Personen weitergegeben, die diese auf dem physischen Weg in die Postproduktion bringen. Wenn weitere Strecken überbrückt werden müssen, erfolgt der Transport per Kurier. Gerade der Transport mit Kurierdiensten hat einige Nachteile: Mehr Übergaben, sowie die Weitergabe an produktionsexterne Personen erhöhen das Risiko des Verlusts. Gerade deshalb werden am Set, sobald die gespeicherten Aufnahmen den/die DIT (Digital Imaging Technician) erreichen, eine Masterkopie und 1 (besser 2) Backups erstellt [1]. Diese sollten dann immer getrennte Wege gehen, um die Chance eines kompletten Verlustes zu minimieren. Bei Drehorten abseits von Großstädten, müssen die Kurierfahrten genau koordiniert werden und Shuttleplatten (die zwischen Post Produktion und Dreh hin und her geschickt werden) immer im Blick behalten werden. Das rechtzeitige Ausliefern der Festplatten durch Kuriere kann aber nicht immer garantiert werden.

Da die Kamera Originaldaten von Filmproduktionen Schnittsysteme überlasten können wird mit Proxy-Dateien geschnitten. Hierbei handelt es sich um, hochkomprimierte Kopien der Originaldaten, die für Schnittprogramme leicht zu verarbeiten und über langsamere Festplatten in Echtzeit abspielbar sind. Am

Ende des Post-Produktions-Prozesses werden die Proxydateien beim Conforming mit den Originaldateien ersetzt und das fertige Produkt gerendert [1].

| Codec                | DNxHD 36  | ProRes Proxy |
|----------------------|-----------|--------------|
| Datenrate FullHD 25p | 36 Mbit/s | 38 Mbit/s    |

Tabelle 7: Datenraten Proxycodecs für FullHD Auflösung [1]

Die kleinen Dateigrößen der Proxies bieten die Möglichkeit eines direkten Hochladens über das Internet nach oder während der Produktion. Nimmt man das oben genannte Beispiel sind ProRes Proxy Dateien für 100 min Material 28,5 Gbyte groß. Mit 20 Mbit/s Upload würde ein Dateiupload eines gesamten Drehtages 76 min dauern. Da die Daten am Drehtag stückweise übertragen werden können, ist ein Upload während des Drehs auch über LTE Mobilfunk möglich. Liegen die Aufnahmen bereits am Ende des Drehtages auf einem Server bereit, können Kunden, Regie, Agentur und Schnitt bereits am Abend Material sichten und die Arbeit am nächsten Drehtag anpassen oder bei fehlerhaften Aufnahmen am nächsten Tag nachdrehen. Bei besonders engem Zeitplan, kann die Schnittarbeit direkt nach dem Upload gestartet werden ohne dass ein/e CutterIn vor Ort sein muss.

## 4 Grenzen von 4G Mobilfunk

In der Theorie sind die von 3GPP vorgestellten Eigenschaften von 4G Mobilfunktechnologien wie LTE, LTE-Advanced und LTE-Advanced Pro vielversprechend für die oben genannten Anwendungen von Film- und Videoproduktion.

|                   | LTE (CAT 5)   | LTE-A (CAT 8) | LTE-A Pro<br>(CAT 17 Downlink<br>/CAT 14 Uplink) |
|-------------------|---------------|---------------|--------------------------------------------------|
| Peak-Datenrate UL | 300 Mbit/s    | 3000 Mbit/s   | 25000 Mbit/s                                     |
| Peak-Datenrate DL | 75 Mbit/s     | 1500 Mbit/s   | 9500 Mbit/s                                      |
| E2E Latenz        | 19-27 ms [38] |               |                                                  |

Tabelle 8: Datenraten und Latenzen von 4G Technologien nach 3GPP [37][38]

Da die Datenraten von LTE stark abhängig von den verwendeten Endgeräten und deren Eigenschaften (MIMO, Carrier Aggregation, M-QAM) sind, werden diese in User-Kategorien eingeteilt [37].

Die in der Praxis realisierbare Datenrate bleibt aber eher eine Frage der durch die Mobilfunkanbieter bereitgestellten Verträge und Netzabdeckung. So beherrscht z.B. ein aktuelles Smartphone (Apple iPhone 13) LTE CAT18, womit 1,2 Gbit/s DL und 221 Mbit/s UL möglich sind. Dies ist aber nur eine Angabe der maximal möglichen Datenrate des Engerätes, die maßgeblich durch hohe Entfernungen zur Basisstation (Pathloss), Signalschwund durch Mehrwegeempfang (Fading), hohe Zellauslastung oder Hindernisse beeinflusst werden kann. Zusätzlich werden die Datenraten bei Mobilfunkverträgen, durch die Mobilfunkbetreiber begrenzt:

|            | Telekom [40]    | Vodafone [41]    | O2 [42]               |
|------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| Vertrag    | MagentaMobil XL | Red XL Unlimited | O2 Free Unlimited Max |
| DL Maximal | 300 Mbit/s      | 500 Mbit/s       | 500 Mbit/s            |
| UL Maximal | 50 Mbit/s       | 100 Mbit/s       | 100 Mbit/s            |

Tabelle 9: Maximale Datenraten von 4G Mobilfunktarifen [40][41][42]

Die in der Praxis erreichbaren Datenraten sind durch die Standortabhängigkeit schwer vorauszusagen. Organisationen wie OpenSignal versuchen durch das Sammeln von Userdaten einen Überblick der aktuellen Mobilfunksituation in verschiedenen Ländern bereitzustellen. Laut ihrem Report der Mobilfunk

Erfahrung in Deutschland im Jahr 2021 betragen beispielsweise die durchschnittlichen Downloadraten in Hamburg zwischen 30-59,7 Mbit/s und die Uploadraten zwischen 11,4-15,6 Mbit/s. [34] Da ein Großteil der Endgeräte 2021 nur 4G LTE unterstützen, wird dieser Bericht als Näherung der durchschnittlichen LTE Datenraten genommen. Durch 5G fähige Endgeräte werden die Datenraten in im Durchschnitt jedoch bereits angehoben.

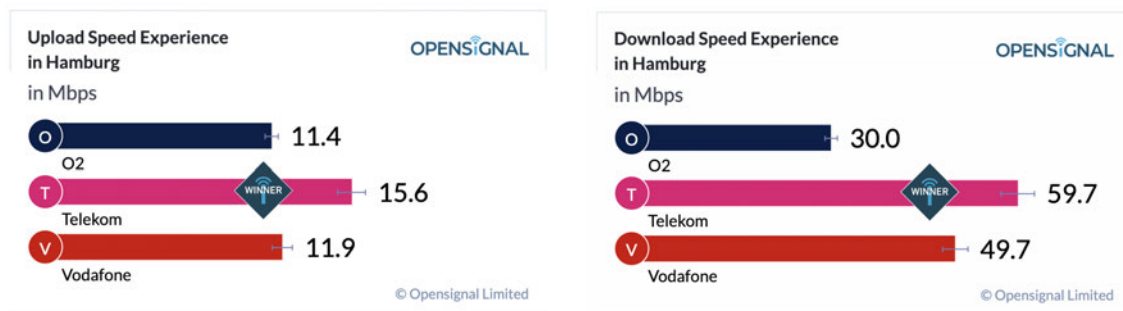


Abbildung 11: Durchschnittliche DL/UL Datenraten in Deutschland mit 4G LTE [34]

Datenraten im Upload von durchschnittlich 15,6 Mbit/s reichen in den meisten Fällen für Live-Streaming mit 10 Mbit/s aus. Ein Upload von Proxy Dateien ist auch während des Drehtages möglich. Da LTE nicht für professionelle Anwendungen vorgesehen ist, kann aber ein bestimmter QOS seitens des Mobilfunkbetreibers nicht garantiert werden. Für immer 4K und HDR Produktionen, reichen die momentanen UL Datenraten von 4G nicht aus. Die Datenraten von Intraframe Codecs oder sogar Raw Material sind zu hoch für eine synchrone Übertragung und würden bei asynchroner Übertragung zu viel Zeit beanspruchen. Für latenzkritische Anwendungen und Anwendungen mit besonderen Zuverlässigkeitsanforderungen ist LTE zudem ungeeignet. Durchschnittliche E2E Latenzzeiten betragen nach [38] 19-27 ms. In Worst Case Szenarien können diese >100 ms betragen [39].

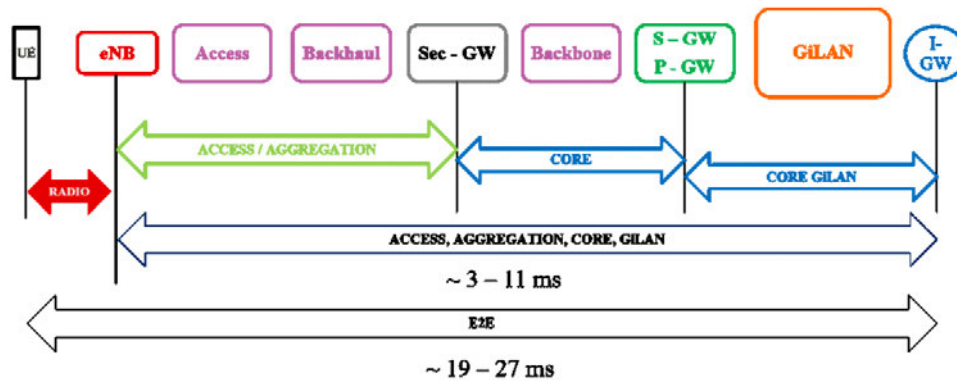


Abbildung 12: E2E Diagramm für 4G (user plane) mit typischen Latenzzeiten (round trip times) [38]

Schwache Empfangsleistung an Zellrändern und schlechte Performance bei hoher Zellauslastung, können ohne zugefügte Redundanz durch Netzbonding, immer wieder zu Ausfällen führen.

## 5 5G NR

2012 hielt die WP5D der ITU die Voraussetzungen für eine neue Mobilfunkgeneration im IMT-2020 Standard fest. Dort wird die Weiterentwicklung von Mobilfunk über das Jahr 2020 hinaus beschrieben und die technischen Rahmenbedingungen für 5G definiert. Die drei Nutzungsvarianten von 5G sind Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC) und Massive Machine-Type Communication (mMTC). Diese Kategorien stellen eine grobe Einteilung dar, um die Anforderungen von unterschiedlichen Anwendungsbeispielen für 5G abschätzen zu können.

- **eMBB**: Beinhaltet Hot-Spots und großflächige Abdeckung mit dem Fokus auf hohen Datenraten, hoher NutzerInnenichte und einem sehr hohen Kapazitätsbedarf.
- **URLLC**: Dieses Szenario soll sowohl menschliche, als auch Maschinenkommunikation abdecken. Es wird durch hohe Ansprüche an Latenz, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit charakterisiert. Beispiele sind Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Fernsteuerung von industriellen Geräten und ferngesteuerte medizinische Eingriffe.
- **mMTC**: Dieser Use Case beinhaltet nur die Maschinenkommunikation. Wichtige Eigenschaften sind eine sehr

hohe Anzahl an verbundenen Geräten im Netzwerk. Gewünscht ist außerdem eine kleine Sendeleistung, um lange Akkulaufzeiten zu gewährleisten.

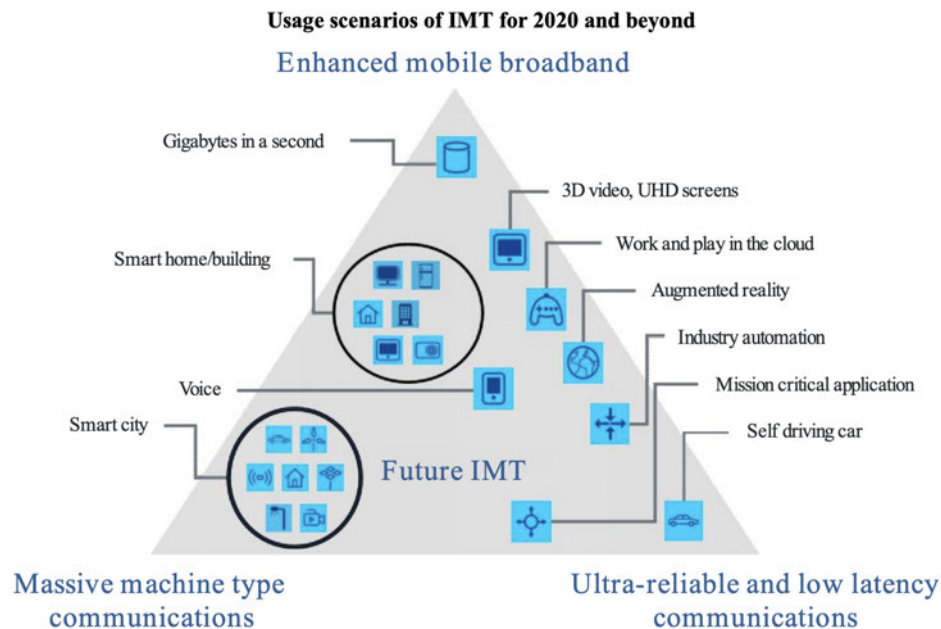


Abbildung 13: 5G use cases aus der ITU-R Empfehlung ITU-R M.2083 [44]

Ein universelles Konzept wie bei den vorherigen Mobilfunkgenerationen (1G-4G), kann den modernen effizienten sowie flexiblen Ansprüchen von gewerblicher Nutzung nicht mehr gerecht werden. Durch Network Slicing soll im 5G Kernnetz verschiedenen KundInnen oder Firmen ein Teil des Netzwerkes bereitgestellt werden, das die individuell benötigten Eigenschaften besitzt.

Die Mindestanforderungen von 5G werden von der ITU-R anhand von 13 Eigenschaften definiert. Davon werden 8 als Kerneigenschaften (key capabilities) bezeichnet.



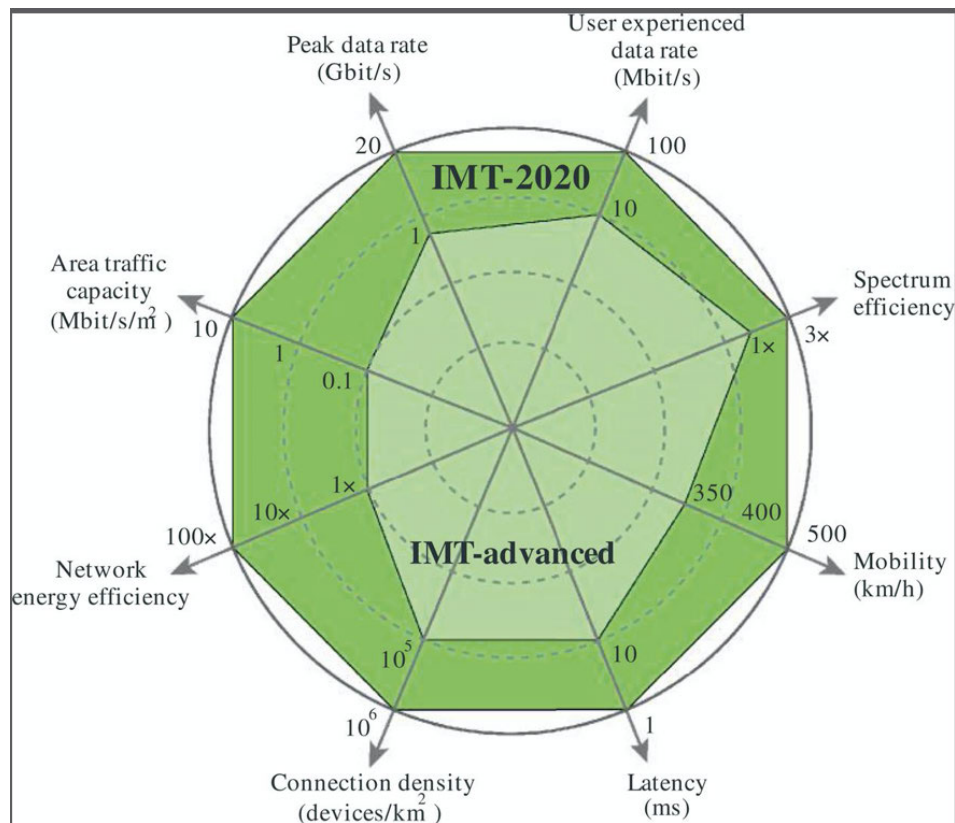


Abbildung 14: Kerneigenschaften von 5G aus ITU-R Recommendation ITU-R M.2083 [44]

Alle Mindestanforderungen von 5G lassen sich in ITU-R Recommendation ITU-R M.2083 nachlesen. Die vollständige Tabelle befindet sich im Anhang.

Die Aufgabe die Technologien zu entwickeln, die die von der ITU-R definierten Eigenschaften von 5G erreichen, fällt auf Organisationen wie die 3GPP. Mobilfunktechnologien zu definieren ist ein fortlaufender Prozess, der von 3 Arbeitsgruppen (Technical Specifications Groups, TSG) der 3GPP umgesetzt wird. Die TSG RAN (Radio Access Network) beschäftigt sich mit Funktionen, Voraussetzungen und Interfaces der Funkübertragung [44].

Viele bereits in 4G etablierten Technologien, werden auch in 5G übernommen oder verbessert. Beispielsweise wird weiterhin OFDM als Übertragungstechnik genutzt. Die Subcarrier Bandbreiten können, anders als bei LTE statt nur 15 KHz, zwischen 15/30/60/120 kHz mit bis zu 3300 Trägern, variieren [44]. Als Modulationsschema (abhängig von der verfügbaren Empfangsleistung) kommt bis zu 1024-QAM zum Einsatz [44]. Carrier Aggregation wird weiterhin für die Allokation spektral getrennter Frequenzbereiche genutzt. Bis zu 16 Carrier können hiermit für die Übertragung genutzt werden, um eine Bandbreite von bis zu

$16 \times 400 \text{ MHz} = 6,4 \text{ GHz}$  zu erreichen [44]. Für die Kanalkodierung werden LDPC-Codes gewählt, da sie im Gegensatz zu den bei 4G genutzten Turbo-Codes vor allem bei höheren Coderaten [45] eine ähnliche Leistung bei geringerer Komplexität bieten [44]. Densification und die Nutzung von Small Cells, soll auch in 5G eine wichtige Rolle spielen, um die Abdeckungseigenschaften zu verbessern. Gerade durch die Erschließung von Frequenzen  $>26 \text{ GHz}$  wird eine Vervielfachung der Basisstationen nötig, um bei größerem Pfadverlust von höheren Frequenzen eine lückenlose Abdeckung zu schaffen. Kleinere Zellen, Massive MIMO und die Nutzung von mmWave Frequenzen, sind drei Schlüsseltechnologien, um die von der ITU-R gegebenen Leistungskennzahlen zu erreichen. Hinzu kommen weitere Verbesserungen, wie mini-slot Transmissions, bei denen der Datentransfer innerhalb eines OFDM Slots starten kann und nicht erst danach [46] oder Full Duplex Kommunikation. Front loaded Referenzsignale, also Referenzsignale am Anfang der Übertragung, reduzieren die Latenz der Luftschnittstelle zusätzlich [44].

## 5.1 Spektrum

Die wohl wichtigste Ressource um die Datenrate einer Funkübertragung zu erhöhen ist die Bandbreite. Viele Frequenzbereiche sind jedoch bereits für diverse andere Funkanwendungen blockiert, weshalb es schwierig ist Bereiche im Funkspektrum mit größeren, durchgehende Bandbreiten ( $>100 \text{ MHz}$ ) zu finden.

Die ITU-R arbeitet daran, international verfügbare Frequenzbänder ausfindig zu machen und schlägt diese in Zusammenarbeit mit 3GPP für die Mobilfunknutzung vor.

Theoretisch kann auf allen Frequenzen, die für Mobilfunk geeignet sind, 5G Technik implementiert werden [44]. Dabei ist aber zu beachten, dass Bandbreiten mit verschiedenen Mittenfrequenzen unterschiedliche Ausbreitungseigenschaften besitzen. Abhängig von der Frequenz steigt die Freiraum- sowie die atmosphärische Dämpfung. Deshalb sind niedrigere Frequenzen besser für weitreichende Abdeckung und höhere Frequenzen eher für kleinere Hot Spots geeignet [79].

Die globale Nutzung des Funkspektrums für verschiedene Anwendungen wird von der ITU-R in ITU Radio Regulations festgehalten. Darin werden auch potentielle

Bänder für 5G NR definiert, wobei dies Empfehlungen sind, die von den nationalen Behörden umgesetzt werden müssen. Neben den bereits von früheren Mobilfunkgenerationen genutzten Frequenzbändern im Sub 6 GHz Bereich wurden mehrere Kanäle jenseits von 24GHz für die Integration von 5G vorgeschlagen [47].

Diese beiden Frequenzbereiche werden als FR1 (0,45-6 GHz) und FR2 (24,25-52,6 GHz) bezeichnet. Mobilfunkspektren lassen sich in 3 Kategorien einteilen:

- **low frequency bands:** Diese entsprechen den bereits für LTE genutzten Frequenzen unter 2 GHz. Sie besitzen eine große Reichweite und werden wenig von Wänden absorbiert, können also bis in Gebäude hineinreichen. Kanalbandbreiten von bis zu 20 MHz werden in diesem Bereich erwartet. Da hier aber zurzeit noch andere Mobilfunkstandards vertreten sind (LTE, GSM) werden sie wahrscheinlich erst Stück für Stück für 5G NR verwendet.
- **medium frequency bands:** Im Bereich von 3-6 GHz sind hier eine gute Abdeckung und durch mehr freie Bandbreiten hohe Datenraten möglich.
- **high frequency bands:** Auch mmWave genannt, beschreibt das Spektrum mit Frequenzen >6 GHz. Besser geeignet für Hotspots durch die niedrige Reichweite lassen sich hier sehr hohe Datenraten im Gbit/s Bereich erzielen. Kanalbandbreiten bis zu 400 MHz sind möglich, die durch Carrier Aggregation nochmals gesteigert werden können [44].

Während die Bandbreiten einzelner Carrier bei 4G noch 20 MHz betragen, sollen bei 5G bis zu 400 MHz möglich sein [44].

In Deutschland hat die Bundesnetzagentur 2019 über die Versteigerung von 41 Frequenzblöcken in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz entschieden. Diese Aktion wird auch als 5G Auktion bezeichnet, da die zugewiesenen Frequenzblöcke explizit für die Nutzung von 5G Technik vorgesehen sind. Aufgeteilt wurden im 2 GHz Bereich jeweils 2 x 20 MHz an Telekom und Vodafone und 2 x 10 MHz an Telefonica (O2) und Drillisch. Im 3,6 GHz Bereich gingen jeweils 90 MHz an Telekom und Vodafone, 70 MHz an Telefonica und 50 MHz an Drillisch [48].

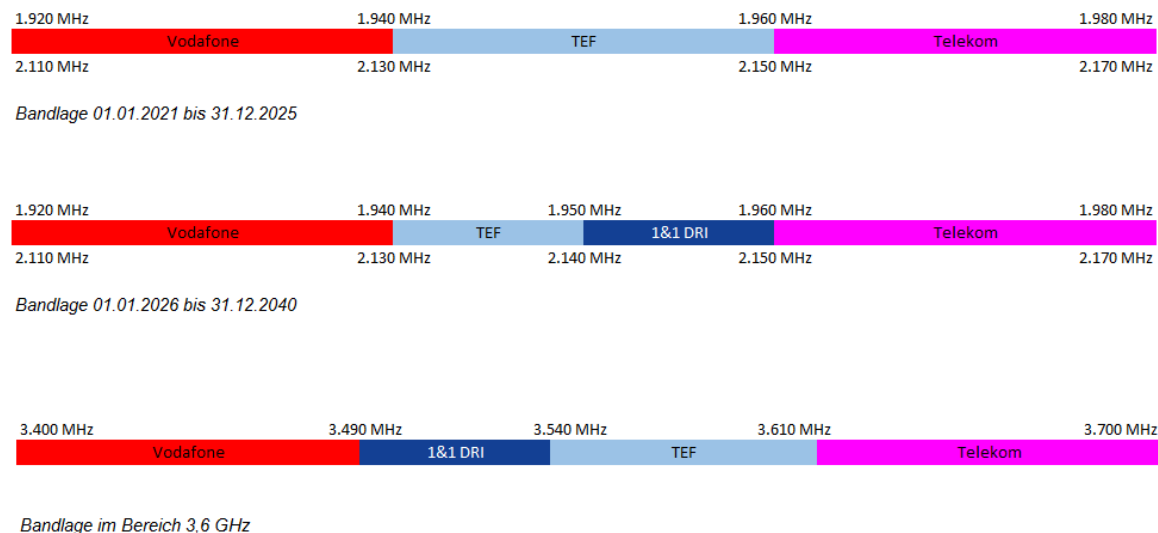


Abbildung 15: Bei der Frequenzauktion 2019 versteigerte Frequenzen für 5G NR [48]

Zusätzlich sind im Bereich 3,7 GHz-3,8 GHz 100 MHz für lokale Netze vorgesehen. Dieses Frequenzband wird nicht national lizenziert und für lokale Anwendungen oder Campusnetze vorgesehen. Unternehmen oder Organisationen können Lizenzen für ein individuell zugeschnittenes 5G Netz erwerben [49].

Aufgrund der niedrigen Bandbreitenverfügbarkeit in FR1 sind Bänder im mmWave Bereich essentiell für eine hohe Datenrate von 10-20 GBit/s (eMBB).

Anders als bei FR1, wo nationale Nutzungsrechte für Frequenzbänder an wenige Mobilfunkbetreiber vergeben werden, gibt es im Bereich von 26 GHz die Möglichkeit lokale und diensteneutrale Lizenzen für Bandbreiten bis zu 800 MHz bei der Bundesnetzagentur zu beantragen. Die Preise sind so gewählt, dass auch Start Ups und mittelständische Unternehmen diese Möglichkeit nutzen können, ähnlich wie bei 3,7 GHz Campusnetzen [50]. Hierfür wurden bis jetzt (04/2022) 9

Anträge genehmigt, unter anderem die TU Dortmund, Fachhochschule Dortmund und CONGIV GmbH. Letzterer ist ein Anbieter für 5G Campusnetze [51]. Frequenzen im Bereich von 42 und 66 GHz sollen zeitnah bereitgestellt werden. Die Bundesnetzagentur wartet jedoch noch auf einen Durchführungsbeschlusses der europäischen Kommission für die Bereitstellung dieser Frequenzen auf europäischer Ebene [52]. Eine nationale Nutzung von mmWave Frequenzen durch Mobilfunkbetreiber benötigt eine Lizenzvergabe der Bundesnetzagentur nach dem Verfahren in FR1. Ob und wann diese Vergaben stattfinden sollen, ist im Frequenzkompass 2020 der Bundesnetzagentur nicht ersichtlich [86].

## 5.2 massive MIMO

“increasing the number of antennas always improves the performance of the system irrespective of the noisiness of the measurements.” [55]

MIMO Technik wurde in den letzten Jahrzehnten umfangreich studiert und hat bei vielen Funkstandards eine hohe Kapazität und Zuverlässigkeit ermöglicht. Die ersten Anwendungen fokussierten sich auf point-to-point MIMO, bei dem zwei Geräte mit mehreren Antennen miteinander kommunizieren. Die Entwicklung geht in den letzten Jahren zu multi-user MIMO (MU-MIMO) Systemen, bei denen typischerweise eine Basisstation mit mehreren Antennen, gleichzeitig mehrere Geräte mit weniger Antennen (1-4) versorgen kann. Vielmehr besitzt eine massive MIMO Basisstation typischerweise mehr Antennen als User innerhalb der Zelle. Wächst die Anzahl der User darüber hinaus, sollte die Antennenanzahl an der Basisstation entsprechend erweitert werden [56]. Dadurch wird teures und großes Equipment nur an der Basisstation gebraucht und die Empfangsgeräte können günstiger und kleiner gebaut werden [57]. Weiterhin wird durch eine höhere Anzahl an Antennenelementen eine bessere Leistung und verbesserter SINR (signal to interference-plus-noise ratio) durch Array- oder Multiplex-Gain erzielt [56].

Selbst in sehr verrauschten Kanälen ist die Erweiterung der Basisstation um mehr Antennen immer vorteilhaft und wenn die Anzahl der Antennenelemente gegen unendlich geht, verschwinden die Effekte von unkorreliertem Rauschen und Freiraumdämpfung [58]. Ein schlechter SNR kann laut [58] immer durch eine Addition einer entsprechenden Anzahl Antennenelemente kompensiert werden.

Bei konventionellen MIMO Systemen beträgt die maximale Anzahl an Antennenelementen jeweils 8 an Sender und Empfänger (8x8 MIMO). Massive MIMO verwendet, je nach 5G NR Standard bis zu 256 Antennen an der Basisstation und bis zu 32 Antennen an Empfangsgeräten [59].



Abbildung 16: Massive MIMO Phased Array Antenne mit 64 Elementen für 5G 6 GHz [60]

[61] beweist, dass die Kapazität durch mehr Antennenelemente unendlich gesteigert werden kann.

Der wesentliche Vorteil von massive MIMO Systemen ist die Nutzung von Beamforming. Durch Phasenverschiebungen kann die Hauptstrahlrichtung des Antennen-Arrays gelenkt werden (Beamsteering), um einzelne User gezielt mit Leistung zu versorgen. Der Array-Gain wächst proportional zur Anzahl der

Antennenelemente [56]. Der weitere große Vorteil dabei ist die räumliche Trennung verschiedener Endgeräte. Einzelne User können von einem Beam anvisiert und Signale von anderen Usern gleichzeitig unterdrückt werden. Die räumlichen Freiheitsgrade des Arrays sind dabei die Anzahl  $M$  der Antennenelemente, es sind also  $M$  räumliche Datenströme möglich [56].

Für jeden räumlichen Datenstrom steht die volle Kanalbandbreite zur Verfügung, da diese nicht mit anderen geteilt werden muss. Somit wird der Datendurchsatz pro Zelle (bit/s/cell) signifikant gesteigert und wächst mit der Anzahl der User [62].

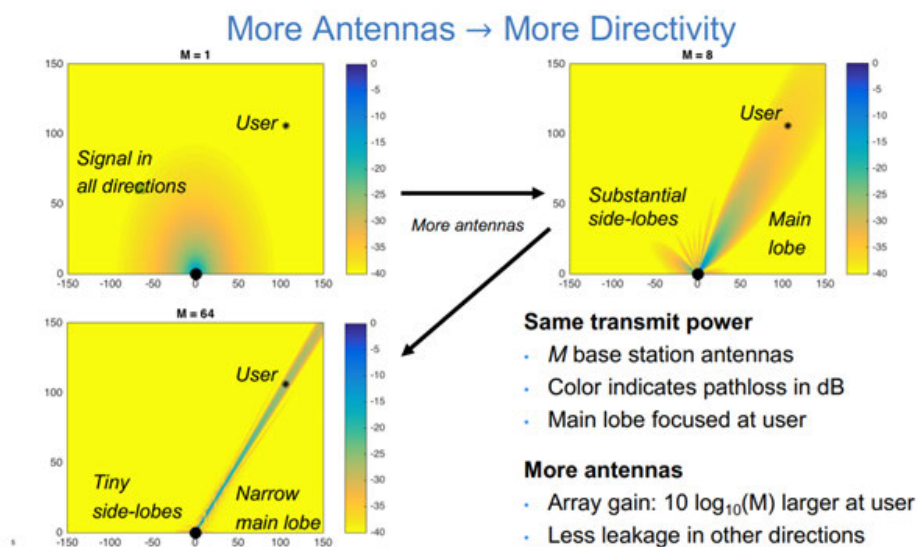


Abbildung 17: Direktivität von Massive MIMO Antennen und Array Gain [63]

Abbildung 17 zeigt, dass mit der Anzahl der Antennenelemente die Strahlbreite immer kleiner wird. Das hat einerseits den Vorteil, dass einzelne Nutzer besser räumlich getrennt werden können. Weiterhin wird die Energieeffizienz gesteigert, weil die Sendeleistung auf einen kleinen Raumwinkel fokussiert wird. Andererseits sind komplexe Algorithmen nötig, um die genaue Position der einzelnen User zu bestimmen und den Strahl mit hoher Genauigkeit auf diese zu lenken (auch bei Bewegung). Je genauer die CSI (Channel State Information), desto besser ist die Performance von massive MIMO Systemen [62].

Ein weiterer Vorteil von massive MIMO ist die Energieeffizienz im Gegensatz zu einem korrespondierenden SISO System. Anstatt dass die gesamte Sendeleistung im Raum verteilt wird, wird sie mit Beamforming so fokussiert, dass

sie nur die User erreicht die sie benötigen. Bei perfekter CSI kann die Sendeleistung proportional zur Anzahl der Antennen an der Basisstation verringert werden, um die gleiche Performance eines SISO Systems zu erreichen. Auf der anderen Seite kann, wenn ausreichend Sendeleistung verfügbar ist, die Reichweite, im Vergleich zu einem SISO System, signifikant erhöht werden, damit auch User am Zellrand mit ausreichend Leistung versorgt werden können [55].

Die Kommunikation im mmWave Bereich erfährt durch massive MIMO Verbesserungen. Kleinere Zellgrößen sind für mmWave Kommunikation, durch den höheren Pfadverlust bei hohen Frequenzen, attraktiv. Die kürzere Wellenlänge begünstigt aber gleichzeitig massive MIMO Designs, da mit steigender Frequenz die Größe der Antennenarrays sinkt und mehr Antennenelemente in kleineren Bauformen integriert werden können. Der durch eine sehr große Anzahl an Antennen erreichte Array Gain kann die Abdeckungsreichweite so weit erhöhen, dass er den Pfadverlust von mmWave Frequenzen überwindet [62].

### 5.3 Networkslicing

Mittels eines „Network Slice“ wird ein virtuelles Netz innerhalb der Infrastruktur des öffentlichen 5G-Netzes eingerichtet. Seitens der KundInnen sind dadurch keine Investitionen in eigene Netz-Hardware, für eine dediziertes 5G Netz nötig. Bei Vertragsabschluss wird eine bestimmte Dienstgüte (QOS) mit dem MNO (Mobile Network Operator) vereinbart. Dieses Betriebsmodell eignet sich für temporäre Anwendungen und in Fällen in denen eine umfangreiche Hardware Installation vermieden werden soll [49].

Eine wichtige neue Entwicklung von 5G-Netzen ist die Möglichkeit lokale bzw. netznahe Berechnungskapazitäten mittels Mobile Edge Cloud (MEC) bereitzustellen. In Hybridformen für die Betreibermodelle von 5G-Campusnetzwerken kann beispielsweise ein Netzwerk Slice in Verbindung mit Edge Computing eine Verbesserung von Latenzzeiten [64].



## 5.4 Abdeckung

Die Abdeckungsprobleme, die in traditioneller Zellarchitektur mit nur einer Basisstation pro Zelle entstehen, sollen mit 5G durch die Einführung eines Heterogeneous Networks (HetNet) gelöst werden. HetNet spielen bereits bei 4G eine wichtige Rolle und bekamen zum Beispiel durch die Einführung von Relaying in Release 10 eine Anwendung. Das 5G HetNet basiert auf der Idee neben großen Basisstationen, Micro-, pico- and femto-cells innerhalb der Zelle zu etablieren, um Gebiete mit einer Funkverbindung auszustatten, die von der Basisstation schwer zu erreichen sind. Weiterhin kann die Spektrale Effizienz der Zelle insgesamt gesteigert und gleichzeitig die Sendeleistung reduziert werden, wenn die NutzerInnen in kleineren Zellen aufgeteilt werden. Die Accesspoints der kleineren Zellen können über Funk- oder Kabelverbindungen an die Basisstation und 5G Kernnetz angeschlossen werden [65].

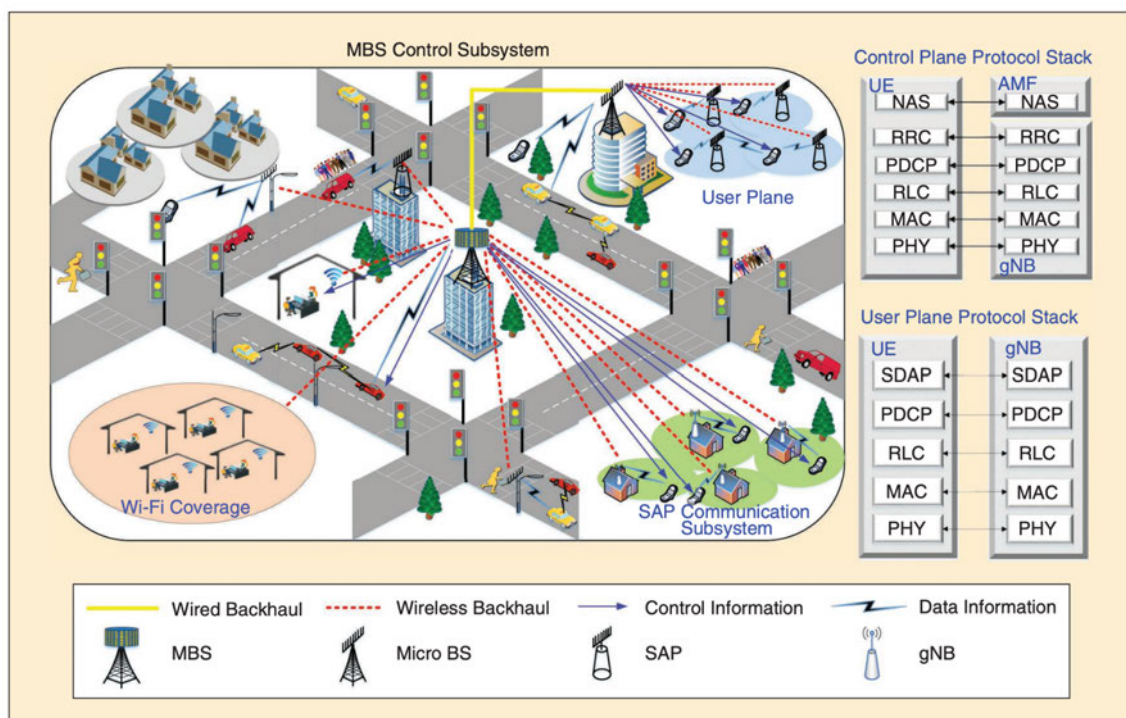


Abbildung 18: Schema eines 5G NR HetNet [66]

Neben den klassischen terrestrischen Accesspoints sind auch andere Zugriffsmöglichkeiten vorgesehen, die so zu jeder Zeit eine Mobilfunkabdeckung garantieren sollen. Darunter zählen zum Beispiel Low-earth-orbit (LEO) Satelliten.

## 5.5 Status

Seit der Einführung von 5G in Deutschland durch die Frequenzversteigerung 2019 wird fortlaufend am Ausbau der neuen Mobilfunktechnik gearbeitet. Der 5G-Ausbau wird zunächst vornehmlich bestehende Mobilfunkstandorte nutzen, erfordert jedoch auch neue Standorte. 4G- und 5G-Netze werden gemeinsam, beziehungsweise parallel betrieben, so dass der Ausbau stufenweise erfolgen kann [67]. Der initiale Ausbau erfolgt dabei zunächst im non-standalone (NSA) Modus von 5G auf den von der Bundesnetzagentur zur Verfügung gestellten Frequenzen. NSA nutzt die Funkschnittstelle von 5G in Verbindung mit dem 4G Kernnetz. Also im Grunde eine verbesserte Nutzung von 4G wird dabei das Maximum aus LTE herausgeholt (enhanced LTE - eLTE) [68]. Dadurch wird ein schneller und zunächst kostengünstiger 5G Ausbau für die Mobilfunkbetreiber ermöglicht [69]. Die erreichbare Datenrate für 5G NSA ist bereits etwas höher als die von 4G, das kommt hauptsächlich durch die neuen 5G RAN Technologien (Radio Access Network) und eMBB zustande (2 GHz und 3,6 GHz). Durch die Nutzung von 4G und 5G für eine Datenübertragung (Dynamic Spectrum Sharing - DSS) kann der Datendurchsatz zusätzlich gesteigert werden. Laut Vodafone sind dadurch Downloadraten von 600-800 Mbit/s möglich. Die Latenz und Upload-Datenraten liegen jedoch weiterhin in den Möglichkeiten von 4G Technik [70].

Das volle Potenzial von 5G wird erst durch das 5G RAN in Verbindung mit dem 5G Kernnetz (5G CN), sowie mmWave, massive MIMO und Densification erreicht. Durch das 5G CN werden erst Funktionen wie Network Slicing, Edge Computing, Latenzzeiten unter 10 ms (URLCC) und Datenraten von mehreren Gbit/s ermöglicht. Mit 5G standalone (SA) können die von der 5G Vision versprochenen Eigenschaften und Use Cases (eMBB, URLCC, mMTC) für Industrieanwendungen umgesetzt werden [71].

Im Breitbandmonitor der Bundesnetzagentur wird unter anderem der Fortschritt im Mobilfunk festgehalten. Laut den von Mobilfunkbetreibern übermittelten Daten wird im Januar 2022 bereits eine Fläche von 55,8% des Bundesgebiets mit 5G

NSA versorgt. In Großstädten wie Hamburg sogar 94,2% oder Berlin 93,1%. Die Abdeckung von 5G SA ist dabei deutlich kleiner. Bundesweit gibt es eine Flächenabdeckung von 7,6%. In Hamburg kann zwar auf 56,5% 5G SA empfangen werden, in vielen Bundesländern ist dieser Wert aber noch deutlich unter 10% (Schleswig-Holstein - 0,97%, Mecklenburg - 0,67%, Niedersachsen - 3,51%) (Stand Januar 2022) [72]. Die vollständige Tabelle befindet sich im Anhang.

Zu diesem Zeitpunkt (März 2022) gibt es bis jetzt erst ein Angebot von Vodafone für PrivatkundInnen, das 5G SA unterstützt. Vodafone bewirbt 5G SA unter dem Namen 5G+ als kostenlos zubuchbare Option bei 5G Tarifen [73]. Dafür kommen Frequenzen bei 700 MHz und 3,6 GHz zum Einsatz. Zunächst ist diese Option aber nur auf kompatiblen Apple- und von Vodafone bereitgestellten Android Smartphones verfügbar.

Die Telekom will bis Ende 2022 ein Angebot für 5G Standalone im 700 MHz Bereich für Privatpersonen ermöglichen [74]. Sobald genug Endgeräte 5G SA unterstützen, plant auch Telefonica eine Freischaltung von 5G SA [75].

## 6 Messung

In der Folgenden Messung soll eine Statusaufnahme des in Hamburg verfügbaren 5G Netzes festgehalten und bestimmte Eigenschaften der Mobilfunkverbindung untersucht werden.

Da 5G NR eine weitaus höhere Upload Datenrate als 4G LTE bereitstellen können soll – 10 Gbit/s Peak Uplink Data Rate und 100 Mbit/s User Experienced Data Rate (s. Anhang) – und seit 2019 am Ausbau des 5G Netzes in Deutschland gearbeitet wird, sind Verbesserungen der Übertragungsqualität, sowie neue Use Cases bereits denkbar.

Gemessen wird im Netz der deutschen Telekom mit dem “Magenta Young M” Vertrag der sowohl 5G NR, als auch 4G LTE unterstützt. Laut Tarifiedetail beträgt die maximale DL Datenrate 300 Mbit/s und die maximale UL Datenrate 50 Mbit/s. An einzelnen 5G Standorten sind laut Telekom auch höhere Datenraten möglich, wie viel wird aber nicht näher spezifiziert [87].

### 6.1 Aufbau

Um eine praktische Anwendung und mögliche Drehorte zu simulieren, sollen verschiedene Empfangssituationen gemessen werden. Dabei wird der LOS-Fall, der NLOS-Fall in Außenbereichen und der NLOS-Fall in Innenräumen betrachtet. Gleichzeitig wird am selben Standort jeweils die Datenrate einer 5G und einer 4G Mobilfunkverbindung festgestellt, um diese zu vergleichen.

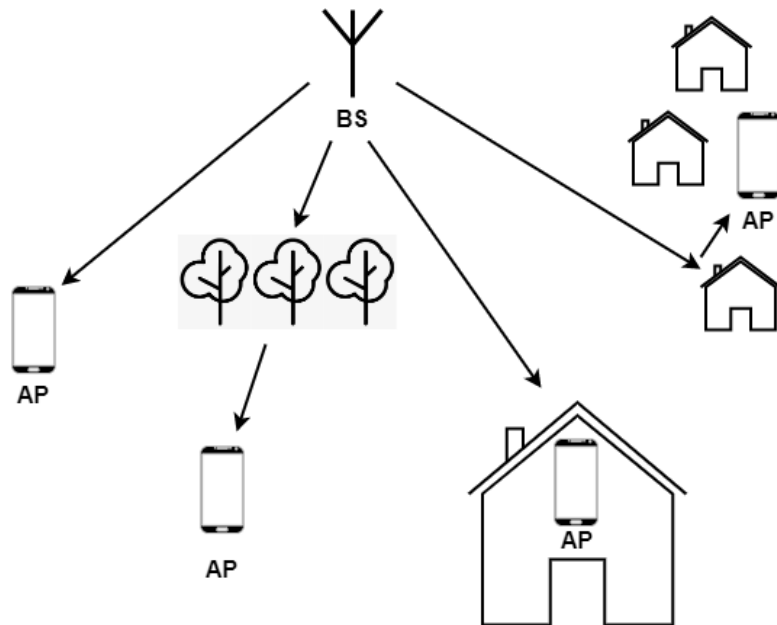


Abbildung 19: Verschiedene Empfangsszenarien zwischen Mobilfunk Basisstation und Accesspoint

Für die Datenrate im Uplink ist entscheidend, wie gut die Basisstation die Signale des Endgerätes empfangen kann. Die Signalstärke an der Basisstation ist in dieser Messumgebung nicht verfügbar. Da für die mobilen Anwendungen, die in dieser Arbeit betrachtet werden, die Upload Datenrate entscheidend ist, wird sie noch einmal mit einem Upload-Test über einen kurzen Zeitraum genauer bestimmt.

## 6.2 Hardware

Für die Messung von einer 5G und 4G Mobilfunkverbindung stehen 2 Smartphones, sowie ein Laptop zur Verfügung. Bei den Smartphones handelt es sich um ein 5G fähiges iPhone 13 sowie ein 4G fähiges iPhone 11. Beide Smartphones sind mit einer Telekom Sim-Karte mit dem in 6 genannten 5G Vertrag ausgestattet. Diese werden jeweils mittels USB Kabel an einem Macbook Pro 2020 angeschlossen und stellen über USB Tethering die mobile Datenverbindung auf dem Laptop bereit. Die Smartphones werden an einer Handyhalterung an einem Fahrrad angebracht und an dem jeweiligen Messort positioniert. Der Laptop dient zur Ausführung von Wireshark, womit die Upload

Datenrate graphisch dargestellt werden kann, sowie der Feststellung der Latenz über das Terminal von MacOS.



Abbildung 20: Aufbau der der Mess-Hardware

## 6.3 Software

Um die Datenrate zu messen wird zunächst ein Speedtest von der Firma OOKLA ausgeführt [88]. Hierbei werden 1304 Byte lange TCP/IP Pakete von und zu einem Testserver gesendet. Die Webseite gibt dann Auskunft über die UL/DL Datenrate sowie den Ping und Jitter zum Testserver. Es lassen sich zwar keine zeitlichen Variationen der Verbindung feststellen, da am Ende nur der letzte festgestellte Wert sichtbar ist, trotzdem lässt sich mit einem solchen Speedtest schnell und unkompliziert eine erste Einschätzung einer Datenverbindung feststellen.

Der UL wird mit Wireshark (Version 3.6.5) nochmal genauer betrachtet und veranschaulicht. Zudem können Paketverluste festgestellt werden, die aber nicht unbedingt von der Mobilfunkverbindung, sondern durch das gesamte Netzwerk



bzw. Knotenpunkte auf dem Weg zum Testserver verursacht werden. Um eine praktische Anwendung zu simulieren wird eine größere Datei (in diesem Fall Arri Test Footage [89]) auf einem Clouddienst (Google Drive) hochgeladen und die UL Datenrate für mindestens 10 Sekunden festgehalten.

Die RTT zu einem Dienst oder Server kann mit dem “ping” Befehl im Terminal des Laptops festgestellt werden. Es werden mindestens 10 Pings zu “[www.google.com](http://www.google.com)” gemessen. Die Pakete werden in diesem Fall an die IP-Adresse 142.250.184.206 mit Standort in Frankfurt am Main gesendet.

## 6.4 Durchführung

Die beiden Messreihen beschäftigen sich mit 2 Standorten von Telekom Basisstationen an denen 5G NSA verfügbar ist. Um einen Überblick über verschiedene Empfangssituationen zu bekommen wurde der Abstand zu Basisstation variiert, sowie unterschiedliche Umgebungen (Park, Innenraum und städtische Umgebung) getestet. Bei den Abständen handelt es sich um Annäherungen der Luftlinie zwischen Basisstation und Accesspoint. Die wichtigsten Ergebnisse der Speedtests, Wireshark Aufzeichnungen, Ping Tests, Fotos der Messorte finden sich im Anhang. Zusätzliche Messungen sind auf dem beiliegenden USB Stick gespeichert.

### 6.4.1 Messreihe 1 (Unna Park)

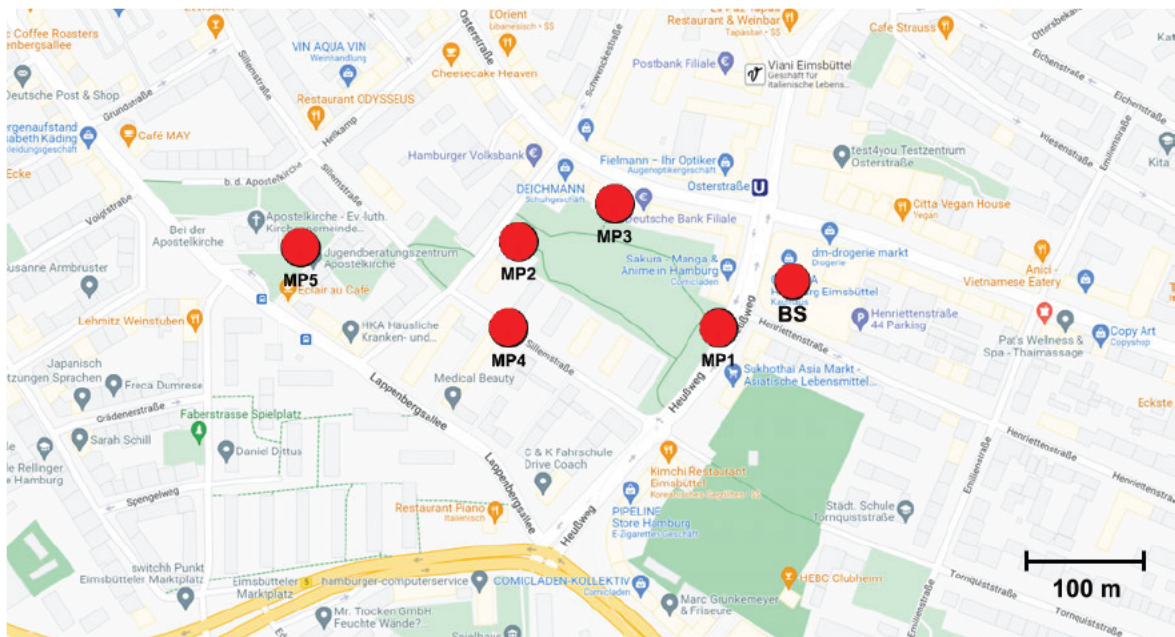


Abbildung 21: Standorte der Basisstation und Accesspoints während der verschiedenen Messungen

Messreihe 1 wurde in der Nähe der Osterstraße in Eimsbüttel durchgeführt. Laut cellmapper.net [90] befindet sich auf dem Karstadt in der Osterstraße eine Basisstation der Telekom, die sowohl 5G NSA, als auch 4G LTE fähig ist. Bei variierendem Abstand zur Basisstation, werden sowohl Messungen mit und ohne LOS zu dieser durchgeführt. Jede Messung wird jeweils am selben Messort einmal mit beiden Endgeräten durchgeführt. Auf Abbildung 21 sind die Standorte der Basisstation (BS) und die der Messpunkte 1-5 (MP1-MP5) zu sehen.

| Messpunkt | Szenario | Abstand zur BS |
|-----------|----------|----------------|
| MP1       | LOS      | 69 m           |
| MP2       | NLOS     | 230 m          |
| MP3       | NLOS     | 160 m          |
| MP4       | NLOS     | 245 m          |
| MP5       | NLOS     | 420 m          |

Tabelle 10: Angenäherte Abstände der AP zur BS von Messreihe 1



MP1 wurde so gewählt, dass der Accesspoint möglichst nah und in Sichtweite zur Basisstation ist. Die Durchschnittliche Downloadrate beträgt in diesem Fall bei 5G NSA 319,3 Mbit/s und bei 4G Empfang 264,1 Mbit/s. Bei 5G NSA Empfang wird also eine 1,2 fache Download Datenrate erreicht. Ein größerer Unterschied ist bei den Upload Datenrate zu erkennen. 5G schafft hierbei 120,3 Mbit/s und 4G 46,9 Mbit/s, also ein Unterschied um das 2,6 fache. Für Messpunkt 2 wurde der Abstand zur Basisstation um ca. 160 m erhöht, zudem befinden sich nun Bäume im Signalweg. Die Datenrate der 5G Verbindung bleibt im DL wenig verändert und ist in diesem Fall sogar minimal höher als im LOS Fall mit 321,6 Mbit/s, die 4G DL Datenrate auf 192 Mbit/s fällt. Bei der UL Datenrate ist es genau andersherum: die 5G UL Datenrate fällt auf 57,1 und die 4G Datenrate bleibt ähnlich mit 44,9 Mbit/s. Ein noch größerer Unterschied, vor allem bei den UL Datenraten ist bei Messpunkten 4 und 5 zu verzeichnen. Diese wurden weiter weg von der Basisstation und mit Gebäuden zwischen AP und BS gewählt. Die DL Datenrate der 5G Verbindung bleibt um die 300 Mbit/s, die UL Datenrate sinkt jedoch bei beiden Mobilfunkgenerationen auf unter 20 Mbit/s oder sogar unter 10 Mbit/s ab. Im Detail sind die Messwerte in Tabelle 11 protokolliert.

| Messpunkt | Datenrate 5G<br>(UL//DL) (Mbit/s) | Datenrate 4G<br>(UL//DL) (Mbit/s) | Ping 5G (ms) | Ping 4G (ms) |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| MP1       | 319,3//120,3                      | 264,1//46,9                       | 19,3         | 28,7         |
| MP2       | 321,6//57,1                       | 192//44,9                         | 14,3         | 20,3         |
| MP3       | 318,2//86,1                       | 275,3//50,1                       | 16,7         | 24,7         |
| MP4       | 287,9//7,2                        | 60,7//7,9                         | 27           | 24,3         |
| MP5       | 306,9//10,5                       | 66,4//19,7                        | 20,7         | 22,3         |

Tabelle 11: Durchschnittswerte der Speedtests an den verschiedenen Messpunkten von Messreihe 1

Auffällig ist bei allen Messpunkten, dass die DL Datenraten der 5G Verbindung alle um die 300 Mbit/s sind und die UL Datenraten der 4G Verbindung 50 Mbit/s nicht übersteigen. Dies weist auf die maximalen Datenraten des genutzten Telekom Vertrages von 300 Mbit/s im DL und 50 Mbit/s im UL hin. Weshalb bei 5G jedoch nur die UL Datenrate diesen Wert übersteigt, ist nicht ersichtlich. Weiterhin

fällt auf, dass die UL Datenrate der 5G Verbindung bei kleinem Abstand zur Basisstation weitaus höher als die der 4G Verbindung ist. Bei größerem Abstand jedoch, weist sie ähnlich kleine Werte trotz gleich hoher DL Datenrate auf. Es ist möglich, dass seitens der Telekom "Uplink Decoupling" für 5G NSA verwendet wird. Dafür wird 5G RAN nur für den DL und 4G auf niedrigeren Frequenzen für den UL verwendet. Durch die Verwendung von 4G im UL soll die Abdeckung erhöht werden, da 4G als etablierte Technologie mehr Zellen besitzt und die Signale auf niedrigeren 4G Frequenzen weniger Pfadverluste erfahren. Die niedrige Sendeleistung der Endgeräte kann so ausgeglichen werden, was bei 5G erst möglich ist wenn genügend Basisstationen installiert sind [91].

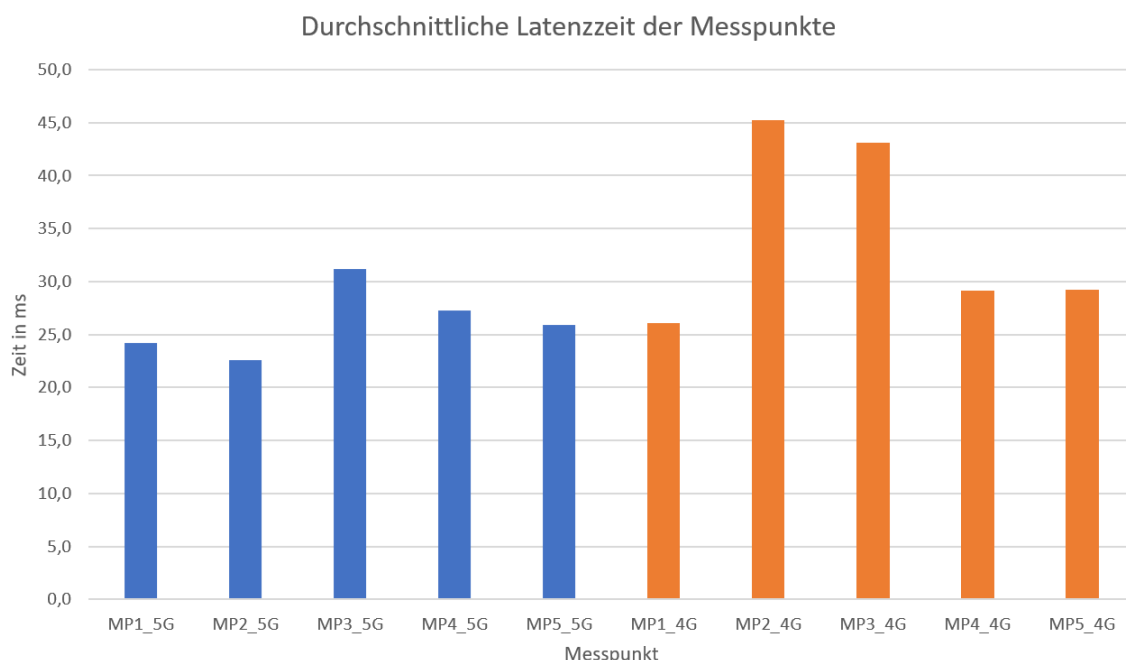


Abbildung 22: Durchschnittliche Latenzzeiten von Messreihe 1

Die durchschnittlichen Latenzzeiten von 5G und 4G bewegen sich bei den durchgeführten Versuchen im Bereich zwischen 20 ms und 30 ms. Auch wenn bei MP2 und MP3 bei Verwendung von 4G durchschnittlich höhere Latenzzeiten zu verzeichnen waren, gab es bei 5G trotz der scheinbar insgesamt niedrigeren durchschnittlichen Latenzzeiten, einzelne RTT die höher ausfielen. So beispielsweise 56,8 ms und 50,9 ms bei MP3. Die höheren Latenzzeiten der 4G Messungen können auf eine kurzzeitige Auslastung des angesprochenen Dienstes zurückzuführen sein. Die ähnlichen RTT von 5G und 4G bestätigen,

dass mit 5G NSA Funktionen wie URLCC noch nicht unterstützt werden. Die Latenzen der Speedtests sind allgemein etwas niedriger, weil die genutzten Testserver näher am Messort sind (Bremen, Hamburg, Bad Oldesloe). Hier lässt sich außerdem ein leichter Unterschied der RTT zwischen 4G und 5G, wobei diese bei 5G niedriger ausfallen.

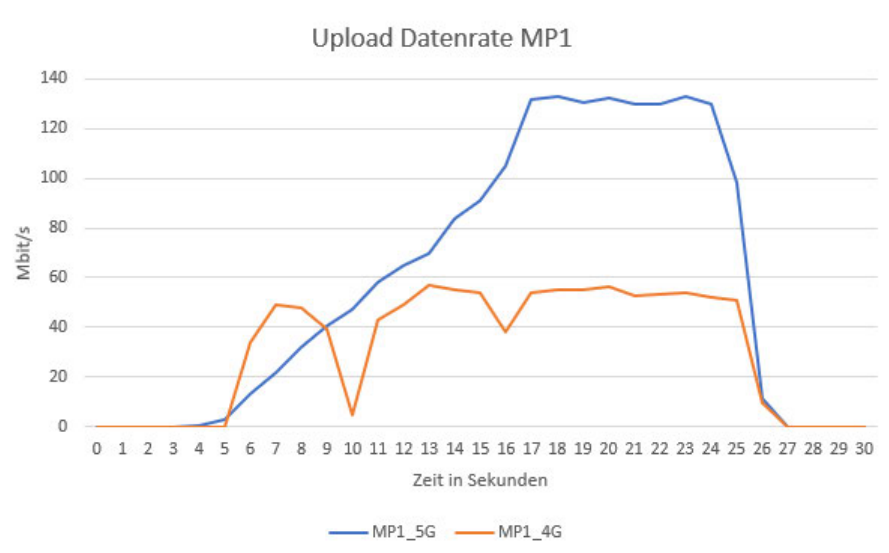


Abbildung 23: Höchste UL Datenrate Messreihe 1

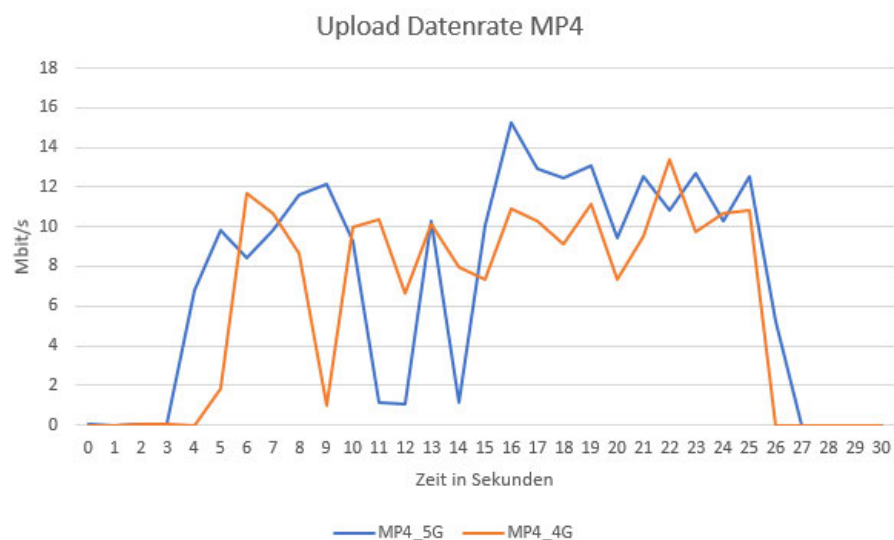


Abbildung 24: Niedrigste UL Datenrate Messreihe 1

## 6.4.2 Messreihe 2 (Neue Mitte Altona)

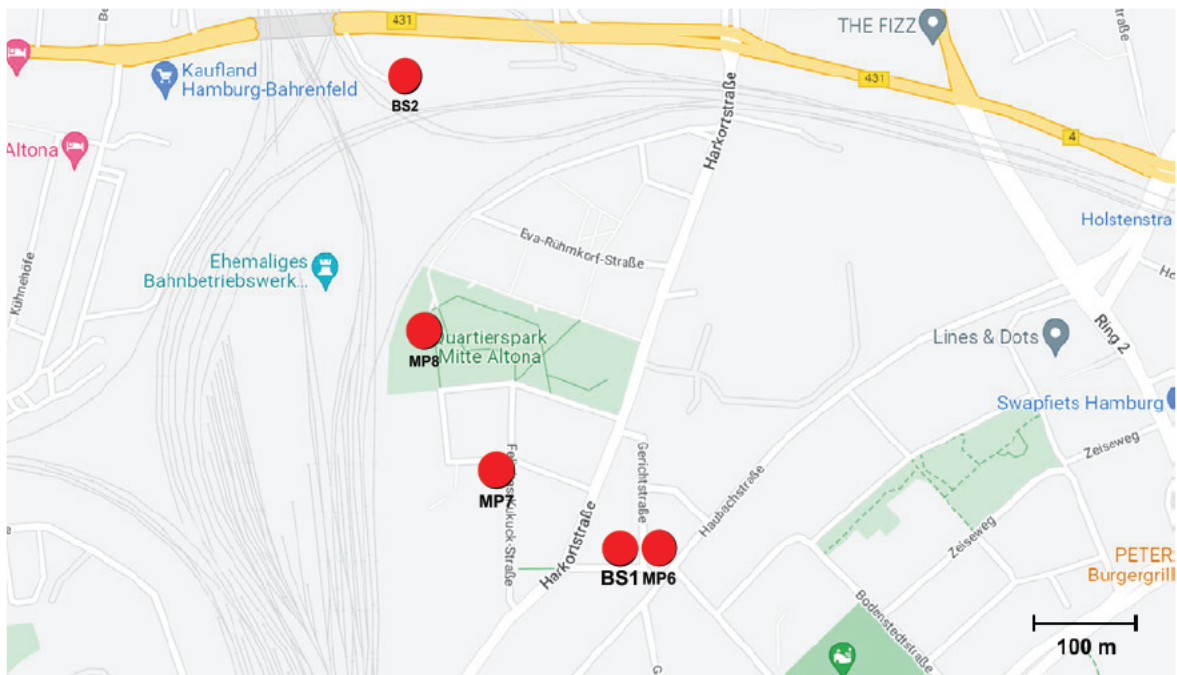


Abbildung 25: Standorte der BS und MP Messreihe 2

Die zweite Messreihe sollte vor allem einen Messpunkt beinhalten, der sich in einem Innenraum befindet. Dieser befindet sich in einer Wohnung im Erdgeschoss mit der Adresse Gerichtstraße 44. MP7 befindet sich in dem Neubaugebiet "Neue Mitte Altona" ohne direkte Sichtverbindung zu BS1 und MP8 im "Quartierspark Mitte Altona". Letzterer hatte Sichtverbindung zu einer weiter entfernten Telekom Basisstation (BS2), weshalb das Endgerät mit ihr eine Verbindung herstellt.

| Messpunkt | Szenario     | Abstand zur BS |
|-----------|--------------|----------------|
| MP6       | NLOS (innen) | 30 m (BS1)     |
| MP7       | NLOS         | 170 m (BS1)    |
| MP8       | LOS          | 270 m (BS2)    |

Tabelle 12: Angenäherte Abstände der AP zur BS von Messreihe 2

Die Datenraten der Messreihe 2 zeigen ein ähnliches Verhalten wie schon in Messreihe 1. Interessant ist jedoch, dass der DL bei MP6 zwischen 5G und 4G über die Hälfte niedriger ist, obwohl die Entfernung zur Basisstation ähnlich niedrig ist. Bei MP8 zeigt sich außerdem, dass selbst bei einer Entfernung von ca.

270 m eine hohe UL Datenrate von 134,1 Mbit/s erreicht werden kann, wenn eine Sichtverbindung besteht.

| Messpunkt | Datenrate 5G<br>(UL//DL) (Mbit/s) | Datenrate 4G<br>(UL//DL) (Mbit/s) | Ping 5G (ms) | Ping 4G (ms) |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| MP6       | 253//83,1                         | 110,3//56,9                       | 18,7         | 23,3         |
| MP7       | 319,8//62,5                       | 316,3//57,2                       | 16           | 21,7         |
| MP8       | 315,2//134,1                      | 279,9//56,4                       | 15,3         | 23           |

Tabelle 13: Durchschnittswerte der Speedtests an den verschiedenen Messpunkten von Messreihe 2

In Messreihe zwei wird der Vermutung, dass 5G NSA und 4G ähnliche Latenzzeiten besitzen nochmals bestätigt, wie in Abbildung 28 zu sehen ist.

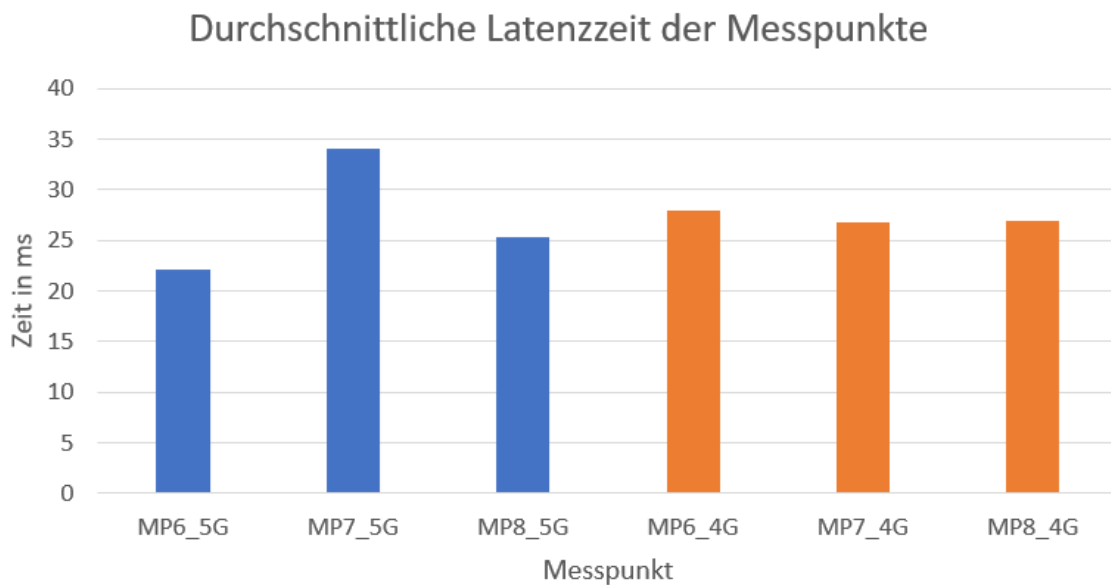


Abbildung 28: Durchschnittliche Latenzzeiten von Messreihe 2

## 6.5 Probleme

Vor und während der Messung gab es einige Faktoren, die diese beeinflussten und erschwert haben. Ursprünglich sollte der "Field Test Mode" des iPhones genutzt werden, um die Eigenschaften der Mobilfunkverbindung näher zu untersuchen. Diese App öffnet sich, wenn man die Nummer `"*3001#12345#"` in die Eingabemaske der Telefon-App eingibt. Der Field Test Mode gibt alle Messungen mit Zeitstempel an. Dieser war jedoch bei vielen Messungen noch vom Vortag und es gab keine Möglichkeit die Werte der App zu aktualisieren. Weiterhin widersprechen sich einige Werte. So wurde bei MP6 in der Kategorie "RAT - Serving Cell Info" eine Bandbreite von 10 MHz und in der Kategorie "LTE - Component Carrier Info" eine Bandbreite von 20 MHz angezeigt. Welche Bandbreite nun die richtige ist, wird nicht ersichtlich. Gleiche Widersprüche gab es bei RSRP, RSRP, RSSI, Cell ID und Mittenfrequenzen.

Es gibt wenig Auskunft darüber, ob Basisstationen 5G unterstützen und so gut wie keine Informationen welche Technologien im Detail (massive MIMO oder mmWave usw.). Die in den Messungen gewählten Basisstationen sind auf [90] als 4G Standorte verzeichnet, teilweise mit 5G NSA. Weiterhin ist im öffentlichen Mobilfunknetz wenig Flexibilität für eine Messumgebung geboten. Was innerhalb der Recheneinheit der Basisstation passiert, ist in diesem Fall nicht einsehbar. Zudem gibt es Komponenten, die dem\*der Betrachter\*in nicht ersichtlich werden, die Messung allerdings determinieren können. Bspw. ob die Basisstation 5G fähig ist, ob sich das Endgerät mit der richtigen Zelle verbindet, wie ausgelastet die Basisstation ist usw.

Hinzukommend konnte der Versuch Aufschluss über Orte in Hamburg gänzlich ohne 5G- und unzureichenden 4G-Empfang, liefern. Ein Beispiel hierfür wäre die im Wehbers Park durchgeführte Messung, obwohl laut [90] dort in der Nähe eine Basisstation der Telekom stehen sollte.

Abschließend sei zu bemerken, dass diese Bedingungen je nach Simkarte, Vertrag und Mobilfunkanbieter variieren. Zwar sind die Basisstationen oft an den gleichen Standorten, dennoch gibt es, aufgrund jeweiliger Vorgaben und Buchungsoptionen, Unterschiede. Des Weiteren gibt es bei anderen

Mobilfunkanbietern auch andere Vertragsbestimmungen, an die die DL und UL Datenraten gebunden zu sein scheinen.

## 6.6 Zusammenfassung der Messergebnisse

Aus den Ergebnissen der Messung kann man auf einige Dinge schließen, die einen Teil des 5G Ausbaus, zumindest in Hamburg, beschreiben. Besonders auffällig ist die Drosselung der DL Datenraten auf 300 Mbit/s bei 5G und 4G, sowie die der UL Datenrate auf 50 Mbit/s bei 4G. Solche maximalen Werte sind in vielen Mobilfunkverträgen der drei großen Mobilfunkanbieter (Telekom, Vodafone, O2) zu finden. Dies ist für Privatpersonen vermutlich kaum wahrnehmbar, was darauf zurückzuführen ist, dass für die häufigsten Anwendungen (Video on Demand, Videotelefonie, Texten, VoIP usw.) ein Download von 300 Mbit/s ausreichend ist. Es ist vor allem bei 5G NSA sinnvoll die Datenrate pro Endgerät zu begrenzen, um allen Usern innerhalb der Zelle eine ausreichende Datenrate bereitstellen zu können. 5G SA Techniken wie Beamforming sind nötig, um NutzerInnen so zu trennen, dass sie sich die Datenrate nicht mehr teilen müssen. Für professionelle Anwendungen sind diese Beschränkungen weniger geeignet. Zwar ist ein konsistenter DL von 300 Mbit/s eine Verbesserung gegenüber 4G, erreicht aber die angesetzten Gigabit Datenraten von 5G nicht. von den höheren UL Datenraten können professionelle Anwendungen jedoch heute schon profitieren. Die Messungen zeigen jedoch, dass diese mit Endgeräten ohne externe Antennen gute Empfangseigenschaften nötig sind, um über den Wert von 50 Mbit/s zu kommen. Unterhalb dieser Grenze verhält sich 5G NSA bei der UL Datenrate ähnlich zu 4G. Fraglich ist außerdem, ob das von der Telekom Beworbene tatsächlich 5G zugeordnet werden kann. Noch übersteigen die tatsächlichen Datenraten der 5G Verbindung die von 4G (Nach ITU-R) nicht, selbst bei LOS und niedrigem Abstand zur BS. Der Zusatz des Mobilfunkvertrags, dass an einzelnen 5G Standorten auch höhere Datenraten möglich sind, lässt zwar auf eine positive Entwicklung schließen, ist aber wenig konkret.

Die fehlende Unterstützung für eine QOS Garantie erschwert die professionelle Nutzung zusätzlich.

## 7 Neue Use Cases für den Filmbereich

5G NR nach ITU-R bietet für die Filmbranche die Erschließung neuer Use Cases.

Tabelle 14 und Tabelle 15 geben einen Überblick für die benötigten Datenraten verschiedener Videocodecs und die Latenzanforderungen von, in der Filmbranche anzutreffenden Use Cases.

| Auflösung | Unkomprimiert | RAW Codecs | Intermediate Codecs (ProRes) | Low Latency Intraframe (Jpeg XS) | Distributions codecs (h.265, h.264) |
|-----------|---------------|------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Full HD   | ca. 1050      | 155-860    | 122-400                      | 70-195                           | 5-12                                |
| UHD1      | ca. 4200      | 622-2530   | 492-1660                     | 250-750                          | 15-25                               |
| UHD2      | ca. 16500     | 1350-6150  | 1460-7078                    | 1000-2800                        | 40-60                               |

Tabelle 14: Überblick der Datenraten bei 25 fps verschiedener Auflösungen und Codecs in Mbit/s

| Anwendung                      | Latenz  | Kompression                        | 5G Use Case |
|--------------------------------|---------|------------------------------------|-------------|
| Focus Pulling                  | <20 ms  | -                                  | URLLC       |
| Drohnensteuerung               | <20 ms  | -                                  | URLLC       |
| Monitoring für Gerätesteuerung | <20 ms  | Low Latency Intraframe             | URLLC, eMBB |
| Echtzeit VFX                   | <20 ms  | Low Latency Intraframe             | URLLC, eMBB |
| Monitoring am Set              | <200 ms | Low Latency Intraframe, Interframe | eMBB        |
| Monitoring Remote              | <1 s    | Low Latency Intraframe, Interframe | eMBB        |
| Datenaustausch                 | >1 s    | RAW, Intermediate Codecs           | eMBB        |

Tabelle 15: Überblick Latenzanforderungen verschiedener Anwendungen



Vergleicht man diese Anforderungen mit den Key Requirements für 5G NR, die von der ITU-R festgelegt wurden, zeigt sich, dass viele Ziele von 5G mit diesen übereinstimmen.

MovieLabs, eine non-profit Organisation, gegründet von den sechs größten Produktionshäusern Hollywoods, beschreibt in [92], inwiefern sich die Filmbranche zukünftig technisch entwickeln wird. Als maßgebliche Verbesserung für Workflows wird dort die cloudbasierte Produktion genannt. Als Cloud sind nicht nur öffentliche Cloudservices gemeint, sondern jedes Speicherungssystem mit Internetzugang, welches für die Kollaboration genutzt werden kann. Das können Lösungen wie Cloud Modelle mit Pay-per-Use oder On-Set Speichersysteme sein. Durch höhere und überall verfügbare UL/DL Datenraten können beispielsweise Akquisitionsgeräte (Kameras, Mikrofone, Sensoren und Script Systeme), Daten in Echtzeit in eine Cloud übertragen. Dadurch können unter anderem Produktions Timelines verkürzt, Globale Kollaboration von Filmschaffenden ermöglicht und der gesamte Produktionsprozess übersichtlicher gemacht sowie zentral verwaltet werden.

## 7.1 Camera to Cloud Production

Bei heutigen Workflows sind die Dailies (Material des aktuellen Drehtages mit gesynctem Sound) oft erst am nächsten Tag für Regie und Produktion zur Einsicht verfügbar. Diese können dann beurteilt und der Verlauf des Projekts überwacht werden. So können SchauspielerInnen regelmäßig ihre Performance anpassen und Kameraleute die Ästhetik des Projekts überprüfen, sowie die technische Richtigkeit des Materials kontrollieren.

Dadurch könnten Schnitt, Regie und Set direkt korrespondieren: Das Material wird vom Schnitt gesichtet sowie für erste Gradings verwendet. Sowohl die kreative Vision, finale Looks, Schnittversionen, als auch photorealistische VFX können für Kund\*innen und ProduzentInnen greifbar gemacht werden.

Weitere Vorteile von Cloudbasierter Produktion sind:

- **Ein Zentraler Speicherort:** Wenn alle projektrelevanten Daten (Aufnahmematerial, VFX Assets, Logos, Schriftarten usw.) an einem zentralen Speicherort verfügbar sind, wird die Kollaboration zwischen verschiedenen Gewerken als auch externen DienstleisterInnen, effizienter. Eine übersichtliche, transparente Projektstruktur ist gewährleistet und Daten müssen nicht mehr zwischen Orten bewegt werden.
- **Wiederverwendung von Material:** Bei richtiger Verwendung und Pflege einer Cloud Speicherlösung ist auch die Wiederverwendung von Dateien ein großer Vorteil. Für Multiplattform Ausspielungen müssen Dateien mehrmals wiederverwendet werden. So werden Zusatzmaterial, Trailer für verschiedenen Plattformen oder alternative Schnittversionen im Laufe des Projekts manchmal auch von verschiedenen Personen erstellt. Durch einen Cloudspeicher, in dem Projektdaten und aktuelle Versionen immer verfügbar sind, wird dieser Prozess vereinfacht. Die Wiederverwendung von VFX Assets und Videomaterial für ähnliche Projekte oder Sequels stellt eine nachhaltigere und effizientere Arbeitsweise dar. Hierfür müssen die Speicherorte dieser Dateien verfügbar und nachvollziehbar sein, was durch eine gut organisierte Cloud gegeben ist.

Für den Upload von Originalkameradaten in Echtzeit ist das Wichtigste ein Netzwerk, dass die nötigen Upload Datenraten zuverlässig zur Verfügung stellt. Bezüglich der Software handelt es sich um einen Filetransfer, der mit gängigen Programmen durchgeführt werden kann.

Die benötigte Datenrate lässt sich aus den entsprechenden Aufnahmedecoders der Produktion ableiten. Da die Größe der entstehenden Datenraten jedoch sehr unterschiedlich sein kann, können im Laufe der Entwicklung von 5G NR manche Aufnahme-Codecs und Formate für einen solchen Upload unterstützt sein, während andere auf dem traditionellen Weg transportiert werden müssen. Datenraten reichen von 122 Mbit/s für Apple ProRes 422 bei FullHD mit 25 fps bis zu 1493 Mbit/s mit ArriRAW UHD1 oder sogar 2160 Mbit/s bei UHD2 mit REDCODE 5:1. Mit der von ITU-R angesetzten Peak Uplink Datenrate von 10 Gbit/s, müsste der Upload aller Formate und Codecs in Echtzeit möglich sein. Ob

diese Datenraten auch umgesetzt werden können, hängt davon ab wie weit die Entwicklung von 5G NR bereits fortgeschritten ist.

Im Folgenden werden die benötigten Kanaleigenschaften für eine Datenrate von 2160 Mbit/s skizziert.

Geht man von der in ITU-R M.2410-0 und ITU-R M.2412-0 simulierten durchschnittlichen Spektralen Effizienz in Dense Urban von 5,4 bit/s/Hz im Uplink für 5G NR aus, beträgt die benötigte Kanalbandbreite für 2160 Mbit/s:

$$B = \frac{D}{SE} = \frac{2160000000 \text{ bit/s}}{5,4 \text{ bit/s/Hz}} = 400000000 \text{ Hz} = 400 \text{ MHz}$$

Formel 2: Bandbreite für 2160 Mbit/s Datenrate bei 5,4 bit/s/Hz spektraler Effizienz

Während diese Bandbreiten in FR1 nicht verfügbar sind, wird in FR2 mit Kanalbandbreiten von 50-400 Mhz gerechnet. Für eine Übertragung mit 100 Mhz Kanalbandbreite, wäre für 2160 Mbit/s (UHD2, REDCODE 5:1) die vierfache Spektrale Effizienz (21,6 bit/s/Hz) nötig, die die Peak Spectral Efficiency im Uplink (15 bit/s/Hz) übersteigt. Geht man von Aufnahmecodecs mit moderateren Datenraten (ProRes 422 HQ), niedrigerer Auflösung (UHD1) und somit 737 Mbit/s aus, wird eine spektrale Effizienz von 1,8 bit/s/Hz bei 400 Mhz und 7,4 bit/s/Hz bei 100 Mhz benötigt.

Praktisch kann nach ETSI TS 138 214 vom 5G Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) mit geeigneter Modulation und Coding Scheme (MCS) maximal eine Spektrale Effizienz von 5,55 bit/s/Hz erzeugt werden. Mittels 16 QAM und einer Coderate von 490/1024 erreicht der Uplink 1,9 bit/s/Hz. Bei 100 MHz Kanalbandbreite bedeuten dies zwischen 190-555 Mbit/s und bei 20 MHz Kanalbandbreite zwischen 38-111 Mbit/s.

Die entsprechenden Datenraten und dafür nötigen SINR können mithilfe von massive MIMO Beamforming und Relaying zuverlässig sowie flächendeckend innerhalb einer Dense Urban Umgebung erreicht werden, wie beispielsweise in [93] gezeigt wird.

Eine Prognose der tatsächlich möglichen Datenrate beim Übertragungszeitpunkt ist jedoch von vielen Faktoren abhängig. Selbst bei bekannten Werten für RSRP, RSRQ und SINR mit einem enormen Aufwand verbunden [94]. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit Hilfe von Network Slicing bestimmte QOS für Filmproduktionen bereitgestellt werden können, wenn eine entsprechende Netzabdeckung gewährleistet ist.

Fraglich ist jedoch, ob ein Echtzeit-Upload von Originalkameradaten in nächster Zeit praktisch umsetzbar ist. Der Aufwand einer zuverlässigen Bereitstellung der benötigten Datenrate durch 5G NR ist möglicherweise für kürzere und günstigere Produktionen zunächst zu hoch. Zudem wären erste Edits und inhaltliche Materialsichtung problemlos mit Proxies möglich. Ist eine Video-OperatorIn am Set, können die einzelnen Takes ohnehin während des Drehs als Referenz und zur Kontrolle gesichtet und sogar gestreamt werden. Der Upload der Originaldaten könnte immer noch über 5G NR, dann allerdings aber asynchron (z.B. nach dem Drehtag oder über Nacht) stattfinden. Geht man von der gesetzlichen Ruhezeit von 11 Stunden zwischen Arbeitsbeginn und -ende als Zeit für den Upload aus (-2 Stunden Headroom) ergeben sich folgende benötigte Datenraten für verschiedene Codecs und Aufnahmezeiten bei UHD1 und 25 fps:

| Codec         | Aufnahmezeit | Datengröße in Gbit | benötigte Datenrate für Upload über Nacht (9 Std.) |
|---------------|--------------|--------------------|----------------------------------------------------|
| ProRes 422    | 1 Std.       | 1768               | 55 Mbit/s                                          |
| ProRes 422 HQ | 1 Std..      | 2656               | 82 Mbit/s                                          |
| ProRes 4444   | 1 Std.       | 3984               | 123 Mbit/s                                         |
| ArriRAW HDE   | 1 Std.       | 5375,2             | 166 Mbit/s                                         |
| REDCODE 2:1   | 1 Std.       | 4579,2             | 141,3 Mbit/s                                       |

Tabelle 16: Benötigte Datenraten für Datenupload eines Drehtages über Nacht

## 7.2 Monitoring

5G NR könnte bei fortgeschrittener Technik eine neue Form der Teamarbeit für Filmproduktionen ermöglichen. URLLC Latenzzeiten in Verbindung mit eMBB, verschafft Focus Puller, Drohnen- oder Remote Head Operator die Möglichkeit standortunabhängig zu arbeiten. Vielmehr können Leuchtmittel, Soundmixer oder Videoswitcher über 5G ferngesteuert werden.

Es lässt sich allgemein zwischen On-Set Monitoring und Remote Monitoring unterscheiden. Am Set in Verbindung mit der oben genannten Geräte-Fernsteuerung. Dafür werden hohe Datenraten, bei Fernsteuerung sehr niedrige Latenzzeiten und eine hohe Anforderung an die Zuverlässigkeit für die Videoübertragung benötigt.

Weiterhin wächst der Bedarf an höherer Produktionsqualität in Richtung 4K/8K und HDR, wodurch zusätzlich eine höhere Datenübertragungsrate als bei FullHD und SDR benötigt wird. 5G NR kann die nötigen Datenraten für 4K/8K HDR Workflows möglicherweise bereitstellen und ein Monitoring oder eine Fernsteuerung einiger, für die Filmproduktion wichtigen Geräte, ermöglichen. Dafür werden neben der Funkübertragungstechnik geeignete Videocodecs, Netzwerkprotokolle sowie Endgeräte benötigt.

### 7.2.1 Monitoring mit Fernsteuerung

Ein vergleichbarer Use Case für die beim Film übliche Gerätesteuerung mit zusätzlichem Videofeed ist die Fernsteuerung von Fahrzeugen über 5G NR, was in [95] und [96] überprüft wird. Während im Filmkontext häufig eine, für Focus Pulling nötige, Latenz unter einem Frame ( $<20$  ms) angegeben wird [92], ist bei der Teleoperation von Fahrzeugen sogar eine end-to-end Latenz von  $<5$  ms eine kritische Anforderung [97]. In [98] konnte gezeigt werden, dass mit 5G NR bei 3,5 GHz und URLLC im bestehenden Vodafone 5GC Netz in London eine End-to-End Latenz von 2,7 ms mit einer Zuverlässigkeit von 99,999 % realisierbar ist und damit die oben genannten Use Cases möglich sind. Dafür nötig sind Edge Server innerhalb des 5G CN und ein von den Betreiber bereitgestelltes QoS

Management. Laut [95] werden dafür Technologien für Self-Service Portale entwickelt, mit denen Netzwerk KonsumentInnen QOS Anforderungen definieren können, wie z.B. die Priorisierung von 4K Video Traffic oder URLLC. Die Software übersetzt diese Anforderungen dann in Instruktionen für die Priorisierung der Netzwerkressourcen.

Die Deutsche Telekom demonstrierte im Februar 2022 in einer Machbarkeitsstudie in Zusammenarbeit mit Ericsson ein 5G E2E Network Slicing mit secured QOS für latenzkritische Unternehmensanwendungen über Ländergrenzen hinaus [99].

Weitere Latenzkomponenten wie Codierung der Videodaten, Mechanik der benutzten Geräte und Paketlaufzeiten innerhalb des Netzwerks, müssen für E2E Latenzen berücksichtigt werden. Da mithilfe von URLLC 5G NR eine so niedrige Latenz erreicht werden kann (1 ms), liegt der Fokus für eine Anwendung auf der Reduzierung der Latenzzeit der anderen Latenzkomponenten. JPEG XS ist aufgrund einer Codier- und Decodierlatenz im Mikrosekundenbereich mit visually lossless Qualität ein geeigneter Codec. Speed HQ bzw. die gesamte NDI Infrastruktur sind aufgrund von günstiger Implementierung, als auch umfangreicher Geräte- und Softwareunterstützung eine gängige Lösung für Videoübertragung über IP-Netzwerke. Ist weniger Bandbreite verfügbar, bieten sich Codecs mit höherer Kompression und Hardwarebeschleunigung an, um trotzdem eine niedrige Latenz zu gewährleisten. Diese fällt jedoch, abhängig von Hardware und Codec, etwas höher aus [100].

Als Proof of Concept verwendete die Riot Esports Technology Group für die Übertragung von Videofeeds beim League of Legends Mid-Season Invitational Reykjavik in Island JPEG XS. Laut James Wyld, infrastructure engineer, Riot Esports Technology Group [101] konnte zwischen den drei Produktionsstandorte in Reykjavik, Berlin und Los Angeles ohne verlorene Frames bei 10 ms Jitterbuffer, Video übertragen werden. Zudem wurde ein Switcher in Los Angeles von einem Operator in Reykjavik gesteuert, wobei ein subjektiv wahrnehmbarer Delay seitens des Operators, trotz 330ms Latenz, ausblieb. Diese geringen Verzögerungen waren durch JPEG XS und dem dedizierten Riot Direct Network möglich. Ein solches dediziertes Netzwerk, was die IP Pakete unabhängig von

ISP's direkt Routen kann, wird für Filmschaffende nicht verfügbar sein. Pay-per-Use Services wie AWS bieten jedoch ähnliche Eigenschaften mit global verteilten Server Standorten für besseres WAN Routing.



Abbildung 26: Multiview of MSI 2021 im Ü-Wagen in Reykjavik, mit Videoquellen aus Los Angeles und Berlin [101]

Was anhand des Beispiels erkennbar wird, ist allerdings der Aufwand: Bei Low End Produktionen ist es nicht im Bereich des Möglichen, sich einen eigenen Internet Backbone zu bauen. Das Budget für AWS oder andere Cloud Services ist jedoch häufiger vorhanden. WAN Übertragungen sind nicht Zuverlässig genug, um die Jitter- und Latenzanforderungen für eine SMPTE 2110-22 Übertragung und JPEG XS bereitzustellen. SRT bietet als Open Source Software die Möglichkeit einer zuverlässigen Übertragung in WAN. Hardwareimplementationen von hochkomprimierenden Codecs wie HEVC oder AV1 gewährleisten eine latenzarme Codierung mit starker Bandbreiteneinsparung. Durch das 5G CN und Edge Server können E2E Latenzzeiten so stark reduziert werden, dass Gerätefernsteuerung auch für Produktionen mit weniger Budget möglich sein kann [102].

### 7.2.2 5G vs Teradek Bolt

Die Technik, die es von 5G für das Monitoring am Filmset zu ersetzen gilt, sind die vorher bereits vorgestellten Videofunkstrecken (bspw. die Bolt Serie von Teradek). Auch wenn es bei Teradek Bolt einige, nicht zu verachtende Nachteile gibt, die in

3.1 aufgezeigt werden, überwiegen die Vorteile. Gegenüber heutigen Mobilfunkstandards sind dies vor allem die simple Anwendung, JSCC, der geringe Formfaktor und die Beweglichkeit des gesamten Systems. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Unabhängigkeit von IP Netzwerken, die viele weitere Herausforderungen für Live-Videoübertragungen mit sich bringen. Besonders die mangelnde Unterstützung von Multicast Übertragung bei Videoformaten über Wireless Netzwerke stellt ein Hindernis dar. 5G Broadcast und 5G Multicast sind Techniken die dieses Problem lösen könnten, jedoch zunächst für lineares Fernsehen und Großveranstaltungen vorgesehen sind bzw. erst noch getestet werden müssen [103]. Network Slicing kann, sobald es von Mobilfunkanbietern angeboten wird, die nötige Zuverlässigkeit bereitstellen und QOS Garantie bieten. Trotzdem bleibt es ein Problem, sich auf die Infrastruktur der 5G Basisstationen zu verlassen. Im Vergleich zu Teradek Bolts, ist es eine weitaus unkompliziertere Lösung, das eigene System mit zum Drehort zu bringen. Falls mal schlechte Empfangsbedingungen herrschen, kann die Position der Empfangsgeräte angepasst werden.

Eine anderer Weg wäre die Weiterentwicklung von dedizierten Funksystemen. Sie profitieren indirekt von der Entwicklung von 5G, da die Geräte durch Übernahme von für 5G vorgeschlagener Technologie verbessert werden können. Teradek Bolt Systeme können durch Integration von Polar Codes, massive MIMO oder mmWave Datendurchsatz, die Reichweite und Interferenzunterdrückung erhöhen. Das Problem des schlechteren Empfangs durch wasserhaltige Hindernisse (Pflanzen, Menschen) bleibt jedoch bestehen und wird mit mmWave Technik eher verschlimmert.

Bonding Router bieten die nötigen sehr hohen Datenraten für Videoübertragungen und die weitaus höhere Zuverlässigkeit als Point to Point Systeme. Sie erfahren aber durch das eingesetzte Netzwerkbonding eine zu hohe Latenz für Gerätesteuerung. Entsprechende Bondingrouter sind außerdem teuer und übersteigen evtl. Budgets von kleineren Produktionen. Ein in 5G integrierter Ansatz von Joint Source Channel Coding wäre eine Lösung für eine solche Videoübertragung. Da dies aber eine grundlegende Änderung der Funkübertragungstechnik von 5G benötigen würde, und der Use Case für



Filmproduktionen sehr spezifisch ist, bleibt so eine Entwicklung wohl eher unwahrscheinlich. Es gibt jedoch Ansätze für JSCC in Verbindung mit Polar Codes für 5G IoT Anwendungen [104].

### 7.2.3 Nachteile von Remote-Arbeit

Gerade bei Arbeit, die traditionell von Arbeitskräften vor Ort durchgeführt wird, gibt es einige Nachteile, wenn diese ferngesteuert abläuft. Speziell die Tätigkeit des Focus Pullers, die die Aufgabe des 1. AC (Assistant Camera) darstellt. Früher, in den Zeiten des analogen Films, als auch heute, der Zeit des Digitalen, muss die Fokusdistanz häufig noch mithilfe manueller Messung bestimmt werden. Diese werden anhand von Maßbändern sowie Laser-Entfernungsmessern festgehalten und dynamisch angepasst. Um auf Bewegungen der Kamera, gefilmten Menschen oder Objekte reagieren zu können, ist es sehr hilfreich vor Ort zu sein. Bei Remote Arbeit, fallen diese manuellen Werkzeuge zur Abschätzung der Fokusdistanz und Bewegung weg. Unterstützende Technologien wie LiDAR können diese Defizite wiederum ausgleichen [105].

Zu beachten ist, dass 1. AC's für viele andere Aufgaben am Set benötigt werden, die Remote nicht möglich sind. Dazu gehören Auf-, Um- und Abbau der Kamera, der Wechsel von Objektiven, Filtern und Speicherkarten oder die Kontrolle der Funktionsfähigkeit aller kamerarelevanten Geräte [1]. Die Remote Arbeit kann daher eher in speziellen Anwendungsfällen unterstützend eingesetzt werden. Bei Ausfall des Focus Pullers wegen Krankheit, oder aus anderen Gründen könnte global und schnell nach Ersatz gesucht werden, wenn eine 5G NR Infrastruktur vorhanden ist. Weiterhin kann bei schwierig erreichbaren Drehorten durch Remote Arbeit die Crew verkleinert werden. Diese speziellen Anwendungsfälle begründen aber im Falle des Fokuspullings keinen Umstieg auf Remote Workflows.

## 7.3 VFX

Laut [92] basieren traditionelle VFX Workflows nicht auf Echtzeit Feedback. Das ist dem Umstand geschuldet, dass die Renderzeit von VFX Szenen, selbst bei Verwendung von Renderfarmen mehrere Tage dauern können. Erst durch Entwicklungen von Render Engines aus dem Gaming Bereich zeigten sich 2018 große Verbesserungen für diese Prozesse. Diese sogenannten Real Time Engines spielen in Zukunft eine immer wichtigere Rolle in der Erstellung von Filmen. Vielmehr ergibt sich die Möglichkeit, ein dem Endprodukt nahes Bild, in Echtzeit bereitstellen zu können. Dadurch ändert sich der Produktionsprozess indem die Postproduktion ein Teil der Produktion wird.

Bei der Produktion von Disneys "The Mandalorian" wurde diese Art der virtuellen Produktion umfangreich genutzt. In Verbindung mit Unreal Engine 5 wurden virtuelle Sets im Studio auf einer LED Wand hinter SchauspielerInnen ausgespielt, die dynamisch auf Kameraposition reagieren und von der Crew iterativ angepasst werden können. Die VFX werden durch die LED Wand In-Camera aufgenommen und es ist wenig bis keine Nachbearbeitung nötig. Dadurch ist die Produktion nicht auf Aufwändige Locationshoots oder Lichtverhältnisse zu bestimmten Tageszeiten angewiesen. Zudem kann die Umgebung schnell und nondestruktiv angepasst werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die VFX der LED Wand ein realistisches Umgebungslicht entsteht. Bei Arbeiten mit Greenscreens stellt realistisches Umgebungslicht eine große Herausforderung in der Nachbearbeitung dar.

Aufgrund der hohen Datenraten für die Übertragung von VFX und Originalkameradaten befinden sich LED Wände, Kameras und Rechner für das Rendering, alle in einem LAN mit entsprechend groß ausgelegten Netzwerkschnittstellen.



Abbildung 27: In-Camera VFX in Disneys Mandalorian [103]

Durch die hohen, versprochenen Datenraten und die niedrige Latenz von 5G NR Verbindungen, können bei traditionellen VFX Workflows einige Verarbeitungsschritte in die Cloud verlegt werden. Das Rendering kann cloudbasiert stattfinden und VFX Artists können digitale Assets über virtuelle Desktops vom Set aus oder remote anpassen. Auch bei Location Shoots, wo In-Camera VFX wie im oben gezeigten Beispiel nicht möglich ist, können VFX Workflows von 5G NR profitieren. Dies ist gemäß dem Fall möglich, wenn VFX Elemente in Szenen hinzugefügt werden oder auf Monitoren am Set verfügbar gemacht werden müssen. Für hochwertige VFX werden dafür jedoch die Originalkameradaten und damit sehr hohe Datenraten (s. Tabelle 14) und zudem eine sehr niedrige Latenz benötigt.

## 8 Fazit

Netzwerk Latenzen und Zuverlässigkeit bleiben bei WAN Übertragungen eine große Herausforderung, gerade bei Filmproduktionen mit niedrigeren Budgets, können die Infrastruktur- und Lizenzkosten für eine Übertragung mit visually lossless compression wie JPEG XS und Standards wie SMPTE 2110 nicht aufgebracht werden. Hardwareimplementationen von Distributionscodecs wie HEVC oder AV1 in Verbindung mit Open Source Netzwerkprotokollen, wie SRT, können eine Alternative für Hochwertige WAN Videoübertragungen bieten. Die Latenzzeiten bleiben jedoch im Vergleich zu dedizierten Funksystem hoch. Innerhalb des 5G CN sind mit Hilfe von Edge Servern E2E Latenzzeiten möglich, die einige neue Use Cases für Filmproduktionen nicht nur im High end sondern auch im Low end Bereich ermöglichen. So zum Beispiel die Fernsteuerung von produktionsrelevanten Geräten. Durch Networkslicing wird Produktionsfirmen oder DienstleisterInnen die Möglichkeit geboten, zuverlässige mobile Datenübertragungen bereitzustellen

Durch die langsame Entwicklung von 5G SA und entscheidenden Technologien, wie Edge Computing und Networkslicing kann es aber noch einige Jahre dauern, bis niedrige Latenzen in Deutschland für Echtzeitanwendungen über 5G NR realisierbar sind. Die in dieser Arbeit durchgeführte Messung zeigt, dass 5G NR noch nicht die Vorteile bringt, die durch diese Technologie versprochen wird. Die einzigen Vorteile scheinen bis jetzt eine höhere Upload Datenrate bei gutem Empfang, sowie ein Erreichen der vertraglich geregelten maximalen DL Datenrate innerhalb der Mobilfunkzelle. Dadurch werden bereits Schritte in eine vernetzte Produktionsumgebung ermöglicht. Proxies und Dailies können häufiger direkt in Clouds hochgeladen werden und Livestreams können in der Qualität gesteigert werden. Bereits jetzt werden Fachkräfte im Filmbereich benötigt, die sich intensiver mit der Thematik Mobilfunk und Netzwerken auseinandersetzen und diese Nachfrage wird in Zukunft sicherlich steigen. Wenn bestimmte Anwendungen von Produktionsfirmen gewünscht sind, die auf 5G angewiesen sind, braucht es Leute, die die Schnittstelle zwischen Mobilfunkanbietern und Filmproduktionen darstellen. Frequenzen müssen geplant werden, Drehorte auf

ihren Empfang getestet und QOS Anforderungen definiert und bei Mobilfunkanbietern angefordert werden. Die exponentielle Entwicklung der verfügbaren Datenraten im Mobilfunkbereich der letzten Jahrzehnte zeigt, dass es nur eine Frage der Zeit ist bis 5G oder 6G die nötigen Eigenschaften bietet, um neue Usecases im Filmbereich möglich zu machen.

# Abbildungs-, Tabellen- und Formelverzeichnis

|                                                                                                                       |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Abbildung 1: Verschiedene Bildauflösungen für Videosignale [1]                                                        | S.9  |
| Abbildung 2: Bayer Pattern im Vergleich zu Full RGB [10]                                                              | S.16 |
| Abbildung 3: End-to-End Latenz einer Videoübertragung und mögliche Ursachen                                           | S.19 |
| Abbildung 4: Auswirkungen von Jitter auf IP-Pakete                                                                    | S.20 |
| Abbildung 5: Vergleich End-to-End Latency mit Hardware- und Software Encoding & Decoding, SRT vs. RTMP sowie RTT [26] | S.23 |
| Abbildung 8: Teradek Bolt Funkstrecke [31]                                                                            | S.29 |
| Abbildung 9: Bildqualität in Abhängigkeit zum SNR, WHDI vs. traditionelle Videofunk-Systeme                           | S.30 |
| Abbildung 10: Beispielaufbau des Monitorings an einem Filmset mit Teradek Funkstrecken                                | S.32 |
| Abbildung 11: Durchschnittliche DL/UL Datenraten in Deutschland mit 4G LTE [34]                                       | S.38 |
| Abbildung 12: E2E Diagramm für 4G (user plane) mit typischen Latenzzeiten (round trip times) [38]                     | S.39 |
| Abbildung 13: 5G use cases aus der ITU-R Empfehlung ITU-R M.2083 [44]                                                 | S.40 |
| Abbildung 14: Kerneigenschaften von 5G aus ITU-R Recommendation ITU-R M.2083 [44]                                     | S.41 |
| Abbildung 15: Bei der Frequenzauktion 2019 versteigerte Frequenzen für 5G NR [48]                                     | S.44 |
| Abbildung 16: Massive MIMO Phased Array Antenne mit 64 Elementen für 5G 6 GHz [60]                                    | S.46 |
| Abbildung 17: Direktivität von Massive MIMO Antennen und Array Gain [63]                                              | S.47 |
| Abbildung 18: Schema eines 5G NR HetNet [66]                                                                          | S.49 |
| Abbildung 19: Verschiedene Empfangsszenarien zwischen Mobilfunk Basisstation und Accesspoint                          | S.53 |
| Abbildung 20: Aufbau der der Mess-Hardware                                                                            | S.54 |
| Abbildung 21: Standorte der Basisstation und Accesspoints während der verschiedenen Messungen                         | S.56 |
| Abbildung 22: Durchschnittliche Latenzzeiten von Messreihe 1                                                          | S.58 |
| Abbildung 23: Höchste UL Datenrate Messreihe 1                                                                        | S.59 |
| Abbildung 24: Niedrigste UL Datenrate Messreihe 1                                                                     | S.59 |
| Abbildung 25: Standorte der BS und MP Messreihe 2                                                                     | S.60 |
| Abbildung 26: Multiview of MSI 2021 im Ü-Wagen in Reykjavik, mit Videoquellen aus Los Angeles und Berlin [101]        | S.71 |
| Abbildung 27: In-Camera VFX in Disneys Mandalorian [103]                                                              | S.75 |
| Abbildung 28: Durchschnittliche Latenzzeiten von Messreihe 2                                                          | S.61 |
| Formel 1: Datenrate R eines Videosignals                                                                              | S.10 |
| Formel 2: Bandbreite für 2160 Mbit/s Datenrate bei 5,4 bit/s/Hz spektraler Effizienz                                  | S.67 |
| Tabelle 1: Datenraten verschiedener SDI Standards [5][6][7][8]                                                        | S.11 |

|                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabelle 2: Datenraten verschiedener Videoauflösung nach Vorverarbeitungsschritten [1]          | S.13 |
| Tabelle 3: Datenraten verschiedener ProRes Varianten [10]                                      | S.15 |
| Tabelle 4: Vergleich der Datenraten verschiedener RAW-Codecs                                   | S.17 |
| Tabelle 5: Verschiedene Datenrate von NDI [29]                                                 | S.25 |
| Tabelle 6: Verschiedene Datenraten von TICO XS [76]                                            | S.26 |
| Tabelle 7: Datenraten Proxycodecs für FullHD Auflösung [1]                                     | S.36 |
| Tabelle 8: Datenraten und Latenzen von 4G Technologien nach 3GPP [37][38]                      | S.37 |
| Tabelle 9: Maximale Datenraten von 4G Mobilfunktarifen [40][41][42]                            | S.37 |
| Tabelle 10: Angenäherte Abstände der AP zur BS von Messreihe 1                                 | S.56 |
| Tabelle 11: Durchschnittswerte der Speedtests an den verschiedenen Messpunkten von Messreihe 1 | S.57 |
| Tabelle 12: Angenäherte Abstände der AP zur BS von Messreihe 2                                 | S.60 |
| Tabelle 13: Durchschnittswerte der Speedtests an den verschiedenen Messpunkten von Messreihe 2 | S.61 |
| Tabelle 14: Überblick der Datenraten bei 25 fps verschiedener Auflösungen und Codecs in Mbit/s | S.64 |
| Tabelle 15: Überblick Latenzanforderungen verschiedener Anwendungen                            | S.64 |
| Tabelle 16: Benötigte Datenraten für Datenupload eines Drehtages über Nacht                    | S.68 |

## Literaturverzeichnis

- [1] Ulrich Schmidt, "Professionelle Videotechnik", Springer Berlin Heidelberg ,16. Juli 2021
- [2] ITU-R, "Recommendation BT.709-6", Juni 2016
- [3] EBU, "Tech Doc 3299", 22. Januar 2010
- [4] ITU-R, "Recommendation BT.2020-2", Oktober 2015
- [5] Society of Motion Picture and Television Engineers, "SMPTE 292M-2008: 1.5 Gb/s Signal/Data Serial Interface"
- [6] Society of Motion Picture and Television Engineers, "SMPTE 424M-2006: 3 GB/s Signal/Data Serial Interface"
- [7] Society of Motion Picture and Television Engineers, "SMPTE ST 2081-11 – 2160-line Source Image and Ancillary Data Mapping for Duallink 6G-SDI"
- [8] Society of Motion Picture and Television Engineers, "ST 2082-10:2018:2160-line and 1080-line Source Image and Ancillary Data Mapping for 12G-SDI"
- [9] International Organization for Standardization, "ISO/IEC 29170-2:2015:Information technology — Advanced image coding and evaluation — Part 2: Evaluation procedure for nearly lossless coding", 2015

- [10] Apple, "ProRes White Paper", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.apple.com/final-cut-pro/docs/Apple\\_ProRes\\_White\\_Paper.pdf](https://www.apple.com/final-cut-pro/docs/Apple_ProRes_White_Paper.pdf)
- [11] A. Descampe *et al.*, "JPEG XS—A New Standard for Visually Lossless Low-Latency Lightweight Image Coding," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 9, pp. 1559-1577, Sept. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3080916.
- [12] R. Langseth, V. R. Gaddam, H. K. Stensland, C. Griwodz and P. Halvorsen, "An Evaluation of Debayering Algorithms on GPU for Real-Time Panoramic Video Recording," *2014 IEEE International Symposium on Multimedia*, 2014, pp. 110-115, doi: 10.1109/ISM.2014.59.
- [13] ARRI, Formats and Resolutions Overview of ARRI digital motion picture cameras, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.arri.com/resource/blob/31908/14147b455c90a9a35018c0d091350ff3/2021-10-arri-for-matsandresolutionsoverview-3-4-data.pdf>
- [14] ARRI, Formats & Data Rate Calculator, 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/tools/formats-and-data-rate-calculator>
- [15] Red Digital Cinema Camera Company, Recording Times, 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.red.com/recording-time>
- [16] Apple, "ProRes RAW White Paper", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.apple.com/final-cut-pro/docs/Apple\\_ProRes\\_RAW.pdf](https://www.apple.com/final-cut-pro/docs/Apple_ProRes_RAW.pdf)
- [17] EBU, "Recommendation EBU R 132", April 2011
- [18] Kaaresoja, Topi & Brewster, Stephen & Lantz, Vuokko. (2014). "Towards the Temporally Perfect Virtual Button: Touch-Feedback Simultaneity and Perceived Quality in Mobile Touchscreen Press Interactions". *ACM Transactions on Applied Perception*, 2014, pp. 1-25, doi:10.1145/2611387.
- [19] Dennis Barrett, Prajakta Desai, Texas Instruments, "Low-latency design considerations for video-enabled drones", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.ti.com/lit/wp/spry301/spry301.pdf?ts=1649607854943&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/wp/spry301/spry301.pdf?ts=1649607854943&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [20] J. L. Tanou and M. Blestel, "Analysis of Emerging Video Codecs: Coding Tools, Compression Efficiency," in *SMPTE Motion Imaging Journal*, vol. 128, no. 10, pp. 14-24, Nov.-Dec. 2019..
- [21] IETF, "RFC 3393: IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)", 2002
- [22] Comer, Douglas E., "*Computer Networks and Internets*", Prentice Hall, 2008, p. 476
- [23] IETF, "RFC 1889: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", 1996
- [24] Haivision, "The Ultimate Guide to the SRT Video Streaming Protocol" Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.haivision.com/blog/all/ultimate-guide-to-the-srt-video-streaming-protocol/>



- [25] IETF Maxim Sharabayko, "107: SRT Protocol Overview", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://datatracker.ietf.org/meeting/107/materials/slides-107-dispatch-srt-overview-01>
- [26] Haivision Lina Nikols, "RTMP vs. SRT: Which Streaming Protocol is Right for You?", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.haivision.com/blog/all/rtmp-vs-srt/>
- [27] L. Shalev, H. Ayoub, N. Bshara and E. Sabbag, "A Cloud-Optimized Transport Protocol for Elastic and Scalable HPC," in *IEEE Micro*, vol. 40, no. 6, pp. 67-73, 1 Nov.-Dec. 2020, doi: 10.1109/MM.2020.3016891.
- [28] Evan Statton & Thomas Edwards in VSF, "Live, Uncompressed Video in the Cloud at VidTrans 21", Zugriffen: 10. April, 2022. [Youtube], Verfügbar unter: [https://www.youtube.com/watch?v=8Enhosh7z\\_g](https://www.youtube.com/watch?v=8Enhosh7z_g)
- [29] NewTek, "Networking Best Practice – White Paper", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://ndi.tv/tools/education/networking/best-practices/networking-best-practice/>
- [30] "RDD 35:2016 - SMPTE Registered Disclosure Doc - TICO Lightweight Codec Used in IP Networked or in SDI Infrastructures," in *RDD 35:2016*, vol., no., pp.1-53, 11 April 2016, doi: 10.5594/SMPTE.RDD35.2016.
- [31] Teradek, "Bolt 4K Series", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://teradek.com/pages/bolt4k>
- [32] Amimon, "WHDI", Zugriffen: 20. Januar, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://venturebeat.com/wp-content/uploads/2007/08/tech\\_article\\_final.pdf](https://venturebeat.com/wp-content/uploads/2007/08/tech_article_final.pdf)
- [33] Steven Shichang Gao; Qi Luo; Fuguo Zhu, "Circularly Polarized Antennas", Wiley-IEEE Press, 2012
- [34] Sam Fenwick, " Deutschland - Erlebnisbericht zum Mobilfunknetz", Open Signal, Mai 2021, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.opensignal.com/de/reports/2021/05/germany/mobile-network-experience>
- [35] Film-tv-Video.de, "8K über 5G mmWave", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.film-tv-video.de/equipment/2021/03/11/8k-ueber-5g-mmwave/>
- [36] Teradek, "VidiU Go", Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://teradek.com/collections/vidiu-go-family>
- [37] 3GPP "LTE ue-Category", August 2016, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.3gpp.org/keywords/acronyms/1612-ue-category>
- [38] O. Al-Saadeh, G. Wikstrom, J. Sachs, I. Thibault and D. Lister, "End-to-End Latency and Reliability Performance of 5G in London," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647379.

- [39] Ebna Masum, Jewel Babu, "End-to-End Delay Performance Evaluation for VoIP in the LTE network", Blekinge Institute of Technology, June 2011
- [40] "MagentaMobil Data", Telekom Deutschland, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.telekom.de/mobilfunk/tarife/daten-tarife>
- [41] "Vodafone Red", Vodafone Deutschland, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/privat/handys-tablets-tarife/alle-tarife-mit-vertrag.html?icmp=pathfinder-mofu:tab-neukunde1:1:sim-only>
- [42] "o2 Free", o2 Deutschland, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.o2online.de/tarife/>
- [43] Sam Fenwick, "German rural 4G users see big differences in 4G Availability and download speeds between operators", Open Signal, März 2020, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.opensignal.com/2020/03/12/german-rural-4g-users-see-big-differences-in-4g-availability-and-download-speeds-between-operators>
- [44] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, "5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology", Academic Press, August 2018
- [45] D. Hui, S. Sandberg, Y. Blankenship, M. Andersson and L. Grosjean, "Channel Coding in 5G New Radio: A Tutorial Overview and Performance Comparison with 4G LTE," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, no. 4, pp. 60-69, Dec. 2018, doi: 10.1109/MVT.2018.2867640.
- [46] Joern Krause "Technical Report 38.912 - Study on New Radio (NR) access technology", 3GPP, 2016
- [47] BMVI, "Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G – Plattform „Digitale Netze und Mobilität“, 2015
- [48] "5G-Auktion 2019 (2 GHz, 3,6 GHz)", Bundesnetzagentur, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Breitband/MobilesBreitband/Frequenzauktion/2019/Auktion2019.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Breitband/MobilesBreitband/Frequenzauktion/2019/Auktion2019.html)
- [49] "Leitfaden 5G-Campusnetze – Orientierungshilfe für kleine und mittelständische Unternehmen", BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/leitfaden-5g-campusnetze-orientierungshilfe-fuer-kleine-und-mittelstaendische-unternehmen.html>
- [50] "Verwaltungsvorschrift für Frequenzuteilungen für lokale Frequenznutzungen im Frequenzbereich 3.700-3.800 MHz", Bundesnetzagentur, Juli 2019, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bkzsh.de/wp-content/uploads/2019/07/VV\\_Lokales\\_Breitband-Version-2019-07-02-finaler-Entwurf.pdf](https://www.bkzsh.de/wp-content/uploads/2019/07/VV_Lokales_Breitband-Version-2019-07-02-finaler-Entwurf.pdf)

- [51] "Übersicht der Zuteilungsinhaber für Frequenzzuteilungen für lokale, breitbandige Frequenznutzungen im Frequenzbereich 24.250-27.500 MHz", Bundesnetzagentur, Juli 2019, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/LokaleNetze/Zuteilungsinhaber26GHz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/LokaleNetze/Zuteilungsinhaber26GHz.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- [52] "Frequenzkompass 2020", Bundesnetzagentur, 2019, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Frequenzkompass2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Frequenzkompass2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [52] "Vfg. 64/2018", Bundesnetzagentur, Juni 2020, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/Kurzzeitnutzung/BNetzAGreen\\_D.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Kurzzeitnutzung/BNetzAGreen_D.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [53] 3GPP, "Release 16", Juli 2020
- [54] Bajracharya, Rojeena & Shrestha, Rakesh & Jung, Haejoon. (2020). "Future Is Unlicensed: Private 5G Unlicensed Network for Connecting Industries of Future", MDPI Sensors, p 20, doi:10.3390/s20102774.
- [55] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in Bell Labs Technical Journal, vol. 20, pp. 11-22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.
- [56] Emil Björnson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti (2017), "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency", Foundations and Trends® in Signal Processing: Vol. 11, No. 3-4, pp 154–655. DOI: 10.1561/20000000093.
- [57] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [58] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, November 2010, doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [59] "Discussion on the frame structure design for NR", 3GPP Meeting R1-84b, Tech Doc R1-163132, April 2016
- [60] "Aurora CMM.100.A 5-6GHz C-Band Massive MIMO Phased Array", TAOGLAS, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.taoglas.com/product/aurora-cmm-100-a-5-6ghz-c-band-massive-mimo-phased-array/>
- [61] E. Björnson, J. Hoydis and L. Sanguinetti, "Massive MIMO Has Unlimited Capacity," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 1, pp. 574-590, Jan. 2018, doi: 10.1109/TWC.2017.2768423.

- [62] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [63] Emil Björnson, "Massive MIMO for 5G below 6 GHz: Achieving Spectral Efficiency, Link Reliability, and Low-Power Operation", Webinar in the IEEE 5G Webinar Series, January 17, 2018, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://ebjornson.com/research/presentations/>
- [64] N. Hassan, K. A. Yau and C. Wu, "Edge Computing in 5G: A Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 127276-127289, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938534.
- [65] H. Ramazanali, A. Mesodiakaki, A. Vinel and C. Verikoukis, "Survey of user association in 5G HetNets," 2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/LATINCOM.2016.7811565.
- [66] J. Zhao, S. Ni, L. Yang, Z. Zhang, Y. Gong and X. You, "Multiband Cooperation for 5G HetNets: A Promising Network Paradigm," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 4, pp. 85-93, Dec. 2019, doi: 10.1109/MVT.2019.2935793.
- [67] "Daten und Fakten zur fünften Mobilfunkgeneration", Informationszentrum Mobilfunk, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/sites/default/files/medien/Daten%20und%20Fakten%20zu%205G.pdf>
- [68] A. EL RHAYOUR and T. MAZRI, "5G Architecture: Deployment scenarios and options," 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISAECT47714.2019.9069723.
- [69] Stephane Teral, "5G best choice architecture", IHS Markit, Januar 2019
- [70] Tobias Krzossa "Technik Check - Das kann 5G Standalone", Vodafone Newsroom, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/newsroom/netz/das-kann-5g-standalone/>
- [71] A. EL RHAYOUR and T. MAZRI, "5G Architecture: Deployment scenarios and options," 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISAECT47714.2019.9069723.
- [72] "Breitband-Monitor", Bundesnetzagentur, 2022 Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.breitband-monitor.de/mobilfunkmonitoring/download>
- [73] "Wie kann ich mit meinem Smartphone 5G und 5G+ nutzen?", Vodafone Fragen und Antworten, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.vodafone.de/hilfe/mobiles-surfen/5g.html#wie-kann-ich-mit-meinem-smartphone-5g-und-5g-plus-nutzen>
- [74] Nicolas La Rocco "Deutsche Telekom: 5G Standalone soll dieses Jahr auch bei 700 MHz starten", Computerbase, Februar 2022, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter:

<https://www.computerbase.de/2022-02/deutsche-telekom-5g-standalone-soll-dieses-jahr-auch-bei-700-mhz-starten/>

[75] "Schwerpunkt auf „pures 5G“ über 3.6 GHz-Frequenz: Schneller O2 Netzausbau – 50 Prozent 5G-Versorgung bis Ende 2022", o2 Corporate News, Oktober 2021, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.telefonica.de/news/corporate/2021/10/schwerpunkt-auf-pures-5g-ueber-3-6-ghz-frequenz-schneller-o2-netzausbau-50-prozent-5g-versorgung-bis-ende-2022.html>

[76] "TicoXS", intopix, Zugriffen: 16. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.intopix.com/jpeg-xs>

[77] "Vfg. 151/2018", Bundesnetzagentur, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/MobilfunkDectWlanCBFunk/2010\\_07\\_WLAN\\_5GHz\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/MobilfunkDectWlanCBFunk/2010_07_WLAN_5GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=7)

[78] "Vfg. 151/2018", Bundesnetzagentur, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/MobilfunkDectWlanCBFunk/2010\\_07\\_WLAN\\_5GHz\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/MobilfunkDectWlanCBFunk/2010_07_WLAN_5GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=7)

[78] "Transmitter Display Operation", Teradek, Zugriffen: 10. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://support.teradek.com/hc/en-us/articles/360057505873-TRANSMITTER-DISPLAY-OPERATION>

[79] King N Ngan; Chi W Yap; Keng T Tan, "Video Coding for Wireless Communication Systems", Boca Raton, FL : CRC Press, 2001

[80] Holger Heuermann, "Mikrowellentechnik", Springer-Vieweg-Verlag, April 2020

[81] ARD; ZDF; ORF "Technische-Produktionsrichtlinien-Fernsehen", Zugriffen: 16. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.zdf.de/zdfunternehmen/technik-normen-richtlinien-100.html>

[82] ITU-T, "Recommendation G.114", Mai 2003, Zugriffen: 18. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114/>

[83] Bing Wang; Jim Kurose, Prashant Shenoy; Don Towsley, "Multimedia streaming via TCP: An analytic performance study", ACM Trans, Multimedia Comput. Commun. Appl. 4, 2, Article 16 (May 2008), 22 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/1352012.1352020>

[84] Mrvelj, Š.; Matulin, M, "Impact of packet loss on the perceived quality of UDP-based multimedia streaming: a study of user quality of experience in real-life environments" *Multimedia Systems* 24, 33–53 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00530-016-0531-8>

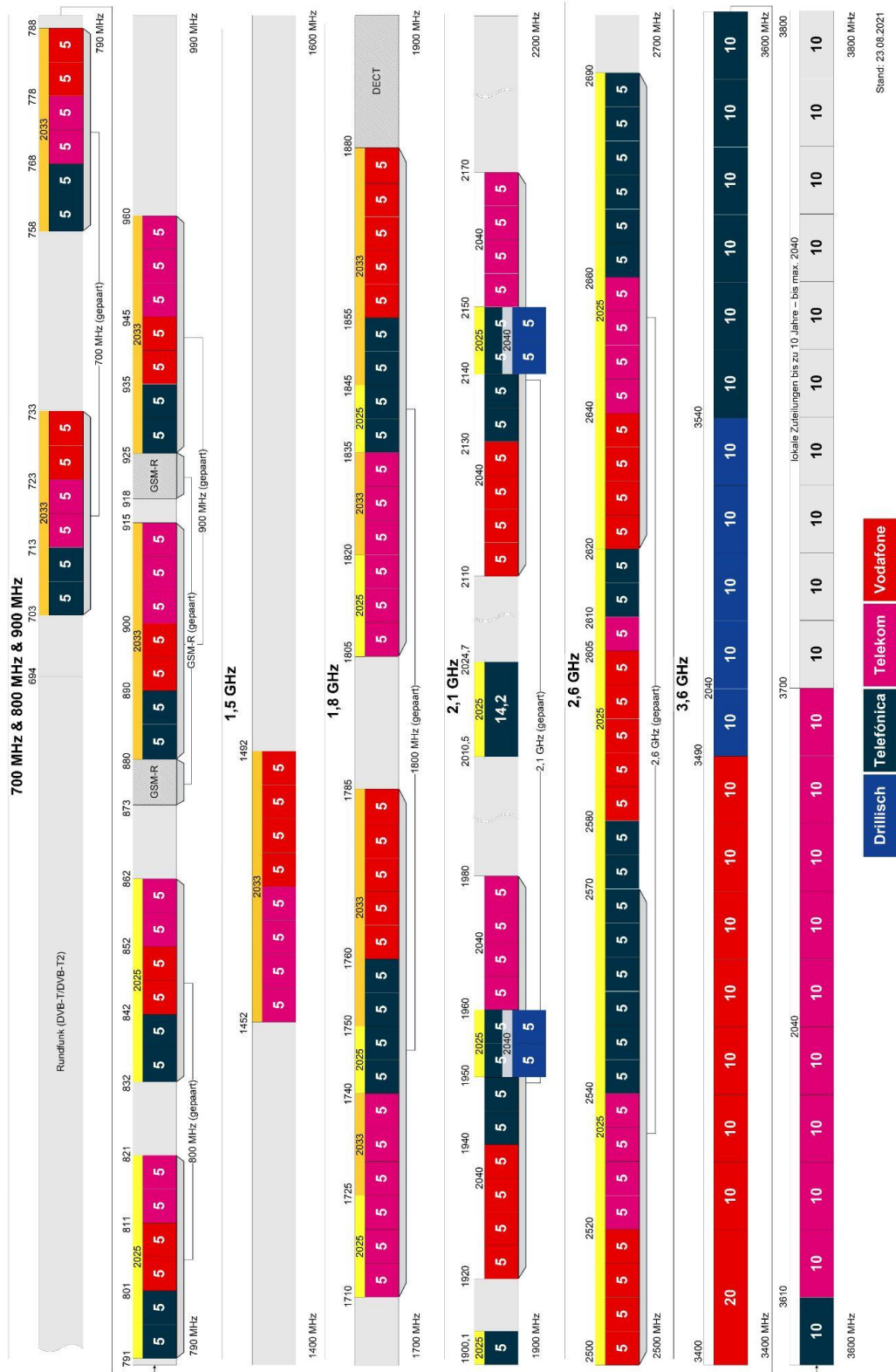
[85] "Vodafone DSL Verträge", Vodafone Deutschland, Zugriffen: 18. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://zuhauseplus.vodafone.de/internet-telefon/dsl/>

- [86] "Frequenzkompass 2020", Bundesnetzagentur, Zugriffen: 18. April, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Frequenzkompass2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Frequenzkompass2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [87] "Junge Leute Tarife: MagentaMobil Young", Telekom, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.telekom.de/mobilfunk/tarife/smartphone-tarife-young?magenta-eins>
- [88] "Speedtest von Ookla", Ookla, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.speedtest.net/de>
- [89] "Camera Sample Footage", Arri, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.arri.com/en/learn-help/learn-help-camera-system/camera-sample-footage>
- [90] cellmapper.net, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.cellmapper.net/>
- [91] H. Elshaer, F. Boccardi, M. Dohler and R. Irmer, "Downlink and Uplink Decoupling: A disruptive architectural design for 5G networks," *2014 IEEE Global Communications Conference*, 2014, pp. 1798-1803, doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037069.
- [92] "The Evolution of Media Creation - A 10 Year Vision for the Future of Media Creation, Post and Creative Technologies", Movielabs, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://movielabs.com/prodtech/ML\\_2030\\_Vision.pdf](https://movielabs.com/prodtech/ML_2030_Vision.pdf)
- [93] J. Bae, Y. S. Choi, J. S. Kim and M. Y. Chung, "Architecture and performance evaluation of MmWave based 5G mobile communication system," *2014 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2014, pp. 847-851, doi: 10.1109/ICTC.2014.6983310.
- [94] A. R. Ramos, B. C. Silva, M. S. Lourenço, E. B. Teixeira and F. J. Velez, "Mapping between Average SINR and Supported Throughput in 5G New Radio Small Cell Networks," *2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WPMC48795.2019.9096179.
- [95] "Remote operation of vehicles with 5G", Ericsson, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/4add9b/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2017/emr-november-2017-remote-operation-of-vehicles-with-5g.pdf>
- [96] R. Inam et al., "Feasibility assessment to realize vehicle teleoperation using cellular networks," *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, pp. 2254-2260, doi: 10.1109/ITSC.2016.7795920.
- [97] "Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 16)", 3GPP TS 22.261, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107>

- [98] O. Al-Saadeh, G. Wikstrom, J. Sachs, I. Thibault and D. Lister, "End-to-End Latency and Reliability Performance of 5G in London," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647379.
- [99] "Deutsche Telekom and Ericsson demonstrate global availability of 5G End to End Network Slicing with Quality of Service", Ericsson, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/en/news/3/2022/deutsche-telekom-and-ericsson-demonstrate-global-availability-of-5g-end-to-end-network-slicing-with-quality-of-service>
- [100] Trochimiuk, Maciej. (2016). Comparison of H.265/HEVC encoders. 100314X. 10.1117/12.2249316.
- [101] "Riot Games Leverages Hyper-Speed of JPEG XS for Historic League of Legends, Valorant Events in Iceland", SVG News, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.sportsvideo.org/2021/06/07/riot-games-leverages-hyper-speed-of-jpeg-xs-for-historic-league-of-legends-valorant-events-in-iceland/>
- [102] A. Sandstrom, "Wide Area Networks for Both High- and Low-End SMPTE ST 2110 Workflows," in SMPTE Motion Imaging Journal, vol. 130, no. 1, pp. 37-40, Jan.-Feb. 2021, doi: 10.5594/JMI.2020.3036733.
- [103] "5G Broadcast/Multicast", Rohde und Schwarz, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: [https://www.rohde-schwarz.com/de/loesungen/broadcast-and-media/content-distribution/terrestrial-transmission/5g-broadcast/5g-broadcast\\_250909.html](https://www.rohde-schwarz.com/de/loesungen/broadcast-and-media/content-distribution/terrestrial-transmission/5g-broadcast/5g-broadcast_250909.html)
- [104] Marić, I., Shamai (Shitz), S., & Simeone, O. (Eds.). (2022). *Information Theoretic Perspectives on 5G Systems and Beyond*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108241267
- [105] Tjontveit, Frode; Hellerud, Erik; Tangeland, Kristian; and Damhaug, Oystein, "LIDAR-ASSISTED AUTO FOCUS TO ENABLE SNAPSHOTS OF CLOSE OBJECTS", Technical Disclosure Commons, (July 01, 2020)
- [103] "Behind the Scenes Mandalorian", Indiewire, Zugriffen: 1. Juni, 2022. [Online], Verfügbar unter: <https://www.indiewire.com/2020/02/the-mandalorian-ilm-stagecraft-1202212389/>

# Anhang

## Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz





| Parameter                                                                 | Minimale Voraussetzung                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Peak Data Rate                                                            | Downlink: 20 Gbit/s<br>Uplink: 10 Gbit/s                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Peak Spectral Efficiency                                                  | Downlink: 30 bit/s/Hz<br>Uplink: 15 bit/s/Hz                                                                                                                                                                                                                                               |
| User-Experienced Data Rate<br>(5th percentile in Dense Urban environment) | Downlink: 100 Mbit/s<br>Uplink: 50 Mbit/s                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Fifth percentile user Spectral Efficiency<br>(Dense Urban environment)    | Downlink: 0,3 bit/s/Hz<br>Uplink: 0,21 bit/s/Hz                                                                                                                                                                                                                                            |
| Average spectral Efficiency                                               | Indoor Hotspot:<br>Downlink: 9 bit/s/Hz<br>Uplink: 6,75 bit/s/Hz<br>Dense Urban:<br>Downlink: 7,8 bit/s/Hz<br>Uplink: 5,4 bit/s/Hz                                                                                                                                                         |
| Area traffic capacity                                                     | 10 Mbit/s/m2 (indoor hotspot for eMBB)                                                                                                                                                                                                                                                     |
| User plane latency                                                        | 4 ms for eMBB<br>1 ms for URLLC                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Control plane latency                                                     | 20 ms                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Connection density                                                        | 1,000,000 devices per km2                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Energy Efficiency                                                         | Related to two aspects for eMBB: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Efficient data transmission in a loaded case</li> <li>b. Low energy consumption when there is no data</li> </ul> The technology shall have the capability to support a high sleep ratio and long sleep duration |
| Reliability                                                               | $1-10^{-5}$ success probability of transmitting a layer 2 PDU (Protocol Data Unit) of 32 bytes within 1 ms, at coverage edge in Urban Macro for URLLC                                                                                                                                      |
| Mobility                                                                  | Normalized traffic channel data rates defined for 10, 30, and 120 km/h at $\sim 1.5\times$ IMT-Advanced numbers<br><br>Requirement for high-speed vehicular defined                                                                                                                        |

|                            |                                                                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | for 500 km/h (compared to 350 km/h for IMT-Advanced)                                              |
| Mobility interruption time | 0 ms                                                                                              |
| Bandwidth                  | At least 100 MHz and up to 1 GHz in higher-frequency bands. Scalable bandwidth shall be supported |

## 5G NR Key Requirements nach ITU-R M.2410-0

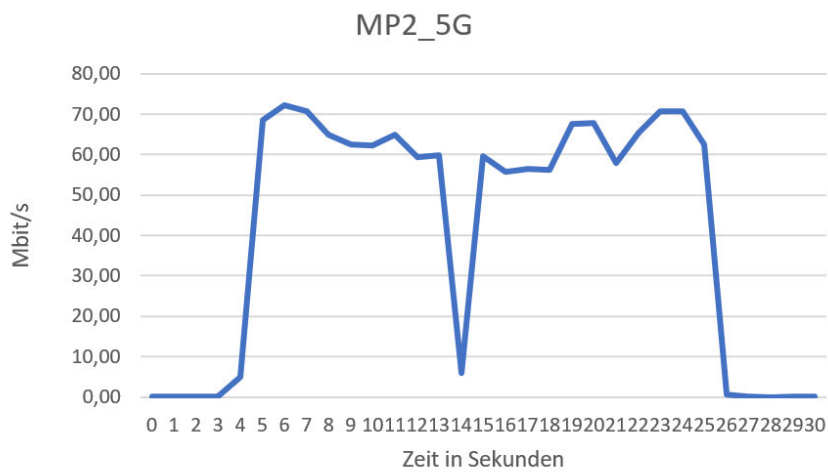
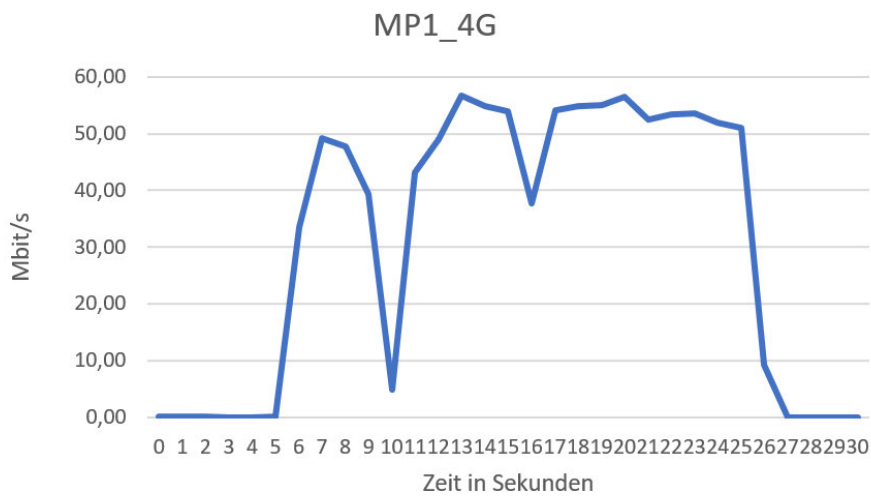
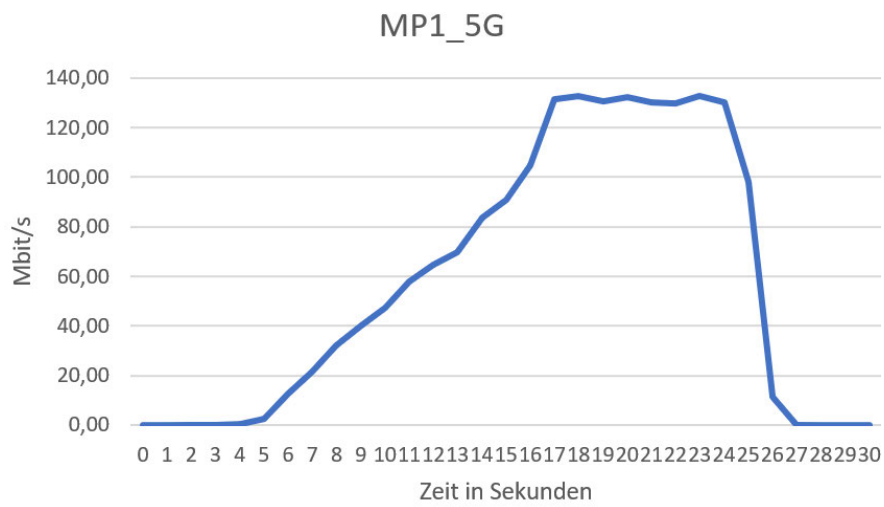
### Monitoring Mobilfunk - Flächenversorgung nach Bundesland

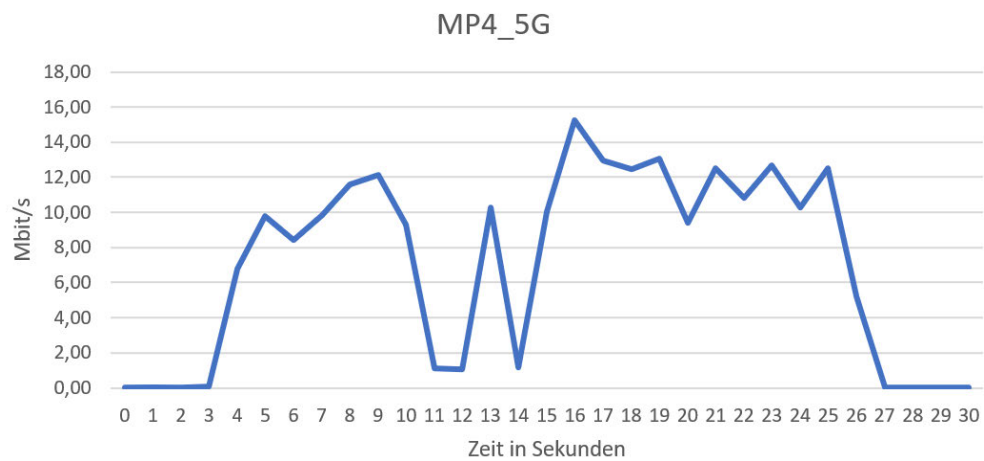
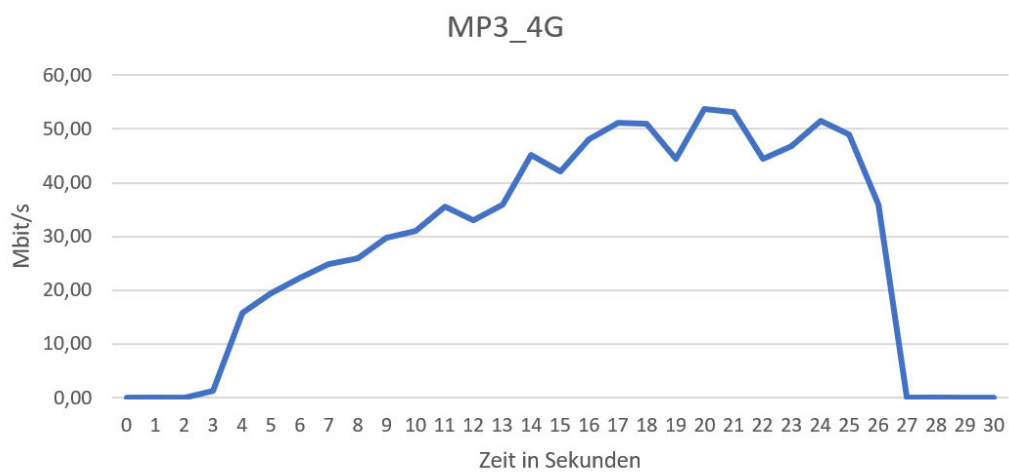
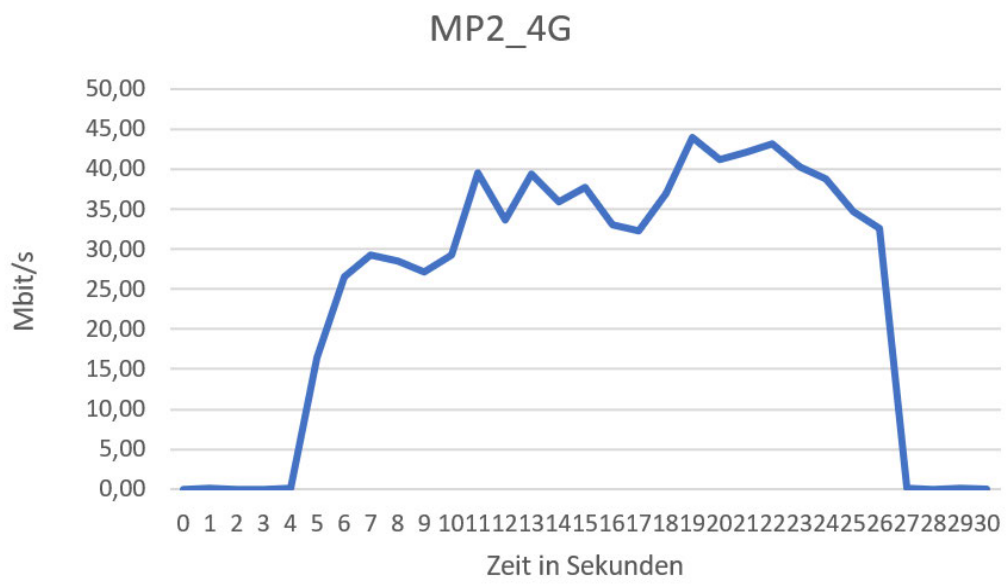
| Bezugsraum          | Rasterzellen insgesamt | Anteil versorgter Fläche |         |        |        | Funkloch | Graue Flecken | Weiße Flecken |
|---------------------|------------------------|--------------------------|---------|--------|--------|----------|---------------|---------------|
|                     |                        | 2G                       | 4G      | 5G DSS | 5G     |          |               |               |
| Bund                | 35.811.082             | 99,64%                   | 96,17%  | 55,78% | 7,59%  | 0,36%    | 6,44%         | 3,79%         |
| Schleswig-Holstein  | 1.585.906              | 100,00%                  | 99,65%  | 69,79% | 0,97%  | 0,00%    | 1,44%         | 0,35%         |
| Hamburg             | 75.110                 | 100,00%                  | 99,99%  | 94,20% | 56,53% | 0,00%    | 0,20%         | 0,01%         |
| Niedersachsen       | 4.775.434              | 99,95%                   | 97,70%  | 61,53% | 3,51%  | 0,05%    | 4,10%         | 2,28%         |
| Bremen              | 41.235                 | 100,00%                  | 100,00% | 96,31% | 32,67% | 0,00%    | 0,02%         | 0,00%         |
| Nordrhein-Westfalen | 3.412.769              | 99,86%                   | 97,62%  | 70,88% | 8,78%  | 0,14%    | 4,46%         | 2,38%         |
| Hessen              | 2.109.884              | 99,58%                   | 95,33%  | 55,21% | 4,22%  | 0,42%    | 8,73%         | 4,67%         |
| Rheinland-Pfalz     | 1.986.695              | 99,17%                   | 94,87%  | 51,62% | 4,07%  | 0,82%    | 8,74%         | 5,13%         |
| Baden-Württemberg   | 3.576.183              | 99,47%                   | 94,32%  | 48,07% | 12,03% | 0,52%    | 9,54%         | 5,62%         |
| Bayern              | 7.062.249              | 99,08%                   | 94,13%  | 56,95% | 10,75% | 0,91%    | 8,46%         | 5,82%         |
| Saarland            | 258.207                | 99,96%                   | 98,09%  | 61,19% | 4,15%  | 0,04%    | 4,12%         | 1,88%         |
| Berlin              | 89.246                 | 100,00%                  | 100,00% | 93,73% | 60,81% | 0,00%    | 0,15%         | 0,00%         |
| Brandenburg         | 2.971.310              | 99,99%                   | 96,40%  | 49,89% | 5,81%  | 0,01%    | 7,19%         | 3,48%         |
| Mecklenburg         | 2.339.932              | 100,00%                  | 97,54%  | 50,71% | 0,67%  | 0,00%    | 4,68%         | 2,36%         |
| Sachsen             | 1.851.346              | 99,85%                   | 97,62%  | 49,77% | 17,02% | 0,15%    | 4,96%         | 2,35%         |
| Sachsen-Anhalt      | 2.055.737              | 99,88%                   | 96,54%  | 47,41% | 7,94%  | 0,12%    | 4,80%         | 3,42%         |
| Thüringen           | 1.619.839              | 99,54%                   | 95,53%  | 40,82% | 5,39%  | 0,45%    | 7,13%         | 4,46%         |

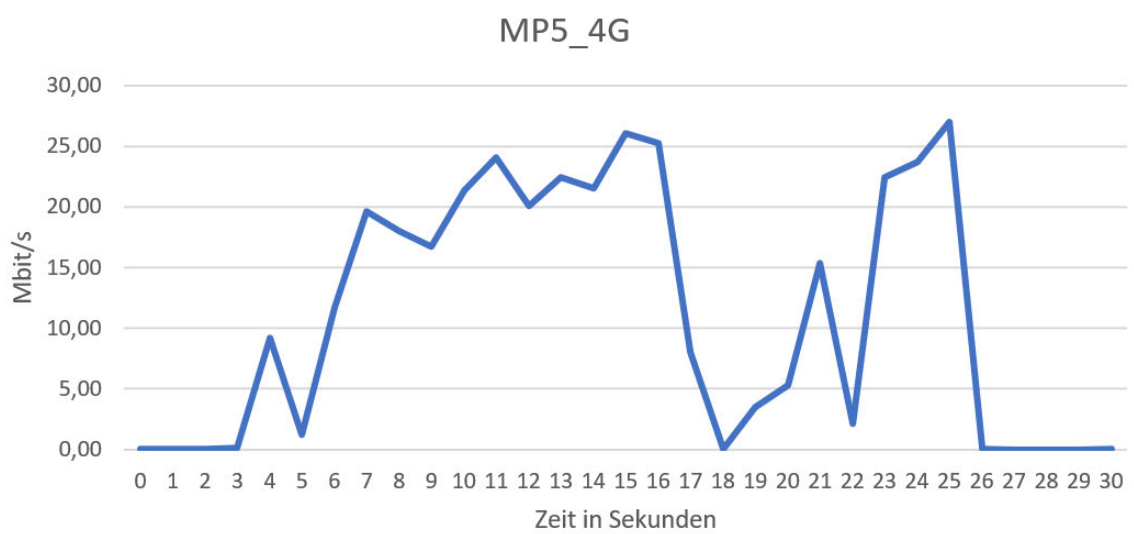
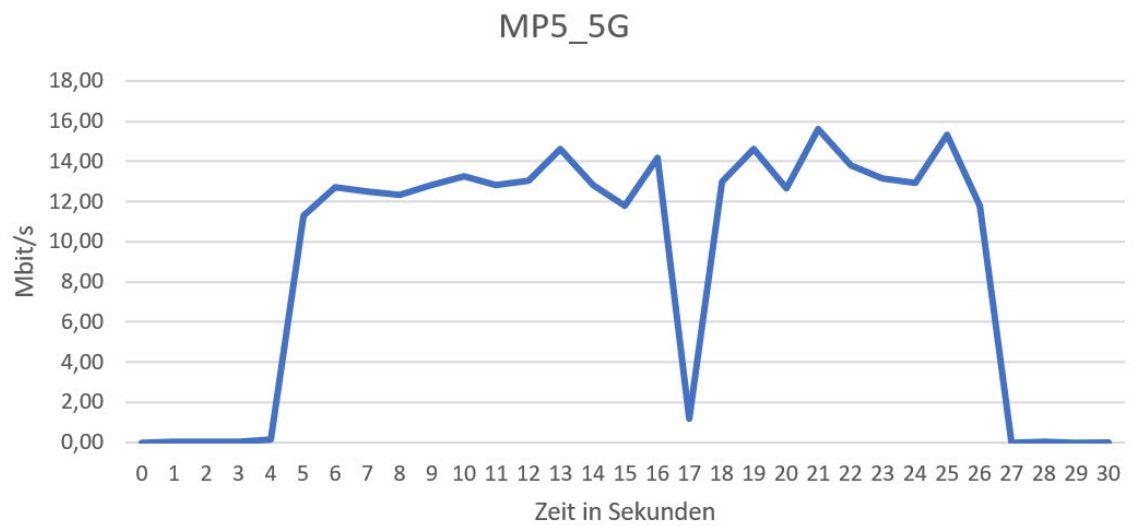
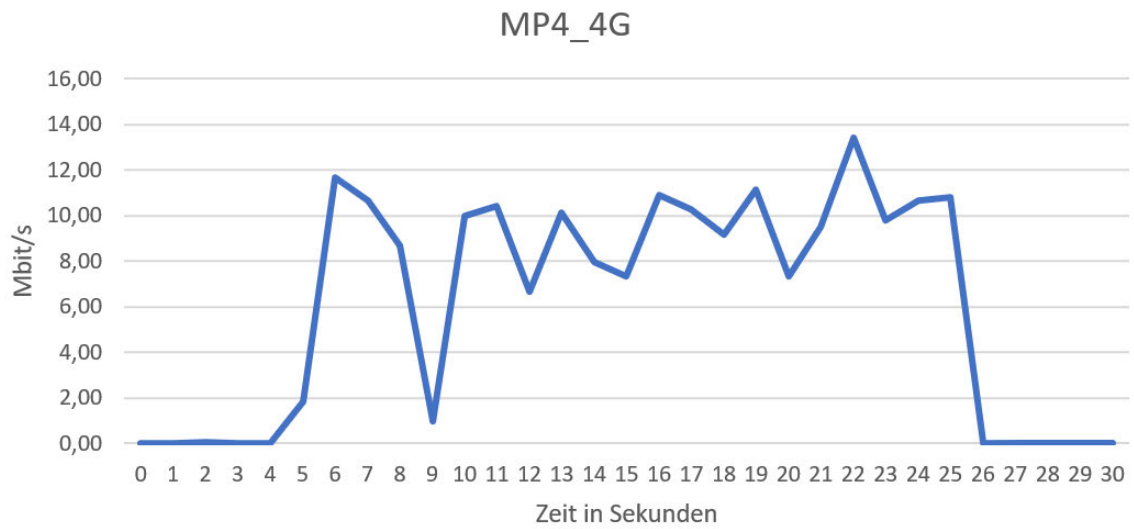
Erläuterung: Die Tabelle enthält Angaben zur flächenhaften Mobilfunknetzabdeckung nach Technologie. Außerdem sind Angaben zu Funklöchern (mit keiner Technologie versorgte Flächen), grauen Flecken (von genau einem Netzbetreiber mit 4G oder 5G bzw. 5G DSS versorgte Flächen) und weißen Flecken (nicht mit 4G oder 5G bzw. 5G DSS versorgte Flächen) enthalten. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Spalte "Rasterzellen insgesamt". Eine Rasterzelle ist 100x100m (1 ha) groß. Die Spalte "Anteil versorgter Fläche" beschreibt die Versorgung durch mindestens einen Netzbetreiber. Sämtliche Angaben basieren auf Daten der Mobilfunknetzbetreiber (Stand Januar 2022) / © GeoBasis-DE / BKG (2021)

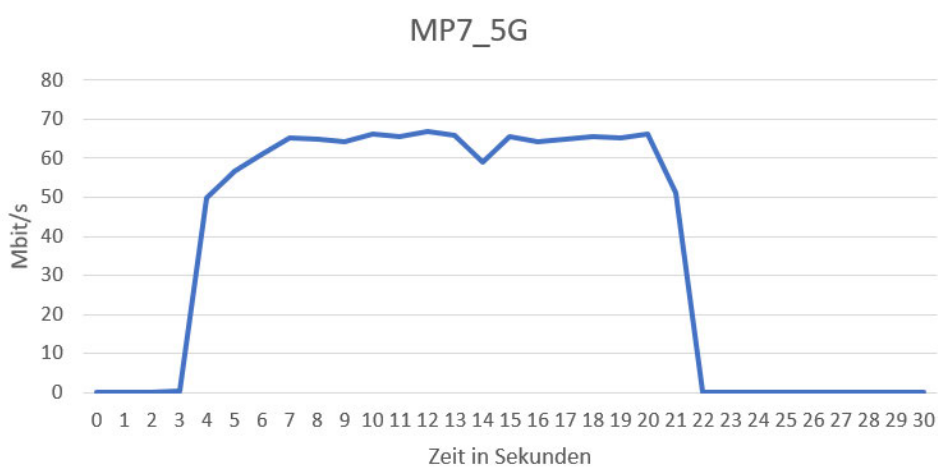
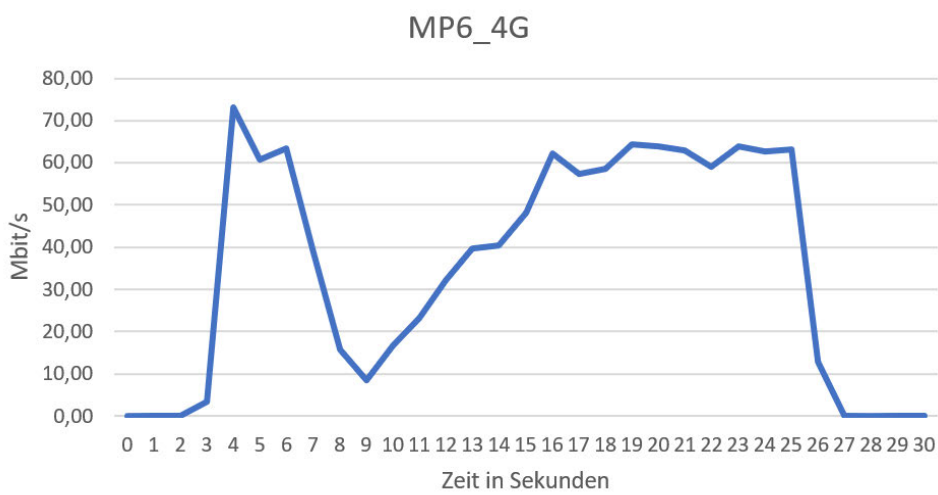
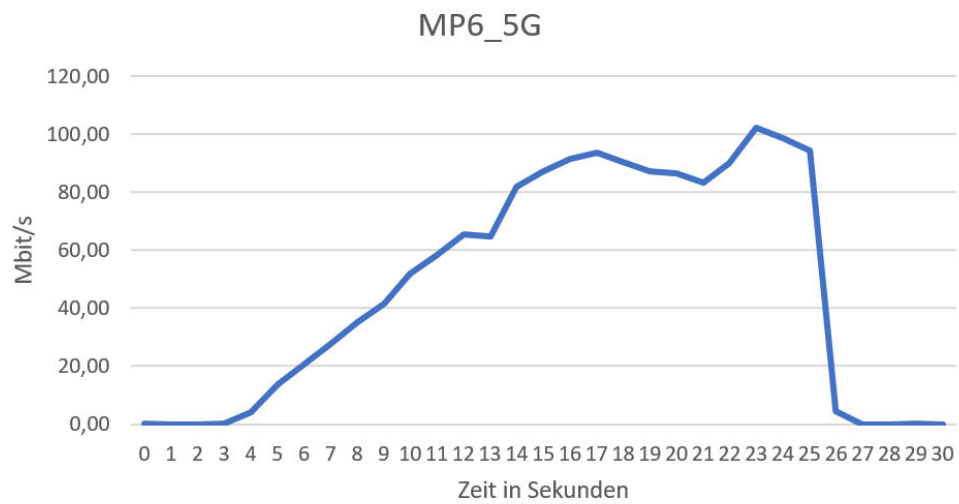
## Verfügbarkeit der Mobilfunkgenerationen nach Bundesland

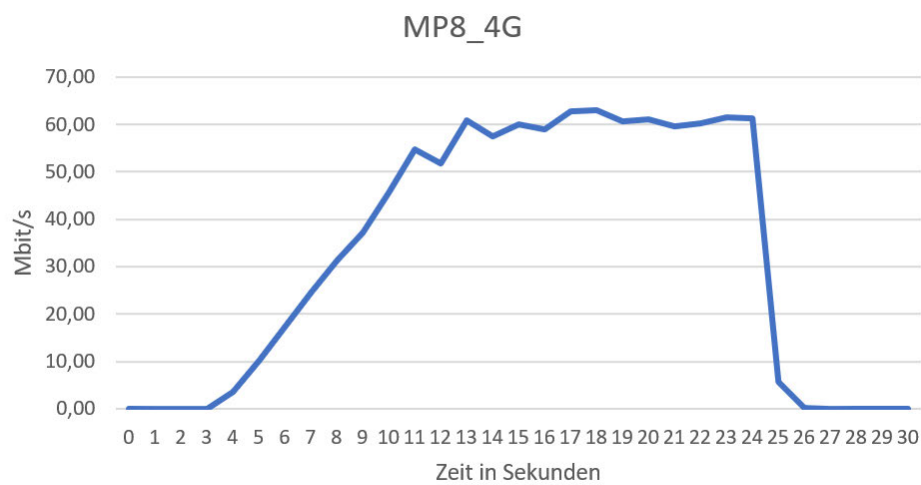
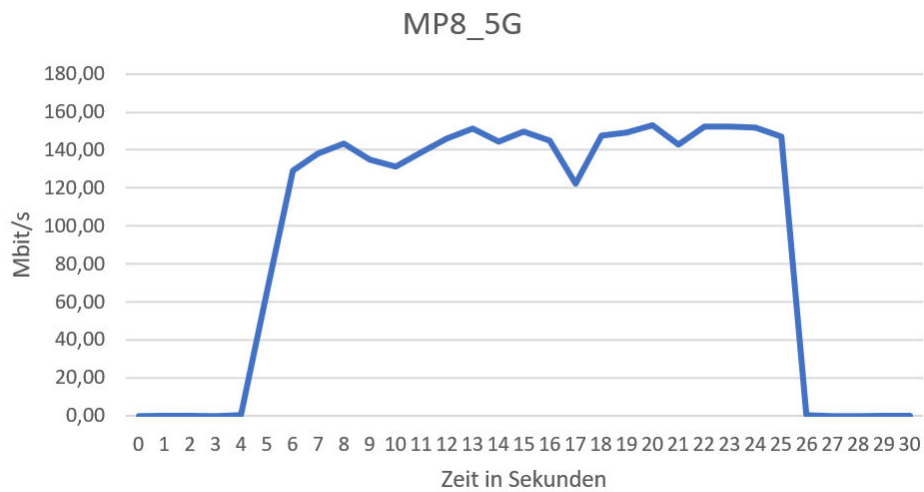
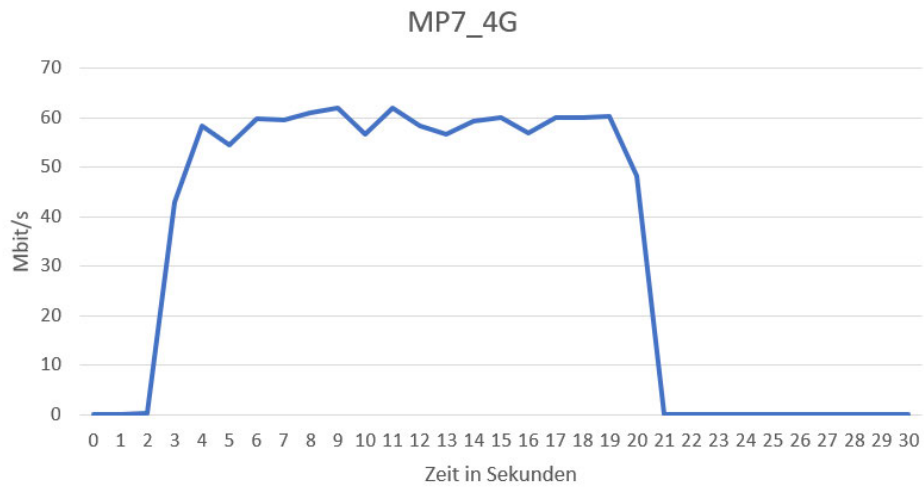
Messreihe 1

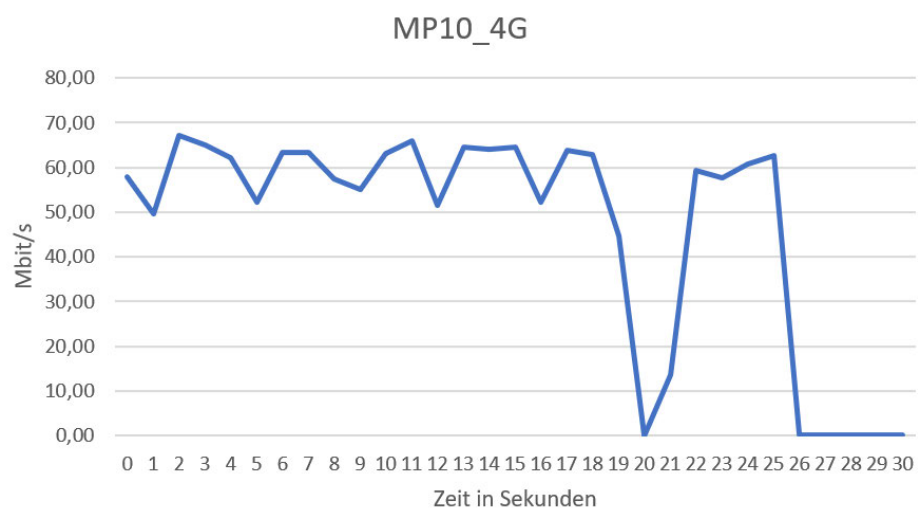
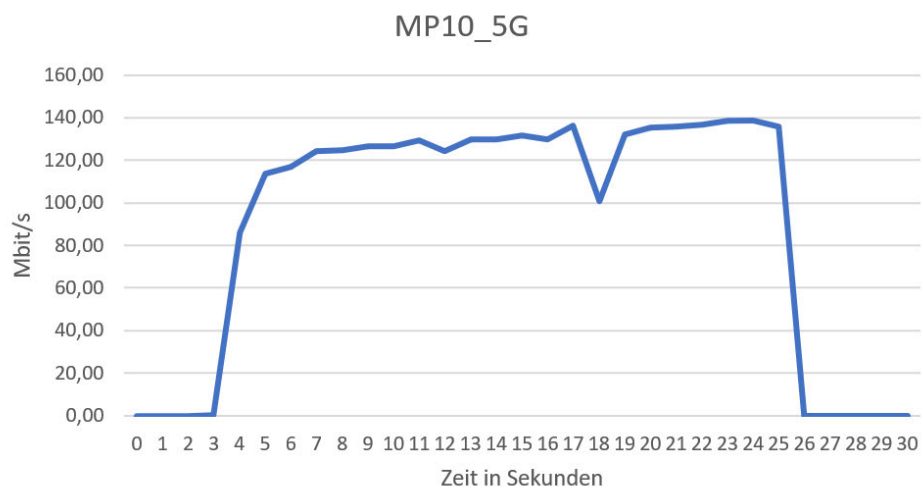
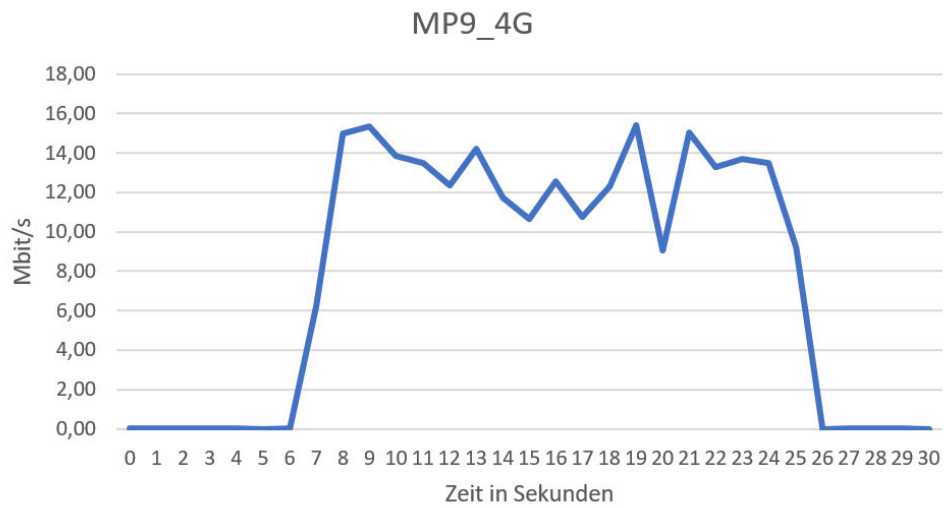




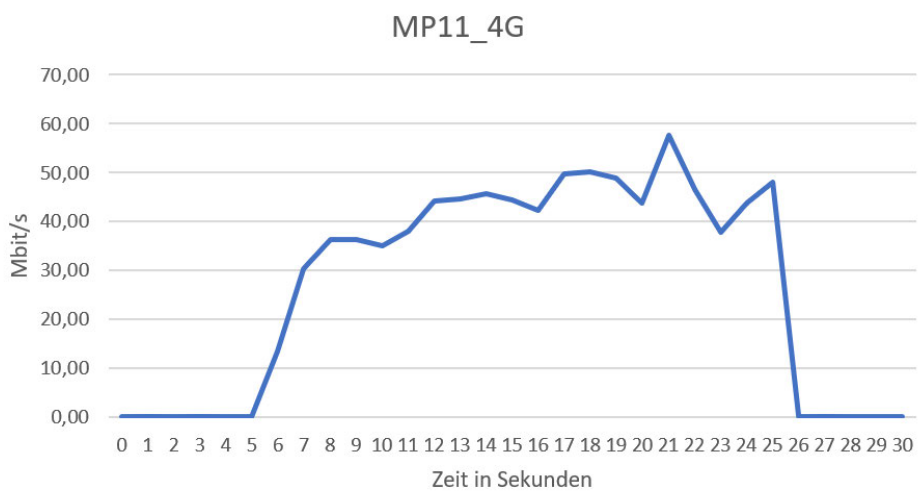
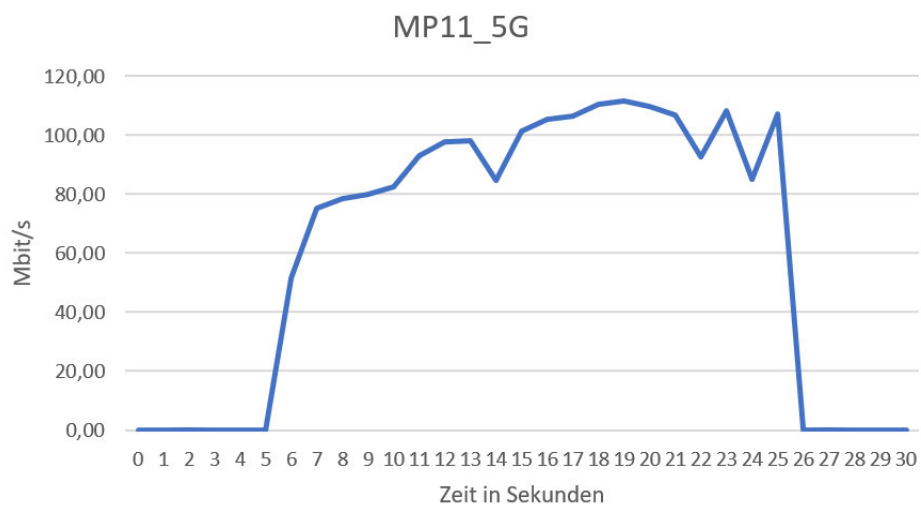












## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

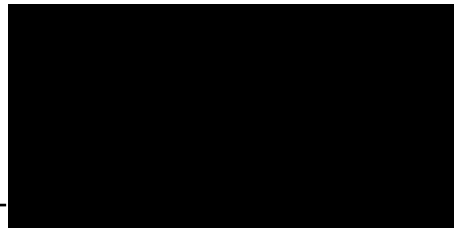
# **“Transformation der Filmbranche durch 5G Mobilfunk”**

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

01.06.2022

---

Datum



Unterschrift