

BACHELORARBEIT

Integration von 5G-Mobilfunktechnologie in eine ST 2110 IP-basierte Produktionsumgebung für Live-TV Multikamera Produktionen

vorgelegt am 27. September 2024 von
Lena Blazejewski

Erstprüfer: Prof. Dr. Marco Grimm, Hochschule für angewandte Wissenschaften
Zweitprüfer: B.Eng. Markus Neeb, Studio Hamburg MCI GmbH

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik
Finkenau 35
20081 Hamburg

Zusammenfassung

Die IP-basierte Rundfunkproduktion bietet diverse innovative und effiziente Möglichkeiten Inhalte zu produzieren. Da sich die Medienproduktion immer mehr auf Netzwerklösungen zu bewegt, könnte der 5G-Mobilfunk als Drahtlostechnik zusätzliche Flexibilität und Freiheitsgrade bringen. Im Rahmen von Recherchen zum aktuellen Stand der Technik und eines praktischen Versuchsaufbaus sollen in dieser Arbeit die Chancen und Möglichkeiten, aber auch mögliche Einschränkungen dieser Technologien evaluiert werden. Neben umfassenden Erläuterungen der technischen Grundlagen zu IP-basierten Sendesystemen und dem 5G-Mobilfunk, soll der Bezug zum Einsatz in der Praxis des Produktionsalltags hergestellt werden. Es gilt die Frage zu beantworten, inwieweit sich mit aktuellem Stand der Technik eine hybride Produktion aus einer kabelgebundenen IP-Produktionsumgebung und der drahtlosen 5G-Technik realisieren lässt, welche Herausforderungen dies mit sich bringt und welche neuen Möglichkeiten eröffnet werden.

Abstract

IP-based broadcast production offers various innovative and efficient ways to produce content. As media production is increasingly moving towards network solutions, 5G mobile radio as a wireless technology could bring additional flexibility and degrees of freedom. As part of research into the current state of the art and a practical test setup, this thesis will evaluate the opportunities and possibilities, but also possible limitations of these technologies. In addition to comprehensive explanations of the technical basics of IP-based transmission systems and 5G mobile communications, the aim is to establish a link to their use in everyday production practice. The question to be answered is to what extent hybrid production using a wired IP production environment and wireless 5G technology can be realized with the current state of the art, what challenges this entails and what new possibilities are opened up.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt der Firma Studio Hamburg MCI GmbH, insbesondere vertreten durch meinen Zweitprüfer Markus Neeb, die mich seit Beginn meines Praktikums in meinen Interessensgebieten unterstützt und gefördert hat und während dieser Arbeit stets mitgefiebert, mitgeholfen und mitgedacht haben. Im Speziellen möchte ich Felix Ohlendorf, für die Begleitung während meines Versuchsaufbaus und Fabian Röttcher für die Organisation des Equipments danken. Außerdem Jörn Bogmer, Arno Albers und Katharina Michel für das Aushalten meiner stetigen Status-Updates und die Tipps für die Ausarbeitung sowie Tobias Scholz für jeden Hinweis und den fachlichen Austausch zu jeglichen Netzwerkthemen. Und ganz besonders bedanke ich mich bei Oliver Gorst dafür, dass er der Ruhepol geblieben ist, wenn nicht alles nach Plan lief.

Ein ganz großer Dank gilt außerdem meiner Familie, die gesammelt als Lektorat aufgetreten ist und versuchten alle kleinen Fehler in dieser Arbeit aufzufinden.

Ganz persönlich danke ich natürlich zuletzt meinen Betreuern Prof. Marco Grimm und Markus Neeb, die diese Arbeit durch diverse Anregungen und Fragestellungen bereichert haben.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	iii
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
2 Produktionsszenario.....	3
3 Technische Grundlagen.....	6
3.1 Konventionelle Produktionsmethoden.....	6
3.1.1 Systemaufbau und Signalflüsse.....	6
3.1.2 Basisbandsignale.....	7
3.2 Grundlagen Netzwerktechnik.....	8
3.2.1 Das OSI/ISO-Referenzmodell.....	8
3.2.2 Übertragungskanäle.....	10
3.2.3 Unicast vs. Multicast.....	11
3.2.4 Netztopologien.....	12
3.2.5 Das Real-Time Transport Protocol.....	13
3.2.6 SRT und SST Protocol.....	14
3.2.7 Das Precision Time Protocol.....	15
3.2.8 Orchestration in Netzwerken.....	17
3.3 SMPTE ST 2110 – Unkomprimierte Elementardatenströme.....	18
3.3.1 ST 2110-10 Systemtakt und allgemeine Definitionen.....	19
3.3.2 ST 2110-20 Unkomprimierte aktive Videopixel.....	19
3.3.3 ST 2110-21 Traffic Shaping.....	20
3.3.4 ST 2110-22 Konstant komprimierte Videosignale.....	21
3.3.5 ST 2110-30 PCM-codiertes Audio.....	21
3.3.6 ST 2110-40 Metadaten.....	22
3.4 5G-Mobilfunk im Broadcast.....	22
3.4.1 Entwicklung und Standardisierung von 5G.....	22
3.4.2 Systemarchitektur.....	25
3.4.3 Frequenzen.....	28
3.4.4 Network Slicing.....	30
3.4.5 Edge Computing.....	31
3.4.6 Campusnetze.....	32
3.5 Videodatenreduktion.....	33
3.5.1 Grundmechanismen der Datenreduktion.....	33
3.5.2 JPEG XS.....	34
3.5.3 H.265/HEVC.....	35
4 Praktische Untersuchung der Technologien.....	36

4.1	Zielsetzung.....	36
4.2	Systemübersicht.....	37
4.2.1	Konzeption der Systemstruktur.....	38
4.2.2	Übertragungskapazitäten.....	39
4.2.3	Wahl der Systemkomponenten.....	41
4.2.4	Versuchsaufbau.....	46
4.2.5	5G-Netz.....	48
4.3	Konfiguration des Systems.....	49
4.3.1	IP-Adressvergabe.....	49
4.3.2	Taktverteilung über PTP.....	50
4.3.3	Konfiguration der Netzwerkknoten.....	50
4.3.4	Konfiguration der 5G-Komponenten.....	52
4.4	Durchführung und Funktionsprüfung.....	56
4.4.1	ST 2110 Kompatibilität und Interoperabilität.....	56
4.4.2	Unabhängige Signalführung.....	58
4.4.3	Netzwerkperformance.....	59
4.4.4	Beurteilung des Videobilds.....	63
4.4.5	Latenz und Synchronität.....	63
4.4.6	Anwendung.....	68
4.5	Auswertung der Messergebnisse.....	70
4.5.1	Systemplanung und -Integration.....	70
4.5.2	Interoperabilität und Management.....	72
4.5.3	Signalführung.....	73
4.5.4	Übertragung.....	73
4.5.5	Synchronisation.....	74
4.5.6	Redundanz.....	76
4.5.7	Anwendung.....	77
5	Zukunftsaussichten.....	79
6	Fazit.....	81
	Literaturverzeichnis.....	83
	Eigenständigkeitserklärung.....	86
	Anhang.....	87

Abkürzungsverzeichnis

VJ	Video Journalismus
DVKS	Digitale Videokreuzschiene
SDU	Service Data Unit
PCI	Protocol Control Information
IGMP	Internet Group Management Protocol
UDP	User Datagram Protocol
RTP	Real-time Transport Protocol
SRT	Secure Reliable Transport Protocol
UDT	UDP-based Data Transfer Protocol
ARQ	Automatic Repeat Request
FEC	Forward Error Correction
SST	Safe Streams Protocol
NTP	Network Time Protocol
PTP	Precision Time Protocol
BMCA	Best Master Clock Algorithm
GM-Clock	Grandmaster-Clock
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
PCM	Puls-Code-Modulation
SDP	Session Description Protocol
SRD	Sample-Row-Data
ITU-R	International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
mMTC	Massive Machine Type Communications
3GPP	3rd Generation Partnership Project
UE	User Equipment

RAN	Radio Access Network
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
UPF	User Plane Function
AMF	Access and Mobility Management Function
SBA	Service Based Architecture
NMOS	Networked Media Open Specifications
AMWA	Advanced Media Workflow Association
VLAN	Virtual Local Area Network
VBR	Variable Bitrate
CBR	Constant Bitrate

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktionsszenario lokale Studio-/Regieumschaltung	4
Abbildung 2: Produktionsszenario standortübergreifende Studio-/Regieumschaltung.....	4
Abbildung 3: Produktionsszenario Remote Produktion.....	5
Abbildung 4: Zu untersuchendes Produktionsszenario.....	5
Abbildung 5: OSI-Referenzmodell am Beispiel einer ST 2110 Übertragung.....	9
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Netztopologien	12
Abbildung 7: Vergleich SRT und SST // Quelle: Haivision, 2023	15
Abbildung 8: 5G Schwerpunktbereiche	23
Abbildung 9: Aufbau 5G-System	25
Abbildung 10: 5G Gesamtsystemarchitektur	27
Abbildung 11: 5G Non-Standalone vs. Standalone.....	28
Abbildung 12: Latenzvorteile mit Edge Computing // Quelle: 3GPP	31
Abbildung 13: Betreibermodelle für 5G-Campusnetze	32
Abbildung 14: Konfiguration Pro460 Destination	54
Abbildung 15: Konfiguration Pro460 Live Profil für Broadcast Low Latency.....	55
Abbildung 16: ST 2110 Kompatibilität Nevion Virtuoso.....	56
Abbildung 17: Analyse des ST 2110 Datenstroms mit Wireshark	57
Abbildung 18: Analyse eines ST 2110 Datenpakets im Detail.....	58
Abbildung 19: Netzwerkperformance ST 2110 Übertragung	59
Abbildung 20: Überprüfung der Datenraten von 5G SST VBR	60
Abbildung 21: Überprüfung der Datenraten von 5G SST CBR	60
Abbildung 22: Ping des Stream Hubs nach Flutung des Netzwerks	61
Abbildung 23: Überprüfung der Datenraten von 5G SST CBR nach Flutung des Netzwerks	62
Abbildung 24: Überprüfung der Datenraten von 5G im öffentlichen Netz	62
Abbildung 25: Vergleich visuelle Qualität von SDI zu 5G.....	63
Abbildung 26: Latenzvergleich Timecode, 5G SST VBR.....	64
Abbildung 27: Latenzvergleich Timecode, 5G SST CBR.....	65
Abbildung 28: Latenzvergleich Timecode, 5G SST CBR Low Latency.....	65
Abbildung 29: Bestimmung Laufzeitunterschied SDI zu 5G VBR mit Oszilloskop	67
Abbildung 30: Anwendung 5G-Komponenten mit Blackmagic URSA Kamera.....	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die ST 2110 Teilstandards.....	18
Tabelle 2: Übertragungsparameter von ST 2110-20	19
Tabelle 3: Maximalanforderungen an 5G-Netze gem. ITU-R	24
Tabelle 4: Zielsetzungen des Versuchsaufbaus	36
Tabelle 5: Datenraten ST 2110 codierte Videosignale	40
Tabelle 6: Systemkomponenten des Versuchsaufbaus	43
Tabelle 7: Details 5G-Campusnetz	48
Tabelle 8: IP-Adressvergabe anhand des Beispiels des 5G Gateways.....	49
Tabelle 9: Laufzeitunterschiede gemessen mit Oszilloskop	68

1 Einleitung

Digitalisierung und fortschreitende Entwicklungen im Mobilfunk beeinflussen die Medienbranche zunehmend. Mit Einführung der 5G-Technologie können sich auch für Live TV-Produktionen neue Optionen eröffnen, die das Potenzial haben die Branche nachhaltig zu beeinflussen.

Bereits seit Jahrzehnten ist die Übertragung per Satellit die gängigste Methode für Sendeanstalten, Live-Video von einem entfernten Veranstaltungsort an eine zentrale Produktionseinrichtung zu senden. Obwohl die Technologie erfolgreich eingesetzt wird, erfordert sie hohe finanzielle Aufwendungen und eine große Zahl an Übertragungsgeräten, um die Inhalte vor Ort zu produzieren. Der Einsatz von Satelliten-Uplinks kann für Events und Produktionen mit einem hohen Budget sinnvoll sein, ist aber für kleinere Veranstaltungen und Video-Journalist-Produktionen nicht realisierbar. Die Nutzung von 5G-Broadcasting könnte hier neue Möglichkeiten eröffnen. Der Hersteller Haivision führt jedes Jahr eine Umfrage zu den neuesten Trends im Broadcast-Bereich durch (Anhang A). Im Jahre 2023 haben sich 814 Teilnehmer:innen weltweit beteiligt, hauptsächlich aus dem TV-Bereich. 74% der Befragten nutzen die 5G Technologie bereits oder planen sie in den nächsten zwei Jahren für Live-Video Übertragung zu nutzen. Die Wandlung hin zu IP-Technologien und die Nutzung von 5G gehören zu den fünf meistgenannten Prioritäten der Befragten (Haivision, 2024). 5G steht gegenüber der bisherigen 4G-Technologie für eine hohe Leistungssteigerung und bietet Vorteile, die es für die Broadcast-Branche relevant macht. Darunter die höhere Datenübertragungsrate, niedrige Latenzen und eine hohe Flexibilität der Netze (Haivision, o. J.).

Verschiedene Rundfunkanstalten in Europa, darunter der SWR in Deutschland, testen bereits die Einbindung von 5G-Netzen in die Produktionsabläufe. Insbesondere mit dem weiteren Ausbau von Media over IP-Netzwerken in Produktionsumgebungen eröffnen sich so Möglichkeiten hinsichtlich Flexibilität und Skalierbarkeit.

Obwohl die Übertragung von unkomprimierten Videodatenströmen immer noch hauptsächlich auf unidirektionalen Punkt-zu-Punkt Verbindungen basieren, befinden sich mittlerweile einige Rundfunkanstalten in einer Transformation der Medienproduktion. Die Erzeugung und Verarbeitung von Basisband-Signalen sollen auf IP-basierte Produktionsprozesse umgestellt und neue Technologien angewendet werden. Mit SMPTE ST 2110 wurde bereits Anfang 2018 ein Standard zur IP-basierten Übertragung von Mediendatenströmen veröffentlicht. Dieser soll durch die Nutzung von Elementardatenströmen und insbesondere durch die bidirektionale Multipunkt-zu-Multipunkt Übertragung eine hohe Flexibilität bieten und auch in Zukunft einfach skalierbar sein. Mittlerweile hat ein großer Anteil von Broadcast Herstellern bereits ST 2110-fähige Geräte in ihren Portfolios. Ziel hierbei ist es ein ganzheitliches Konzept für die Signalübertragung innerhalb eines Sendesystems zu schaffen.

1 Einleitung

Diese Arbeit stellt eine qualitative Analyse der technischen Möglichkeiten und Herausforderungen von einem Einsatz der 5G-Mobilfunktechnologie in einer IP-basierten Produktionsumgebung dar. Neben den Erläuterungen der Grundlagen zur Netzwerktechnik und ihrem Einsatz in TV-Produktionsumgebungen sowie den Grundlagen des 5G-Mobilfunks, wird das Zusammenspiel dieser Technik in einem praktischen Versuchsaufbau nachvollzogen. Forschungsziel ist es dabei, die Relevanz und die praktische Anwendung von hybriden Produktionsmethoden zu untersuchen. Besonderes Augenmerk gilt dabei den technischen und operativen Herausforderungen bei der Einrichtung und Durchführung von Remote-Contribution-Szenarien, also der Zuspielung von Content über 5G. Welche Unterschiede bestehen in der Latenz und Bandbreite zwischen kabelgebundenen Netzwerken und dem Einsatz von 5G Netzen bei Live-Content Zuspielung? Welche Herausforderungen treten bei der Synchronisation von Kamerasignalen auf, wenn sowohl 5G als auch kabelgebundene Netzwerke genutzt werden? Wie könnten sie gelöst werden? Diese Fragen gilt es mit der Ausarbeitung des Versuchsaufbaus zu beantworten. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zum Ende der Arbeit zusammengefasst, um die zentrale Frage zu beantworten, welche Vor- und Nachteile der Einsatz von 5G-Technik für Remote-Workflows im Broadcast bringen können.

Primäre Grundlage dieser Arbeit bildet die funktions- und messtechnische Untersuchung des praktischen Testaufbaus. Neben der Recherche in einschlägiger Literatur, Fachzeitschriften und diversen Standards war auch der Austausch mit Herstellern und Experten maßgeblich. Viele Informationen sowohl zu konventionellen Produktionsmethoden, als auch zu IP-basierten Produktionen basieren zudem auf persönlichen Erfahrungen der Autorin aus der Tätigkeit in der Systemintegration bei Studio Hamburg MCI GmbH im Zeitraum von Oktober 2023 bis September 2024. Die Erkenntnisse aus diesen Gesprächen und Schulungen gehen teilweise über die Informationen aus Literaturquellen zu den Themen hinaus. Sie fließen daher in hohem Maße in diese Arbeit ein, auch wenn sie nicht explizit als Quellen gekennzeichnet werden können. Sämtliche Grafiken und Bilder in dieser Arbeit wurden, sofern nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, durch die Autorin erstellt.

2 Produktionsszenario

Dass das Interesse an Media-over-IP Sendesystemen für öffentlich-rechtliche Rundfunkanstalten in Deutschland interessant ist, zeigen aktuelle Projekte von MCI, darunter die öffentliche Ausschreibung des SWRs für die Konzeption und den Aufbau einer ST 2110 MoIP Testregie. Die folgende Ausführung ist ein direktes Zitat aus dieser Ausschreibung.

„Das Rückgrat [für IP-basierte Produktionsprozesse] bilden IP-Netze mit Standard-Netzwerkswit-chen für Audio, Video und Daten, sogenannte „Media over IP-Netze“, mit sehr hohen Anforderungen an Verfügbarkeit, Geschwindigkeit, Flexibilität, Zuverlässigkeit und Sicherheit. Diese Anforderungen können derzeit ausschließlich vom normierten Technologiestandard SMPTE ST2110 erfüllt werden, so dass sich der SWR dazu entschieden hat, auf diesen Standard zu setzen.“

(Südwestrundfunk, 2023, S. 4)

Noch mehr Flexibilität könnte in Zukunft die Nutzung von 5G-Technologien bieten. Auch hier ist der SWR bereits dabei Möglichkeiten auszutesten und konnte erste Proof of Concepts im Live-Betrieb durchführen. Während der Vorbereitungen auf diese Arbeit hat sich die Möglichkeit ergeben mit der Fachbereichsleitung Broadcastsysteme Video vom SWR über das Projekt 5G zu sprechen. Der SWR hat bereits seit einigen Jahren ein eigenes 5G-Campusnetz rund um den Hauptstandort Baden-Baden, um zu untersuchen inwieweit die 5G Technologie zukünftig für ortsunabhängige, kabellose Remote-Produktion genutzt werden kann. Erstmals wurde das Campusnetz für den Live-TV-Betrieb im Dezember 2023 erfolgreich genutzt für die Sendung „Weihnachtsmarkt live“. Hier wurde live mit Smartphones aus der Ravennaschlucht im Schwarzwald gesendet. Laut dem SWR wird die Integration der neuen Technologien von allen Mitarbeiter:innen sehr gut angenommen. Bereits in Testphasen wurden alle Abteilungen, insbesondere die Außenübertragung eingebunden. Zudem sollen zukünftig auch größere Produktionen mit Broadcast-Kameras inkl. Tally und Steuerungssignalen realisiert werden. Bisher wurde beim SWR noch keine Mischproduktion von wireless 5G Technologien und kabelgebundenen Umgebungen getestet, auch dies soll aber zukünftig möglich sein.

Üblicherweise können in Rundfunkanstalten drei verschiedene Szenarien auftreten, wie Inhalte produziert werden:

Lokale Studio- und Regieumschaltung

Hierbei handelt es sich in der Regel um Studioproduktionen. Bei gewöhnlichen Studioproduktion befinden sich alle Funktionskomponenten, also die Produktionstechnik an einem Standort. Regien und Studios sind üblicherweise immer mit den gleichen Funktionskomponenten ausgestattet.

2 Produktionsszenario

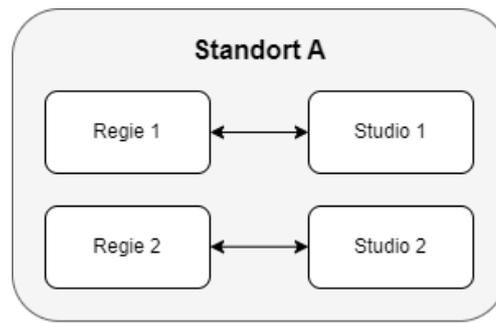


Abbildung 1: Produktionsszenario lokale Studio-/Regieumschaltung

Standortübergreifende Studio- und Regieumschaltung

Unter diesem Szenario sind z.B. Außenübertragungen zu verstehen, bei denen der Übertragungswagen eine eigene Regie darstellt. Aber auch Regionalstudios, welche an eine zentrale Rundfunkanstalt zuspielden, gehören dazu. Funktionskomponenten sind hier an mehreren Standorten aufgeteilt. Die Regien und Studios sind aber auch hier auf funktionaler Ebene gleich aufgebaut und beinhalten gleiche Produktionstechnik. Die Bandbreite zur Übertragung zwischen den Standorten ist begrenzt.



Abbildung 2: Produktionsszenario standortübergreifende Studio-/Regieumschaltung

Remote Produktion

Bei dieser Art von Produktion wird eine externe Produktionsfläche an eine zentrale Produktionseinheit angebunden. Inhalte werden an dieser zentralen Einheit empfangen und können dort weiterverarbeitet werden, z.B. in Form von Bildnachbearbeitungen, Bild-/Tonmischung etc. Die Remote Produktion ist ein guter Ansatz, um zukünftig Broadcast-Produktionen möglichst flexibel zu gestalten, sowohl was den Einsatz der Technik und des Personals angeht, als auch um ggf. Kosten zu sparen.

2 Produktionsszenario

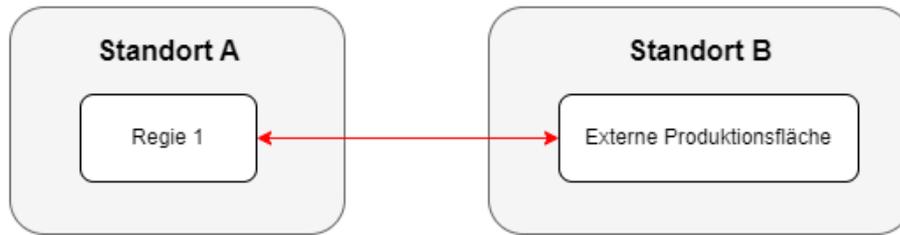


Abbildung 3: Produktionsszenario Remote Produktion

Da sich diese Arbeit insbesondere auf die Flexibilität und Skalierbarkeit der MoIP-Techniken spezialisiert, soll ein Ansatz als Produktionsszenario gewählt werden, der möglichst viel Spielraum für zukünftige Anwendungen lässt. Aus den oben beschriebenen Szenarien wird die Remote Produktion als Basis gewählt. Es gibt also grundsätzlich zwei Produktionsflächen. Wie in Abbildung 4 zu sehen, soll Live-Content in Form von Kamera- oder Zuspieldaten von einer externen Produktionsfläche B eingebunden und in Standort A verarbeitet werden. Wie aus dem Gespräch mit dem SWR hervorgegangen ist, ist es ein zukünftiges Ziel, dass Hybrid-Produktionen aus verschiedenen Produktionsmitteln möglich sein sollen. Aus diesem Grund befindet sich an Standort A sowohl die Regie als auch eine weitere Produktionsfläche mit Kameras. Ob es sich bei der Regie um eine lokale Regie oder einen Ü-Wagen handelt, soll in den folgenden Überlegungen erst einmal außen vorgelassen werden. Es gilt im Laufe dieser Ausarbeitung heraus zu finden, ob sich ein solches Produktionsszenario umsetzen lässt, welche technischen und operativen Herausforderungen auftreten können und welche Vor- und Nachteile sich aus einer Umsetzung mit 5G-Mobilfunk ergeben.



Abbildung 4: Zu untersuchendes Produktionsszenario

3 Technische Grundlagen

Im dritten Kapitel dieser Arbeit sollen die Grundlagen zum Verständnis IP-basierter Sendesysteme und 5G-Mobilfunk im Zusammenhang mit Broadcasttechnologien geschaffen werden. Dazu werden zunächst konventionelle Produktionsmethoden umrissen, sodass im weiteren Verlauf ein Vergleich stattfinden kann und Zusammenhänge eingeordnet werden können. Es folgen kurze Erläuterungen zu den netzwerktechnischen Grundlagen, die für die folgenden Themen relevant werden. Da die Untersuchung auf einer SMPTE ST2110 Produktionsumgebung basieren soll, wird dieser Standard zur Übertragung der Mediensignale umfassender erläutert. Für den Hauptteil der Untersuchung soll es dann um die Grundlagen der Nutzung von 5G-Mobilfunktechnologie im Broadcast gehen. Zum Abschluss wird kurz auf das Thema „Videodatenreduktion“ eingegangen, sodass im späteren Versuchsaufbau die Zusammenhänge zu den Übertragungsmethoden herausgearbeitet werden können.

3.1 Konventionelle Produktionsmethoden

Unter konventionellen Produktionsmethoden wird in dieser Arbeit verwiesen, wenn es sich um eine auf elektrisch-digitalen Signalen basierende Infrastruktur handelt. Konkret geht es hier um den Signalfluss von Video-, Audio- und Metadaten, sodass dieser im weiteren Verlauf systematisch auf IP-basierte Mediensysteme übertragen werden kann.

3.1.1 Systemaufbau und Signalflüsse

Generell sollte in Sendesystemen die Möglichkeit bestehen die Signalquellen und –senken flexibel miteinander zu verschalten, um auf die Produktionsanforderungen einzugehen. Die zentrale Rolle spielen hierbei die Video- und Audiokreuzschienen, in heutigen Installationen meist durch digitale Systeme realisiert. Mithilfe einer Signalmatrix lassen sich so Koppelpunkte wählen, die die Schaltung der Signale zwischen Quellen und Senken realisieren. In der Architektur eines solchen Sendesystems werden sämtliche Signalquellen direkt auf eine zentrale, digitale Videokreuzschiene (DVKS) geführt und alle Signalsenken werden von dieser gespeist. Diese bietet üblicherweise neben dem Beschalten der Senken auch die Möglichkeit, Signale beliebig zu vervielfältigen sowie an Ein- und Ausgängen eine Aufarbeitung von elektrischen und optischen Signalen vorzunehmen. Mit integrierten Embeddern und Deembeddern können außerdem eingebettete Audio-signale unabhängig vom Videosignal verteilt werden. Geräte zur Manipulation der Signale werden zwischen Kreuzschieneneingang und –ausgang geschaltet. Darunter fallen z.B. Farbkorrektoren oder Synchronizer. Die Kreuzschiene bietet somit im Sendebetrieb Flexibilität in der Signalführung, indem sämtliche Koppelpunkte im System manipuliert werden können. Da sie jedoch den zentralen Punkt im System bildet, würde ein Totalausfall zur Havarie des Sendebetriebs führen.

Oft werden deshalb für wichtige Signale zusätzliche dedizierte Wege vorgesehen, um auch bei einem Ausfall der zentralen Kreuzschiene den Sendebetrieb aufrecht zu erhalten.

Auch die Signalführung für Audiosignale basiert im Prinzip auf einer elektronischen Kreuzschiene. Durch die geringere Datenrate von Audiosignalen, können analoge Signale direkt in verteilten Endgeräten der Kreuzschiene digitalisiert und anschließend übertragen werden. Das Schalten der Koppelpunkte erfolgt dann innerhalb oder zwischen Endgeräten.

Die Signalverteilung von Video- und Audiodaten basiert also im Grunde auf ähnlichen Prinzipien, die Parallelen in der Struktur aufweisen und auf unidirektionalen Punkt-zu-Punkt Verbindungen bestehen.

3.1.2 Basisbandsignale

Üblicherweise werden in den meisten Broadcast-Produktionsumgebungen überwiegend Basisbandsignale genutzt. Für Videosignale ist das dominierende Format das digital-serielle Komponentensignal. Als Schnittstelle für die unkomprimierte Videosignalübertragung innerhalb von Sendesystemen ist SDI bereits seit einiger Zeit der einzig relevante Standard. Nach SMPTE 292M ist HD-SDI für die Videostandards 720p50 und 1080i50 definiert und für 1080p50 nach SMPTE 424M 3G-SDI. Zurzeit sind dies immer noch die üblichen Sendestandards. Mit Blick in die Zukunft könnten allerdings auch höhere Auflösungen, eine hohe Farbunterabtastung und höhere Bildwiederholraten relevant werden, was in entsprechend höheren Datenraten resultiert und andere Schnittstellen erfordert. Für UHD Signale 2160p25 ergeben sich bereits Datenraten von 6 Gbit/s, also doppelt so viel wie eine 3G-SDI Schnittstelle an Bandbreite leisten kann. Bei Framerates von 50 oder 60 fps verdoppelt sich die Bandbreite erneut. Zur Übertragung solch hoher Auflösungen haben sich die 6G- und 12G-SDI Schnittstellen etabliert. Ein 12G-Signal kann zudem auch als Quad-Link übertragen werden, indem dieses auf vier singuläre 3G-SDI-Verbindungen aufgeteilt wird.

Das Komponentensignal schreibt vor, dass das Luminanzsignal (Y) und die Farbkomponentensignale (CbCr) auf zwei verschiedenen Kanälen übertragen wird. Die beiden Kanäle werden wortweise abwechselnd im Multiplex in einen seriellen Datenstrom überführt. Zur Synchronisation werden Anfang und Ende von Bildzeilen mit Referenzmustern versehen – dem Start-of-Active-Video (SAV) und End-of-Active-Video (EAV). Der passive Bildteil der SDI-Schnittstelle wird genutzt, um Zusatzinformationen in Form von Metadaten zu übertragen. Zusätzlich können über die Schnittstelle bis zu 16 Audiokanäle transportiert werden, die ebenfalls in die Austastlücke des Videosignals eingebettet werden. Die physikalische SDI-Schnittstelle bilden BNC-Steckverbindungen und die Übertragung erfolgt über Koaxialkabel. Für weitere Übertragungstrecken werden inzwischen aber auch Glasfaserverbindungen nach SMPTE ST 297 eingesetzt (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 76–77).

Auch wenn die Übertragung der unkomprimierten Video- und Audiosignale üblicherweise noch auf unidirektionalen Verbindungen und seriellen Schnittstellen basiert, sind IP-basierte Daten-netzwerke für einzelne Anwendungen ein wesentlicher Bestandteil in jeder Produktionsinfra-struktur. Anwendungsgebiete sind z.B. Datentransfer, Uhrensyste-me und Zeitverteilung, Telefon-systeme und Kommandoanlagen oder Redaktionssysteme. Zu den wichtigsten Anwendungen der IP-Technologie in den Produktionsumgebungen gehört jedoch die Anbindung einzelner Kompo-nenten an ein übergeordnetes Steuerungssystem, auch bekannt als „Broadcastcontroller“. Be-kannte Systeme sind z.B. „vsmStudio“ der Firma Lawo GmbH oder der „Hi Controller“ der Firma Broadcast Solutions. In vielen Studioinstallationen erfolgt das Schalten von Koppelpunkten auf der Kreuzschiene über ein solches Steuerungssystem, oft mit dafür konfigurierten Hardwarebe-dienteilen. Die Systeme bieten insbesondere den Vorteil, dass sie relevante Funktionen für den Sendebetrieb verschiedener Geräte bündeln und für die Nutzer:innen zugänglich machen. Darun-ter auch das Schalten von Tally oder das Management und die Weitergabe von Signalnamen.

Die Konfiguration und Steuerung von Geräten, die über die Funktionen des Broadcastcontrollers hinausgehen, ist ebenfalls überwiegend netzwerk-basiert. In der Regel stellen Hersteller Webapplikationen oder spezielle Konfigurationsprogramme zur Verfügung.

Ein weiterer wesentlicher und inzwischen recht weit verbreiteter Bestandteil der IP-Technologie sind Audionetzwerke basierend auf „Dante“ oder „Ravenna“. Aufgrund der deutlich geringeren Datenraten von Audiosignalen, können Audiosysteme bereits umfangreich netzwerk-basiert auf-gebaut und konfiguriert werden.

Alle genannten Signale, Technologien und Systeme werden auch für eine etwaige Umstellung auf All-IP-Umgebungen relevant bleiben und müssen bei einer Konzeption eines solchen Systems be-rücksichtigt werden, sodass alle Funktionen erhalten bleiben.

3.2 Grundlagen Netzwerktechnik

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen der Netzwerktechnik. Im Vordergrund stehen hier die Technologien, Protokolle und Standards, welche im Zusammenhang mit ST 2110 und 5G-Infrastrukturen relevant sind und später bei der Konzeption des Versuchsaufbaus eine direkte Rolle spielen.

3.2.1 Das OSI/ISO-Referenzmodell

Um die Kommunikation über Datennetzwerke zu strukturieren, wurden im Laufe der Zeit ver-schiedene Referenzmodelle entwickelt. Die gesamten Funktionalitäten eines Netzwerkes werden dazu in verschiedene Teilfunktionalitäten gegliedert, um die Komplexität zu verringern und Pro-tokolle werden durch eindeutig definierte Zuständigkeiten voneinander abgegrenzt. Das meist

3 Technische Grundlagen

verbreitete Referenzmodell ist das „Open System Interconnection“ Modell (OSI-Modell). Dieses ist kein allgemeingültiger Standard, stellt netzwerkbasierte Rechnerkommunikation aber übersichtlich und leicht verständlich dar. Das OSI-Referenzmodell definiert sieben Layer, die aufeinander aufbauen. Jede Schicht stellt der nächsthöheren Schicht bestimmte Dienste bereit und sie kommunizieren über Protokolle untereinander. Die Schichten sind in sich abgeschlossen, wodurch jede Schicht einzeln weiterentwickelt werden kann, ohne andere Schichten zu beeinflussen.

Aus den Funktionsweisen und Definitionen des OSI-Schichtmodells lassen sich direkte Anforderungen an die Auswahl der Systemkomponenten ableiten. Es kann zwischen Endsystemen und Transitsystemen unterschieden werden. Die Funktionen zur Übermittlung von Nachrichten im engeren Sinne sind in Layer 1-3 angeordnet. Die Schichten befinden sich daher an den Schnittstellen zum Netz und damit in den Netzwerkknoten. Zu Transitsystem gehören z.B. Netzwerkschicht oder Router. Diese greifen in der Regel auf Layer 1-3 zu. Netzwerkschicht können aber je nach Typ und Konfiguration in der zweiten oder dritten Schicht arbeiten und somit verschiedene Anforderungen an das System erfüllen. Endsysteme sind z.B. Server oder Rechner und arbeiten auf allen Protokollschichten (Obermann & Horneffer, 2013, S. 22).

In Abbildung 5 sind alle Layer des OSI-Modells und die Kommunikation zweier Endgeräte über einen Netzwerkschicht dargestellt. Dieser ist in dem gezeigten Beispiel als Layer-3-Switch konfiguriert und übernimmt somit Routingfunktionen.

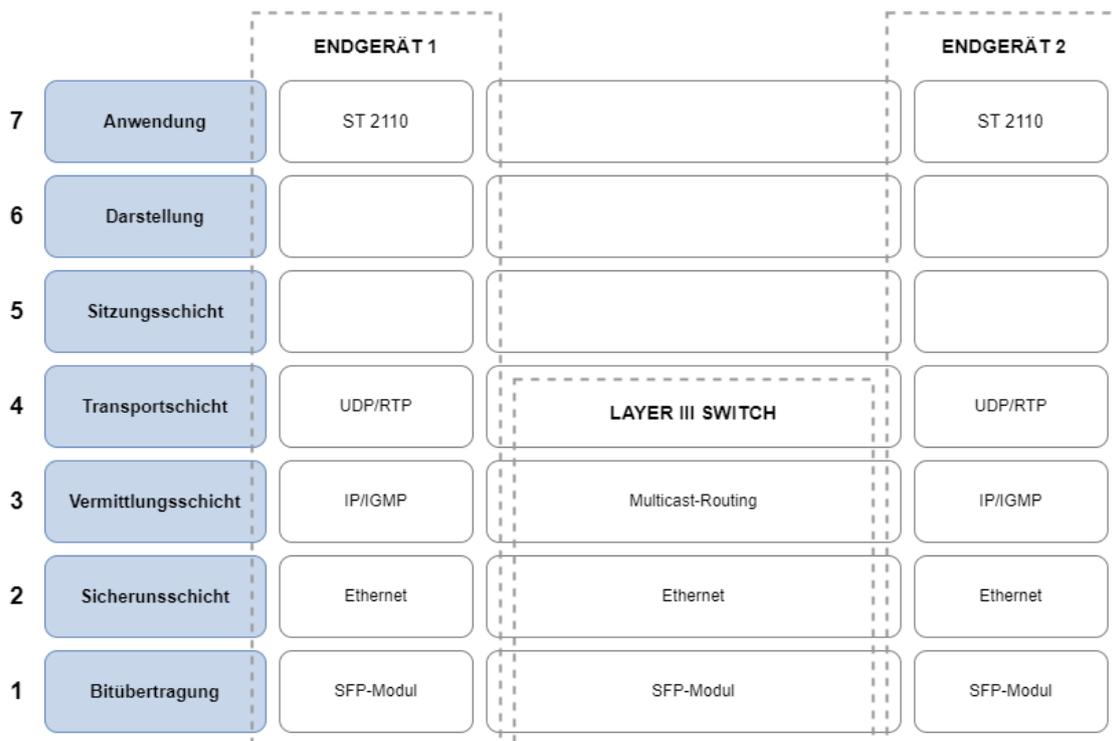


Abbildung 5: OSI-Referenzmodell am Beispiel einer ST 2110 Übertragung

Obwohl logische Verbindungen zwischen zwei identischen Protokollschichten horizontal bestehen, durchläuft der tatsächliche, physikalische Informationsfluss der Schichten im Sender und Empfänger vertikal. Die physikalische Übertragung der Kommunikation stellt dabei die Bitübertragungsschicht dar. Die Nutzdaten, Service Data Unit genannt, werden in jeder durchlaufenen Schicht um zusätzliche Informationen in Form eines Headers oder eines Trailers ergänzt. Diese werden als Protocol Control Information (PCI) bezeichnet und stellen die korrekte Übermittlung und Vermittlung, letztlich die Übertragung der Nutzdaten, sicher (Obermann & Horneffer, 2013, S. 20 f.). Bei der Übertragung von Videosignalen nach SMPTE ST2110-20 sind die Nutzdaten die Abtastwerte der digitalen Komponenten der aktiven Videopixel. Diese durchlaufen die Protokollschichten, welche in Abbildung 5 dargestellt sind und werden in jeder Schicht um die entsprechenden Headerinformationen ergänzt. Nach der Übertragung durch die Protokollschichten kann die Information am Empfänger wieder entpackt und interpretiert werden, sodass am Empfänger wieder die reinen Nutzdaten vorliegen.

3.2.2 Übertragungskanäle

Zu den Übertragungskanälen von Datennetzwerken gehören Kupferkabel, Lichtwellenleiter und drahtlose Übertragungswege (Baun, 2022, S. 49). Die erforderliche Bandbreite zwischen Teilnehmern beeinflusst die Wahl des Übertragungskanals. Die SDI-Schnittstelle greift dabei hauptsächlich auf Koaxialkabel zurück, während die netzwerkbasierte Videosignalübertragung fast ausschließlich Glasfaserleitungen nutzt. Für Steuer- und Audiosignale werden meist Twisted-Pair Kupferkabel mit RJ45 verwendet. Hierbei handelt es sich um Signale mit recht geringer Anforderung an die Datenübertragungsrate bis zu 1 Gbit/s (auch 1 GbE). Für die Übertragung dieser Datenrate sind Kupferkabel der Klasse Cat 5e erforderlich. Dementsprechend sind weitere Klassen für Anforderungen an die Datenrate sowie an die Leitungslänge definiert. Für eine Übertragung von bis zu 10 GbE sind bereits Kabel der Klasse Cat 6A erforderlich (Baun, 2022, S. 80–81).

Aufgrund der Anforderungen an die Datenraten werden für Mediennetzwerke allerdings häufig optische Übertragungskanäle gewählt. Aufgrund einer geringen frequenzabhängigen Dämpfung eignen sich diese besonders gut für die Übertragung hoher Datenraten über weite Entfernungen. Unterschieden wird zwischen Multimode- und Singlemode Glasfasern für den Übertragungskanal. Dabei besitzen Multimode-Fasern einen größeren Querschnitt und reflektieren dadurch das Licht innerhalb der Fasern in verschiedenen Winkeln. Das Licht wird bei Singlemode-Fasern dagegen geradlinig übertragen. Diese Fasern eignen sich besser für die Übertragung über weite Strecken (Schreiner, 2019, S. 19). Für den Versuch werden Singlemode-Glasfaserkabel verwendet.

Viele Geräte, die optische Übertragungskanäle nutzen, werden mit sogenannten SFP-Modulen ausgestattet. Dabei handelt es sich um kompakte Transceiver, die die Verbindung über Glasfasern ermöglichen. Unterschieden wird zwischen Small Form-Factor Pluggable (SFP) und Quad Small

Form-Factor Pluggable (QSFP). Diese unterscheiden sich untereinander hinsichtlich der Datenrate und optischen Wellenlängen. Ein Gerät kann so, Anforderungen entsprechend, mit verschiedenen Modulen bestückt werden (www.black-box.de, o. J.). Da die Switches im Versuch ausschließlich SFP-Einschübe besitzen, werden für alle Schnittstellen diese Module verwendet. Größtenteils werden hier SFP+ Module genutzt für Singlemode Fasern mit 10 GbE. Für die Verbindung zwischen den Gateways und den Switches werden dagegen QSFP28 Module verwendet für eine Übertragungsrate von 100 GbE.

3.2.3 Unicast vs. Multicast

In IP-basierten Systemen können die Daten auf verschiedenen Wegen zwischen Endgeräten übertragen werden.

Bei einer Punkt-zu-Punkt Verbindung, bei der eine Quelle die Daten ausschließlich an einen Zielteilnehmer sendet, handelt es sich um Unicast. Die Verbindung kann dabei sowohl uni- als auch bidirektional sein. Bei Unicasting steigt die notwendige Bandbreite bei jedem zusätzlichen Host im Netzwerk an, was bei der Gestaltung des Netzwerkes in jedem Fall berücksichtigt werden sollte.

Beim Multicasting handelt es sich dagegen um eine One-to-Many-Verbindung. Multicast-Routing definiert sogenannte Multicast-Gruppen, die durch eine eindeutige Multicast-Adresse gekennzeichnet sind. Der Adressraum für Multicast umfasst die IP-Adressen von 224.0.0.0 bis 239.255.255.255. Ein Netzwerkteilnehmer kann auf Basis von Multicast nun einen Datenstrom aussenden, den eine Vielzahl von anderen Teilnehmern empfangen kann. Diese müssen Mitglieder der vorher definierten Multicast-Gruppe sein. Im Gegensatz zu Broadcast, wo die Nachricht an alle Netzwerkteilnehmer gesendet wird, empfangen hier nur diejenigen Teilnehmer den Datenstrom, die diesen angefordert haben. Dieses Vorgehen kann die Netzwerkauslastung erheblich optimieren, weshalb Multicast die ideale Kommunikationsmethode für Signalverteilung in Sendesystemen ist. Zur Anwendung von Multicast muss ein Netzwerkknoten oder Router die Multicast-Gruppen verwalten und z.B. feststellen, welche Endgeräte Teilnehmer einer Multicast-Gruppe sind. Um Teilnehmer einer Gruppe zu verwalten, wird das Internet Group Management Protocol (IGMP) verwendet. Dieses beschreibt die Kommunikation der Endgeräte mit einem Multicast-Router um die Multicast-Datenströme zu steuern. Soll ein Endgerät einer Multicast-Gruppe beitreten, sendet dieses eine IGMP-Anfrage an den Multicast-Router aus. Dieser prüft dann, ob der Datenstrom direkt verfügbar ist und leitet diesen an das Endgerät weiter. Liegt der Datenstrom nicht am Router vor, wird eine Anfrage per IP-Routing-Tabelle an den nächsten Multicast-Router weitergeleitet, bis die Quelle der Daten gefunden wurde. Dieser Vorgang wird auch als Abonnieren eines Multicast-Datenstroms bezeichnet (Schreiner, 2019, S. 552). Als Multicast-Router fungieren grundsätzliche Netzwerk-Geräte mit Routing-Funktion, also z.B. ein Layer 3-Switch. Ein herkömmlicher

Switch arbeitet normalerweise auf OSI-Layer 2 und hat somit keine Routing-Funktionen. Allerdings kann auch ein solcher Switch durch den Einsatz von IGMP-Snooping Multicast-Gruppen verfolgen und die Datenpakete gezielt an die Ports der Mitglieder weiterleiten.

Die Version zwei von IGMP ist die früheste IGMP-Version, die zur Anwendung für IPTV verwendet wird. In IGMP v2 und v3 ist das Verlassen einer Multicast-Gruppe in Form eines „Leave-Request“ implementiert, was insbesondere für den Wechsel einer Signalquelle in Sendesystemen relevant ist (Scott Shoaf & Marc Bernstein, 2006, S. 5).

3.2.4 Netztopologien

Datennetzwerke können unterschiedlich strukturiert werden. Die Topologien bilden die Grundstruktur des Netzes und können je nach Anwendung in Vor- und Nachteilen variieren. Eine strukturierte Netzwerktopologie ist die Grundlage für die Skalierbarkeit des Systems. Die wesentlichen Topologien sind in Abbildung 6 dargestellt und werden im Folgenden kurz ausgeführt.

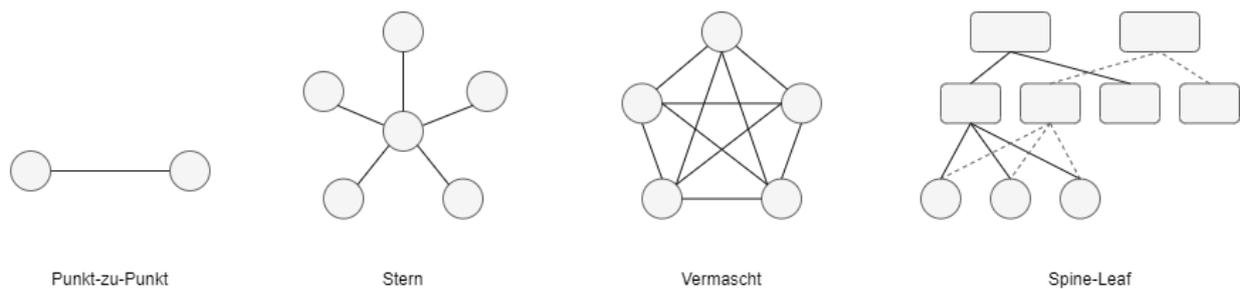


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Netztopologien

Die einfachste Form des Netzwerks entsteht durch das direkte Verbinden der Netzwerkschnittstellen von zwei Geräten. Die gesamte Bandbreite der Verbindung steht zwischen diesen beiden Knoten zur Verfügung. Allerdings steht keine zentrale Verwaltungsmöglichkeit zur Verfügung und der Verkabelungsaufwand ist sehr hoch, weshalb diese Topologie allein in der Praxis sehr selten genutzt wird.

Bei einem Sternnetz werden sämtliche Teilnehmer eines Netzwerks über eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung an einen zentralen Knoten angebunden. Die gewährleistet in den meisten Fällen die Verwaltung und Steuerung des Netzwerks. Der Ausfall von Endgeräten hat hier keine Auswirkung auf das restliche Netzwerk, der Ausfall des zentralen Teilnehmers führt jedoch zum Ausfall der Kommunikation im gesamten System.

Das vermaschte Netz ist die sicherste Variante eines Netzwerks. Jedes Endgerät ist mit einem beliebigen oder mehreren Geräten verbunden. Ist jeder Teilnehmer mit jedem anderen Teilnehmer

verbunden spricht man auch von einem vollständig vermaschten Netz. Bei Ausfall von Teilnehmern kann die Kommunikation durch Routing aufrechterhalten werden. Durch die Vielzahl von Verbindungen ist dieses Konzept mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden (Obermann & Horneffer, 2013, S. 9–10).

Die Spine-Leaf-Topologie ist eine Kombination der bisher genannten Strukturen. Die zentrale Komponente wird hier gedoppelt, um Redundanz herzustellen und dem kompletten Ausfall des Netzwerkes bei Ausfall der zentralen Komponente entgegenzuwirken. Sogenannte Spine-Switches bilden das Rückgrat des Netzwerkes und verbinden mehrere Leaf-Switches untereinander. Die Topologie eignet sich besonders gut für Multicast- und Broadcastanwendungen, da hohe Bandbreiten und kurze Latenzen durch Direktverbindungen zu den Netzwerkknoten erzielt werden können. Die zentralen Komponenten müssen allerdings sehr leistungsfähig sein, um den gesamten Datenverkehr verwalten zu können (*Cisco Application Centric Infrastructure - Cisco ACI Multi-Tier Architecture White Paper*, o. J.).

3.2.5 Das Real-Time Transport Protocol

Das Real-Time Transport Protocol (RTP) agiert als Transportprotokoll auf OSI-Layer 4, der Transportschicht. RTP ist die Grundlage für die Übertragung von ST 2110 Datenströmen und basiert auf dem User Datagram Protocol (UDP), dem dominierenden Transportprotokoll für Echtzeitanwendungen. UDP erlaubt es Daten ohne den Aufbau einer logischen Kommunikationsverbindung zu übertragen und stellt weder Flusskontrolle, Neuübertragung oder Überlastungsüberwachung sicher. Damit ist es allerdings besonders geeignet für die Übertragung großer Datenmengen in Echtzeit, bei der Schnelligkeit und Gleichmäßigkeit im Vordergrund stehen. RTP basiert auf diesen Grundlagen, stellt aber zusätzliche Funktionen zur Verfügung, um eine reibungslose Übertragung von Inhalten bieten zu können. Für eine fehlerfreie Übertragung von Daten in Echtzeit werden RTP-Pakete mit einer eindeutigen, aufsteigenden Sequenznummer versehen, sodass der Datenstrom am Empfänger auch bei unterschiedlichen Paketlaufzeiten korrekt zusammengesetzt werden kann. Anhand der Sequenznummer kann der Empfänger zudem mögliche Paketverluste feststellen. Wie bei UDP ist keine Rückmeldung des Empfängers oder eine Neuübertragung einzelner Pakete vorgesehen. Zusätzlich fügt RTP den Paketen einen Zeitstempel hinzu, welcher sich am Anfang der Sequenz befindet und dem Empfänger dabei hilft Laufzeitunterschiede in der Übertragung festzustellen und bei einer Wiedergabe auszugleichen (Schreiner, 2019, S. 623).

Der ST-2110 Standard schreibt explizit vor, dass Mediendatenströme RTP als Transportprotokoll verwenden müssen. Im Standard selbst – ST-2110-10 – werden Details, z.B. zu der Berechnung des Zeitstempels konkret beschrieben (SMPTE, 2022a, S. 7).

3.2.6 SRT und SST Protocol

Das Secure Reliable Transport (SRT) Protokoll wurde im Jahr 2013 von der Firma Haivision entwickelt mit dem Ziel eine sichere Übertragung von Videosignalen in unzuverlässigen Netzwerken zu ermöglichen. 2017 wurde SRT als Open-Source-Code zur Verfügung gestellt. Durch die Veröffentlichung des Codes implementieren immer mehr Hersteller das Protokoll in ihren Produkten. Das Protokoll verspricht eine erhöhte Zuverlässigkeit durch den Einsatz von Fehlerkorrekturmechanismen, eine geringe Latenz, dynamische Anpassung an die Netzverhältnisse und eine hohe Sicherheit mit einer AES-128/256 Verschlüsselung und setzt dabei auf eine starke Datenreduktion.

Ursprünglich basiert SRT auf dem UDT-Protokoll (UDP-based Data Transfer Protocol), welches für die schnelle Übertragung von Dateien entwickelt wurde. SRT erweitert UDT um weitere Funktionen, insbesondere im Bereich der Echtzeitanwendungen. UDT zielt auf die Nutzung von maximaler Kapazität ab, sodass eine Anwendung sicherstellen muss, dass Eingangspuffer immer verfügbar sind, wenn Daten gesendet werden sollen. Beim Senden von Echtzeit-Video ist die Geschwindigkeit der Paketerzeugung im Vergleich zum Auslesen der Dateien langsam. Der Puffer ist somit schneller erschöpft und erzeugt Rücksetzungen in der UDT-Übertragung und kann eine Überlastung der UDT-API zur Folge haben. Dies wiederum sorgt dafür, dass Pakete der Echtzeit-Videoanwendung verworfen werden. SRT passt das UDT Protokoll insoweit an, als das die verfügbare Bandbreite zwischen Echtzeit- und neu übertragenen Paketen aufgeteilt wird, wobei ältere Pakete anstelle der neuen verworfen werden (Haivision, 2018, S. 5 ff).

Um die Auswirkungen von Netzwerkjitter zu minimieren, verwendet SRT einen adaptiven Jitterbuffer. Dieser sammelt eingehende Datenpakete und leitet sie in einheitlicher Reihenfolge und mit konstanter Geschwindigkeit an die entsprechenden Anwendungen weiter. Dies soll die Wahrscheinlichkeit von Unterbrechungen reduzieren. Zur Anpassung an unvorhersehbare Netzwerke, kann sich das Protokoll zudem dynamisch an die Netzwerkbedingungen anpassen und Parameter, wie die Übertragungsrate, in Echtzeit optimieren (Haivision, 2018, S. 2).

Ein weiteres Element des SRT Protokolls ist die Fähigkeit, verlorene Pakete wiederherzustellen. Dafür werden zwei Methoden zur Fehlerkorrektur verwendet. Bei der Automatic Repeat Request (ARQ) fordert der Empfänger den Sender auf, das fehlende Paket erneut zu senden. Mit der Forward Error Correction (FEC) werden redundante Datenpakete hinzugefügt, die es dem Empfänger ermöglichen fehlende Pakete ohne erneute Übertragung zu rekonstruieren (Haivision, 2018, S. 2–5). Damit dies möglich ist, müssen Puffer-Größen für Sender und Empfänger definiert werden. Diese kann bei SRT auch dafür genutzt werden eine absolute Übertragungslatenz einzustellen, was insbesondere bei der Konfiguration von mehreren synchronen Videoübertragungen hilfreich

3 Technische Grundlagen

ist. In Überlegungen zur Puffer-Latenz sollten immer die tolerierbare Verzögerung und die Übertragungssicherheit in Betracht gezogen werden (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 135–136).

Die Übertragung von Video und Audio basiert bei SRT auf dem MPEG-Transportstrom (MPEG-TS). Dieser teilt den datenreduzierten Mediendatenstrom in einzelne MPEG-TS-Pakete mit einer Länge von 188 Byte auf. In einem Transportstrom können dabei mehrere Video-, Audio- oder Metadatenströme enthalten sein. Theoretisch ermöglicht SRT die Nutzung sämtlicher Audio- und Video-Codecs, die von MPEG-TS unterstützt werden, was in der Praxis aber häufig durch die Software- und Hardwareencoder begrenzt ist. Da nahezu alle SRT-Encoder H.264 und H.265 und AAC-Audio nutzen, konnte sich dies als Standardkonfiguration durchsetzen (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 134).

Ein ähnliches, ebenfalls von Haivision eingesetztes proprietäres Real-Time Protokoll ist das Safe Streams Transport Protocol (SST). Dieses wurde ebenfalls für Echtzeit-Streaming mit hoher Qualität und geringer Latenz über unmanaged Netzwerke entwickelt und basiert auf vergleichbaren Prinzipien. Der grundlegende Unterschied zu SRT ist der explizite Einsatz im Streaming über mobile und kabellose Netzwerke – wie z.B. 5G Netzwerke.

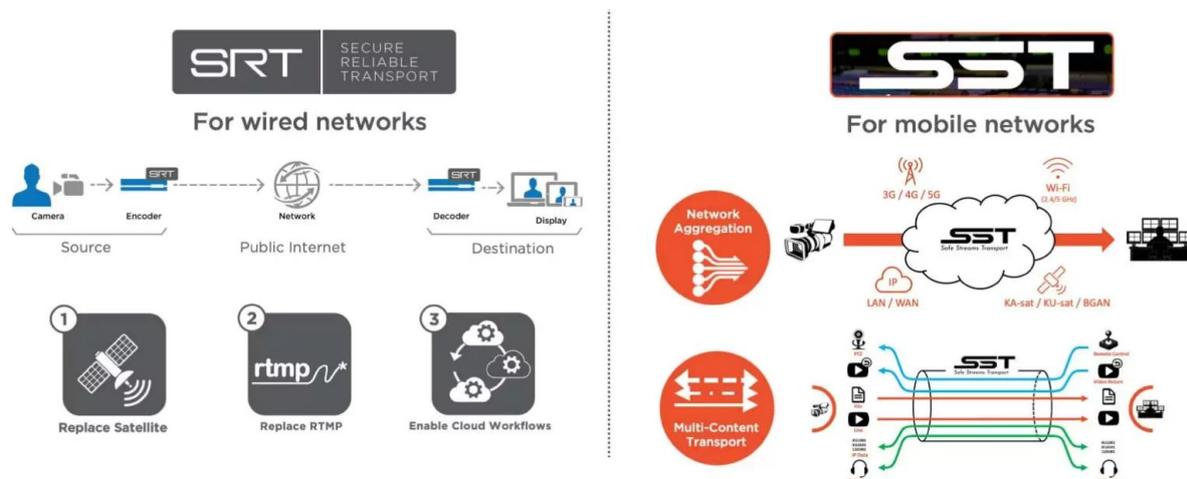


Abbildung 7: Vergleich SRT und SST // Quelle: Haivision, 2023

SST fasst, wie in Abbildung 7 zu sehen, mehrere Netzwerkverbindungen in Echtzeit zusammen und passt die Videobitrate dynamisch an Bandbreitenschwankungen an. Zusätzlich zu Videodaten können außerdem Audio, Metadaten und Kontrolldaten in SST-Streams übertragen werden. Im Gegensatz zu SRT bietet SST zudem Quality of Service, um einzelne Mediendatenströme im Netzwerk zu priorisieren (*SRT and SST Transport Protocols: Understanding the Differences*, 2023).

3.2.7 Das Precision Time Protocol

Wie in bisherigen Basisbandsystemen, ist auch in IP-basierten Sendesystemen eine präzise Taktverteilung und Synchronisation der Signale notwendig. Während in konventionellen Systemen

3 Technische Grundlagen

analoge Synchronisationssignale, wie Black Burst oder Tri-Level Sync verwendet werden, sieht ein ST 2110 System die Nutzung vom Precision Time Protocol (PTP) in der Version 2 vor, welches unter IEEE 1588-2008 standardisiert wurde. PTP ermöglicht die Synchronisation der Endgeräte mit einer Genauigkeit von bis zu einer Nanosekunde und ist damit deutlich präziser als das verbreitete Network Time Protocol (NTP) (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 127).

Da PTP ein sehr komplexes Protokoll ist, beschränkt sich die folgende Ausführung auf die wesentlichen Funktionen und für die Arbeit relevanten Eigenschaften. Im Grunde ist PTP ein Protokoll zur präzisen Zeitverteilung im Netzwerk. In IP-basierten Sendesystemen ist dies jedoch gleichzusetzen mit der Synchronisierung der beteiligten Geräte in Bezug auf Frequenz und Phase. Das Protokoll synchronisiert die Teilnehmer im Netzwerk durch regelmäßige Synchronisationsnachrichten. Durch starke Auslastung eines Netzwerks oder besonders viele aktive Teilnehmer im Netz können Laufzeiten, insbesondere Laufzeitunterschiede bei der Übertragung von Taktpaketen stark schwanken. Zentrale Aufgabe von PTP ist es also diese Schwankungen zu ermitteln und an den jeweiligen Endgeräten zu kompensieren. Dafür definiert PTP mehrere Klassen von Geräten, die bei der Taktverteilung unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Grundsätzlich wird zwischen Taktgebern (Master) und Taktnehmern (Slave) unterschieden, zwischen welchen immer eine logische Kommunikationsverbindung besteht. Die größte Klasse darunter sind die sogenannten Ordinary Clocks. Diese können sowohl als Master, als auch als Slave auftreten. Die meisten Endgeräte in einem System agieren als Ordinary Clocks, darunter z.B. Gateways, Serversysteme, aber auch Taktgeneratoren. Über den Best Master Clock Algorithm (BMCA) wird ermittelt, welche der Ordinary Clocks der zentrale Taktgeber, also die Grandmaster-(GM)-Clock, wird (IEEE, 2019, S. 154 ff.). Dies basiert auf einer Reihe von Entscheidungsparametern. Primärer Entscheidungsfaktor ist dabei die erste Priorität (Priority 1). Es handelt sich um einen numerischen Wert von 1 bis 255, welcher vom Nutzer in den jeweiligen Geräteeinstellungen angepasst werden kann, um den präferierten Taktgeber im Netzwerk festzulegen. Ein geringerer Wert steht dabei für eine höhere Priorität. Besitzen zwei Geräte die gleiche erste Priorität, werden weitere Parameter bei der Entscheidung hinzugezogen, z.B. die Klasse und die Genauigkeit des Taktgebers. Dabei handelt es sich um physikalische Parameter des Geräts und können somit nicht beeinflusst werden (IEEE, 2019, S. 160). In realen Systemen wird der PTP-Taktgeber üblicherweise mit einer externen Zeitinformation versorgt, z.B. über GPS.

Den sogenannten Boundary-Clocks kommt eine besondere Bedeutung zu. Sie können zwischen zwei Netzwerken vermitteln, indem sie selbst als Slave von der GM-Clock getaktet werden, anderen Geräten gegenüber aber als Master auftreten. Geräte, die als Boundary-Clock definiert werden sollen, müssen diese Funktion explizit unterstützen (IEEE, 2019, S. 17).

Netzwerkknoten werden jedoch häufig als Transparent-Clocks konfiguriert. Die Geräte leiten den PTP-Datenverkehr transparent weiter, korrigieren aber die Zeitstempel in den Paketen entsprechend zu den Laufzeiten im Gerät. Dadurch kann eine höhere Genauigkeit bei der Taktverteilung erreicht werden. Die Transparent-Clocks synchronisieren sich selbst auf die GM-Clock (IEEE, 2019, S. 182 ff.).

Um Zeitebenen in einem Netzwerk zu schaffen, gibt es die sogenannten PTP-Domains. Die Zugehörigkeit von Geräten zu einer PTP-Domain wird in der Konfiguration festgelegt, indem ein numerischer Wert zwischen 0 und 127 vergeben wird (IEEE, 2019, S. 69).

Mit der zweiten Version von PTP wurden PTP-Profilen für unterschiedliche Anwendungen eingeführt. Diese definieren die zentralen Parameter der Kommunikation und Anforderungen an die Geräte. Darunter zum Beispiel die Methode zur Laufzeitbestimmung, die Intervalle für Synchronisations-Nachrichten, zulässige Arten von Uhren und Transportmechanismen. Mit ST 2059-2 wurde von der SMPTE ein spezielles PTP-Profil für die Anwendung innerhalb von Produktionsumgebungen standardisiert, welcher Voraussetzung für den Aufbau von ST 2110 basierten Sendesystemen ist. Durch Anpassungen dieses Profils ist es möglich auch Endgeräte zu synchronisieren, die den AES67 Standard nutzen. Dadurch können sowohl Video- als auch Audio-Signale in einem ST 2110-System synchronisiert werden (SMPTE, 2020, S. 7 ff.).

3.2.8 Orchestration in Netzwerken

Die Orchestration von Netzwerken koordiniert die Verwaltung von Netzwerkinteraktionen. Ein Orchestrator dient als Controller eines Gesamtnetzwerks und bezieht sich auf Aktionen bei der Einrichtung von Geräten und Anwendung von Diensten in diesem (*What Is Network Orchestration?*, o. J.). Im Anwendungsfall von Mediennetzwerken ist der Orchestrator dafür zuständig sämtliche Signale im Netzwerk zu steuern. Der Signalfluss ist so nicht durch eine physikalische Infrastruktur vorgeschrieben und wird dynamisch genutzt. Softwarebasiert können Mediendatenströme so z.B. von Quellen zu Senken geroutet werden, ohne statische Konfigurationen in Switchen vornehmen zu müssen. Der Netzwerk-Controller muss dafür auf die Endgeräte im Netzwerk, welche ein Mediensignal empfangen sollen, zugreifen. Die Einbindung erfolgt über bestimmte Steuerungsprotokolle, wie NMOS (Networked Media Open Specifications). Der Standard NMOS wird durch die „Advanced Media Workflow Association“ (AMWA) verfolgt und soll Interoperabilitätsprobleme zwischen verschiedenen Herstellern durch das einheitliche Kommunikationsprotokoll lösen. Der Teilbereich NMOS IS-04 beschäftigt sich dabei mit der automatisierten Erkennung und Registrierung im Netzwerk. Dafür sieht das Protokoll eine übergeordnete Registrierungsstelle vor, den Registry Server, welcher Informationen über die physikalischen Endgeräte im Netzwerk einem übergeordneten Steuerungssystem zugänglich macht. Weitere Teilspezifika-

tion sind außerdem IS-05, welche ein Protokoll zum Verbindungsmanagement für Hard- und Software definiert und IS-06, die sich mit garantierten Datenraten auseinandersetzt (*NMOS Technical Overview*, o. J.).

3.3 SMPTE ST 2110 – Unkomprimierte Elementardatenströme

Mit dem 2017 von der SMPTE veröffentlichte Standard „Professional Media Over Managed IP Networks“ (ST 2110) soll ein ganzheitliches Übertragungskonzept innerhalb IP-basierter Sendesysteme geboten werden. ST 2110 ist ein vollumfänglicher Ansatz zur Verteilung und Synchronisation von Video-, Audio- und Metadatenströmen in Produktionsumgebungen. Dabei basiert der Standard nicht auf dem Multiplexing der Echtzeitsignale in einem einzelnen IP-Datenstrom, sondern auf der separaten Verteilung der Mediendatenströme im Netzwerk. Dies erlaubt es Systeme zu konzipieren, in denen Komponenten zwar dieselbe Infrastruktur nutzen und auf alle Signale zugreifen könnten, jedoch nur die Signale empfangen, die sie tatsächlich benötigen. Die Audiosignale liegen zum Beispiel vollständig unabhängig von Videosignalen vor und können flexibel auf reine Audiokomponenten geschaltet werden, ohne dass Embedder und Deembedder die Signale trennen oder zusammenführen müssen.

Die Vorgaben und Definitionen von ST 2110 setzen sich aus einer Reihe von Teilstandards zusammen, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind (SMPTE, o. J.).

Tabelle 1: Die ST 2110 Teilstandards

Standard	Thema
ST 2110-10	Systemtakt und allgemeine Definitionen
ST 2110-20	Übertragung des unkomprimierten, aktiven Videosignals
ST 2110-21	Verkehrssteuerung für Videosignale
ST 2110-22	Übertragung von konstant komprimierten Videosignalen
ST 2110-30	Übertragung von digitalem, PCM-codiertem Audio
ST 2110-31	Transparente Übertragung von AES3
ST 2110-40	Metadaten nach ST 291-1
ST 2110-43	Timed Text Markup Language für Untertitel

3.3.1 ST 2110-10 Systemtakt und allgemeine Definitionen

Neben der allgemeinen Systembeschreibung widmet sich ST 2110-10 zum größten Teil der Taktverteilung und der Generierung von RTP-Zeitstempeln. Wie bereits in Abschnitt 3.2.7 beschrieben, erfolgt die Taktverteilung bei ST 2110 über das Netzwerk. Im Speziellen wird das bereits beschriebene Precision Time Protocol verwendet, um die präzise Verteilung einer absoluten Zeitinformation an sämtliche Geräte zu realisieren. Alle Geräte im System werden dabei von einem zentralen Taktgeber versorgt und müssen ihren internen Takt auf den Systemtakt synchronisieren. Bei der Erzeugung der Mediendatenströme wird neben dem Systemtakt dann noch zwischen zwei weiteren Zeitebenen unterschieden: der Signalzeit und der RTP-Zeit. Die Signalzeit steht in Relation zur Bildwiederholrate oder Abtastrate des Mediensignals. Die RTP-Zeit verhält sich dazu synchron, kann aber einen Versatz aufweisen. Um an einem Empfänger wieder synchron zusammengeführt werden zu können, werden alle im System generierten Datenströme mit einem präzisen Zeitstempel versehen. Dafür wird das dafür vorgesehene Feld im RTP-Basisheader verwendet, welcher mit der aktuellen RTP-Zeit gefüllt wird (SMPTE, 2022, S. 6).

ST 2110-10 schreibt zudem explizit die Nutzung von RTP für alle Mediendatenströme im Netzwerk vor. Alle RTP-Streams die auf Basis von ST 2110 erzeugt werden, müssen durch das Session Description Protocol (SDP) genau beschrieben werden. Dieses enthält Informationen zur Anzahl der aktiven Pixel, Bildwiederholrate, Farbabtastung sowie zu Netzwerkinformationen. Dazu gehört der Klarname und eine Beschreibung des Signals, die Quell- und Zieladresse des Streams und Informationen zur Zusammengehörigkeit redundanter Datenströme (SMPTE, 2022a, S. 17).

3.3.2 ST 2110-20 Unkomprimierte aktive Videopixel

ST 2110-20 definiert, wie die unkomprimierten Abtastwerte des aktiven Videobildes als RTP-Stream über das Netzwerk übertragen werden. Der Teilstandard ist hinsichtlich Videostandards flexibel formuliert und somit nicht auf bestimmte Standards festgelegt. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über mögliche Übertragungsparameter.

Tabelle 2: Übertragungsparameter von ST 2110-20

Parameter	Werte
Bildgröße (horizontal)	1 – 32767 px
Bildgröße (vertikal)	1 – 32767 px
Farbtiefe	8, 10, 12 & 16 Bit ganzzahlig oder 16 Bit Fließkomma
Farbabtastung	4:2:0, 4:2:2, 4,4,4 (YCbCr, CLYCbCr, ICtCp), XYZ, KEY, RGB
Bildwiederholrate	Ganzzahlig oder als Dezimalbruch (nicht weiter eingegrenzt)

3 Technische Grundlagen

Farbmodelle	BT601, BT709, BT2020, BT2100, ST2065-1, ST2065-3, XYZ, Alpha
Luminanzkurven	SDR, PQ, HLG, LINEAR, BT2100LINPQ, BT2100LINHLG, ST2065-1, ST428-1, DENSITY, ST2115LOGS3, Manuell/Nicht festgelegt

Diese Parameter bilden insgesamt eine Grundlage für eine große Anzahl möglicher Standards, welche mit ST 2110 realisiert werden können. Auflösungen sind in der Theorie weit größer als 8K möglich und nur durch die physikalischen Durchsatzraten der Netzwerke und Geräte begrenzt. Das Bildseitenverhältnis kann dabei, ebenso wie die Bildwiederholrate, beliebig definiert werden (SMPTE, 2022c, S. 16 ff.).

Der größte Unterschied zwischen ST 2110-20 und konventionellen Videosignalformaten ist, dass ausschließlich die aktiven Videopixel übertragen werden und Signale somit keine Austastlücke mehr beinhalten. Dies spart bei der netzwerkbasierter Übertragung zwischen 25 und 40% der Übertragungsdatenrate ein. Die beschreibenden Informationen zu einem Videosignal werden nicht im eigentlichen Mediendatenstrom übertragen, sondern in dem bereits beschriebenen SDP-File angelegt. Die Nutzdaten des RTP-Datenstroms beinhalten somit ausschließlich die Abtastwerte der aktiven Videopixel. Diese bilden Wert für Wert den RTP-Payload. Da die maximale Paketgröße in einem RTP-Stream begrenzt ist, können die Abtastwerte der Videobilder über mehrere Pakete verteilt am Empfänger eintreffen. Aus diesem Grund wird der RTP-Header für den Anwendungsfall durch zusätzliche Informationen erweitert. Dazu gehört in erster Linie die erweiterte Sequenznummer, welche der Nummer aus dem Basis-Header 16 weitere Datenbits hinzufügt, da aufgrund der hohen Datenrate deutlich mehr Pakete pro Sekunde versendet werden und größere Sequenzen bei der Nummerierung nötig sind. Weiterhin wird der Header um die Sample-Row-Data (SRD) ergänzt. Diese beschreibt zusammengefasst wie die Abtastwerte den Koordinaten des aktiven Videobilds zugeordnet werden (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 129–130).

3.3.3 ST 2110-21 Traffic Shaping

Die Spezifikation von ST 2110-21 beschreibt das Traffic Shaping von unkomprimierten Videosignalen. Sie definiert also, wie der Sender von Videodaten die Pakete über das Netzwerk sendet und spezifiziert ein Timing-Modell sowie die SDP-Parameter des Senders, die zur Signalisierung der Timing-Eigenschaften verwendet werden können. ST 2110-21 schreibt Paketraten, Puffergrößen und die maximale Auslastung des Netzwerkes vor. So soll eine Überlastung des Netzwerkes und daraus resultierender Paketverlust vermieden werden. Durch die Definition der Puffergrößen beim Empfänger wird es diesem ermöglicht Pakete, die außerhalb der gesendeten Reihenfolge empfangen wurden, neu zu ordnen.

ST 2110-21 unterscheidet dabei zwischen drei Sendetypen:

- Narrow Sender (Typ N)
- Narrow Linear Sender (Typ NL)
- Wider Sender (Typ W)

Der Narrow Sender ist ein vorhersehbarere Sendertyp. Das heißt, es werden Pakete in einem festen Intervall gesendet. Wird z.B. ein Signal mit einer Paketgröße 1500 Bytes übertragen, steht beim Empfänger ein Puffer bereit, der acht Pakete zwischenspeichern kann (SMPTE, 2022d, S. 12). Dieser Sendertyp kann praktisch nur von einem Hardware-basierten Sender unterstützt werden, da ein sehr exaktes Timing von Paketen benötigt wird.

Bei Wide Sendern des Typs W steht auf Empfängerseite ein größer dimensionierter Puffer zur Verfügung. Dieser muss mindestens 720 Pakete umfassen und kann damit ca. 20% eines 1080p 4:2:2 10 Bit Frames zwischenspeichern. Die Pakete werden konstant gesendet, allerdings nicht in vorhersehbarer Weise (SMPTE, 2022d, S. 13–14). Die Wide Sender können für die Implementierung von Software-basierten Sendern verwendet werden.

3.3.4 ST 2110-22 Konstant komprimierte Videosignale

ST 2110-22 spezifiziert die Übertragung von komprimierten Videosignalen mit konstanter Bitrate. Ebenso wie die zuvor beschriebene Übertragung von Videodaten basiert auch ST 2110-22 auf der Nutzung von RTP-Streams und der Beschreibung der Videodaten anhand des Session Description Protocol. Da es in diesem Teilstandard aber nicht um unkomprimierte Videosignale geht, werden zusätzlich Informationen mit formatspezifischen Parametern zur Komprimierung gegeben. Zusätzlich wird im SDP-Objekt die durchschnittliche Bitrate angegeben (SMPTE, 2022b, S. 3–6). Häufig wird in ST 2110-22 der Codec JPEG-XS verwendet.

3.3.5 ST 2110-30 PCM-codiertes Audio

Die Audiosignalübertragung von ST 2110-30 basiert auf dem Standard AES67 der Audio Engineering Society. ST 2110-30 erweitert AES67 allerdings um einige Vorgaben und Voraussetzungen. Bestehende AES67-Audionetzwerke und Geräte können in 2110-Infrastrukturen integriert werden.

Ebenso wie die Videodatenübertragung basiert auch AES67 vollständig auf der Verwendung von RTP. Ebenfalls in AES67 standardisiert ist die Nutzung von PTP für Synchronisation und Taktverteilung sowie die Unterstützung von Unicast und Multicast. Innerhalb eines RTP-Streams können zwischen einem und 64 Audiokanäle parallel übertragen werden. Die Uni- oder Multicast-Verbindungen werden äquivalent zu ST 2110-20 durch das Session Description Protocol beschrieben. Jeder ST 2110-30 fähige Sender und Empfänger muss zwingend eine Abtastrate von 48 kHz und kann optional 44,1 kHz und 96 kHz unterstützen. Alle Geräte müssen zudem Datenströme mit je

einem bis acht Audiokanälen verarbeiten können. Der Signaltakt und der RTP-Takt müssen der gewählten Abtastrate entsprechen (SMPTE, 2017, S. 4).

3.3.6 ST 2110-40 Metadaten

Neben den eigentlichen Video- und Audiosignalen werden in der Praxis diverse Zusatzdaten übertragen, darunter Untertitel, Timecode oder HDR-Metadaten. Diese sind nach ST 291-1 ebenfalls standardisiert. In konventionellen Systemen werden diese Metadaten in der Regel nicht über spezielle Schnittstellen, sondern in den Austastlücken des Videosignals übertragen. Da die Videosignale aber, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, ohne Austastlücke über das Netzwerk übertragen werden, definiert der Teilstandard ST 2110-40 wie die Metadaten ebenfalls in einen RTP-Stream überführt werden können und als separater Datenstrom übertragen werden. Die Datenpakete werden ähnlich zu den Video- und Audiodatenströmen behandelt, durch PTP synchronisiert und in SDP-Objekten beschrieben (SMPTE, 2023, S. 5–10).

3.4 5G-Mobilfunk im Broadcast

Die fünfte Generation der Mobilfunktechnologie, allgemein als 5G bekannt, ist der neueste Standard für mobile Kommunikation, der darauf abzielt, die Leistung und Fähigkeiten von Mobilfunknetzen erheblich zu verbessern. 5G bietet im Vergleich zu seinem Vorgänger 4G, eine weitaus höhere Datenrate, eine geringere Latenz und eine verbesserte Kapazität zur Unterstützung einer Vielzahl von Geräten und Anwendungen. Wie bereits in der Einleitung verdeutlicht, gehört die Nutzung von 5G-Technologien auch zu den Top-Prioritäten der Medienbranche und schafft neue Potenziale für innovative und effiziente Produktionsmethoden. In den folgenden Absätzen soll die Entwicklung von 5G näher erläutert werden. Dazu gehören die Anwendungsszenarien und die sich daraus ergebende Netzwerkarchitektur mit ihren verschiedenen Komponenten. Es wird kurz auf die verwendeten Protokolle eingegangen, sowie auf die verwendeten Frequenzen der Funktechnologie, mit besonderem Fokus auf die Frequenzverteilung innerhalb Deutschlands. Zuletzt soll es um einige Besonderheiten, die 5G technisch mit sich bringt, gehen, um besonders die Vorteile für die Broadcast-Industrie herauszuarbeiten.

3.4.1 Entwicklung und Standardisierung von 5G

Hinter dem Begriff 5G, auch 5G New Radio, verbirgt sich eine Reihe an Standards für die 5. Mobilfunkgeneration. Der Übergang von 4G zu 5G markiert einen bedeutenden Fortschritt in der mobilen Kommunikationstechnologie. Im Gegensatz zu den vorigen Mobilfunktechniken, wie 3G oder LTE, ist die Entwicklung von 5G nicht technikgetrieben. Stattdessen standen am Anfang der Technologie diverse Nutzungsszenarien, anhand derer die für die Umsetzung erforderlichen Konzepte

3 Technische Grundlagen

und Techniken spezifiziert wurden. Der Fokus liegt somit nicht mehr nur bei Diensten und Kommunikation für Menschen, sondern auch für smarte Geräte und Systeme. Durch die vielen verschiedenen Anwendungsfälle, werden stark variierende Anforderungen an 5G-Netze gestellt. Das beinhaltet unterschiedlichste Dienste an verschiedenen Orten mit variierenden Bitraten und Anzahlen an verbundenen Endgeräten. Dies erfordert eine sehr hohe Flexibilität, Skalierbarkeit und Elastizität der Netze. Anhand der Use Cases entwickelte die ITU-R drei Schwerpunktbereiche für den Mobilfunk über 5G:

- Enhanced Mobile Broadband
- Ultra-Reliable and Low Latency Communications
- Massive Machine Type Communications

Enhanced Mobile Broadband umfasst die Kommunikation von Personen an mobilen Hotspots mit hoher Nutzungsdichte, hohen Bitraten, aber geringer Mobilität. Zudem beinhaltet es auch die Kommunikation in einem ausgedehnteren geografischen Bereich mit nicht so hohen Bitratenanforderungen, aber unterbrechungsfreier Konnektivität. Ultra-Reliable and Low Latency Communications hat, wie der Name bereits ausdrückt, hohe Anforderungen an den Durchsatz, die Verzögerung und die Verfügbarkeit. Massive Machine Type Communications setzt eine sehr hohe Anzahl kommunizierender Geräte voraus mit vergleichsweise geringen Bitraten und Daten, die unkritisch bezüglich Verzögerungen sind (Trick, 2023, S. 110).

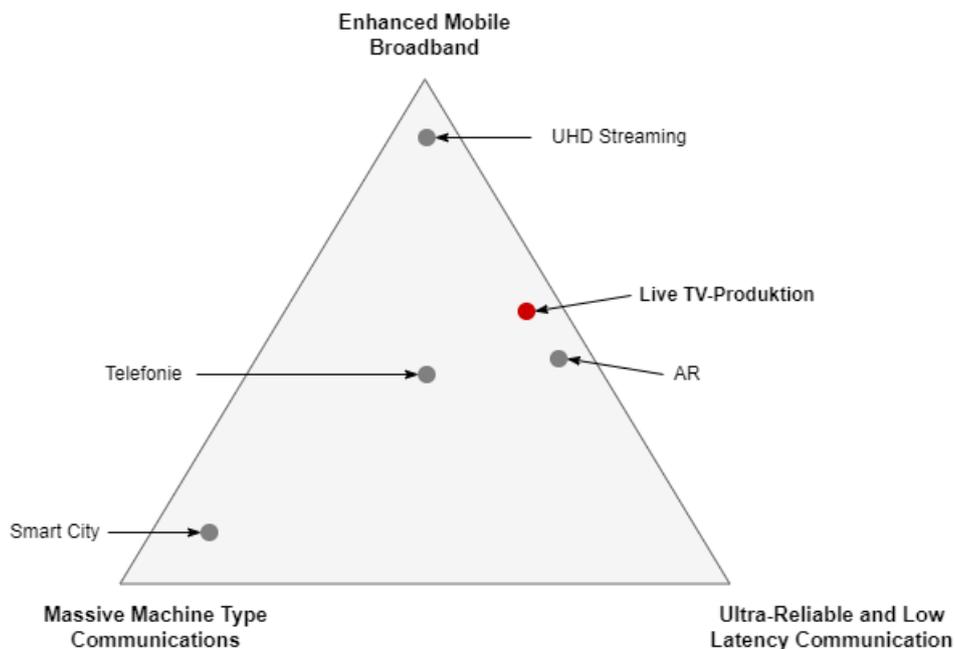


Abbildung 8: 5G Schwerpunktbereiche

3 Technische Grundlagen

Aus diesen drei Anwendungen und den Überschneidungen daraus, lassen sich entsprechende Anforderungen an 5G-Netze ableiten. Die ITU-R bewertet dabei acht Parameter als am wichtigsten und hat dafür Maximalanforderungen definiert, wobei aber nicht für jeden Use Case alle Kriterien gleichzeitig erfüllt sein müssen. Diese sind in Tabelle 3 zusammengefasst (Trick, 2023, S. 120).

Tabelle 3: Maximalanforderungen an 5G-Netze gem. ITU-R

Parameter	Maximalanforderung
Spitzendatenrate	pro Nutzer bzw. UE bis 10 Gbit/s, unter besonderen Bedingungen bis 20 Gbit/s
Von Nutzern erlebte Datenrate	pro Nutzer bzw. UE dauerhaft 100 Mbit/s, an speziellen Hotspots bis 1 Gbit/s
Latenz	Minimal 1 ms
Mobilität	Bis 500 km/h
Verbindungsichte	Bis 10^6 UEs/km ²
Energieeffizienz	100x besser als bei IMT-Advanced, d.h. gleicher Energieverbrauch bei 100-facher Leistungsfähigkeit
Spektrale Effizienz	3x höher als bei IMT-Advanced
Verkehrskapazität	10 Mbit/s/m ²

Die eigentliche Standardisierung von 5G erfolgt durch 3GPP. Dieses wurde von den zuständigen europäischen, asiatischen und nordamerikanischen Standardisierungsorganisation eigens für die weltweite Standardisierung zu Mobilfunknetzen gegründet. Dies hat mit 3G begonnen und wird mit ihrem Auftrag für 5G fortgesetzt (Trick, 2023, S. 130). Der 3GPP-Standard für 5G, bekannt als Release 15, wurde im Juni 2018 veröffentlicht und legt die technischen Spezifikationen für die erste Phase der 5G-Einführung fest. Die folgenden Releases (Release 16 bis 20) erweitern die Fähigkeiten von 5G weiter und adressieren spezifische Anforderungen für vertikale Industrien, einschließlich der Medienproduktion und des Broadcastings. 3GPP definiert für 5G nicht nur die Luftschnittstelle, sondern auch alle Protokolle und Netzwerkschnittstellen, die das Mobilfunksystem ermöglichen. Um Kapazitäten für die Anwendungsfälle zu bieten, nutzt 5G eine Reihe spezieller Technologien, die „Network Function Virtualization“, „Network Slicing“ oder „Edge Computing“ auf welche in den folgenden Ausführungen weiter eingegangen wird (*The 3GPP's System of Parallel Releases*, o. J.).

3.4.2 Systemarchitektur

Die breite Anforderungspalette, welche in Abschnitt 3.4.1 beschrieben wurde, kann von einem einzigen 5G-System nicht abgedeckt werden. Die Lösung sind anforderungsspezifische Teilsysteme, innerhalb eines Gesamtsystems. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Trennung von der Steuerungsebene (Control Plane) und User Ebene (User Plane), was eine effizientere Netzwerkverwaltung und -steuerung ermöglichen soll. Diese Trennung wird durch Software-Defined Networking (SDN) und Network Functions Virtualization (NFV) unterstützt, welche die Netzwerkfunktionen von der zugrundeliegenden Hardware abstrahieren und somit eine dynamische Anpassung und Skalierung der Netzwerkressourcen ermöglichen.

Besondere Aufmerksamkeit gilt beim Design der Netzwerkarchitektur die Modularisierung: Verschiedene Funktionalitäten werden aus modularen Funktionen zusammengebaut. Für die Implementierung dieser Teilsysteme ist entsprechend eine Softwarisierung des Systems nötig. Die Netzwerkarchitektur ergibt sich durch diese Designprinzipien und die daraus resultierenden Schlüsseltechnologien (Trick, 2023, S. 142).

Grundsätzlich beinhaltet das 5G-System das User Equipment, das Radio Access Network (RAN) und das Core Network, das Kernnetz des Netzbetreibers als „Schaltzentrale“. Die Verbindung zwischen dem Kernnetz und dem funkbasierten Zugangsnetz bildet das Transportnetz. Das Gebiet, das von einer Antenne des RAN abgedeckt wird, nennt man Funkzelle. Dieser grundlegende Aufbau wird in Abbildung 9 aufgezeigt.

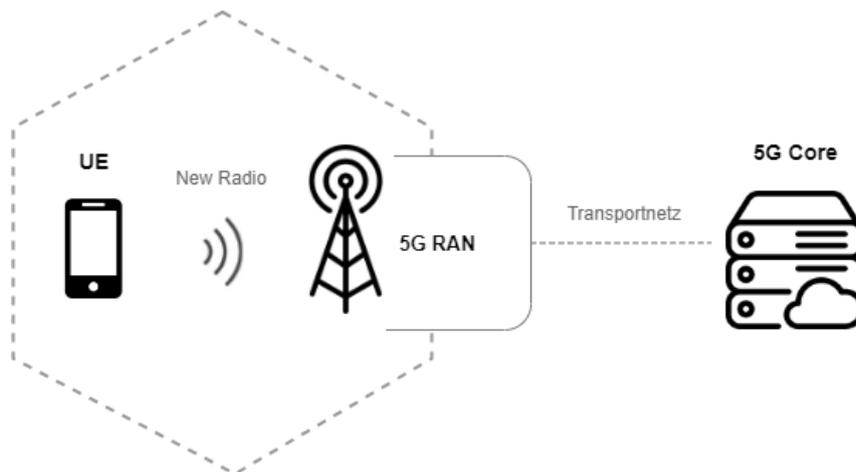


Abbildung 9: Aufbau 5G-System

Das Next Generation RAN (NG-RAN) ist das sogenannte 5G-Zugangsnetz, welches die Basisstationen mit den Antennen bezeichnet (3GPP, 2022a). Das 5G RAN basiert auf der neuen Luftschnittstelle, bekannt als New Radio, die speziell entwickelt wurde, um die Anforderungen moderner und zukünftiger Kommunikationsanwendungen zu erfüllen. New Radio basiert auf Konzepten von

3 Technische Grundlagen

LTE, erweitert diese aber aufgrund der beschriebenen Anforderungen an 5G-Systeme. Für den Datentransport über die Funkschnittstelle werden verschiedene Funktionalitäten benötigt, darunter z.B. FEC-Codierung und -Decodierung, Leistungsregelung, Modulation und Demodulation und die Frequenz- und Zeitsynchronisation (Trick, 2023, S. 155).

Eine zentrale Rolle im eigentlichen Aufbau des 5G RAN spielt die gNodeB (gNB), die als Basisstation fungiert und die drahtlose Kommunikation zwischen den Endgeräten und dem Core Network ermöglicht. Die gNBs sind modular aufgebaut und bestehen typischerweise aus drei Hauptkomponenten: der Centralized Unit, der Distributed Unit und der Radio Unit. Die Centralized Unit ist für die Steuerungsebene zuständig. Sie verwaltet die Signalisierung und Steuerung des Netzwerkverkehrs. Die Distributed Unit übernimmt Aufgaben der Verarbeitung von Datenpaketen und der Ausführung von Echtzeitfunktionen. Die Distributed Unit ist dafür verantwortlich, die von der Radio Unit empfangenen Signale zu verarbeiten und die Daten an die Centralized Unit weiterzuleiten. Die Radio Unit, welche die Daten in Funksignale umwandelt und sie über die Luftschnittstelle überträgt, kann abgesetzt an einem entfernten Antennenstandort betrieben werden. Die gNBs werden mit dem 5G Core und ggf. untereinander verschaltet und kommunizieren über standardisierte Schnittstellen (Trick, 2023, S. 169-170). Ein weiterer zentraler Bestandteil des 5G RAN ist die Unterstützung von Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) und Beamforming. Massive MIMO nutzt eine große Anzahl von Antennen an den gNBs, um mehrere parallele Datenströme gleichzeitig zu senden und zu empfangen. In der Regel sind solche Antennengruppen mit Antennen im zwei, drei- oder vierstelligen Bereich ausgestattet. Diese Technologie erhöht die Spektraleffizienz und die Netzkapazität erheblich. Beamforming ermöglicht die gezielte Ausrichtung der Funksignale, wodurch die Signalqualität verbessert und Interferenzen reduziert werden (Trick, 2023, S. 164–165).

Auch für die Konzeption des 5G-Kernnetzes spielen die Designkriterien und insbesondere die Modularisierung eine Rolle. Der 5G Core stützt sich dabei auf die sogenannte Service Based Architecture (SBA). Diese Architektur ermöglicht eine flexible Bereitstellung und Verwaltung von Netzwerkdiensten, indem sie Netzwerkfunktionen als feingranulare Funktionsmodule in einem Repository bereitstellt und über APIs aufruft. Entsprechend den Use Cases können diese Netzfunktionen dann zusammengestellt und kombiniert werden, sodass spezifische Netze auf Basis des 5G-Systems gebildet werden können (Trick, 2023, S. 179). Eine zentrale Rolle spielt dabei die Aufteilung der Netzfunktionen für die Control Plane mit Signalisierungs- und Steuerungsprotokollen und für die User Plane mit den Nutzdaten.

Die Control Plane umfasst Netzfunktionen, die für die Signalisierung und Steuerung der Netzwerkkoperationen zuständig sind. Dazu gehören im Wesentlichen die Access and Mobility Management Function, welche für die Registrierung, Authentifizierung und Mobilitätsverwaltung der Endgeräte verantwortlich ist. Dies beinhaltet die Steuerung von Verbindungsanforderungen und somit

3 Technische Grundlagen

die Gewährleistung der Überhänge zwischen verschiedenen Zellen und Netzwerken. Die Session Management Function verwaltet die Datenübertragungssitzungen mit der Zuweisung und Verwaltung von IP-Adressen (Trick, 2023, S. 191).

Die User Plane beinhaltet diejenigen Netzfunktionen, die für die Datenübertragung zwischen Endgeräten und dem Netzwerk verantwortlich sind. Die zentrale Komponente der User Plane ist die User Plane Function. Diese ist für die Bearbeitung und Weiterleitung von Benutzerdaten zuständig und trennt dabei die Benutzerebene von der Kontrollebene (Trick, 2023, S. 191).

Die Architektur des 5G Core setzt stark auf Virtualisierung und cloud-native Technologien, was eine flexible und skalierbare Bereitstellung von Netzwerkdiensten ermöglicht. Die Network Function Virtualization erlaubt die Virtualisierung von Netzwerkfunktionen, sodass diese auf Standard-Hardware ausgeführt werden können, anstatt auf spezialisierten Geräten und modular eingesetzt werden. Das SDN trennt die Steuerungsebene von der Datenebene, was eine zentrale und flexible Steuerung des Netzwerks ermöglicht. Zusätzlich soll Orchestration die Verwaltung der virtualisierten Netzfunktionen erleichtern und so eine dynamische Bereitstellung und Anpassung von Netzwerkdiensten entsprechend der aktuellen Anwendungen ermöglichen (Shafi et al., 2017, S. 12–13).

Wie die Systemarchitektur eines 5G-Netzes aufgebaut ist und wie die beschriebenen Komponenten zusammenspielen, kann der Abbildung 10 entnommen werden.

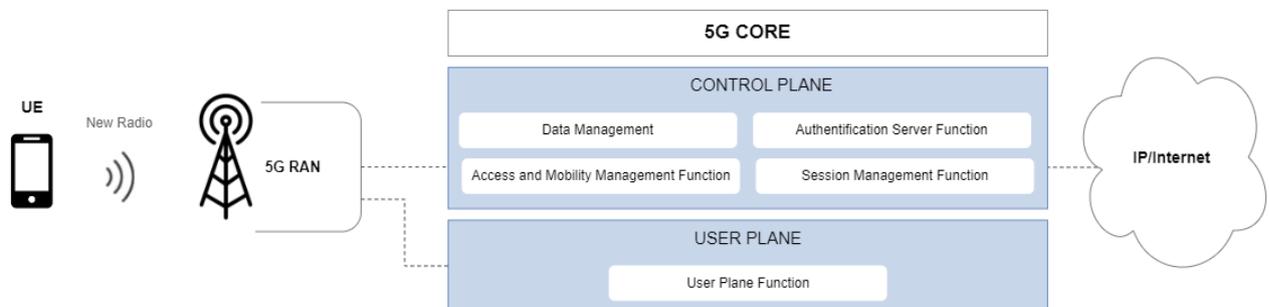


Abbildung 10: 5G Gesamtsystemarchitektur

Im Rahmen der Einführung der 5G-Technologie gibt es zwei wesentliche Bereitstellungsoptionen: die Non-Stand Alone (NSA) Architektur und die Stand-Alone (SA) Architektur. Die NSA Architektur nutzt das 5G Radio Access Network und die New Radio Schnittstelle in Kombination mit der bestehenden LTE- und EPC-Infrastruktur des Core Networks. Dies bedeutet, dass die New Radio - Technologie ohne vollständigen Austausch des Netzwerks verfügbar gemacht wird. In dieser Konfiguration werden nur die 4G-Dienste unterstützt, profitieren jedoch von den erweiterten Kapazitäten.

3 Technische Grundlagen

zitäten des 5G New Radio, wie z.B. niedrigeren Latenzzeiten. Die NSA-Architektur kann als vorübergehender Schritt hin zu einer vollständigen 5G-Bereitstellung gesehen werden, bei der das 5G-Zugangsnetz mit dem 4G-Kernnetzwerk verbunden ist. Diese Konfiguration ermöglicht es, die Vorteile der 5G New Radio-Technologie zu nutzen, ohne sofort das gesamte Netzwerk auf 5G umstellen zu müssen.

Im Gegensatz dazu steht die Stand-Alone (SA) Architektur, bei der die New Radio-Basisstationen direkt mit dem 5G Kernnetz verbunden sind. Die SA-Architektur wird als "vollständige 5G-Bereitstellung" betrachtet, da sie keine Komponenten des 4G-Netzwerks für ihren Betrieb benötigt. In der SA-Architektur verbinden sich die Basisstationen über die sogenannte Xn-Schnittstelle miteinander. Das Zugangsnetzwerk verbindet sich über das Transportnetz mit dem 5G Core-Netzwerk. Diese Konfiguration ermöglicht es, die vollen Vorteile der 5G-Technologie auszuschöpfen, einschließlich verbesserter Datenraten, niedrigerer Latenzzeiten und einer höheren Kapazität zur Unterstützung einer Vielzahl von Geräten und Anwendungen. Die SA-Architektur stellt somit die langfristige Vision für 5G dar, da sie eine unabhängige und vollständige 5G-Umgebung bietet, die nicht auf bestehende 4G-Infrastrukturen angewiesen ist. Dies ermöglicht eine maximale Nutzung der 5G-Technologien und die Bereitstellung innovativer Dienste, die die Fähigkeiten des Netzwerks voll ausschöpfen können (3GPP, 2022a).

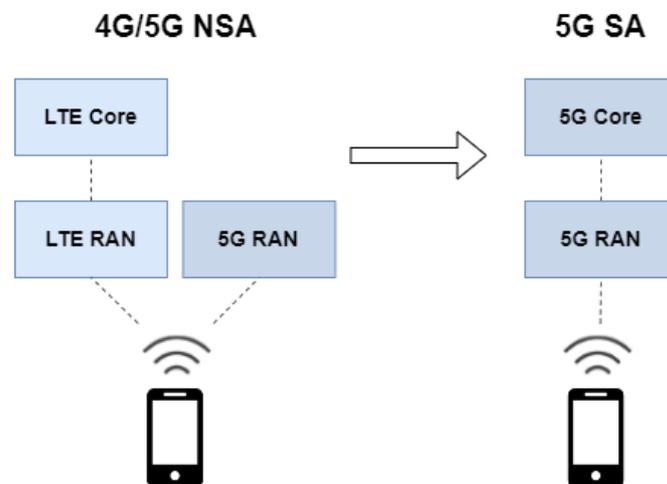


Abbildung 11: 5G Non-Standalone vs. Standalone

3.4.3 Frequenzen

Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, basiert das 5G RAN auf der Funktechnologie „New Radio“. Zu den wichtigsten Merkmalen dieser gehört, dass mehrere Frequenzbereiche unterstützt werden können, um den Einsatz in Frequenzen auf Länder- und Regionenbasis zu ermöglichen. Die von 5G genutzten Frequenzen sind in zwei Hauptkategorien unterteilt: FR1 (Frequency Range) und

3 Technische Grundlagen

FR2. Jeder dieser Frequenzbereiche bietet spezifische Vor- und Nachteile, die ihre Eignung für verschiedene Anwendungsszenarien beeinflussen.

FR1, die Sub-6 GHz Frequenzbänder umfassen Frequenzen unter 6 GHz. Diese Bänder bieten eine gute Balance zwischen Reichweite, Durchdringung und Datenrate. Als niedrige Frequenzen werden die unter 2 GHz bezeichnet, wie das 700 MHz Band. Diese Bänder bieten eine gute Reichweite und Gebäudedurchdringung. Diese Eigenschaften machen sie ideal für die Abdeckung ländlicher und suburbaner Gebiete sowie für die Bereitstellung von drahtlosen Diensten in Innenräumen. Ein Nachteil dieser Frequenzen ist jedoch ihre begrenzte Kapazität, was sie weniger geeignet für Anwendungsfälle macht, in denen hohe Datenraten und geringe Latenz benötigt werden. Dies würde breitere Frequenzkanäle erfordern, die in den unteren Bändern nicht verfügbar sind. Einen Kompromiss bietet das Mittelbandspektrum zwischen 2-6 GHz. Bereiche, wie das 3,5 GHz Band bieten eine höhere Kapazität und Datenrate als die niedrigen Frequenzen, während sie gleichzeitig eine akzeptable Reichweite und Durchdringung erreichen. Dadurch kann eine breite Palette von Anwendungen unterstützt werden.

Mit FR2 werden für den Mobilfunk ganz neue Frequenzspektren definiert im Bereich der sogenannten cm-Wellen und der mm-Wellen zwischen 24,25-52,6 GHz. Oft wird der gesamte Frequenzbereich unter „mmWave“ zusammengefasst, bezeichnet durch die Wellenlängen von diesem. Der Bereich bietet extrem hohe Datenraten und Kapazitäten, aber auch einige Herausforderungen. Die hohe Bandbreite ermöglicht schnelle Datenübertragungen, die für Anwendungen wie UHD-Video-Streaming, VR- oder AR-Anwendungen geeignet sind. Es ergeben sich allerdings nur relativ kurze Funkreichweiten und starke Beeinträchtigungen durch Hindernisse, wie Nebel, Niederschlag oder auch Menschen. Entsprechend komplex muss die Funkübertragungstechnik umgesetzt werden (Trick, 2023, S. 130–134).

Die 5G-Netze in Deutschland nutzen zurzeit die, bereits für den Mobilfunk der dritten und vierten Generation verfügbaren, Frequenzbereiche 700 MHz bis 2,6 GHz. Aufgrund der erforderlichen Bandbreiten wurden weitere Frequenzen für 5G-Anwendungen freigegeben. Für die bundesweite Nutzung durch öffentliche Mobilfunknetze wurde das Frequenzband 3,4-3,7 GHz versteigert. Zudem kann das Frequenzband 3,7-3,8 GHz im Antragsverfahren vergeben werden, für z.B. Campusnetze. Die Vergabe für den mmWave-Bereich erfolgt im Frequenzbereich 24,25-27,5 GHz, ebenfalls im Antragsverfahren (Bundesumweltministerium, o. J.).

Die Wahl der Frequenzbänder ist besonders relevant für Broadcast-Anwendungen, die spezifische Anforderungen an Reichweite, Datenrate und Zuverlässigkeit stellen. Sub-6 GHz Frequenzen sind aufgrund ihrer guten Reichweite und Durchdringung ideal für die Bereitstellung von Broadcast-Diensten in weiten Gebieten, einschließlich ländlicher und suburbaner Regionen. Diese Bänder ermöglichen es, eine breite Abdeckung mit einer relativ geringen Anzahl von Basisstationen zu

erreichen, was die Implementierungskosten senkt und trotzdem eine gute Effizienz des Netzwerks bietet. Auf der anderen Seite bieten mmWave-Bänder aufgrund ihrer hohen Datenraten und Kapazitäten erhebliche Vorteile für Anwendungen mit extrem hohen Anforderungen an die Datenraten und geringen Latenzen. Allerdings erfordern diese Frequenzen eine dichtere Netzwerkinfrastruktur und eine sorgfältige Planung, um die Herausforderungen der begrenzten Reichweite und Durchdringung zu bewältigen (Trick, 2023, S. 133–134).

3.4.4 Network Slicing

Network Slicing ist ein neues Konzept in der 5G-Architektur, das es ermöglicht, mehrere virtuelle Netzwerke auf einer gemeinsamen physischen Infrastruktur zu betreiben. Jedes dieser „Slices“ kann individuell konfiguriert werden, um spezifische Anforderungen verschiedener Anwendungen und Dienste zu erfüllen. Mit einem virtualisierten 5G Core können mehrere logische Netzwerke mit jeweils eigenen, software-definierten Funktionen unterstützt werden, die auf derselben physischen Hardware laufen. Die Network Slices können sich dabei nicht nur auf das Kernnetz, sondern auch auf das Zugangnetz erstrecken. Die logisch getrennten Netze können verschiedenen Mandanten, also Netzbetreibern oder Service Providern, zugeordnet und von diesen administriert werden. Die Umsetzung erfordert die bereits beschriebenen Technologien SDN und NFV zur Steuerung und Verwaltung der Netzwerkressourcen und der Virtualisierung der Netzfunktionen auf Standard-Hardware. Jeder Network Slice wird als eine Sammlung virtueller Netzwerkfunktionen (VNFs) implementiert, die auf einer gemeinsamen physischen Infrastruktur ausgeführt werden und spezifisch für den jeweiligen Slice konfiguriert sind. Generell bestehen die Slices aus Networkslice-Subnetzen, z.B. dem RAN Subnetz oder dem Core Netzwerk Subnetz. Die Subnetze werden wiederum aus den NFs zusammengesetzt. Über sogenannte Service Level Agreements werden die Anforderungen an Netzwerkslices definiert, darunter die Bandbreite, Latenz und Abdeckung. Ein zentrales Element des Netzwerkslice-Managements ist die Closed Loop Assurance. Dieses geschlossene Steuerungssystem überwacht kontinuierlich die Leistung der Netzwerkslices und passt sie automatisch an, um eine optimale Leistung zu gewährleisten, ohne dass menschliche Eingriffe erforderlich sind. Diese Automatisierung wird durch die Analyse und Auswertung von Leistungskennzahlen (KPIs) und den Service Level Agreements unterstützt. Die Orchestrierungssysteme sind integraler Bestandteil der 5G-Core-Architektur (3GPP, 2023).

Im Broadcast-Bereich bietet Network Slicing Vorteile, da es die Bereitstellung spezialisierter Dienste ermöglicht, die auf die spezifischen Anforderungen der Rundfunkübertragung zugeschnitten sind. So können z.B. dedizierte Low Latency Slices für Live-Übertragungen eingesetzt werden. Entsprechend können die Service Level Agreements für verschiedene Anwendungsszenarien angepasst werden. Darüber hinaus können Network Slices für den Einsatz in speziellen

Veranstaltungen oder temporären Netzwerken erstellt werden. Beispielsweise könnte ein Veranstaltungsort wie ein Stadion oder eine Konzerthalle einen dedizierten Slice für die Dauer einer Veranstaltung innerhalb des öffentlichen 5G-Netzes der Mobilfunkbetreiber erhalten.

3.4.5 Edge Computing

Eine weitere Schlüsseltechnologie, die mit 5G eingeführt wurde, ist Edge Computing. Es bezeichnet die Praxis, Rechenressourcen und Datenverarbeitungsaufgaben näher an die Endbenutzer und die Datenquellen zu verlagern, anstatt diese Aufgaben in zentralisierten Cloud-Rechenzentren durchzuführen. Dadurch können Latenzzeiten erheblich reduziert werden. Es ist außerdem möglich, Datenflüsse zu optimieren und lokale Verarbeitungen und Speicherung zu nutzen, was die Betriebskosten und die Komplexität der Datenübertragung verringern kann. Zudem sind bestimmte Anwendungen nicht mehr auf die Konnektivität zu zentralen Servern oder Cloud-Servern angewiesen, was wiederum die Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit von Systemen verbessern kann. Im Bereich von 5G werden die Computing-Funktionen in Form von Rechenleistung am Rand des RAN bereitgestellt und die Funktionen nativ im 5G Core unterstützt. Datenströme von Endgeräten werden direkt zu den nahegelegenen Edge-Servern geleitet (3GPP, 2023).

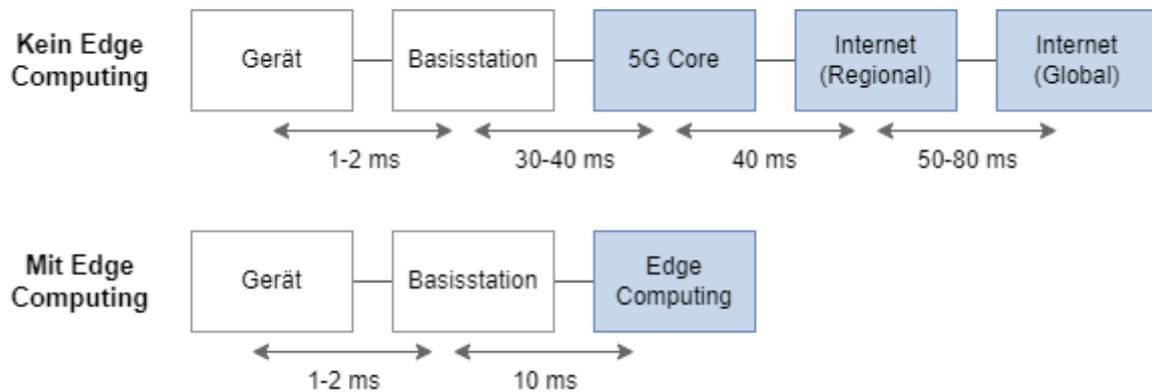


Abbildung 12: Latenzvorteile mit Edge Computing // Quelle: 3GPP

Ein Vorteil von Edge Computing im Broadcast-Bereich ist die Fähigkeit große Datenmengen effizient zu verarbeiten und zu verteilen. In einem traditionellen zentralisierten Cloud-Modell könnten die Übertragung großer Video-Streams und die Verarbeitung von HD-Inhalten zu erheblichen Verzögerungen und Engpässen führen. Durch die Nutzung von Edge-Computing-Ressourcen können diese Aufgaben lokal ausgeführt werden, wodurch die Belastung der zentralen Rechenzentren reduziert und die Gesamtleistung des Netzwerks verbessert wird.

3.4.6 Campusnetze

Non Public Networks (NPN), auch als Campusnetze bekannt, sind private 5G-Netzwerke, die nicht für die allgemeine Öffentlichkeit zugänglich sind. Sie bieten eine maßgeschneiderte Kommunikationsinfrastruktur, die spezifischen Anforderungen gerecht wird. Campusnetze sind geografisch begrenzt und werden unter der Verwendung von dedizierten Frequenzen aufgebaut (3GPP, 2022b).

Technisch gesehen erfordern Campusnetze die Implementierung von Basisstationen (gNodeBs), die das gesamte Campusgelände abdecken. Diese Basisstationen sind mit dem 5G-Core-Netzwerk verbunden. Es können sowohl virtuelle als auch physische Netzelemente verwendet werden. Insgesamt kann zwischen vielen verschiedenen Konfigurationen von NPNs unterschieden werden. 3GPP definiert aber zwei Hauptkategorien: Ein eigenständiges nicht-öffentliches Netz und ein in das öffentliche Netz integriertes NPN. Bei einem vollständig eigenständigen NPN wird das Netzwerk komplett isoliert betrieben, nutzt also keine Netzfunktionen eines Mobilfunknetzbetreibers. Das integrierte NPN wird mit Unterstützung des öffentlichen 5G-Netzes eingerichtet. Es kann als privater Netzwerk Slice innerhalb des öffentlichen Netzes bereitgestellt werden oder als Hybrid-Modell mit shared RAN oder einem 5G Core, welcher durch das externe Netz betrieben wird.

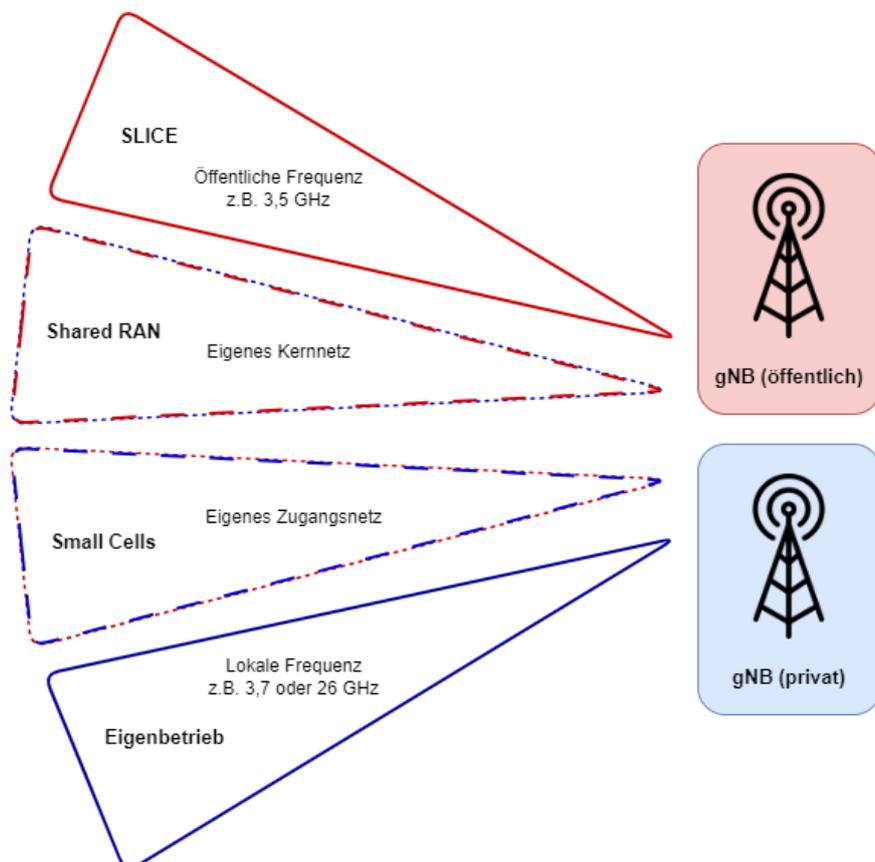


Abbildung 13: Betreibermodelle für 5G-Campusnetze

Regulatorisch müssen Betreiber von Campusnetzen bestimmte Vorschriften und Frequenzuteilungen einhalten, die je nach Land und Region variieren können. In vielen Fällen müssen Unternehmen Frequenzlizenzen bei nationalen Regulierungsbehörden erwerben, um sicherzustellen, dass ihre Netzwerke ohne Interferenzen betrieben werden können. Zudem müssen Sicherheits- und Datenschutzstandards eingehalten werden, um die Integrität und Vertraulichkeit der übertragenen Daten zu gewährleisten. In Deutschland kann z.B. das Frequenzband 3,7-3,8 GHz im Antragsverfahren vergeben werden. Dies ist auch für eine Kurzzeitnutzung bis zu einem Monat möglich (BMW, 2020, S. 21 ff.).

Die technische Infrastruktur eines NPN bietet zahlreiche Vorteile. Dazu gehört eine verbesserte Netzwerksicherheit, da das Netzwerk isoliert und ausschließlich für die internen Anforderungen des Betreibers konfiguriert ist. Dies ermöglicht eine fein abgestimmte Kontrolle über alle Netzwerkparameter und die Implementierung maßgeschneiderter Sicherheitsprotokolle. Durch die Nutzung dedizierter Frequenzen und Infrastrukturkomponenten können NPNs auch eine höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bieten, da sie nicht den gleichen Belastungen und Interferenzen wie öffentliche Netzwerke ausgesetzt sind. Durch die lokale Präsenz der Netzeinheiten wird zudem die physische Entfernung und die Anzahl der Netzsprünge reduziert, wodurch die Latenzzeit innerhalb des NPNs verringert wird (3GPP, 2022b).

3.5 Videodatenreduktion

Der Standard ST 2110 beschreibt die Signalübertragung von unkomprimierten Datenströmen in einem IP-basierten Sendesystem. Diese nehmen aber je nach Auflösung sehr hohe Bandbreiten in Anspruch, was die Anzahl der Videosignale reduziert, die über eine Leitung gesendet werden können. Hinzu kommt nun die begrenzte Bandbreite über den wireless Übertragungskanal 5G. Hier werden zwar hohe Datenraten versprochen, für unkomprimierte Videodatenströme reichen diese allerdings Stand heute noch nicht. Um die zur Verfügung stehende Bandbreite effektiv nutzen zu können, muss eine Datenreduktion des Videosignals erfolgen. Das Ziel der Datenreduktion ist eine verminderte Bandbreite bei gleichbleibender visueller Qualität (U. Schmidt, 2021, S. 197). In den folgenden Absätzen wird kurz auf die Grundmechanismen der Videodatenreduktion eingegangen und anschließend auf die Codecs, welche für die Ausführungen der praktischen Untersuchung relevant werden.

3.5.1 Grundmechanismen der Datenreduktion

Videosignale bieten durch eine hohe zeitliche Korrelation zwischen Einzelbildern und eine hohe örtliche Korrelation innerhalb der Bilder ein hohes Potenzial für effiziente Reduktion. In der Datenreduktion wird zwischen Redundanz-, Irrelevanz- und Relevanzreduktion unterschieden. Bei

der Redundanzreduktion werden Informationen beseitigt, die im Original mehrfach vorliegen. Dabei handelt es sich um eine mathematisch verlustlose Verminderung der Informationsmenge. Das ursprüngliche Signal lässt sich aus dem redundanzreduzierten Signal vollständig rekonstruieren. Eine Redundanzreduktion wird bei allen Datenreduktionsverfahren angewendet (U. Schmidt, 2021, S. 197).

Die Irrelevanzreduktion nutzt die Grenzen des visuellen Fassungsvermögens der menschlichen Wahrnehmung aus, um irrelevante Informationen zu reduzieren. Diese Reduktion erzeugt nicht oder kaum wahrnehmbare Fehler im Videosignal. Das Bildmaterial wird hierbei verändert, wodurch Informationen unwiderruflich verloren gehen. Werden die Datenmengen weiter reduziert, geht der Vorgang in die Relevanzreduktion über. Dabei werden Bildfehler und Detailverlust zwangsläufig sichtbar. Je nach Anwendung kann dieser Vorgang allerdings aus wirtschaftlichen Gründen tolerierbar sein. (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 137).

Eingesetzt werden für die Videodatenreduktion häufig sogenannte Intra- und Interframe-Codex, welche sich auf die erwähnten Korrelationen in Videosignalen beziehen. Intraframe-Codex nutzen die örtliche Korrelation innerhalb der Videobilder aus, also grobe Strukturen und Flächen in den Bildern. Durch dieses Einzelbild-Verfahren mit schnellem Zugriff auf einzelne Frames können minimale Codier- und Decodierverzögerungen erreicht werden. Die Interframe-Verfahren nutzen die zeitliche Korrelation zwischen mehreren Bildern aus, bei z.B. wenig Bewegung im Video. Diese Codex arbeiten sehr effizient, benötigen allerdings einen erhöhten Rechenaufwand, wodurch die Latenz bei der Codierung und Decodierung erhöht wird (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 138).

Die Codex sind die Standards zur Videodatenreduktion. Sie werden von verschiedenen Gremien oder einzelnen Herstellern definiert. Die Anwendungsgebiete von verschiedenen Codex können sehr unterschiedlich sein, abhängig von Parametern wie Effizienz bei der Datenreduktion, Qualität des Videosignals, Komplexität oder Latenz (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 148–149).

3.5.2 JPEG XS

Der JPEG XS-Codex zielt auf Datenreduktion bei minimaler Latenz in Produktionsumgebungen ab. Der Codex ist ausschließlich Intraframe-datenreduziert und visuell verlustlos, was bedeutet, dass er im Bereich der Irrelevanzreduktion arbeitet. Dadurch ist der Datenreduktionsfaktor maximal 1:10. Die Codierverzögerung liegt bei JPEG XS unterhalb eines Einzelbildes. Damit zielt der Codex insbesondere auf Echtzeitsysteme ab, wie netzwerkbasierende Studioinfrastrukturen basierend auf der Nutzung von ST 2110, speziell dem Teilstandard ST 2110-22. So können z.B. mehrere UHD-Videosignale über eine 10G Ethernet-Verbindung gesendet werden. Für die Echtzeitanwendungen kann JPEG XS direkt als RTP-Payload transportiert werden. Unterstützt werden Auflösungen

bis zu 8K mit 120 fps und 4:2:0, 4:2:2 und 4:4:4 Abtastmuster in RGB oder YC_RC_B (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 151–152).

3.5.3 H.265/HEVC

Der Standard H.265 soll die Verarbeitung der stetig wachsenden Datenmengen ermöglichen. Ziel bei der Entwicklung war eine rund doppelt so hohe Effizienz im Vergleich zum Vorgängerformat H.264. Der Codec soll universell verwendbar sein und unterstützt deshalb alle gängigen Bildauflösungen bis hin zu UHD2. Auch bei der Datenübertragung über 5G spielt H.265 eine Rolle und kommt für die Datenreduktion zum Einsatz.

Das Bild wird bei H.265 in Blöcke aufgeteilt, deren Größen variabel gestaltet werden können. Die übliche Makroblockstruktur wird durch sogenannte Coding Units ersetzt. Während bei H.264 eine Blockeinteilung bis zu 16x16 möglich ist, bietet H.265 eine Einteilung von bis zu 64x64 Blöcken, die in der Größe weitaus flexibler sind. Dies trägt zur verbesserten Codiereffizienz bei. Hinzu kommt die Intraframe-Prädiktion, erstmals in H.264 verwendet, welche eine Vorhersage in bis zu 33 Richtungen erlaubt (U. Schmidt, 2021, S. 258–259).

Die Auflösungen und maximalen Datenraten, die ein Decoder unterstützen sollte, sind in mehreren Leveln organisiert. Das Level 4 erlaubt z.B. eine Full-HD Auflösung mit bis zu 32 fps. Die Abstufungen 4.1, 5.1 usw. ermöglichen höhere Bildwiederholraten bis zu 300 fps.

Als Containerformat nutzt H.265 die gängigen MP4 oder MOV-Container, er kann aber auch in Echtzeit in einen MPEG-Transportstrom übertragen werden (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 159–160).

4 Praktische Untersuchung der Technologien

Der Einsatz von 5G-Mobilfunktechnologie, insbesondere mit Media over IP Produktionsumgebungen, bietet viel Potenzial für den flexiblen und skalierbaren Einsatz von Produktionsmitteln und -Personal in Live-TV Produktionen. Im folgenden Kapitel sollen nun die Möglichkeiten, aber auch die Herausforderungen in einem praxisorientierten Versuch ausgearbeitet werden. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung und Bewertung der technischen Aspekte und dem Zusammenspiel der Technologien für Einsatzzwecke im Broadcast. Neben der Planung und Konfiguration des Systems wird die funktions- und messtechnische Untersuchung am Versuchsaufbau vorgenommen. Im Vorhinein werden die zentralen Komponenten ausgewählt und von den Herstellern für den Zeitraum des Versuchs Leihgeräte angefragt. Besonderer Augenmerk liegt auf dem Abgleich der vorher definierten Zielsetzungen mit den realen Möglichkeiten der Technologien, um aussagekräftige Annahmen über mögliche zukünftige Einsätze dieser zu erzielen.

4.1 Zielsetzung

Grundsätzliches Ziel der Arbeit ist es die Relevanz und praktische Anwendungen von 5G-Technologie im Zusammenspiel mit IP-basierten Produktionsumgebungen für die Praxis zu untersuchen. Es sollen Vorteile und Herausforderungen analysiert und aufgezeigt und herausgearbeitet werden, inwiefern sie zur Optimierung von Live-TV-Produktionen beitragen können. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Reduzierung von Synchronisationsproblemen, die durch die Integration von 5G in traditionelle kabelgebundene Infrastrukturen entstehen können. Um den Versuchsaufbau zu strukturieren und konkrete Aussagen treffen zu können, wurde die Untersuchung in sieben Zielsetzungen unterteilt. Diese werden nach der Umsetzbarkeit in der Praxis bewertet. Dabei stellt die Erkenntnis über die Erreichbarkeit der Teilpunkte ein zentrales Forschungsziel dar, um Möglichkeiten und Grenzen der Technologien festzustellen. Ein Verfehlen der Zielsetzungen ist hier ebenso eine Erkenntnis wie das Erreichen dieser. Die Zielsetzungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Zielsetzungen des Versuchsaufbaus

Thema	Technisches Ziel	Forschungsziel
1 - Systemplanung und -integration	Ein Produktionssystem mit 5G Technologie ist für Fachpersonal plan- und integrierbar. Der Aufwand ist vergleichbar mit konventionellen Systemen.	Herausarbeiten der technischen Herausforderungen und mögliche Lösungen bei der Planung, Integration und Inbetriebnahme der Komponenten in Produktionsumgebungen

4 Praktische Untersuchung der Technologien

2 – Interoperabilität und Management	<p>Alle Komponenten unterstützen den Standard ST 2110, sind untereinander kompatibel und lassen sich zu einem Gesamtsystem integrieren.</p> <p>Die Komponenten lassen sich herstellerübergreifend steuern.</p>	<p>Überprüfen der Erfüllung des ST 2110 Standards einzelner Komponenten sowie Ausarbeitung möglicher Schwachstellen bei der Interoperabilität verschiedener Hersteller.</p> <p>Prüfung der Möglichkeiten und des Aufwandes zur Steuerung aller Komponenten mit einem übergeordneten Orchestrator.</p>
3 - Signalführung	<p>Audio-, Video- und Metadatenströme lassen sich im Netzwerk unabhängig voneinander verteilen.</p>	<p>Prüfung der Möglichkeiten durch die Übertragung unkomprimierter Elementardatenströme im Netzwerk</p>
4 - Übertragung	<p>Für die Übertragung der Signale über das IP-basierte System steht ausreichend Datenrate zur Verfügung, sodass kein sichtbarer Verlust der Qualität auftritt. Die Datenrate muss vorhersehbar und konstant sein.</p>	<p>Feststellung und Überprüfung der möglichen Datenraten innerhalb des 5G-Systems und Abgleich mit benötigten Datenraten.</p>
5 - Synchronisation	<p>Die Latenz der Komponenten ist minimal sowie ebenfalls vorhersehbar und konstant. Mögliche Latenzen können zur Synchronisation aller Signale ausgeglichen werden.</p> <p>Die Systemkomponenten lassen sich durch ein zentral generiertes PTP Taktsignal synchronisieren, das parallel zu den Mediensignalen über das Datennetzwerk übertragen wird.</p>	<p>Erarbeiten eines Konzepts zur genauen Latenzmessung und Messung dieser auf den verschiedenen Signalwegen. Überprüfen der Möglichkeiten zur Manipulation der Signale zur Synchronisation.</p> <p>Konfiguration und Überprüfung zur Möglichkeit der PTP-Taktung.</p>
6 - Redundanz	<p>Zur Produktionssicherheit sind Redundanzstrategien sichergestellt.</p>	<p>Prüfung der Komponenten auf Möglichkeiten zur redundanten Signalverteilung.</p>
7 - Anwendung	<p>Die Produktionsmöglichkeiten bieten Vorteile in der Anwendung und vereinfachen Workflows.</p>	<p>Herausarbeiten der Vor- und Nachteile der diskutierten Technologie für Mitarbeiter:innen in der Produktion.</p>

Nach Durchführung des Versuchsaufbaus werden die Zielsetzungen anhand der Ergebnisse diskutiert und bewertet.

4.2 Systemübersicht

In diesem Abschnitt werden die zuvor erläuterten Grundlagen und die beschriebenen Zielsetzungen genutzt, um den Versuchsaufbau mit Ausblick auf ein reales Sendesystem zu konzipieren. Die

Ausführungen basieren dabei überwiegend auf Erfahrungen aus der praktischen Umsetzung und den Gesprächen mit Experten und Herstellern. Der Fokus liegt auf der Gesamtarchitektur des Systems und nicht auf der Auswahl einzelner Komponenten.

4.2.1 Konzeption der Systemstruktur

Das in Kapitel 2 beschriebene Produktionsszenario basiert auf einer Videoproduktion mit mehreren Kameras in einer professionellen Umgebung. Dieses gilt es in den folgenden Ausführungen mit den ST 2110 Media-over-IP und 5G Technologien zu konzipieren. In dem Anwendungsfall werden Szenarien mit mehreren Standorten untersucht, bei denen Produktionseinrichtungen vor Ort, aber auch dezentrale Produktionsmodelle zur Remote-Produktion von Live-Zuspielern gegeben sind. Eine Hybrid-Produktion aus kabelgebundenen und drahtlos angebundenen Kameras soll ermöglicht werden. Dabei können bestehende Technologien, wie Funkkameras mit der 5G-Technologie repliziert werden. Der eigentliche Versuchsaufbau für diese Ausarbeitung soll eine mögliche Anwendung dieses Szenarios lediglich simulieren und dient zur Auswertung von Messgrößen und dem Überprüfen der technischen Ziele in kleinem Rahmen.

Die Signalverteilung sowie -verarbeitung erfolgt an einem Standort A basierend auf einer ST 2110 Produktionsumgebung. Hier wird der Ansatz einer hybriden IP-Infrastruktur verfolgt. Im Kern wird das System als All-IP Lösung konzipiert, falls nötig wird jedoch auch die Integration konventioneller Technik vorgesehen. Die gesamte Manipulation und Distribution der Signale erfolgt durch das Netzwerk, welches die Funktionen einer Kreuzschiene ersetzt. Soweit es möglich ist, werden die Signalquellen und -senken direkt an das Netzwerk angebunden, bestehende Geräte, wie SDI-Kameras, können jedoch über Gateways eingebunden werden. Da alle Signale im Netzwerk vorliegen, beinhaltet auch die hybride Infrastruktur die Vorteile einer IP-Produktionsumgebung. Die Architektur des Netzwerks spielt bei der Konzeption von IP-Systemen eine zentrale Rolle. In einem realen Sendesystem würde sich hier die in Kapitel 3.2.4 beschriebene Spine-Leaf-Topologie als Abwandlung der Sterntopologie eignen. Aufgrund der Verfügbarkeiten der Geräte ist im tatsächlichen Versuchsaufbau die Redundanz keine Priorität und der Spine-Switch fungiert gleichzeitig als Leaf-Switch, indem er die Endgeräte direkt verbindet. Aufgeteilt wird das Netzwerk in ein Mediennetz und ein separates Netzwerk für die Kontrollschnittstellen der Geräte. Über das Mediennetzwerk werden damit ausschließlich die ST 2110 Mediendatenströme gesendet, während alle Steuerungsdaten über das Kontrollnetzwerk laufen.

Bei der Konzeptionierung des 5G-Netzes gilt es die Anforderungen der Anwendungen zu definieren, allerdings immer unter Beachtung der Anwendbarkeit in der Praxis. Mit der Übertragung von Live-Mediendaten werden sowohl hohe Anforderungen an die Höhe der Bandbreite gestellt als auch insbesondere an die Vorhersehbarkeit dieser. Aufgrund der Gegebenheiten von Live-Übertragungen sollte auch die Latenz vorhersehbar, konstant und möglichst geringgehalten werden.

Wegen der variierenden Auslastung des öffentlichen 5G-Netzes können diese Punkte voraussichtlich bei einer Übertragung darüber nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund sind die Kerntechnologien für das 5G-Netzwerk die Nutzung von einem Non-Public-Network und Netzwerk Slicing. Hier käme sowohl ein Network Slice im öffentlichen Netz in Frage, als auch ein Campusnetz im Eigenbetrieb. Aufgrund der offenen Möglichkeiten für diese Ausarbeitung wird ein eigenes Campusnetz zur Übertragung während des Versuchs verwendet. So steht die alleinige Bandbreite für die Übertragung der Mediendaten zur Verfügung. Mit Blick auf reale Anwendungen sollen die Ergebnisse aus diesem Versuch auch mit einem Test im öffentlichen Netz verglichen werden. So können die wesentlichen Vor- und Nachteile der verschiedenen Netzwerkkonfigurationen herausgearbeitet werden.

Anforderung an das System ist außerdem, dass alle Komponenten durch einen zentralen Orchestrator gesteuert werden können. Mit diesem sollen sich Geräte in das Mediennetz integrieren und anschließend orchestrieren lassen. Der Controller übernimmt außerdem das Routing der Signale innerhalb des Netzwerkes, was auch eine separate Signalführung verschiedener Datenströme beinhaltet. Daraus ergibt sich für die Einzelkomponenten, dass sie zwingend ein Steuerungsprotokoll unterstützen müssen. In diesem Fall wird von einer Registrierung und Steuerung über NMOS ausgegangen.

4.2.2 Übertragungskapazitäten

Um eine Überlastung des Netzwerkes und mögliche Fehler in der Übertragung der Mediendatenströme zu vermeiden, ist eine Berechnung der benötigten Übertragungskapazitäten unerlässlich. Hier müssen sowohl Videosignale als auch Audiosignale berücksichtigt werden, wobei Audiosignale in einer sehr geringen Größenordnung vorliegen. Beim Standard ST 2110 handelt es sich um unkomprimierte Übertragung und die Datenrate ist unabhängig vom Bildinhalt konstant. Während bei einer klassischen Infrastruktur Leitungen bestehen, die für bestimmte Videostandards ausgerichtet sind, gibt es in der Netzwerktechnik Standards für Leitungen nach der Übertragungsfähigkeit. Um zu ermitteln welche Signale sicher pro Port und Leitung übertragen werden können, müssen die Datenraten entsprechend ermittelt werden.

Eine Abschätzung der Datenrate eines ST 2110 codierten Videodatenstroms kann aus der Multiplikation der aktiven Pixel mit der Bittiefe, der Anzahl der Farbkanäle und der Bildwiederholrate erfolgen. Beispielhaft ist die Rechnung für ein Videosignal im Standard 1080p50 mit einer Farbtiefe von 10 Bit und einer Farbunterabtastung von 4:2:2 aufgeführt:

$$R_{1080p50} = 1920 \text{ px} * 1080 \text{ px} * 10 \text{ Bit} * 50 \text{ fps} * 2 = 2073,6 \text{ Mbit/s}$$

4 Praktische Untersuchung der Technologien

Mit dieser Rechnung werden ausschließlich die Nutzdaten berechnet. In der eigentlichen Übertragung werden diese noch durch Headerinformationen von RTP, UDP und IP ergänzt. Da die Headerinformationen von den Nutzdaten pro Paket abhängen, variieren diese je nach Videostandard. Der Tabelle 5 können die Datenraten für 2110-20 codierte Daten nach SMPTE entnommen werden (SMPTE, o. J.). Demnach lässt sich für eine grobe Abschätzung der Anteil der Header an der gesamten Datenmenge mit ca. 5% annehmen.

Tabelle 5: Datenraten ST 2110 codierte Videosignale

Videostandard	2110-20 [Mbit/s]
2160p50, 10 Bit, 4:2:2	8754,9
1080p50, 10 Bit, 4:2:2	2143,9
1080i25, 10 Bit, 4:2:2	1071,9
720p50, 10 Bit, 4:2:2	953,0

Für den Versuch wird von den Videostandards der technischen Richtlinie von ARD, ZDF und ORF ausgegangen. Diese sind 1080i25 und 720p50, beide jeweils mit einer Farbunterabtastung von 4:2:2 (*Technische Produktionsrichtlinie zur Herstellung von Fernsehproduktionen für ARD, ZDF und ORF*, 2016, S. 12). Mit Blick auf zukünftige Anwendungen werden die Versuche zudem mit dem Standard 1080p50 durchgeführt. Die höhere Bildwiederholrate soll ebenfalls für die Untersuchungen zur Bestimmung der Latenz genutzt werden, um hier möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen.

Für die Audiodatenströme lassen sich ebenfalls Näherungen berechnen. Das folgende Beispiel zeigt die Berechnung des Audiosignals mit acht Kanälen mit einer Wortbreite von 24 Bit und einer Abtastrate von 48 kHz.

$$R_{Audio} = 8 * 24 \text{ Bit} * 48 \text{ kHz} \approx 9,2 \text{ MBit/s}$$

Im Vergleich mit den Videodatenströmen lassen sich diese Datenraten fast vernachlässigen, sollten für ein reales System aber ebenfalls im Blick behalten werden. Insbesondere wenn Audiodaten über ein separates Netzwerk geroutet und an Endgeräte verteilt werden sollen, spielen diese Überlegungen für die Auswahl der Komponenten auch bei kleineren Kapazitäten eine Rolle.

Durch die Betrachtung der Datenraten ergibt sich, dass eine 1GbE Schnittstelle zwar für die Übertragung von unkomprimierten Videodatenströmen unbrauchbar ist, aber bis zu hundert Audiokanäle übertragen könnte. Mit einer 10GbE Schnittstelle können neun 1080i25 oder vier 1080p50

Videokanäle übertragen werden. Über eine 100GbE Schnittstelle könnten dagegen schon 93 Videosignale im Standard 1080i25 übertragen werden. Grundsätzlich ist auf jeder Schnittstelle aber jegliche Kombination aus Video- und Audiokanälen möglich. Für die Anwendung im Versuch sind 10GbE Schnittstellen ausreichend. Für die Planung von realen Systemen ist zu beachten, dass es bei maximaler Auslastung der Schnittstellen zu Kapazitätsengpässen kommt. Dies hätte ein Überlaufen des Puffers am Netzwerkknoten zur Folge, wodurch es zu Paketverlusten kommt. Es sollte deshalb stets eine Überkapazität an den Schnittstellen eines Gerätes vorliegen.

Da das Szenario auch die Übertragung über 5G beinhaltet, müssen auch die Übertragungsraten von datenreduzierten Video- und Audiosignalen berücksichtigt werden, da hier nur eine sehr begrenzte Kapazität zur Verfügung steht. Die Videodatenreduktion basiert auch auf Prädiktion von Bildinhalten, weshalb hier keine genaue Vorhersage zu konstanten Datenraten getroffen werden kann, sondern auf Annäherungen basieren. Für Streaming und drahtlose Übertragung wird von einer H.264 oder H.265 Codierung ausgegangen, da diese in Echtzeit in einen MPEG-Transportstrom eingebettet und über RTP übertragen werden können (J. Schmidt & Schmidt, 2023, S. 158). Zudem nutzen eine Vielzahl von 5G En- und Decodern diese Codecs, wobei H.265 oft eine höherwertige Quantisierung sowie Farbunterabtastung bietet, weshalb die folgenden Überlegungen sich darauf beziehen werden. Um bis zu vier Videosignale über eine 1GbE Verbindung zu übertragen, muss eine Datenrate für das komprimierte Videosignal von 250 Mbit/s festgelegt werden. Der Kompressionsfaktor lässt sich aus der originalen Datenrate und der Zieldatenrate berechnen. Hier soll für den Versuch von dem Videostandard mit dem höchsten Bedarf an Datenraten ausgegangen werden, also 1080p50.

$$\frac{\text{Originale Datenrate}}{\text{Komprimierte Datenrate}} = \frac{2143,9 \text{ Mbit/s}}{250 \text{ Mbit/s}} = 8,6$$

Der Kompressionsfaktor sollte also etwa bei 8,6:1 liegen. Bis zu einem Kompressionsfaktor von 50:1 findet Irrelevanzreduktion ohne visuelle Verluste statt. Eine visuell verlustfreie Übertragung wäre hier also möglich, die Zieldatenrate könnte sogar noch deutlich niedriger gehalten werden. Ob dies in der Realität mit einer H.265 Codierung und Übertragung über 5G tatsächlich erreicht wird, zeigt sich im weiteren Verlauf der Arbeit.

4.2.3 Wahl der Systemkomponenten

Die zuvor beschriebenen Zielsetzungen waren eine der Grundlagen für die Auswahl der Systemkomponenten des praktischen Versuchsaufbaus. Für die Auswahl der Komponenten müssen allerdings einige Vorbetrachtungen einbezogen werden, die insbesondere die Kommunikation der Geräte untereinander und die Kompatibilität innerhalb des Systems sicherstellen sollen. Bei der finalen Auswahl der Geräte spielte letztendlich auch die Verfügbarkeit dieser bei den Herstellern eine Rolle.

Für eine Integration in eine MoIP-Produktionsumgebung ist es zunächst wichtig, dass alle Komponenten kompatibel mit dem Standard ST 2110 sind und entsprechende Datenströme durch das Netzwerk geschickt werden können. Da die Auswahl der Komponenten für eine All-IP sehr eingeschränkt ist, müssen Lösungen zur Einbindung von konventionellen Schnittstellen bereitgestellt werden, sodass die ST 2110 Kompatibilität gegeben wird. Mit der Nutzung von ST 2110 geht zusätzlich einher, dass die Taktung des Systems über PTP erfolgt. Entsprechend müssen die Geräte dieses Protokoll unterstützen.

Zur Kompatibilität zwischen den verschiedenen Herstellern und insbesondere für die Einbindung einer zentralen Steuereinheit ist die Unterstützung eines Steuerungsprotokolls wichtig. Das Netzwerk und die einzelnen Systemkomponenten sollten deshalb mindestens die Registration über NMOS IS-04 und IS-05 zum Verbindungsmanagement unterstützen. Besonders der Orchestrator muss dazu in der Lage sein, mit allen Netzwerkgeräten an den Medienknoten zu kommunizieren.

Netzwerkseitig steht für die Konfiguration ein eigenes Steuernetz zur Verfügung. Wenn möglich sollten sich die Schnittstellen für das Steuernetz in einem separaten Subnetz zum Mediennetz befinden, über das die eigentlichen Mediendaten gesendet werden. Jede Schnittstelle muss eine eigene Host-IP und MAC-Adresse besitzen. Dazu müssen alle Hosts sowohl im Steuer- als auch im Mediennetz das Internet Protocol Version 4 (IPv4) unterstützen. Für das Mediennetz ergeben sich zudem spezifische Anforderungen an den zentralen Netzwerkknoten. Der Knoten muss IPv4 Multicast Streams mit UDP-Paketgrößen wie in ST 2110 spezifiziert verarbeiten können. Zudem sollte dieser als Multicast-Router konfigurierbar sein, also IGMP unterstützen. Eine volle Unterstützung von PTP muss gegeben sein, mit der entsprechenden Möglichkeit den Netzwerkknoten als Boundary Clock zu konfigurieren. Der Netzwerkknoten sollte präferiert auf Layer 3 des OSI-Modells operieren. Nach den Überlegungen aus Kapitel 4.2.2 müssen an den Netzwerkknoten Schnittstellen mit mind. 10 GbE zur Verfügung stehen.

Für die 5G-Komponenten wird für eine Anbindung des Transmitters SDI vorausgesetzt. Zudem sollte eine redundante Anbindung an Kameras zur Sendesicherheit vorhanden sein. Die verfügbare Übertragungskapazität hängt in diesem Fall maßgeblich von dem Aufbau des 5G-Netzes ab, es sollte aber ausreichend Kapazität zur fehlerfreien und latenzarmen Übertragung von komprimierten Videodatenströmen zur Verfügung stehen. Gleiche Voraussetzungen gelten für den Decoder und das Gateway. Dieser sollte zudem ebenfalls zum ST 2110 Standard kompatibel sein und entsprechende Schnittstellen zur Übertragung der ST 2110 Videodatenströme bereitstellen. Idealerweise sollte auch dieses Endgerät PTP-fähig sein und über NMOS IS-04 und IS-05 in das Orchestrationssystem eingebunden werden können.

4 Praktische Untersuchung der Technologien

Aus diesen Vorüberlegungen hat sich die Übersicht der Systemkomponenten aus Tabelle 6 ergeben. In den darauffolgenden Abschnitten werden einige der Komponenten und deren Funktionen detaillierter erläutert.

Tabelle 6: Systemkomponenten des Versuchsaufbaus

Hersteller	Typ	Kategorie
ST 2110 Komponenten		
Nevion	eMerge Switch 24x SFP + 4x QSFP	Switch Mediennetzwerk
Cisco	Nexus N9K-C93180YC-EX	Switch Mediennetzwerk für statisches Routing
Netgear	GS324T	Switch Kontrollnetzwerk
Nevion	Virtuoso MI	Media Node
Nevion	VideolPath	Orchestrator
Telestream	SPG9000	PTP Taktgenerator
Telestream	PRISM MPS-300	Videomessgerät mit ST 2110 Lizenz
5G Komponenten		
Haivision	Stream Hub	5G Decoder und Gateway
Haivision	Pro460	5G Encoder und Transmitter
AVM	FRITZ!Box 6850 5G	5G Router
Konventionelle Komponenten		
Blackmagic	Hyperdeck Studio 4K Pro	Broadcast-Deck als Medienplayer
Blackmagic	Hyperdeck Shuttle HD	Broadcast-Deck als Medienplayer
Blackmagic	ATEM SDI Extreme ISO	Bildmischer
Blackmagic	URSA Broadcast G2	Kamera
Blackmagic	HDMI to SDI Miniconverter 4K	HDMI/SDI-Wandler
Blackmagic	Smartview 4K	Monitor Multiview
Atomos	Shogun 4K	Mobiler Monitor
Tektronix	Digital-Phosphor-Oszilloskop TDS3000	Digitales Oszilloskop, 2 Ch.
Software		
Wireshark	Wireshark	Netzwerkanalyse Tool

4 Praktische Untersuchung der Technologien

Solar Winds	WAN Killer	Generierung von Netzwerktraffic
Bitfocus	Companion	Ansteuerung der Hyperdecks

Netzwerkknoten

Die Wahl der Netzwerkknoten ist für die Funktion des Mediennetzwerkes essentiell, da sie das Rückgrat des Netzwerkes bilden. Diese Funktion übernimmt der Nevia eMerge Switch im Versuchsaufbau. Dieser bietet 32 QSFP28 Ports mit 1/10/25/40/100G Interface Support und unterstützt eine Datenrate von bis zu 6,4 Tbit/s. Der Switch bietet außerdem eine volle PTP Implementierung und kann als Boundary oder Transparent Clock konfiguriert werden. IGMP wird ebenfalls unterstützt, wodurch Multicast-Routing ermöglicht wird. Durch die Nutzung von Openflow – einem Kommunikationsprotokoll, das Zugriff auf die Hardwarekomponenten eines Switches liefert – ist der eMerge außerdem SDN programmierbar. In diesem System wird der Switch als Spine-Switch eingesetzt. Die Netzwerkarchitektur wird in diesem konkreten Versuchsaufbau nicht stringent nach Spine- und Leaf-Switchen unterschieden und die Komponenten werden direkt an den Spine angebunden.

Da sich im Laufe des Versuches herausgestellt hat, dass eine Nutzung von VideoIPath als Orchestrator mit den 5G-Komponenten nicht möglich war, mussten die eintreffenden Signale von diesen statisch im System geroutet werden. Eine Nutzung von Openflow war damit nicht mehr notwendig, weshalb für die Verteilung dieser Signale im Netzwerk ein Cisco Nexus Switch als Alternative verwendet wird. Hierbei handelt es sich um einen L3 Switch mit 48 SFP+ Ports und sechs QSFP28 Ports mit 40/100G Interface Support. Auch der Cisco Switch bietet volle PTP Implementierung und unterstützt IGMP für das Multicast-Routing.

Media Node

Das als Media Node bezeichnete Gerät Virtuoso, ebenfalls der Firma Nevia, dient im System als Signalgateway und –prozessor. Dieser bildet die Schnittstelle zwischen konventionellen Signalformaten und der ST 2110 Umgebung und übernimmt gleichzeitig die Aufgaben eines Embedders und Deembedders. Gleichzeitig unterstützt der Virtuoso PTP und kann Videoquellen an den Systemtakt angleichen. Die Verbindung zum Netzwerk erfolgt ausschließlich über 100 GbE Schnittstellen, die als QSFP-28 Einschübe ausgeführt sind. Die SDI-Schnittstellen sind über SDI-Breakout SFP realisiert. Das Gateway kann im Aufbau bidirektional genutzt werden. Der Virtuoso unterstützt NMOS und kann damit zur Steuerung in das Gesamtsystem eingebunden werden.

Orchestrator

Die Steuerung und Orchestrierung der Signale sollte ursprünglich über Nevions Orchestrator VideoIPath dienen, welcher eine Vielzahl von Protokollen bietet, um diverse Geräte zu steuern. Darunter NMOS, Ember+ und andere herstellereigene Protokolle sowie Openflow zur Steuerung des Switches. VideoIPath übernimmt im beschriebenen System in erster Linie die Aufgabe des Routings der Signale, würde aber eine Vielzahl weiterer Funktionalitäten, wie z.B. das Monitoring der integrierten Geräte unterstützen. Die Einbindung aller Geräte über NMOS und die Routing Funktionalitäten wurden umfangreich getestet. Da sich allerdings im Laufe des Versuchs herausgestellt hat, dass NMOS auf dem 5G Gateway noch nicht voll funktionsfähig ist, wurden alle Routings statisch erstellt.

Taktgenerator

Zur Taktsynchronisation aller Netzwerkteilnehmer wird ein Taktgenerator von Telestream, der SPG9000 verwendet. Dieser erhält das Referenzsignal über eine GPS-Antenne. Alle IP-basierten Komponenten werden über PTPv2.1 synchronisiert.

5G-Komponenten

Für die Übertragung der 5G-Signale wurden Komponenten der Firma Haivision gewählt. Der Pro460 Video Transmitter unterstützt die Übertragung von Videostreams mit einer Auflösung bis zu 2160p60 Videostreams. Dafür ist ein Ultra-Low-Latency H.265 Hardware Encoder implementiert. Der Transmitter überträgt die Videodaten über SST für eine möglichst geringe Latenz mit bis zu 80 Mbit/s als konstante oder variable Bitrate. Ob dies für eine Live-Broadcast Produktion ausreichend ist, gilt es mit dem Versuchsaufbau herauszufinden. Mit bis zu vier SDI-Eingängen können die Videosignale redundant übertragen werden. Es stehen außerdem sechs SIM-Karten Slots zur Verfügung, um auch hier eine Redundanz zu schaffen. Die Übertragung über 5G kann über SA sowie NSA Architekturen und über die öffentlichen Frequenzbänder oder Campusnetze erfolgen.

Der Haivision Stream Hub dient als Decoder der empfangenen 5G-Streams und als Gateway zum IP-Netzwerk. Entsprechend werden als Input SST und SRT Streams unterstützt. Es steht zudem eine IP Data Bridge zur Verfügung, um Control Signale oder Video Returns an z.B. die 5G-Transmitter zu senden und Remote Produktion zu ermöglichen. Der Stream Hub kann als ST 2110 Variante zur Verfügung gestellt werden und somit ST 2110 konforme Streams senden. Damit geht auch eine NMOS IS-04 und IS-05 Funktionalität einher.

Da der Stream Hub vom Transmitter über eine öffentliche IP-Adresse erreichbar sein muss, dient der 5G-Router als Schnittstelle. Dieser wird ebenfalls mit einer 5G-Simkarte ausgestattet und leitet jeglichen Traffic, welcher vom Pro460 Transmitter eingeht, direkt an den Stream Hub weiter. Hier ist es insbesondere relevant, dass der Router das richtige Frequenzband in Standalone 5G-Netzen für das Campusnetz unterstützt.

Messung und Analyse

Als Messwerkzeug für das Netzwerk wurde ein PRISM MPS-300 mit ST 2110 Lizenz der Firma Teletream ausgewählt. Er erlaubt die messtechnische Untersuchung von konventionellen Kenngrößen und die Analyse IP-basierter Systeme. Auch der PRISM kann über NMOS direkt in das IP-System eingebunden werden wodurch zu analysierende Signale direkt darauf geroutet werden können. Dazu besitzt dieser zwei redundante 10 GbE SFP-Einschübe. Zu den Funktionen gehört unter anderem die Untersuchung des PTP-Taktes, das Auslesen der Informationen aus den Pake-thern und die Auswertung der Datenraten.

Für die Analyse des 5G-Übertragungsweges bietet der Stream Hub direkt passende Analysewerkzeuge an, die ebenfalls Informationen über z.B. die Datenraten geben.

Zur Messung der Latenz wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der die Latenz nicht nur frame-genau, sondern millisekunden-genau bestimmen soll. Dieser wird in Abschnitt 4.4.5 noch einmal näher beschrieben. Zentraler Bestandteil ist hier ein digitales Oszilloskop mit zwei Channeln der Firma Tektronix, welche die elektrische Spannung von zwei Photodioden messtechnisch erfassen können.

4.2.4 Versuchsaufbau

Nachdem die Systemkomponenten festgelegt wurden, sollen diese in konkrete Versuchsaufbauten umgesetzt werden, sodass die Forschungsziele aus Absatz 4.1 überprüft werden können. Anhang B eigt eine schematische Übersicht des gesamten Versuchsaufbaus. Hier ist zu sehen, dass für die Konfiguration der Geräte alle zentralen Komponenten am Kontrollnetzwerk angebunden sind. Geräte mit konventionellen Schnittstellen werden über den Virtuoso als Gateway angeschlossen. Dieser sendet die Mediendatenströme über die 100 GbE Schnittstellen und über das Mediennetzwerk, also jeweils den eMerge und Cisco Switch.

Für den 5G Transmitter Pro460 werden für die verschiedenen Versuche SIM-Karten bereitgestellt. Zum Versuch über das öffentliche 5G-Netz wird eine konventionelle Vodafone SIM-Karte verwendet. Für das Campusnetz werden vom Betreiber eigene SIM-Karten bereitgestellt, die das ausschließliche Senden im n78 Frequenzband, also im Campusnetz, ermöglichen.

Für alle wesentlichen Netzwerkmessungen wird der PRISM genutzt. Dieser ist über ein Single Mode Glasfaser SFP direkt an das Mediennetzwerk angeschlossen und wird in VideoIPath integriert. So können Signale direkt darauf geroutet werden. Mit dem PRISM lassen sich die Themen 2, 4, 5 und in Teilen 6 aus Tabelle 4 überprüfen. Mit der ST 2110 Lizenz lassen sich diese Datenströme direkt auf dem Messgerät identifizieren. Werden diese als solche erkannt, ist eine Konformität mit dem Standard gegeben. Da das Analysetool alle Datenströme identifiziert, kann auch das Routing einzelner Elementardatenströme innerhalb des Netzwerkes überprüft werden. Zudem

lassen sich pcap-Dateien aufzeichnen. Diese können in der Software Wireshark analysiert und der Aufbau der übertragenden Pakete näher betrachtet werden. Mithilfe der pcap-Files kann auch der tatsächliche Datendurchsatz im Sendesystem bestimmt werden. Der PRISM gibt zusätzlich auch die durchschnittlichen Datenraten während der Messung an und stellt diese graphisch dar. Mit der Möglichkeit zur Untersuchung der PTP-Taktung lassen sich auch hier die generelle Präsenz eventuelle Schwankungen des Taktes im Netzwerk überprüfen. Der RTP-Zeitstempel der übertragenen Pakete kann ebenfalls ausgelesen und zu vorigen Paketen verglichen werden. Diese Informationen, sowie der durchschnittliche RTP-Offset während der Messung, lassen sich zusätzlich in Wireshark verifizieren. Monitoring-Funktionen zur Übertragung über 5G lassen sich direkt im Hivision Stream Hub abrufen. Insbesondere für die drahtlose Übertragung, und damit einhergehend die Codierung und Decodierung der Signale, werden verschiedene Testvideos über das System abgespielt. Abgespielt werden die Testvideos über die Hyperdecks. Ein Hyperdeck ist am Standort A aufgebaut und kann die Signale über SDI in das System geben. Ein Zweites spielt die gleichen Signale ab und überträgt diese an den 5G Transmitter. Die Player können zeitgleich mit der Software „Companion“ von Bitfocus angesteuert werden, sodass die Testvideos zeitgleich gestartet werden. Zur Vorbereitung wurde auch hier eine Latenzmessung gemacht, um die Latenz zwischen den „Play“ Befehlen durch Companion festzustellen. Ein entsprechender Offset wurde dann für den Befehl des zweiten Hyperdecks Shuttle eingestellt.

Für die Latenzmessung, also die Überprüfung von Forschungsziel 6, werden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wird die Latenz über den Vergleich eines Frame Counters über verschiedene Signalwege festgestellt. Um genauere Messwerte zu erreichen wird sie anschließend noch einmal messtechnisch mit dem Oszilloskop erfasst. Dafür wurde ein Video generiert, welches periodisch schwarze und weiße Frames zeigt. Dieses wird auf einem Monitor für die verschiedenen Signalwege dargestellt. An dem Monitor wird jeweils eine Photodiode für jeden Signalweg befestigt. Diese wandelt Lichtimpulse in eine elektrische Spannung, welche sich am Oszilloskop messen lässt. Sobald das Video einen weißen Frame zeigt, wird eine höhere Spannung durch die Diode erzeugt. Am Oszilloskop lassen sich diese Impulse für beide Channel erfassen und gegeneinander vergleichen. So kann die Zeitdifferenz zwischen den beiden Impulsen gemessen werden. Auch hier werden die Testvideos direkt über die Hyperdecks abgespielt und ins System gegeben. Dabei gibt es einen direkten kabelgebundenen Weg über SDI an den Bildmischer. Das zweite Signal wird durch das ST 2110 System über den Virtuoso gesendet und von dort an den Bildmischer gegeben. Zuletzt ist der Stream Hub über das ST 2110 System an den Mischer angeschlossen. Diese Signale werden auf einem Multiview wiedergegeben und aufgezeichnet, sodass der Frame Counter im Nachgang analysiert werden kann. Für die Messung mit der Photodiode werden immer zwei Sig-

nalwege miteinander verglichen und zusätzlich über einen Multiview dargestellt. Mit der Latenzmessung lässt sich nun auch feststellen, inwieweit Verzögerungen des Signals für eine synchrone Bearbeitung nötig sind und wie sie sich einstellen lässt.

Um auch auf Thema 8, aus Tabelle 4 einzugehen, also die eigentliche Anwendung von Produktionen, soll auch ein Szenario aufgebaut werden, in welchem eine Kamera an einem externen Standort als Zuspüler genutzt werden soll. Die Kamera wird dafür direkt mit dem 5G Transmitter angebunden. Der Versuchsaufbau für die Regie bleibt ansonsten gleich. Über das Hyperdeck wird ebenfalls ein Videosignal über das ST 2110 Produktionsnetzwerk an den Bildmischer gegeben. So soll in der Praxis getestet werden, ob diese Art von Produktion Anwendung finden kann und ob hybride Produktionsmethoden sich tatsächlich mit 5G umsetzen lassen. Der Testaufbau lässt sich ansonsten eher als Idealumgebung mit durchdachtem Aufbau bezeichnen und der Aufbau in sich sollte für Produktionmitarbeiter:innen nachgestellt werden.

4.2.5 5G-Netz

Zentraler Bestandteil des gesamten Versuchs ist das 5G-Netzwerk. Als Versuchsumgebung dient ein privates 5G-Campusnetz basierend auf 5G-Komponenten von Nokia. Gestellt und konfiguriert wurde dieses von der Firma Media Broadcast im Auftrag der Wirtschafts- und Innovationsförderung im Landkreis Harburg und umfasst eine Abdeckung von ca. 25 Hektar. Das Campusnetz ist aus zehn Funkzellen mit 129 Outdoor-Units zusammengesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Standalone 5G-Netz im Frequenzband n78 mit einer zentralen Frequenz von 3550 MHz und einer Bandbreite von 500 MHz, welche vollkommen unabhängig von öffentlichen Mobilfunknetzen zur Verfügung steht. Die SIM-Karten unterstützen entsprechend nur dieses Frequenzband. Mit dem privaten Netzwerk werden Spitzendatenraten von bis zu 10 Gbit/s ermöglicht. Den SIM-Karten werden feste IP-Adressen vergeben, die innerhalb des Funknetzes untereinander angesprochen werden können. Zudem gibt es einen festen Access Point für die SIM-Karten, welcher vorkonfiguriert wird. Alle Details zum 5G-Netz sind noch einmal in der Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Details 5G-Campusnetz

Betriebsart	5G Standalone
Frequenzband	N78
Zentrale Frequenz	3550 MHz
Bandbreite	500 MHz
Spitzendatenrate	10 Gbit/s

Das gesamte 5G-System basiert auf ein einem Digital Automation Cloud System von Nokia, bestehend aus einem MX Industrial Edge, welcher das Core Network steuert und einer Vielzahl von Antennen. Alle Komponenten sind durch ein weit umfassendes Glasfasernetz miteinander verbunden.

4.3 Konfiguration des Systems

Die Konfiguration der einzelnen Komponenten spielt beim Aufbau der IP-basierten Infrastruktur eine entscheidende Rolle. Der Signalfluss wird maßgeblich durch diese Konfigurationen bestimmt und die Funktionalität des Systems überhaupt erst ermöglicht. Da über zentrale Switches der gesamte Datenverkehr geleitet wird, ist der korrekten Inbetriebnahme dieser besonders viel Aufmerksamkeit zu widmen, ebenso wie der Taktverteilung durch PTP.

4.3.1 IP-Adressvergabe

Das Internetprotokoll (IP) bildet die Grundlage für die Adressierung von Datenpaketen in einem Netzwerk und damit dem eigentlichen Aufbau von Netzwerken und Subnetzen. Zur Identifikation und Adressierung von Paketen besitzt jedes Gerät im Netzwerk auf einer oder mehreren physikalischen Schnittstellen eine eindeutige IP-Adresse. Neben den IP-Adressen der Endgeräte werden im Mediennetzwerk Multicast-Gruppen genutzt, um Signalströme zu definieren. Die IP-Adresse der Netzwerkschnittstelle einer Quelle ist gleichzeitig die Quelladresse einer Multicast-Gruppe. Im folgenden Aufbau werden die Adressen statisch vergeben. Da nur eine geringe Anzahl an Netzteilnehmern vorliegt, wird der private Adressraum der Klasse C Netze (192.168.0.0 – 192.168.255.255) verwendet. Das ST 2110 Produktionsnetzwerk bildet dabei ein in sich geschlossenes Netzwerk, in dem alle Geräte IP-Adressen aus dem Adressraum 192.168.38.0 - 192.168.38.255 erhalten. Die einzige Schnittstelle nach draußen bieten die 5G-Komponenten. Im Campusnetzwerk erhält der Transmitter deshalb eine eigene SIM-Karte mit einer festen IP-Adresse. Eine Adresse aus demselben Adressraum bekommt außerdem der Router zugewiesen, welcher den Datenverkehr an das Gateway weiterleitet. Dieses ist mit mehreren Schnittstellen an die verschiedenen Netzwerke angebunden. Exemplarisch ist dies in der Tabelle 8 zu sehen.

Tabelle 8: IP-Adressvergabe anhand des Beispiels des 5G Gateways

Anwendung	Schnittstelle	IP Adresse	Subnetz	Gateway
Kontrollnetzwerk	LAN 1	192.168.38.165	255.255.255.0	192.168.38.254
Mediennetzwerk	SFP 2	192.168.39.165	255.255.255.0	192.168.39.254
5G-Netzwerk	LAN 2	192.168.120.165	255.255.255.0	192.168.120.1

Die Konfiguration der Adressen erfolgt über die Weboberfläche der Hersteller. Alle verwendeten Adressen können dem Anhang C entnommen werden. Hier ist zu beachten, dass die IP-Adresse des Virtuosos für das Mediennetz abweicht. Da diese IP-Adresse zu Demo-Zwecken vom Hersteller konfiguriert wurde, wurde diese nicht abgeändert. Das Routing erfolgt schlussendlich über Multicast, weshalb diese Adresse die Nutzung des Gesamtsystems nicht beeinträchtigt.

Als Multicast-Adressbereich wird der Bereich 239.0.0.0 – 239.255.255.255 gewählt. Jedem Quelldatenstrom wird eine Adresse aus diesem Bereich zugeordnet. Da in diesem Versuch ein Orchestrator verwendet wird, werden die Multicast-Adressen von diesem automatisch beim Routing eines Mediendatenstroms vergeben. Aufgrund von Problemen in der Software konnte der Haivision Stream Hub leider nicht über NMOS in den Orchestrator VideoIPath einbinden. Hier wurden die Multicast-Adressen beim statischen Routing der Mediendatenströme manuell in der Nutzeroberfläche der Geräte vergeben.

4.3.2 Taktverteilung über PTP

Die Generierung und Verteilung des Taktsignals erfolgt durch den Taktgenerator Telestream SPG9000. Die Verteilung der Zeitinformationen erfolgt im Netzwerk über Multicast auf Basis des PTP-Profiles ST 2059-2. Dieses enthält Vorgaben und Definitionen zu den zentralen PTP-Parametern und die Vorgaben aus dem Profil werden zum größten Teil übernommen.

Als PTP-Domain wird in diesem Versuch die 127 gewählt. Mit dieser Domain befindet sich jedes Gerät im System in der gleichen Zeitebene. Damit nur der Taktgenerator als Grandmaster-Clock fungiert, müssen die richtigen Prioritäten an den Endgeräten eingestellt werden. Der Generator erhält als Priority 1 einen geringen numerischen Wert 50 und damit eine hohe Priorität. Alle anderen Geräte im Netzwerk erhalten eine geringere Priorität mit einem numerischen Wert von 100 oder mehr.

4.3.3 Konfiguration der Netzwerkknoten

Die im Versuch eingesetzten Switches benötigen für die Übertragung von Video, Audio und Takt einige wichtige Konfigurationen. Die hier beschriebenen Befehle beziehen sich auf die Konfiguration des Cisco Switches. Als Betriebssystem wird das Cisco-eigene Betriebssystem NX-OS Version 9.3 genutzt. Beschränkt werden die Ausführungen auf folgende, für die Anwendung in der Medienübertragung wichtigen, Punkte:

- PTP
- Multicast

Der Zugang auf den Switch erfolgt über die Management-Schnittstelle des Gerätes. Die Konfiguration kann so netzwerkbasierend per SSH (Secure Shell) über die Befehlszeile erfolgen. Es ist bei allen Punkten zwischen einer globalen Konfiguration und Interface-Konfiguration zu unterscheiden.

Im ersten Schritt werden die globalen Konfigurationen durchgeführt. Diese beinhalten das Aktivieren von diversen Features:

```
feature ptp
feature interface-vlan
```

Mit dem PTP Feature wird PTP erst einmal grundsätzlich global aktiviert. Das Feature Interface-VLAN ermöglicht es, Virtual Local Area Networks auf den Switchen zu nutzen. Ein VLAN ist ein logisches Teilnetz auf der Vermittlungsschicht. Dieses erlaubt eine virtuelle Trennung innerhalb eines physikalischen Netzwerks.

Um die Taktverteilung über die Netzwerkknoten hinweg zu gewährleisten, müssen die PTP-Parameter für den Switch global korrekt eingestellt werden. Die Switche sind standardmäßig als Boundary-Clock eingestellt. Der Switch wird so durch die Grandmaster-Clock synchronisiert und leitet die PTP-Pakete an die anderen Netzwerkteilnehmer weiter. Die PTP-Domain wird gemäß der PTP-Konfiguration auf 127 eingestellt. Als Quelladresse wird die IP-Adresse der PTP-Netzwerkschnittstelle des Taktgenerators gewählt. Die Prioritäten werden mit einem hohen numerischen Wert 100 niedrig gehalten.

```
ptp source 172.18.0.100
ptp priority1 100
ptp priority2 100
ptp domain 127
```

Neben der globalen Konfiguration müssen auch die einzelnen Interfaces des Geräts für PTP freigeschaltet werden. Darin werden z.B. die Intervalle festgelegt, mit denen die PTP-Pakete versendet werden. Zudem wird für den Versuch ein eigenes VLAN 20 angelegt, welches ebenfalls entsprechende Konfigurationen als eigenes Interface erhält. Diesem werden alle anderen Schnittstellen zugewiesen.

```
interface ethernet 1/1
  ptp
  ptp delay-request minimum interval smpte-2059-2 -3
  ptp announce interval smpte-2059-2 0
  ptp sync interval smpte-2059-2 -3
  switchport access vlan 20
```

Der Switch sollte zudem für Multicast-Routing konfiguriert werden, um die Verteilung der Mediendatenströme sicherzustellen. Das beinhaltet in erster Linie die Unterstützung von IGMP-Funktionen. Der Switch dient als Router, der die Listen der Multicast-Gruppen verwaltet und wird auch als IGMP-Querier bezeichnet. Gemeinsam mit dem Anfrageintervall werden diese Einstellungen für das verwendete VLAN 20 definiert.

```
vlan configuration 20
    ip igmp snooping group-timeout never
    ip igmp snooping querier 192.168.38.206
    ip igmp snooping querier-timeout 300
    ip igmp snooping query-interval 120
```

Die verwendete Version von IGMP wird dann im VLAN Interface festgelegt. Die Unterstützung der IGMP-Funktionen muss auf jedem Interface, an welchem ein IGMP-fähiges Endgerät angeschlossen ist, konfiguriert werden. Diese Interfaces werden dementsprechend dem VLAN 20 zugeordnet, wodurch die Multicast-Konfigurationen für diese gelten.

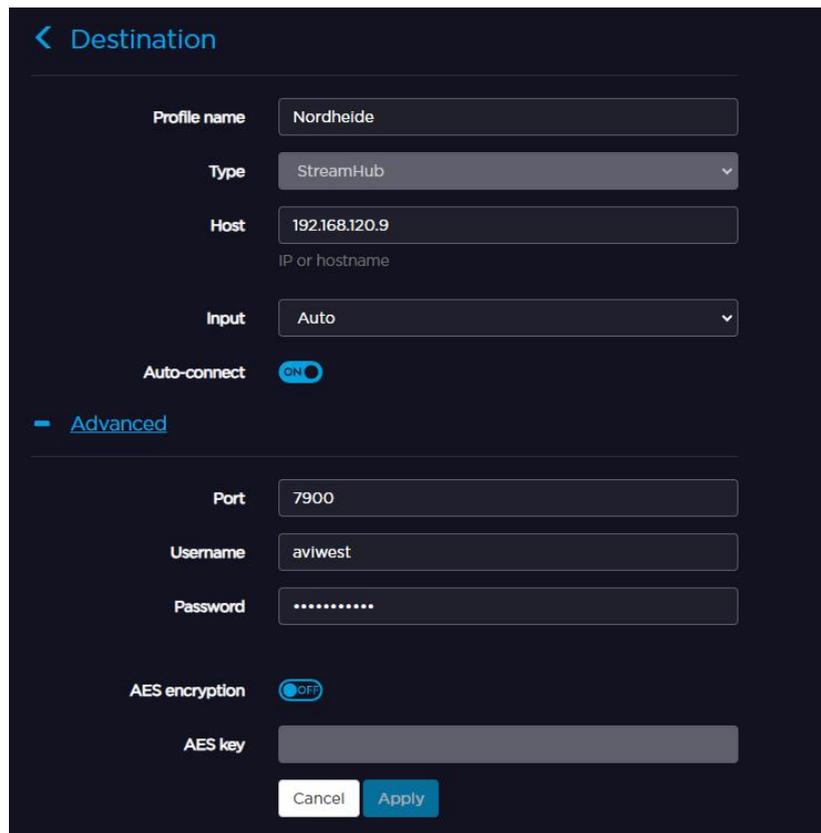
```
interface vlan20
    ip igmp version 3
```

4.3.4 Konfiguration der 5G-Komponenten

Da das 5G-Netz bereits zur Verfügung steht müssen nur die Nutzereinheiten innerhalb des Netzwerkes konfiguriert werden. Dies beinhaltet die Sendeseite mit dem Haivision Pro460 Transmitter sowie den Stream Hub als Empfänger und Gateway in das ST 2110 Produktionsnetzwerk. Damit der Stream Hub für den Transmitter im Mobilfunk-Netz erreichbar ist, muss an diesen eine entsprechende IP-Adresse vergeben werden. Dies könnte im gewöhnlichen Umfeld eine Public-IP-Adresse sein, die durch den Fritz Box Router vergeben wird. Dieser bekommt ebenso wie der Pro460 eine SIM-Karte. Da das 5G-Campusnetz ein in sich geschlossenes System bildet, erhalten beide SIM-Karten eine IP-Adresse im selben Subnetz, sodass die Vergabe einer eigenen Public-IP nicht mehr notwendig ist. Für den Betrieb verwendet der Stream Hub Server immer bestimmte UDP-Ports. Dafür müssen auf dem Router Regeln hinzugefügt werden, um ein- und ausgehenden Datenverkehr für bestimmte Ports zu aktivieren. Die freizuschaltenden Ports sind im Manual des Gerätes beschrieben. Das Anlegen der Regel erfolgt dann über die Weboberfläche des Routers. Jeglicher Datenverkehr, welcher an die IP-Adresse der SIM-Karte, in diesem Fall 192.168.20.9, gesendet wird, wird so durch den Router an die Netzwerkschnittstelle des Stream Hubs durchgeleitet. Für das 5G-Netz muss im Router zuletzt noch der Access Point Name, also der Zugangspunkt in das Netzwerk angegeben werden.

Für die Nutzung in die ST 2110 Umgebung wird eine eigene Einschubkarte für die ST 2110 Funktionalitäten mit entsprechenden Netzwerkschnittstellen verwendet. Im ersten Schritt werden auch im Stream Hub die PTP-Konfigurationen entsprechend Kapitel 4.3.2 vorgenommen. Zudem soll der Stream Hub für die Steuerung und das Routing per NMOS in Video IPath eingebunden werden. Im Laufe der Inbetriebnahme des Gerätes und nach einem Austausch mit dem Support von Haivision ist herausgekommen, dass in der aktuellen Firmware die Nutzung von NMOS noch nicht voll funktionsfähig ist und die Integration dadurch nicht möglich. Alle Signale, die über den Stream Hub gesendet werden, müssen aus diesem Grund statisch über den Cisco Switch als Mediswitch geroutet werden, indem ein Multicast-Flow im Stream Hub angelegt wird. Mit der Multicast-Adresse können die Empfangsgeräte einer Multicast-Gruppe beitreten und den Flow abonnieren.

Damit die Videodaten ins Produktionsnetzwerk gelangen können, werden diese mit dem Haivision Pro460 Transmitter über 5G an den Stream Hub gesendet. Dafür werden in der Konfiguration des Transmitters sogenannte Destination Profile angelegt. In diesem werden alle Informationen zum Empfänger der Videodaten angegeben. Die wichtigste Angabe ist dabei die IP-Adresse des Ziels, welche in diesem Fall die Adresse der SIM-Karte im 5G-Router ist, sowie der UDP-Port, an welchen der Datenverkehr weitergeleitet wird. Die Konfiguration ist in Abbildung 14 zu sehen. Der Pro460 erhält ebenfalls eine SIM-Karte mit der IP-Adresse 192.168.20.10 und befindet sich damit im selben Subnetz wie der Router. Hier wird ebenfalls der Identifier für das Zugangsnetz angegeben.



The screenshot shows a configuration screen for a destination profile. The title is "Destination" with a back arrow. The main configuration area includes:

- Profile name:** Nordheide
- Type:** StreamHub (dropdown menu)
- Host:** 192.168.120.9 (with a note "IP or hostname" below)
- Input:** Auto (dropdown menu)
- Auto-connect:** ON (toggle switch)

Below this is an "Advanced" section, indicated by a minus sign and the word "Advanced" in blue. It contains:

- Port:** 7900
- Username:** avlwest
- Password:** masked with dots
- AES encryption:** OFF (toggle switch)
- AES key:** empty text field

At the bottom are "Cancel" and "Apply" buttons.

Abbildung 14: Konfiguration Pro460 Destination

Neben den Informationen zur Datenübertragung werden in dem Pro460 diverse Profile für die Encodierung und anschließende Übertragung über 5G angelegt. Beispielhaft ist die Konfiguration für die Broadcast Low Latency Anwendung in Abbildung 15 zu sehen.

The screenshot displays the configuration interface for a Pro460 Live profile, organized into several sections:

- Profile name:** BK SST LL CBR
- Application:** Broadcast (SST Low Latency)
- Network:**
 - End-to-end latency:** 80
 - Delay (ms):**
 - 80 ms (min) / 500 ms (max) for p50/59.94/60
 - 150 ms (min) / 500 ms (max) for others
- Video:**
 - Encoder type:** H.265/HEVC
 - Chroma subsampling:** 4:2:2 10-bit
 - Bitrate control:** CBR
 - Bitrate:** 20000
 - Bitrate (kbps):** 2000 kbps (min) / 80000 kbps (max)
- Audio:**
 - Encoder type:** LPCM
 - Channel layout:** 1 x Stereo
 - Bitrate:** 1928
 - Bitrate (kbps):** 1928

Abbildung 15: Konfiguration Pro460 Live Profil für Broadcast Low Latency

Netzwerkseitig beinhaltet die Konfiguration das Protokoll, welches in diesem Fall auf SST Low Latency gewählt wird. Hierbei handelt es sich um ein eigenes Protokoll des Herstellers Haivision. Der Transmitter könnte ebenfalls mit SRT arbeiten, dies allerdings ausschließlich über eine LAN-Verbindung. Für eine 5G-Übertragung wird immer das SST Protokoll gewählt. Die angestrebte Latenz kann für das Netzwerk ebenfalls gewählt werden. Wie bereits beschrieben, wird für den Versuch mit einer H.265/HEVC Codierung mit 4:2:2 10-bit gearbeitet. Die maximale Bitrate wird ebenfalls angegeben. Bereits aus dieser Konfiguration gehen einige Beschränkungen der Geräte hervor. Die Übertragungsrate ist je nach Auflösung stark begrenzt, ebenso wie die minimale Latenz. Diese Einstellungen müssen immer getätigt werden, sodass die Übertragung auch dann nicht mit einer höheren Datenrate erfolgen würde, wenn das Netzwerk diese ermöglichen würde. Für den Versuchsaufbau werden drei verschiedene Profile getestet. Alle Streams sollen mit der maximalen Bandbreite und einer geringen Latenz übertragen werden. Variiert wird die Kontrolle der Bitrate zwischen einer variablen Bitrate und einer konstanten Bitrate. Zusätzlich wird die Anwendung der Low Latency Variante überprüft, welche ausschließlich mit einer konstanten Bitrate arbeitet.

4.4 Durchführung und Funktionsprüfung

Nachdem das Datennetzwerk aufgebaut und konfiguriert wurde, wird die Funktionalität der technischen und operativen Anforderungen, die in Kapitel 4.1 vorgestellt wurden, überprüft. Bei der technischen Betrachtung sind die zentralen Aspekte die Kompatibilität der IP-Systeme über 5G und im ST 2110 Produktionsnetzwerk untereinander, die effiziente Nutzung von Datenraten und durch die Drahtlostechnik insbesondere die Latenz.

4.4.1 ST 2110 Kompatibilität und Interoperabilität

Mit dem zukünftigen Ziel All-IP-Produktionsnetzwerke umsetzen zu können, sollte die Kompatibilität aller Komponenten mit dem ST 2110 Standard gegeben sein. Diese wird mithilfe des Telestream PRISM überprüft. Dazu werden die Ausgangssignale aller sendenden Geräte über Multicast an den PRISM geroutet. Dieser stellt für die eingehenden Datenströme diverse Daten zur Auswertung zur Verfügung, in erster Linie kann aber untersucht werden, ob es sich bei den eingehenden Datenpaketen um ST 2110 Daten handelt. Es werden über das Hyperdeck Pro 4K Testsignale in das System am Nevion Virtuoso eingespeist. Dieser agiert als SDI-IP-Gateway. Wird das netzwerkseitig ausgehende Signal nun über ein festes Multicast-Routing an den PRISM gesendet, werden die ST 2110 Datenströme als Eingangssignal dargestellt, wie in Abbildung 16 gezeigt.

ID	PORT	PROTOCOL	BITRATE	PAYLD	DEST IP	SOURCE IP	DEST MAC
3	1	S2110.20	2.191 Gb/s	96	239.20.0.1:5500	10.1.1.1:5500	01:00:5e:14...
5	1	S2110.30	6.016 Mb/s	96	239.30.0.3:5500	10.1.1.1:5500	01:00:5e:16...
8	1	S2110.40	109.6 kb/s	100	239.40.0.1:5500	10.1.1.1:5500	01:00:5e:28...
1	1	PTP_Evt	5.739 kb/s	--	224.0.1.129:319	172.18.0.100:319	01:00:5e:00...
2	1	PTP_Gen	12.11 kb/s	--	224.0.1.129:320	172.18.0.100:320	01:00:5e:00...
4	1	S2110.20	2.191 Gb/s	96	239.20.2.1:5500	10.1.2.1:5500	01:00:5e:14...
6	1	S2110.30	6.016 Mb/s	96	239.30.2.3:5500	10.1.2.1:5500	01:00:5e:16...
7	1	S2110.40	109.6 kb/s	100	239.40.2.1:5500	10.1.2.1:5500	01:00:5e:28...
--	--	Other Level 3	0b/s	--	--	--	--

Abbildung 16: ST 2110 Kompatibilität Nevion Virtuoso

Ebenfalls kann hier abgelesen werden, dass das PTP-Signal im Netzwerk präsent ist und die Geräte sich auf diesen Takt der Grandmaster Clock einstellen können. Es ist zudem in Zeile 6-8 der Abbildung ersichtlich, dass auch die redundanten Signale am PRISM vorhanden sind.

Das gleiche Vorgehen wird auf die Ausgangssignale des Haivision Stream Hubs angewendet. Die gleichen Testsignale, wie im vorigen Absatz, werden über das Hyperdeck Shuttle an den 5G-Transmitter gegeben. Dieser sendet die Videodaten über das 5G-Netz an den Stream Hub, welcher als Gateway dient. Der Input kann dann über die ST 2110-IP Karte des Servers an den PRISM geroutet

4 Praktische Untersuchung der Technologien

werden. Das Ergebnis ist auch hier dasselbe wie bereits beim Virtuoso, welches in Abbildung 16 zu sehen ist. Auch hier basieren alle Datenströme auf dem ST 2110 Standard und sind redundant präsent.

Die Überprüfung der Datenströme kann noch einmal mit der quelloffenen Software „Wireshark“ verifiziert werden. In dieser werden die tatsächlich übertragenen Datenpakete visualisiert. Sie erlaubt es Kommunikationsverbindungen inklusive der Protokolle nachzuverfolgen und zu untersuchen. Dafür wird der Multicast-Datenstrom der Ausgangsgeräte auf einen Untersuchungsrechner gespiegelt, der diesen über Wireshark mitschneidet. Die Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt einiger aufgezeichneten Datenpakete, die während der Messung übertragen wurden. Die einzelnen Pakete werden nach ihrer zeitlichen Abfolge in Listenform dargestellt.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4	0.000013297	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165522, Time=2392411768, FirstRow=140, Rows=1
5	0.000017852	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165523, Time=2392411768, FirstRow=140, Rows=1
6	0.000022241	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165524, Time=2392411768, FirstRow=141, Rows=1
7	0.000026639	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165525, Time=2392411768, FirstRow=141, Rows=1
8	0.000031139	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165526, Time=2392411768, FirstRow=141, Rows=1
9	0.000035806	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165527, Time=2392411768, FirstRow=141, Rows=1
10	0.000040343	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165528, Time=2392411768, FirstRow=142, Rows=1
11	0.000044547	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165529, Time=2392411768, FirstRow=142, Rows=1
12	0.000048917	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165530, Time=2392411768, FirstRow=142, Rows=1
13	0.000053324	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165531, Time=2392411768, FirstRow=142, Rows=1
14	0.000057815	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165532, Time=2392411768, FirstRow=143, Rows=1
15	0.000062213	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165533, Time=2392411768, FirstRow=143, Rows=1
16	0.000066936	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165534, Time=2392411768, FirstRow=143, Rows=1
17	0.000071241	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165535, Time=2392411768, FirstRow=143, Rows=1
18	0.000075491	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165536, Time=2392411768, FirstRow=144, Rows=1
19	0.000080111	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165537, Time=2392411768, FirstRow=144, Rows=1
20	0.000084389	192.168.39.166	239.20.0.1	ST2110-20	1262	Seq=64165538, Time=2392411768, FirstRow=144, Rows=1

Abbildung 17: Analyse des ST 2110 Datenstroms mit Wireshark

Hier ist der Stream Hub mit der IP-Adresse 192.168.39.166 klar als Sender ersichtlich. Dieser ist der Multicast-Gruppe 239.20.0.1 beigetreten. Der Multicast-Router, in diesem Fall der Medienswitch, leitet sämtlichen Datenverkehr dieser Multicast-Gruppe an das Messgerät weiter. Wegen der hohen Datenrate des Videosignals treffen in sehr schneller zeitlicher Abfolge die Pakete inkl. Header mit den Bildinformationen mit 1262 Byte Umfang ein. Mithilfe von Wireshark können die einzelnen Pakete detailliert untersucht werden. Beispielhaft ist ein solches Paket in Abbildung 18 dargestellt.

4 Praktische Untersuchung der Technologien

```
> Frame 19: 1262 bytes on wire (10096 bits), 1262 bytes captured (10096 bits)
> Ethernet II, Src: MellanoxTech_1b:a0:8b (58:a2:e1:1b:a0:8b), Dst: IPv4mcast_14:00:01 (01:00:5e:14:00:01)
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.39.166, Dst: 239.20.0.1
> User Datagram Protocol, Src Port: 58556, Dst Port: 5545
v Real-Time Transport Protocol
  > [Stream setup by HEUR RTP (frame 1)]
    10.. .... = Version: RFC 1889 Version (2)
    ..0. .... = Padding: False
    ...0 .... = Extension: False
    .... 0000 = Contributing source identifiers count: 0
    0... .... = Marker: False
    Payload type: DynamicRTP-Type-96 (96)
    Sequence number: 5793
    [Extended sequence number: 71329]
    Timestamp: 2392411768
    Synchronization Source identifier: 0x4ee6ba85 (1323743877)
    <Payload [truncated]: 03d304b0009001e0d407078077d407078077d407078077d4c7078077d407078077d4...
v SMPTE ST2110-20 (Uncompressed Active Video)
  Extended Sequence Number: 979
  [Sequence Number: 64165537]
  [RTP Timestamp: 2392411768]
v Sample Row Data 0
  [SRD Header Index: 0]
  SRD Length: 1200
```

Abbildung 18: Analyse eines ST 2110 Datenpakets im Detail

Hier fallen direkt die einzelnen Protokollschichten auf aus denen sich die Datenpakete zusammensetzen. Es ist klar ersichtlich, dass es sich bei den eintreffenden Datenpaketen um ST 2110-20 Daten handelt.

Die Unterstützung von NMOS ist zwar nicht im ST 2110 Standard selbst definiert, erleichtert aber das Arbeiten in der Netzwerkumgebung erheblich, da eine Steuerung der Geräte über die NMOS-spezifizierten Protokolle ermöglicht wird. Der Stream Hub sollte die Spezifikation explizit unterstützen, was die Steuerung über das zentrale Orchestrationssystem möglich gemacht hätte. Leider konnte in der Praxis die Konfiguration der NMOS-Funktionalitäten nicht umgesetzt werden. Nach Gesprächen mit den Herstellern stellte sich das Problem als Fehler in der Firmware heraus, sodass dieses nicht mehr innerhalb der Versuchszeit behoben werden konnte. Das zeigt noch einmal, dass bei der Planung der Systeme diese Problemstellungen nicht direkt aus den Datenblättern ersichtlich sind und vorherige Interoperabilitätstest der Geräte unerlässlich sind. Auch wenn sich die Bedienung des Systems durch ein übergeordnetes Orchestrierungssystem deutlich erleichtert hätte, konnte eine Interoperabilität zwischen den Komponenten ebenfalls durch das statische Routen der Multicast-Flows hergestellt werden. Alle Datenströme konnten durch alle getesteten Geräte gesendet und empfangen werden und die Konnektivität wurde durch die Wahl des Spine-Switches sichergestellt.

4.4.2 Unabhängige Signalführung

Einer der Vorteile von IP-basierten Produktionsnetzwerken auf Basis von ST 2110 ist die Übertragung einzelner Elementardatenströme, die eine unabhängige Signalführung von Video- und Audiosignalen ermöglicht. Embedder und Deembedder können so an den Schnittstellen entfallen.

Mit dem gerade beschriebenen Versuchsaufbau und der Überprüfung der anliegenden Datenströme mithilfe des PRISMs lässt sich dies bestätigen. Die Signale, die über das Gateway in das System eingespeist werden, liegen im Netzwerk als unabhängige Datenströme vor. Der Virtuoso bietet dafür bis zu 128 In- und Output Streams, wobei jeder Kanal individuell geroutet werden kann. Auch der Stream Hub bietet die Möglichkeit die eintreffenden Audiodatenströme individuell im Netzwerk an separate Multicast-Gruppen zu verteilen. Der Pro40 Transmitter kann dazu bis zu vier Stereo Kanäle übertragen.

4.4.3 Netzwerkperformance

In Kapitel 4.2.2 wurden die benötigten Datenraten innerhalb des Systems bereits beschrieben. Durch die Dimensionierung der Netzwerk-Komponenten ist davon auszugehen, dass diese für das ST 2110 Netzwerk zur Verfügung stehen. Verifiziert wird dies noch einmal mit Hilfe des Messgeräts, auf welches ST 2110 Datenströme geroutet werden. In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass die Datenrate konstant bei etwa 2,188 Gbit/s pro Kanal liegt und keine Schwankungen vorliegen. Die gemessenen Werte decken sich weitestgehend mit den Angaben aus Kapitel 4.2.2.

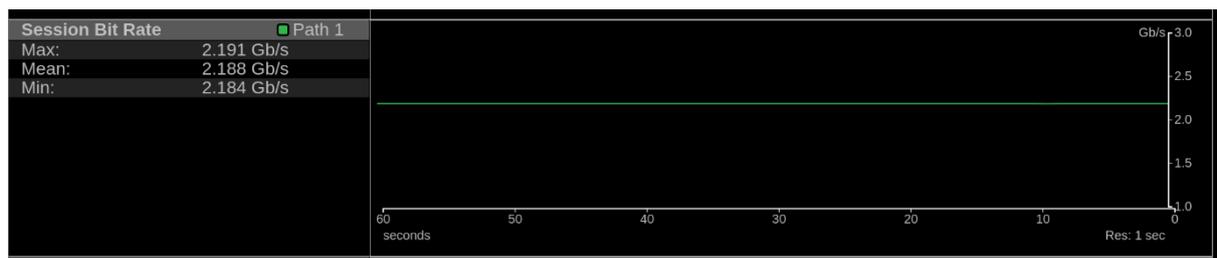


Abbildung 19: Netzwerkperformance ST 2110 Übertragung

Durch die Unvorhersehbarkeit einer drahtlosen 5G-Übertragung, wird erwartet, dass die Datenrate hier nicht konstant bleibt. Hinzu kommt die Begrenzung der Spitzendatenraten innerhalb des Systems. Im Campusnetz könnten zwar bis zu 10 Gbit/s erreicht werden, was theoretisch die Übertragung von unkomprimierten Datenströmen ermöglichen würde. Deutlich begrenzt werden die Möglichkeiten allerdings durch den Pro460 Transmitter und die Konfigurationen der Live-Profile. Bei einer Übertragung von 1080p50 Videosignalen wird die mögliche Datenrate hier auf maximal 20 Mbit/s begrenzt. Da hier allerdings von H.265 codierten Videosignalen die Rede ist, muss dies nicht unbedingt eine Einschränkung in der visuellen Videoqualität bedeuten. Während des Versuchs können die tatsächlich erreichten Datenraten während der 5G-Übertragung sowie mögliche Paketverluste innerhalb des Stream Hubs überwacht werden. In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist beispielhaft das Ergebnis der Übertragungen mit variabler und konstanter Bitrate zu sehen. Es wurde mit allen drei Profilen stets die versprochene maximale Datenrate von 20 Mbit/s erreicht. Zunächst ist der Verbindungsaufbau in den Abbildungen sehr gut zu erkennen.

4 Praktische Untersuchung der Technologien

Nach einem stetigen Anstieg der Datenrate bleibt diese ganz klar konstant über die gesamte gemessene Zeit, auch bei einem Profil mit variabler Bitrate. Da das Campusnetz völlig unabhängig vom öffentlichen 5G-Netz betrieben wird und die User Einheiten, die sich darin befinden begrenzt und kalkulierbar sind, war dies ein erwartetes Ergebnis.



Abbildung 20: Überprüfung der Datenraten von 5G SST VBR



Abbildung 21: Überprüfung der Datenraten von 5G SST CBR

Um zu überprüfen ob die Datenraten weiterhin so vorhersehbar bleiben, wenn deutlich mehr Daten am Eingang des Stream Hubs eintreffen und ob es Auswirkungen auf die weitere Verarbeitung

dieser gibt, wird das Netzwerk mit generierten UDP-Datenpaketen geflutet. Verwendet wird dazu das Tool „WAN Killer“. Damit werden zufällig generierte Datenpakete mit einer Übertragungsrate von durchschnittlich 3 Gbit/s von einem PC an den Port 7900 des Stream Hubs gesendet, welcher auch die über 5G übertragenen Mediendaten empfängt. Wird nun ein Ping an den Stream Hub gesendet, sind die Auswirkungen ganz klar zu erkennen. Die Antwortzeit des Servers ist hier mit 3639 ms sehr hoch oder er ist gar nicht mehr erreichbar. Die gleichen Auswirkungen lassen sich auch bei den anderen Geräten im Netzwerk feststellen, die sich nicht mehr steuern ließen und ähnliche Antwortzeiten bei einem Ping hatten.

```
C:\Users\lblazejewski>ping 192.168.38.166

Ping wird ausgeführt für 192.168.38.166 mit 32 Bytes Daten:
Antwort von 192.168.38.166: Bytes=32 Zeit=3167ms TTL=64
Antwort von 192.168.38.166: Bytes=32 Zeit=3639ms TTL=64
Zeitüberschreitung der Anforderung.
Zeitüberschreitung der Anforderung.

Ping-Statistik für 192.168.38.166:
    Pakete: Gesendet = 4, Empfangen = 2, Verloren = 2
    (50% Verlust),
Ca. Zeitangaben in Millisek.:
    Minimum = 3167ms, Maximum = 3639ms, Mittelwert = 3403ms
```

Abbildung 22: Ping des Stream Hubs nach Flutung des Netzwerks

Trotz dieser Feststellungen, blieb die Datenrate mit denen die Mediendatenströme im Stream Hub eintrafen durchweg konstant und auf dem maximalen Wert wie in Abbildung 23 zu sehen. Dies zeigt deutlich, dass Quality of Service Funktionen vorliegen, die hier in Aktion treten. Erhöhtes Aufkommen von Daten am Gateway beeinflusst die Videoübertragung nicht.

4 Praktische Untersuchung der Technologien



Abbildung 23: Überprüfung der Datenraten von 5G SST CBR nach Flutung des Netzwerks

Zuletzt sollte ein Vergleich der vorliegenden Ergebnisse mit der Anwendung in einem öffentlichen 5G-Netz gezogen werden, in welchem zum einen die Übertragungswege deutlich höher sind und sich zum anderen das Netz mit diversen weiteren User Einheiten geteilt wird, die für Gewöhnlich höher priorisiert sind. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 zu sehen.

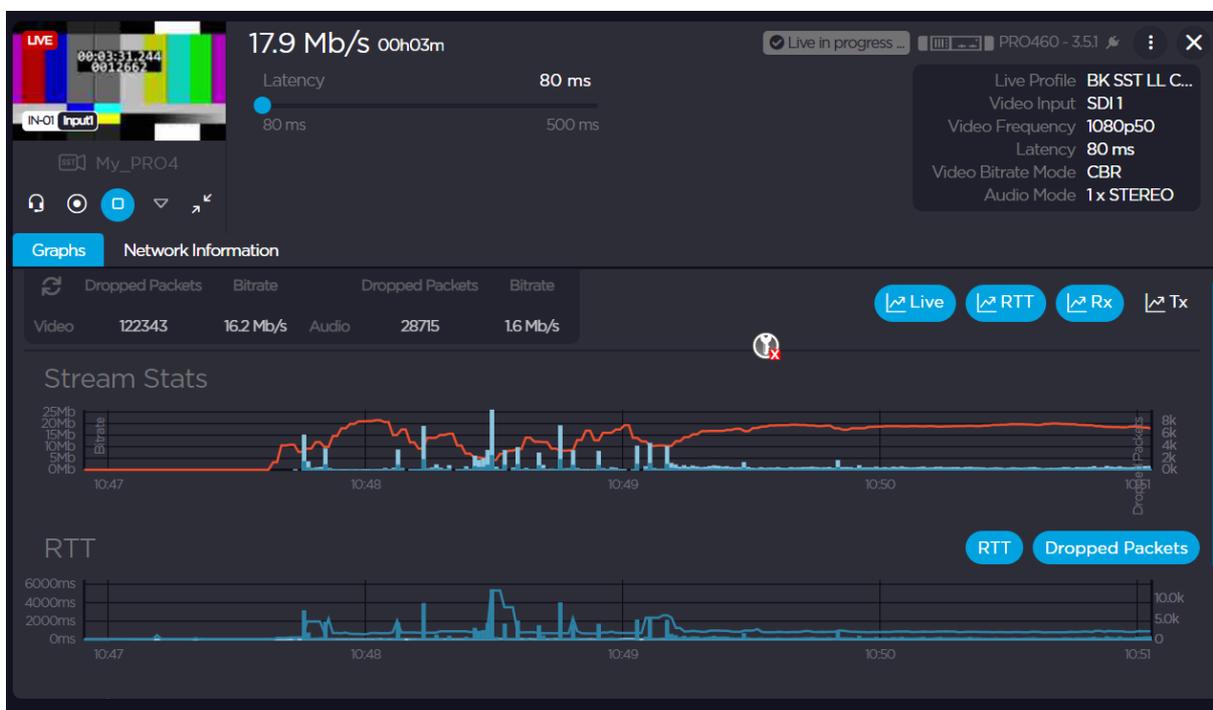


Abbildung 24: Überprüfung der Datenraten von 5G im öffentlichen Netz

Die erheblichen Schwankungen sind hier klar ersichtlich. Während im Campusnetz eine konstante Bitrate von 20 Mbit/s erreicht wird, liegt der Durchschnitt hier bei 16,2 Mbit/s. Zudem sind hier diverse Paketverluste zu sehen. Eine Vorhersehbarkeit der verfügbaren Datenübertragungsrate ist nicht gegeben und es ist mit Verlust von Bildinformationen zu rechnen.

4.4.4 Beurteilung des Videobilds

Die Komprimierung des Signals für die 5G-Übertragung geht automatisch mit einem Qualitätsverlust einher. Die drahtlose Übertragung und mögliche Paketverluste während dieser können ebenfalls visuelle Qualitätsverluste herbeiführen. Zum Vergleich der Bilder wurde das 1080p50 Kamerasignal der Blackmagic URSA mit dem Pro460 Transmitter übertragen und mit dem gleichen Signal übertragen mit SDI verglichen. Die Signale werden in den Bildmischer gegeben und über den Multiviewer ausgegeben und verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 25 zu sehen. Das über 5G übertragene Videosignal befindet sich auf der linken Seite, das SDI Bild auf der rechten.



Abbildung 25: Vergleich visuelle Qualität von SDI zu 5G

Bei Betrachtung der Videosignale auf dem Multiviewer ist kein visueller Qualitätsverlust festzustellen. Die Signale sind mit bloßem Auge nicht voneinander zu unterscheiden, wie nach den Erkenntnissen aus dem vorigen Kapitel zu den Datenraten im Campusnetz bereits zu erwarten war.

4.4.5 Latenz und Synchronität

Bei der Übertragung von Mediensignalen über drahtlose Übertragungswege spielt die Latenz eine große Rolle. Insbesondere für Live Produktionen muss diese so gering wie möglich gehalten werden, um so eine nahtlose hybride Produktion aus allen zur Verfügung stehenden Produktionsmitteln zu ermöglichen. Ziel dieses Versuchsteils ist es, die Latenz zwischen den verschiedenen Signalwegen möglichst präzise zu bestimmen und so mögliche Schwachstellen zu identifizieren und daraus ggf. Lösungen zu entwickeln. Dazu wurden zwei Varianten durchgeführt. Für die erste wurde ein Videobild mit Timecode aus den Hyperdecks ausgegeben. Eines gibt das 1080p50 Testbild an den 5G-Transmitter aus, welcher über das 5G-Netz an den Stream Hub sendet. Das zweite Hyperdeck gibt das selbe Testbild kabelgebunden über SDI aus und schickt es auf einem zweiten

Weg über das ST 2110 Gateway durch das Netzwerk an den Bildmischer. Alle Signale werden auf einem Multiviewer ausgegeben und dort verglichen. Wie bereits beschrieben sind alle Komponenten über PTP getaktet. Das Testsignal wird mit einer Fernsteuerung der Hyperdecks über Companion gleichzeitig gestartet. Anschließend kann über den Multiviewer der Timecode aller Signale betrachtet und die verschiedenen Übertragungswege miteinander verglichen werden. Um lediglich die Abweichung der reinen Übertragungswege zu bestimmen, wurde im Vorhinein bestimmt, wie viel Latenz die Geräte für das Processing einbringen. Der Blackmagic HDMI/SDI-Wandler sorgt dabei für eine zusätzliche Latenz von etwa 24 ms. Der Virtuoso bringt als reine Plattform zur Übertragung lediglich 4 ms Latenz ein. Da keine Funktion des Virtuosos zur Signalmanipulation verwendet wird, sollte dieser ansonsten nicht wesentlich zur Übertragungslatenz beitragen. Der Bildmischer bringt ebenfalls eine Latenz von 8 ms ein. Für die 5G-Übertragung wurden erneut alle Profile getestet: Mit variabler Bitrate, konstanter Bitrate sowie die Übertragung mit dem Low Latency Protokoll. In Abbildung 26 bis Abbildung 28 sind Screenshots aus den Aufnahmen zu sehen.



Abbildung 26: Latenzvergleich Timecode, 5G SST VBR

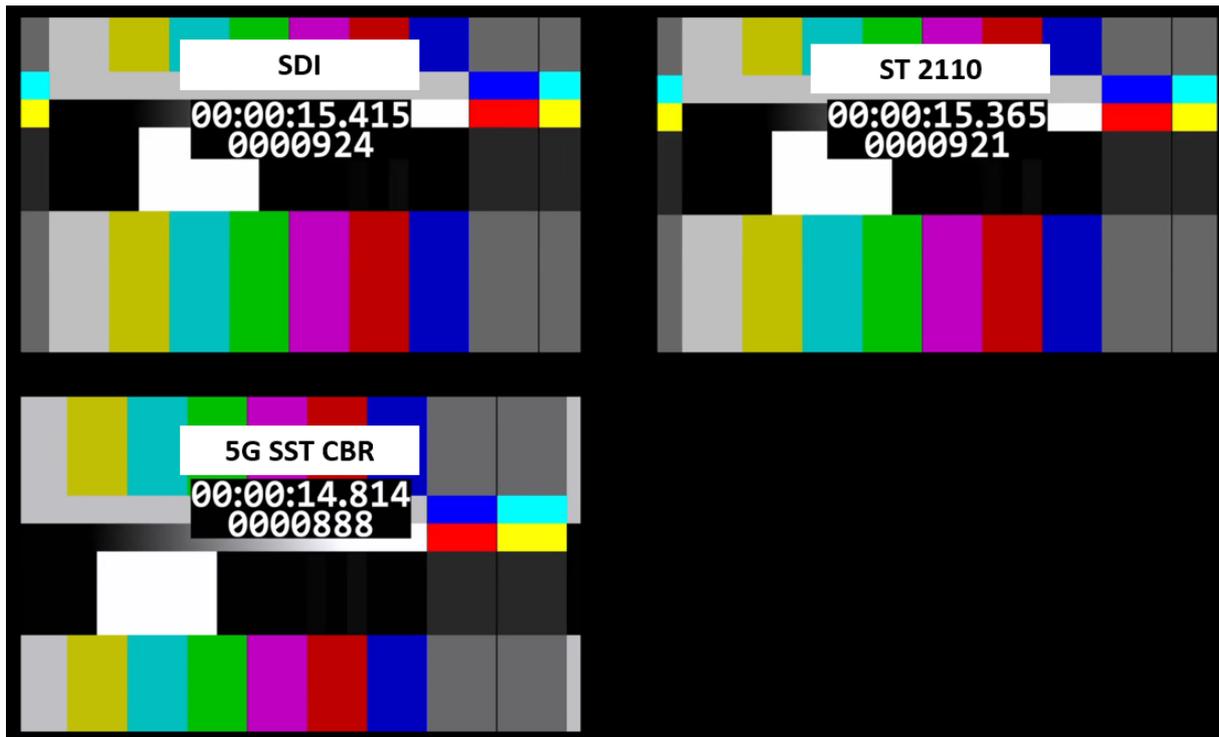


Abbildung 27: Latenzvergleich Timecode, 5G SST CBR

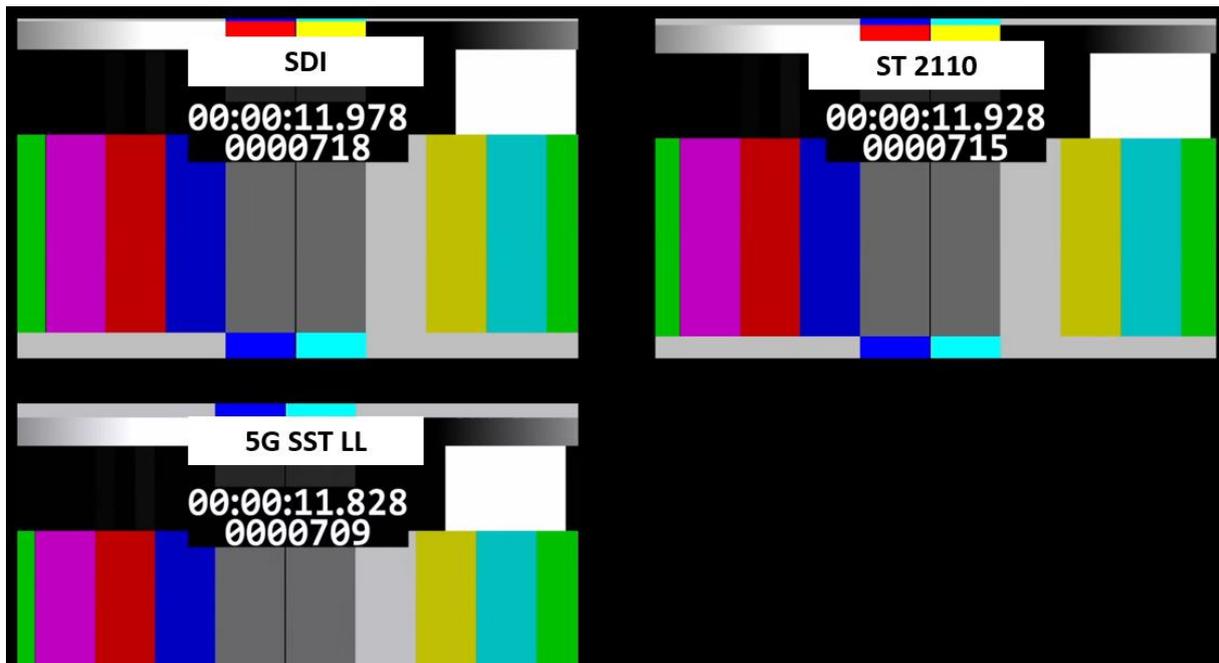


Abbildung 28: Latenzvergleich Timecode, 5G SST CBR Low Latency

Die Latenz von der ST 2110 Übertragung beträgt hier in der ersten Messung aus Abbildung 26 33 ms und in den beiden weiteren Messungen jeweils 50 ms. Was bei der Übertragung über 5G bereits besonders hervorsteht ist die deutlich geringere Latenz bei der Übertragung mit dem Low Latency SST Protokoll im Vergleich zu den anderen Übertragungsprofilen. Während der Laufzeitunterschied verglichen mit SDI bei der VBR-Variante 817 ms und in der CBR-Variante 601 ms

beträgt, wird diese mit dem Low Latency Protokoll auf 150 ms reduziert, was im Videostandard 1080p50 etwa 7,5 Frames entspricht. Die Übertragung mit der variablen Bitrate ist hier, verglichen mit den anderen Übertragungsmethoden, wesentlich höher und übersteigt sogar die konfigurierte Maximallatenz von 800 ms im Übertragungsprofil. Dies lässt sich mit einem möglichen höheren Rechenaufwand während der Codierung erklären, da hier die Bitrate immer wieder dem Übertragungsweg angepasst werden muss. Auch wenn die Datenrate in der Übertragung letztendlich konstant bleibt, geht die Vorhersage während der Codierung mit einer erhöhten Latenz einher.

Für eine genaue Messung wird zum Abspielen eines Testvideos zunächst derselbe Versuchsaufbau verwendet. Dieses besteht aber nun aus sich periodisch wiederholenden weißen Frames in einem ansonsten nur aus schwarzen Frames bestehenden Video. Es werden immer zwei Signalwege auf den Bildmischer gegeben und als Multiviewer nebeneinander ausgegeben. Auf den Bildschirmen wird dann jeweils eine Photodiode angebracht und an die zwei Kanäle eines Oszilloskops angeschlossen. Sobald ein weißer Frame gezeigt wird, wandelt die Photodiode den Lichtimpuls in eine Spannung, welche auf dem Oszilloskop angezeigt wird. Die Laufzeitunterschiede können dann unter den Channels des Oszilloskops verglichen werden. Abbildung 29 zeigt beispielhaft, wie die Latenz von einer 5G-Übertragung mit VBR zu SDI mithilfe des Oszilloskops verglichen werden kann. Channel 1 ist hierbei der SDI Signalweg, auf Channel 2 laufen die Messungen über 5G.

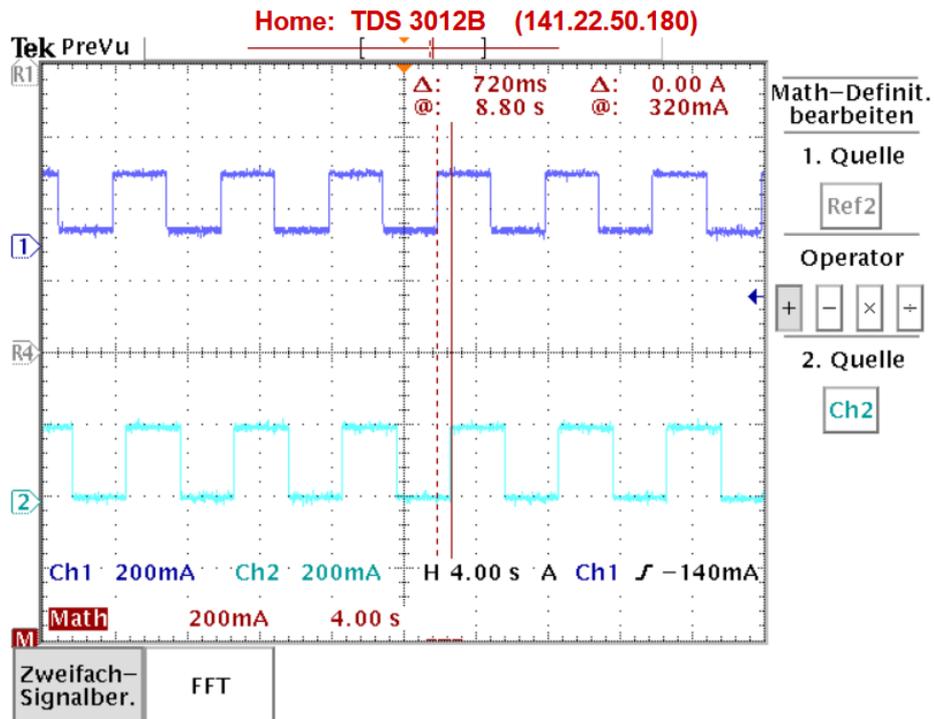


Abbildung 29: Bestimmung Laufzeitunterschied SDI zu 5G VBR mit Oszilloskop

Für alle Signalwege wurden 20 Messpunkte aufgenommen, die auch in Anhang D noch einmal zu finden sind. Die Ergebnisse sind als Mittelwerte in Tabelle 9 zusammengetragen.

Im Vergleich zur vorigen Messmethode sind klare Abweichungen zu erkennen, der Trend zu den Übertragungswegen bleibt aber derselbe: Eine extrem hohe Latenz bei der Übertragung mit 5G VBR und einem deutlich reduzierten Laufzeitunterschied mit dem Low Latency Protokoll. Die Abweichungen lassen sich durch die Aufnahme mehrerer Messpunkte erklären. Während in Variante 1 nur die Screenshots des Timecodes als erster Überblick dienen, werden mit dem Oszilloskop Mittelwerte aus mehreren Messungen gebildet. Des Weiteren bietet das Oszilloskop eine deutlich genauere Messmethode aufgrund der niedrigen Reaktionszeiten der Photodioden im Nanosekundenbereich und dem Vergleich der Impulse im Millisekundenbereich. Auch hier sticht wieder das Low Latency SST Protokoll heraus mit einem Laufzeitunterschied mit durchschnittlich 45 ms im Vergleich mit SDI, was ca. 2 Frames entspricht. Dies liegt weit unter den konfigurierten Werten des Profils und unter den erwarteten Ergebnissen. Zudem fällt während der gesamten Messung auf, dass die Laufzeitunterschiede nicht signifikant schwanken und über die Messungen hinweg konstant bleiben. Dazu trägt in hohem Maße die konstant bleibende Datenrate durch das private 5G-Netz bei, da keine anderen Netzteilnehmer den Datenaustausch stören können. In Kapitel 4.4.3 wurde bereits aufgezeigt, dass das Erzeugen von zusätzlichem Traffic am Port des Stream Hubs keine signifikanten Auswirkungen auf die Datenraten hat. Dagegen sind allerdings leichte Abweichungen in den Latenzen zu messen, welche sich in einem Rahmen von einem bis zwei Frames bewegen im Vergleich zu den vorigen Messungen ohne zusätzlichem UDP-Traffic. Besonders hohe

4 Praktische Untersuchung der Technologien

Auswirkungen hat das bei der Nutzung des Low Latency Protokolls, wo der Laufzeitunterschied mehr als doppelt so hoch ist. Mit einer zusätzlichen Auslastung des Stream Hubs am Port der ein-treffenden UDP-Pakete kommt es zu einer höheren Netzwerkauslastung, was zu einer erhöhten Pufferung innerhalb des Gateways führen kann. Dies zeigt sich in den entsprechend höheren Laufzeiten der Signale. Das Ergebnis bei einer konstanten Bitrate ist hingegen etwas besser. Dies kann durch eine entsprechende Vorhersehbarkeit bei der Verarbeitung der Daten erklärt werden. Die Pufferung kann hier besser angepasst werden. Die Messungen hierzu sind ebenfalls in Anhang D zu finden. Alle gemessenen Werte sind noch einmal in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Laufzeitunterschiede gemessen mit Oszilloskop

Latenzen vom Processing

Blackmagic ATEM Bildmischer	8 ms	
Blackmagic HDMI/SDI Wandler	24 ms	
Nevion Virtuoso	4 ms	
Übertragungswege	Laufzeitunterschied [ms]	Laufzeitunterschied abzüglich Processing [ms]
SDI/ST 2110	37,4	25,4
SDI/5G SST VBR	763	727
SDI/5G SST CBR	542	506
SDI/5G SST Low Latency	81	45
Mit zusätzlichem UDP-Traffic		
SDI/5G SST VBR	800,4	764,4
SDI/5G SST CBR	504	468
SDI/5G SST Low Latency	87,2	51,2

Die netzwerkbasierte Übertragung mit ST 2110 führt dagegen nicht zu einer relevanten Steigerung der Signallaufzeit. Ebenso wie bei konventionellen Systemen führen eher die Systeme zur Signalmanipulation zu den Verzögerungen.

4.4.6 Anwendung

Für die tatsächliche Anwendung der Technologie in der Praxis wurde ein kleines Kamera-Setup mit der Blackmagic URSA aufgebaut, um tatsächlich ein Kamerasignal in einen Bildmischer zu

4 Praktische Untersuchung der Technologien

bringen und die Bedienbarkeit der Technologie zu erfahren. Mit bereits bestehender Vorkonfiguration wurde der Pro460 Transmitter mit dem V-Mount an die Kamera angebracht. Dieser kann mit einem entsprechenden Akku ausgestattet werden, sodass sowohl der Transmitter als auch die Kamera mit Strom versorgt wird. Der Ausgang der Kamera wird per SDI direkt mit dem Eingang des Pro460 verbunden. Durch die konfigurierten Profile für die Übertragungsart und den Zielsever, ist die Bedienung des Transmitters sehr verständlich aufgebaut und innerhalb kürzester Zeit vor Ort in Betrieb zu nehmen. Das Setup ist in Abbildung 30 zu sehen.



Abbildung 30: Anwendung 5G-Komponenten mit Blackmagic URSA Kamera

Für eine Zuspiegelung von außerhalb kann die Kamera innerhalb des Campusnetzes bewegt werden. Im nahen Umkreis des Testaufbaus konnte kein signifikanter Verlust der Bildqualität festgestellt werden und das eingehende Videosignal ließ sich problemlos mit dem Bildmischer verarbeiten. Ab 300 m Entfernung des Transmitters wurde allerdings die 5G-Verbindung deutlich schlechter mit immer wieder auftretenden Verbindungsabbrüchen bis die Verbindung schließlich ganz abgebrochen ist. Dies ist mit Verlassen der Funkzelle des Campusnetzes geschehen. Zukünftig könnte der Pro460 Transmitter mit weiteren SIM-Karten ausgestattet werden, auf welche bei einem Signalausfall ausgewichen werden könnte, welche dann z.B. über das öffentliche 5G-Netz weitersenden, sodass hier Sendesicherheit gewährleistet werden kann.

Die Komponenten von Haivision würden zudem eine Möglichkeit zur Nutzung von Intercom und eines Return-Videos über eine Rückstrecke bieten. Da auf diesen Funktionalitäten allerdings nicht der Fokus liegt, wurden diese im Versuchsaufbau nicht getestet.

4.5 Auswertung der Messergebnisse

Nach dem Abschluss der praktischen Untersuchungen werden nun die Erkenntnisse aus den Versuchen anhand der formulierten Zielsetzungen ausgewertet. Dabei beziehen sich die Messergebnisse auf verschiedene Teilziele, für die sie relevant sind. Die Ausführungen nehmen teilweise schon Punkte des Fazits vorweg und sind daher bereits als erweitertes Fazit und Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit zu betrachten.

4.5.1 Systemplanung und -Integration

Im Rahmen des Versuchs wurde die Untersuchung der Planung, Integration und Inbetriebnahme eines Sendesystems IP-basiert mit ST 2110 und 5G angestrebt. Der Aufwand sollte vergleichbar mit konventionellen Produktionssystemen sein. Die Produktionsumgebung basiert auf dem IP-Standard ST 2110 und wird um drahtlose 5G-Komponenten ergänzt. Die IP-Technologie bietet bereits in der Planung viele Möglichkeiten was die Flexibilität angeht. Die Signale liegen als einzelne IP-Datenströme im Sendesystem vor und bieten die Möglichkeit die Signalkette frei und flexibel zu wählen, während diese in konventionellen Produktionsstätten durch die physikalische Infrastruktur limitiert ist. Dies führt zu einer einfachen Integration von weiteren Geräten in die Signalkette. Die Planung des Sendesystems im Versuchsaufbau hat gezeigt, dass dieses mit wenig Aufwand abgeändert und skaliert werden kann, sowohl nach oben als auch nach unten, sofern im Vorhinein ausreichende Überlegungen zum Vorhaben angestellt wurden. Während ein Netzwerk in Spine-Leaf-Topologie geplant wurde, war aufgrund der Menge der Signale nur ein Switch notwendig. Wahlweise hätte der Versuchsaufbau aber auch um weitere Netzwerkknoten erweitert werden können. Zudem war die Umplanung der Netzwerkstruktur von einem Orchestrator hin zu statischem Routing ohne besonderen Aufwand möglich und umsetzbar. Eine Mischvariante wäre hier ebenfalls denkbar gewesen. Dennoch müssen in der Praxis immer noch viele Signale gewandelt werden, da zahlreiche Komponenten den ST 2110 Standard nicht nativ unterstützen. Die Einplanung von Gateways ist daher unerlässlich und eine vollständige IP-Infrastruktur noch nicht umsetzbar. Dies führt zu einem erhöhten Aufwand in der Signalverarbeitung und kann die Gesamteffizienz des Systems beeinträchtigen. Es ist jedoch ganz klar, dass sich die Planung und Integration immer mehr in Richtung des IT-Bereiches bewegt. Da ST 2110 bzw. Netzwerk-Infrastrukturen immer noch nicht häufig eingesetzt werden, fehlt es teilweise an Planer:innen und praktischen Erfahrungen mit netzwerkbasierter Produktion. Auch wenn die Auswahl der Systemkomponenten, die Konfiguration und Inbetriebnahme im durchgeführten Versuchsaufbau nicht mit immensem Mehraufwand verbunden war, kann dieser Teil der Arbeit nur als persönlicher Erfahrungswert angesehen werden und ist nicht unbedingt auf die Skalierung eines solchen Systems in der Praxis anwendbar. Entsprechende Schulung von Fachpersonal ist hier immer noch notwendig. Damit der Überblick über die verschiedenen Signale behalten werden kann, ist eine

exakte Planung und Dokumentation der IP- und Multicast-Gruppen-Adressbereiche unerlässlich. Die Endgeräte müssen entsprechend für die Steuerung der Signale durch Multicast konfiguriert werden und die richtige Konfiguration der Netzwerkschicht ist unerlässlich. Erst nach einer korrekten Konfiguration aller Komponenten ist ein Senden jeglicher Signale in diesem System möglich. Es ist allerdings hervorzuheben, dass Benutzeroberflächen der Endgeräte immer intuitiver werden und die Konfiguration dieser deutlich erleichtern. Um die Funktionalität zu gewährleisten, muss zudem eine funktionierende Taktverteilung gegeben sein. Diese wird nicht über eine separate Infrastruktur, sondern über das gleiche Netzwerk realisiert. Auch diese muss für ein laufendes Sendesystem fehlerfrei eingerichtet werden. Die Konfiguration während des Versuchs hat gezeigt, dass ein falsch verwendeter PTP-Parameter im Stream Hub die Nutzung von Routing per Multicast unmöglich macht und Signale in den Senken nicht nutzbar sind.

Für die Integration der 5G-Komponenten wurde diese IP-basierte Umgebung gewählt, da 5G ebenfalls auf einem netzwerkbasieren Ansatz aufbaut und sich somit bestenfalls nahtlos in die bestehende ST 2110-Infrastruktur einfügen lässt. Der Trend in der Branche führt zu immer mehr Entwicklungen in 5G-Technologien und bietet entsprechend immer mehr Komponenten für den Einsatz von 5G in diesen Bereichen. Da gerade im Broadcast-Bereich der Fokus auf ST 2110 Systemen liegt, bieten die Komponenten auch hier Möglichkeiten mit diesem Standard zu arbeiten. Allerdings wurde ST 2110 für die Übertragung unkomprimierter Signale entwickelt, die hohe Datenraten erfordern. Dies stellt eine große Herausforderung dar, insbesondere in Bezug auf die Bandbreitenanforderungen in einem 5G-Netz. Die Implementierung steckt daher noch in vielen Bereichen in der Entwicklung. So war im Versuchsaufbau eine Einbindung der Geräte über NMOS noch nicht möglich, wodurch die zentrale Steuerung der Komponenten nicht realisiert werden konnte und eine kurzfristige Umplanung des Systems notwendig war. Es ist zudem zu beachten, dass im Versuch lediglich die Integration von 5G-Endgeräten und nicht des 5G-Netzwerks selbst untersucht wurde. Die Konfiguration eines eigenen 5G-Netzwerks erfordert nicht nur umfassendes Fachwissen im Bereich der Mobilfunktechnik, sondern auch ein Investment in Infrastruktur und die Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs. Bei privaten 5G-Netzen müssen Rundfunkanbieter Aspekte wie Frequenzuteilung, Netzwerkkapazitäten, sowie die Netzsicherheit planen und implementieren. Besonders herausfordernd ist die Gewährleistung der stabilen und vorhersehbaren Datenübertragung, da hierfür spezifische Netzwerkparameter wie Latenz, Bandbreite und Quality of Service auf die Anforderungen des Broadcastings abgestimmt werden müssen. Eine Möglichkeit bietet hier das Network Slicing innerhalb des öffentlichen 5G-Netzwerks mit einem Shared RAN oder 5G Core, sodass der Aufbau eines dedizierten Netzwerks nicht ausschließlich in der Hand der Produktion liegt.

Im Gegensatz dazu stellt die Nutzung öffentlicher 5G-Netze eine vergleichsweise unkomplizierte Möglichkeit dar, 5G-Komponenten einzubinden. Allerdings bringt diese Option Unsicherheiten

mit sich. Die verfügbare Bandbreite und die Qualität der Datenübertragung sind in öffentlichen 5G-Netzen stark von der Netzwerkauslastung abhängig und daher nur bedingt planbar. Damit wird deutlich, dass der Betrieb in öffentlichen 5G-Netzen zwar eine schnelle Integration ermöglicht, aber auch die Kontrolle über kritische Übertragungsparameter weitgehend in die Hände des Mobilfunknetzbetreibers legt. Diese Einschränkungen müssen daher bei der Planung von TV-Sendesystemen, die auf 5G-Technologie setzen, sorgfältig abgewogen werden.

Die ersten Erfahrungen zeigen, dass die Einbindung der 5G-Komponenten in die bestehende Infrastruktur vergleichsweise unkompliziert ist, was darauf hindeutet, dass der Einsatz von 5G als Übertragungsstandard für zukünftige Broadcast-Anwendungen vielversprechend ist. Mit Nutzung eines privaten 5G-Campusnetzes bleibt auch die Planbarkeit von Übertragungsanforderungen erhalten. Trotzdem bleibt die Herausforderung, eine umfassende native ST 2110-Unterstützung in der gesamten Signalverarbeitungskette zu gewährleisten, um eine vollständig IP-basierte Produktionsumgebung zu realisieren. Dazu müssen Gedanken zur Steuerung der Systeme, zur Taktverteilung sowie zur Signalverteilung einfließen.

4.5.2 Interoperabilität und Management

Die praktische Untersuchung hat gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist ein Sendesystem mit Einbindung von 5G-Produktionsmitteln auf Basis von ST 2110 aufzubauen. Der Standard ist bereits praxistauglich und wird von vielen Herstellern bereits unterstützt. Die Signalübertragung in das Produktionsnetzwerk durch ST 2110-20 und ST 2110-30 funktioniert mit allen Komponenten problemlos. Im Versuch wurden allerdings bei der Einbindung des Stream Hubs Interoperabilitätsprobleme aufgrund der Software hinsichtlich der Steuerung festgestellt. Gerade für die Organisation und Einbindung aller Zusprieler über 5G zur Weiterverarbeitung und -Verbreitung der Signale ist dies ein großes Problem. Eine manuelle Verteilung der Datenströme ist gerade in der Praxis und in größeren Installationen nicht denkbar. Die Verwendung von universellen Kommunikationsprotokollen ist hier unerlässlich und muss fehlerfrei funktionieren. In den letzten Jahren ist allerdings eine deutliche Entwicklung hin zur Nutzung von z.B. NMOS Steuerungsprotokollen bei den Herstellern zu beobachten und es ist zu erwarten, dass sich dies zukünftig immer weiter verbessern wird.

Wie bereits im vorigen Absatz kurz beschrieben, lassen sich noch nicht alle Funktionen konventioneller Sendesystem durch rein IP-basierte Komponenten abbilden. Nicht alle Geräte sind mit nativer Kompatibilität zu ST 2110 und entsprechenden Schnittstellen verfügbar. Bei der Realisierung sind daher zwingend Gateways und Signalkonverter nötig. SDI-Schnittstellen sind hier immer noch zu verwenden und an vielen Stellen weiterhin einzuplanen.

Das Durchführen von Interoperabilitätstests einzelner Komponenten vor der Planung und Inbetriebnahme eines solchen Sendesystems ist hier ganz klar zu empfehlen, um eine reibungslose Funktion des Systems zu gewährleisten.

4.5.3 Signalführung

Der Versuchsaufbau hat gezeigt, dass die Video-, Audio- und Metadatenströme im IP-basierten Netzwerk unabhängig voneinander existieren und flexibel verteilt werden können. Diese Modularität ist einer der wesentlichen Vorteile des ST 2110-Standards. An den Gateways lassen sich Video- und Audiosignale bedarfsgerecht kombinieren, was eine individuelle Signalverarbeitung je nach Anforderung ermöglicht.

Auch die Integration von 5G-Komponenten in diesen Workflow verlief problemlos, solange die 5G-Signale im Stream Hub entsprechend geroutet werden. Dies zeigt, dass 5G eine vielversprechende Ergänzung zur bestehenden ST 2110-Infrastruktur darstellt. Voraussetzung ist jedoch, dass die 5G-Signale vor ihrer Weiterverarbeitung korrekt ins Netzwerk eingespeist und die erforderlichen Datenströme im System entsprechend adressiert werden.

4.5.4 Übertragung

Bei der Übertragung von Signalen über ein IP-basiertes System ist die Verfügbarkeit einer ausreichend hohen und stabilen Datenrate von entscheidender Bedeutung. Insbesondere im Broadcast-Bereich, in dem unkomprimierte Audio- und Videosignale in höchster Qualität transportiert werden müssen, ist es unerlässlich, dass die Signalübertragung ohne sichtbaren Qualitätsverlust erfolgt. Das Ziel für Live-Produktionen besteht daher darin, eine konstante und vorhersehbare Datenrate sicherzustellen, um die reibungslose Übertragung zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang wird die Leistung des Versuchsaufbaus hinsichtlich der Bereitstellung der erforderlichen Bandbreite und der Einhaltung der Qualitätsstandards ausgewertet. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass die Signalverteilung innerhalb des ST 2110 Produktionssystems lediglich von der Dimensionierung der Netzwerkschnittstellen abhängig ist. In der praktischen Untersuchung wurden diese mit mindestens 10 GbE oder höher gewählt, sodass ausreichend Kapazitäten für die Übertragung unkomprimierter Signale zur Verfügung standen.

Besonderes Augenmerk lag auf der Übertragung über den 5G-Signalweg, der im Versuchsaufbau über ein dediziertes Campusnetz realisiert wurde. Dieses private 5G-Netz hätte theoretisch Übertragungskapazitäten von bis zu 10 Gbit/s bereitstellen können. Allerdings war eine solch hohe Bandbreite in der Praxis nicht erforderlich, da die eingesetzten 5G-Komponenten ausschließlich mit komprimierten Signalen arbeiten. Stattdessen wurde die Datenrate bereits mit der Wahl der Übertragungskomponenten auf maximal 20 Mbit/s eingeschränkt. Trotz dieser Begrenzung

stellte sich die Nutzung der effizienten H.265-Codierung als vollkommen ausreichend heraus, da die Signale ohne sichtbare Qualitätseinbußen an der Empfangsseite ankamen.

Ein entscheidender Vorteil des Campusnetzes zeigte sich in der konstanten und vorhersehbaren Datenrate. Über den gesamten Testverlauf wurden keine auffälligen Paketverluste festgestellt, was die Stabilität und Zuverlässigkeit des privaten 5G-Netzes unterstreicht. Die Komponenten ermöglichen die Übertragung der Signale mit variabler oder konstanter Bitrate, um sich entsprechend Netzwerkbedingungen anzupassen. Da innerhalb des privaten Netzes ausreichend Datenrate zur Verfügung stand, war eine Nutzung beider Varianten problemlos möglich. Der Einsatz der variablen Bitrate könnte allerdings bei der Übertragung in öffentlichen Netzen von Vorteil sein, um mögliche Schwankungen in den Kapazitäten auszugleichen. Dies ginge dann mit Einbußen in der visuellen Qualität der Videosignale einher. Die Nutzung einer konstanten Bitrate gewährleistet dagegen eine gleichmäßige Codierung und Nutzung der Bandbreite, was ein entscheidender Faktor für eine vorhersehbare Signalübertragung ist, da konstante Datenraten die Netzwerkauslastung besser kalkulierbar machen. Innerhalb des Versuchsaufbaus war das problemlos möglich. Im Vergleich dazu gestaltet sich die Nutzung öffentlicher 5G-Netze deutlich weniger vorhersehbar. Die Bandbreite und Datenrate im öffentlichen 5G-Netz können stark variieren, abhängig von der Netzwerkauslastung, Nutzeranzahl und den Priorisierungsmechanismen des Mobilfunkanbieters.

Für professionelle Broadcast-Anwendungen, bei denen konstante und vorhersehbare Datenraten entscheidend sind, bietet ein privates 5G-Campusnetz klare Vorteile, erfordert aber wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben einen hohen Aufwand in der Planung und Einrichtung.

4.5.5 Synchronisation

Eine der zentralen Forschungsziele war die Untersuchung hinsichtlich Minimierung und Vorhersehbarkeit von Latenzzeiten, um eine lückenlose Synchronisation aller Signalwege zu gewährleisten. Im vorliegenden Versuch wurden dazu die Systemkomponenten mithilfe eines zentral generierten PTP-Taktsignals synchronisiert. Ziel war es, ein Konzept zur genauen Latenzmessung zu erarbeiten und die Latenzen auf den verschiedenen Signalwegen zu messen.

Die Beschreibungen zur Versuchsdurchführung zeigen, dass die Messung der Latenz mithilfe des Oszilloskops sehr gut funktioniert hat und sich die Laufzeitunterschiede genau bestimmen ließen. Die Ergebnisse der Messungen zeigen klar hohe Latenzen bei der Übertragung mit 5G verglichen mit einer kabelgebundenen Übertragung. Die hohe Latenz bei der Übertragung mit 5G wurde vor allem bei der Verwendung des VBR-Modus festgestellt, mit einem Laufzeitunterschied von 779 ms. Durch den Einsatz des Low-Latency-Protokolls wurde jedoch eine deutliche Reduktion der

Latenzen erreicht. Die Messungen zeigten, dass die Übertragung mit diesem Protokoll im Vergleich zur SDI-Referenzverbindung einen durchschnittlichen Laufzeitunterschied von 81 ms aufwies, was etwa 4 Frames entspricht. Diese Werte liegen sowohl unter den konfigurierten Profillgrenzen als auch unter den ursprünglich erwarteten Ergebnissen, was die Effektivität des Low-Latency-SST-Protokolls von Haivision hervorhebt. Ein weiteres positives Ergebnis waren die konstanten Laufzeitunterschiede. Über den gesamten Messzeitraum hinweg wurden keine signifikanten Schwankungen festgestellt. Auch hier war ein wesentlicher Faktor für die geringe Schwankung der Laufzeitunterschiede die Nutzung des privaten 5G-Campusnetzes, welches eine konstante Datenrate gewährleistete. Durch die Kontrolle über das private Netzwerk konnten Störungen durch andere Netzteilnehmer ausgeschlossen werden.

Im aktuellen Versuchsaufbau wurden die Signale im Campusnetz direkt an das 5G-Gateway gesendet, von wo aus sie in das ST 2110-Netzwerk eingespeist und zu einem Bildmischer oder weiteren Wiedergabegeräten weitergeleitet wurden. Dieses Vorgehen kann als eine Form von Edge Computing betrachtet werden, bei der die Verarbeitung und Weiterleitung der Daten möglichst nahe an der Signalquelle erfolgt. Im Gegensatz dazu hat eine Übertragung zu einem Stream Hub über das globale öffentliche Internet erhebliche Auswirkungen auf die Übertragungszeiten. Dies führt zu zusätzlichen Verzögerungen und potenziellen Paketverlusten. Zudem sind die Übertragungsraten weniger vorhersehbar, da sie von der aktuellen Auslastung des öffentlichen 5G-Netzes und der Netzwerkinfrastruktur abhängen.

Hinsichtlich des Timings im Versuchsaufbau war die PTP-Taktung ein wesentlicher Bestandteil. Die Synchronisation der Komponenten über PTP erwies sich an den Signalschnittstellen des Netzwerks, sowohl am 5G-Gateway als auch an den ST 2110-Gateways und den Switchen, als problemlos möglich und war jederzeit präsent. Das Referenzsignal für den PTP-Takt kann mit GPS gestellt werden. Aufgrund der inkonsistenten Charakteristik der drahtlosen 5G-Übertragung und der aktuellen technischen Einschränkungen ist es derzeit nicht möglich, das PTP-Taktsignal aus dem ST 2110-Netzwerk direkt an die 5G-Komponenten an einem entfernten Standort zu übertragen. Um dennoch eine Synchronisation der Signale sicherzustellen, mussten diese im Nachhinein am Gateway mit einem Zeitstempel versehen werden. Dieser Schritt ermöglicht es, die unterschiedlichen Signalwege zu identifizieren und die Abweichungen durch die inkonsistente Latenz der 5G-Übertragung auszugleichen. Die nachträgliche Synchronisation der Signale erfolgt in der Regel durch das Verzögern der anderen Signale im Netzwerk, bis alle Streams auf demselben zeitlichen Stand sind. Im vorliegenden Versuchsaufbau muss die nachträgliche Synchronisation der Signale über den Virtuoso erfolgen. Das über 5G übertragene Signal kann dort mithilfe des PTP-Zeitstempels aus dem Stream Hub mit dem ST 2110-Signal synchronisiert werden. Dies sorgt dafür, dass die unterschiedlichen Signalwege im SDI-Bildmischer korrekt zusammengeführt werden.

Die Methode des ST 2110-31 Standards nutzt die Informationen aus den Zeitstempeln, die an den Signalquellen durch den PTP-Takt vergeben wurden, um die Signale in einem Puffer zu halten. Insbesondere der Einsatz von Buffern auf der Empfängerseite, wie sie im ST 2110-21-Standard spezifiziert sind, erlaubt es dem Virtuoso, eintreffende Videopakete entsprechend ihrer Zeitstempel neu zu ordnen. So können Datenströme auch bei variablen Latenzen der drahtlosen Übertragung wieder in den gleichen zeitlichen Kontext gebracht werden.

Zusätzlich könnte zukünftig in einem solchen System ein PTP-fähiger IP-Bildmischer anstelle des SDI-Bildmischers eingesetzt werden, der eine direkte Verarbeitung von ST 2110-Signalen ohne SDI-Wandlung ermöglicht. In diesem Szenario würde die Synchronisation der Videodatenströme direkt im Mischer erfolgen, basierend auf den PTP-Zeitstempeln, ohne dass eine Konvertierung auf SDI notwendig wäre. Dadurch könnten Latenzen weiter reduziert und eine präzisere Synchronisation zwischen unterschiedlichen Signalwegen durch den Bildmischer direkt ermöglicht werden. Beispielhaft für ein solches Mischer-System ist die Carbonite Ultra Serie von Ross zu nennen (*Ultrix Carbonite Specifications*, o. J.).

Eine weitere Überlegung für die Zukunft wäre hier ein zweiter Taktgeber an diesem Standort, so dass die ausgehenden Signale bereits mit einem Zeitstempel versehen werden, welcher sich auf ein GPS-Signal bezieht. Dieser könnte sowohl die Komponenten im 5G-Netzwerk als auch im ST 2110 Netz mit einem Zeitstand versorgen. Bedingt durch den Signalweg kommt es zu den genannten höheren Latenzen, was eine Synchronisation der Signale im Nachhinein notwendig macht.

Dennoch ist aufgrund der längeren und inkonsistenteren Latenzen des 5G-Signalwegs weiterhin eine sorgfältige Nachbearbeitung notwendig. Diese erfolgt durch die Einstellung entsprechender Verzögerungen an den Gateways, sodass alle Signale zeitlich aufeinander abgestimmt sind. Obwohl diese Methode aktuell eine praktikable Lösung darstellt, bleibt sie anfällig für unerwartete Latenzschwankungen in der 5G-Übertragung und erschwert eine Live-Produktion.

4.5.6 Redundanz

Eine hohe Produktionssicherheit ist im professionellen Broadcast-Bereich unerlässlich, weshalb die Implementierung effektiver Redundanzstrategien ein Ziel des Versuchsaufbaus darstellte. Um eine durchgehende Signalverfügbarkeit sicherzustellen und Ausfallzeiten zu vermeiden, müssen alle Signale redundant im Netzwerk verteilt werden können. Die Redundanz gewährleistet, dass auch bei einem Ausfall einzelner Komponenten oder Übertragungswege der Sendebetrieb fortgesetzt werden kann, ohne dass es zu Beeinträchtigungen in der Qualität oder Verfügbarkeit der übertragenen Inhalte kommt.

Die Auswertung des Versuchs hat gezeigt, dass alle Komponenten des Netzwerks in der Lage waren, die Audio-, Video- und Metadatenströme redundant zu verteilen. Gleichzeitig wurde jedoch

festgestellt, dass die Möglichkeit zur redundanten Signalverteilung flexibel gehandhabt werden kann. In Szenarien, in denen eine Einsparung von Netzwerkressourcen gewünscht ist, kann auf die Redundanz verzichtet werden. Dies kann nach den Produktionsanforderungen abgewogen werden.

4.5.7 Anwendung

Zuletzt gehörte es zu den Zielsetzungen, die Produktionsmöglichkeiten des Systems zu evaluieren und herauszufinden, inwiefern sie Vorteile für die praktische Anwendung bieten und bestehende Workflows vereinfachen. Moderne Broadcast-Produktionsumgebungen stehen vor der Herausforderung, immer flexibler und effizienter zu arbeiten, um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Mit der Versuchsdurchführung haben sich einige Vor- und Nachteile für den Einsatz der 5G-Drahtlostechnik in Produktionen herauskristallisiert.

Zunächst ist es offensichtlich, dass die Verwendung von 5G-Netzwerkausrüstung die Flexibilität bei Produktionen erhöht und die Einrichtungszeit durch die Verlegung von Kabelwegen reduziert. Wenn sich die Kameras während der Produktion bewegen (kontinuierlich oder vorübergehend), ist die Verkabelung von Kameras oft hinderlich und die Drahtlostechnologie bietet hier klare Vorteile. Durch die drahtlose 5G-Übertragung können Kameras und andere Produktionsgeräte ohne physische Verkabelung flexibel im Studio oder vor Ort platziert werden. Es muss hier allerdings zusätzlich der Übergang von verschiedenen 5G-Funkzellen beachtet werden, wenn die Abdeckung mehrere solcher Zellen erfordert. Hier liegt die Gefahr in einem Verbindungsabbruch bei einem Wechsel der 5G-Zugangspunkte.

Insbesondere mit den vorliegenden Komponenten ist die Installation und Bedienung des 5G-Equipment durch Fachpersonal an Veranstaltungsorten erleichtert. Bei Bedarf kann schnell zwischen Übertragungsmodi oder sogar Übertragungszielen gewechselt werden. Diese Flexibilität ermöglicht es, den Workflow an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Produktion anzupassen. Mit den 5G-Technologien und IP-basierten Produktionsumgebungen müssen Produktionsmittel nicht mehr nur auf eine Produktionsart ausgerichtet sein, sondern können flexibel an Situationen angepasst werden. Dazu trägt auch die Signalverteilung von einzelnen Elementardatenströmen mit ST 2110 bei.

Wie bereits in Kapitel 4.5.1 ausgeführt liegt die Schwierigkeit eher in der Planung und Integration eines solchen Systems, insbesondere des 5G-Netzes. Die konstante und vorhersehbare Datenrate konnte im Versuch nur durch die Nutzung eines privaten 5G-Campusnetzes erreicht werden. Für Mitarbeiter bedeutet dies, dass die hohe Übertragungsqualität und Zuverlässigkeit nur in Umgebungen garantiert werden kann, in denen ein eigenes 5G-Netzwerk vorhanden ist. Die Nutzung öffentlicher 5G-Netze hingegen birgt Einschränkungen. Die Datenrate und Übertragungsqualität

4 Praktische Untersuchung der Technologien

sind in öffentlichen Netzen unvorhersehbar und abhängig von der aktuellen Netzwerkauslastung, was zu Schwankungen und Störungen in der Übertragung führen kann.

Auch wenn der Einsatz der Low Latency SST Übertragung überraschend positive Ergebnisse erzielt hat, sind die Laufzeitunterschiede über 5G immer noch erheblich. Dies stellt insbesondere bei Echtzeit-Produktionen eine Herausforderung dar. Produktionsmitarbeiter:innen müssen daher zusätzliche Schritte unternehmen, um die Latenzunterschiede im Nachhinein auszugleichen, was den Workflow verlangsamen und die Komplexität der Signalverarbeitung erhöhen kann.

Insgesamt zeigt sich, dass die zusätzliche Integration von 5G-Komponenten in bestehende Netzwerke keine große Herausforderung für das operative Geschäft darstellen sollte und die flexible Nutzung der Technologie einige Vorteile mit sich bringt. Betrachtet man den Workflow allerdings als Ganzes, inklusive der Planung und Integration der Netzwerke, bringt dies einen Mehraufwand mit sich. Da dieser Aufwand nur einmalig kalkuliert werden muss, ist hier eine Abwägung der Kosten zu dem Nutzen notwendig.

5 Zukunftsaussichten

Die Versuchsauswertung hat gezeigt, dass die Kombination aus 5G-Technologie und IP-basierten Systemen wie ST 2110 bereits heute vielfältige Möglichkeiten in der Broadcast-Produktion bietet. Trotz der bestehenden Herausforderungen, wie der höheren Latenz und der fehlenden direkten Taktungsmöglichkeit des 5G-Transmitters, sind die erzielten Ergebnisse vielversprechend und eröffnen einen Ausblick auf zukünftige Anwendungen.

Da die Tests gezeigt haben, dass die Übertragungssicherheit und Qualität in einem privaten 5G-Campusnetz konstant und vorhersehbar sind, besteht in der Zukunft die Möglichkeit, solche Netze weiter auszubauen und gezielt für Broadcast-Produktionen zu nutzen. Dadurch könnten Produktionsfirmen unabhängig von öffentlichen Netzbetreibern eine sichere und zuverlässige 5G-Übertragungsinfrastruktur schaffen, was auch die Implementierung fortgeschrittener Synchronisations- und Redundanzmechanismen erleichtern würde. Denkbar ist hier auch die vermehrte Nutzung von Netzwerk-Slicing, um Priorisierungen von Datenströmen aus der Broadcast-Anwendung innerhalb der öffentlichen 5G-Netze zu schaffen. Diese gezielten Netzwerkressourcen würden die Übertragungssicherheit und -qualität ermöglichen.

Auch die vereinzelt Komponenten werden hier immer weiterentwickelt. Aus dem Versuch ist hervorgegangen, dass einzelne Funktionen der Hersteller für IP-basierte Produktionen beworben werden, aber in der Praxis nicht immer funktionieren. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass sich hier in Zukunft immer mehr Möglichkeiten auftun und Funktionen implementiert werden. Der Trend hin zu möglichst flexiblen Workflows und Remote-Produktion ist in der Branche ganz klar zu sehen. Das inkludiert nicht nur die klassischen Broadcastproduktionen, sondern auch die Umsetzung kleiner Produktionen für Live-Streams. Die hohe Bandbreite und geringe Latenz von 5G ermöglichen die Durchführung solcher Remote-Produktionen. Produktionsmitarbeiter:innen könnten von zentralen Standorten an der Produktion teilnehmen. Da die Signale bei einer Übertragung über 5G ohnehin komprimiert vorliegen, sind weitere Workflows, welche die Verarbeitung und Verbreitung dieser komprimierten Signale beinhalten, ein weiterer Schritt in flexiblere Produktionsmethoden. Damit bietet sich eine Verlagerung in Cloud-basierte Arbeitsweisen an, was nicht nur die Flexibilität und Mobilität bei der Content-Erstellung steigern würde, sondern auch die Produktionskosten erheblich reduzieren, da weniger Personal und Equipment vor Ort benötigt werden. Gleichzeitig eröffnet die Verbindung mit Cloud-Diensten neue Möglichkeiten für die Zusammenarbeit: Video- und Audiosignale können in der Cloud gespeichert, bearbeitet und nahezu gleichzeitig an verschiedene Plattformen verteilt werden.

Die im Versuch aufgezeigte Möglichkeit, 5G-Signale direkt in das ST 2110-Netzwerk einzubinden, könnte in der Zukunft erweitert werden. Mit Fortschritten in der 5G-Technologie können neue Produktionsmittel wie Drohnen, Smartphones und mobile Kameras nahtlos in die Arbeitsabläufe

5 Zukunftsaussichten

integriert werden. Reporter:innen könnten beispielsweise mit ihrem Smartphone von jedem Ort aus Live-Übertragungen in Broadcast-Qualität ermöglichen. Durch 5G können Smartphones direkt in die Produktionsumgebung eingebunden werden, ohne auf externe Infrastruktur angewiesen zu sein. Dies erlaubt eine flexible Berichterstattung und schnellere Reaktionszeiten bei aktuellen Ereignissen. In einer vollständig IP-basierten Produktionsumgebung könnte das Smartphone nicht nur als Kamera, sondern auch als Steuerungs- und Kommunikationsmittel fungieren. Produktionsmitarbeiter könnten über speziell entwickelte Apps den Produktionsablauf verfolgen, Kameras aus der Ferne steuern oder direkt mit dem Produktionsteam kommunizieren.

Die 5G-Technologie hat das Potenzial, den Broadcast-Bereich grundlegend zu verändern und eine Vielzahl neuer Produktionsmethoden und -werkzeuge zu ermöglichen. Von der verbesserten Integration von Drohnen und Smartphones über Remote-Produktionen bis hin zur Einbindung von neuen Steuerungsmöglichkeiten. Die Zukunft wird zeigen, inwiefern diese Möglichkeiten durch fortschreitende 5G-Entwicklungen in die Praxis umgesetzt werden können.

6 Fazit

Es wird immer deutlicher, dass IP-basierte Übertragungssysteme die konventionellen Produktionsmethoden in der Broadcast-Produktion ablösen werden.

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass die Integration von 5G-Technologie in IP-basierte Broadcast-Produktionsumgebungen, insbesondere in Kombination mit dem ST 2110-Standard, Potenzial für die Weiterentwicklung der Produktionsprozesse bietet. Durch die Verwendung von ST 2110 können stabile, flexible und qualitativ hochwertige Signalverbindungen realisiert werden, wobei auch die Einbindung komprimierter Mediendatenströme über entsprechende Gateways problemlos möglich ist. Damit wird es möglich, unterschiedlichste Signalquellen, von Kameras bis zu Audio-Geräten, flexibel in das Produktionsnetzwerk einzubinden und sowohl unkomprimierte als auch komprimierte Datenströme mit hoher Effizienz zu verarbeiten.

Die Versuche haben verdeutlicht, dass 5G-Komponenten in einem kontrollierten, privaten Campusnetz zuverlässig eingesetzt werden können, wobei konstante und vorhersehbare Datenraten ohne sichtbare Qualitätsverluste erreicht wurden. Dies zeigt, dass die hohe Übertragungskapazität von 5G, auch wenn sie im aktuellen Setup nicht vollständig ausgereizt wurde, die Anforderungen an flexible und mobile Produktionsmethoden erfüllen kann. Hervorzuheben ist die Entwicklung der Low Latency Protokolle. Dass diese Weiterführung bestehender Protokolle und Techniken einen Workflow positiv beeinflussen, hat der Einsatz von diesen mit den Haivision Komponenten klar gezeigt. Durch diese Möglichkeiten rückt ein Einsatz für den tatsächlichen Live-Betrieb in deutliche Nähe. Ein weiterer Vorteil der 5G-Integration zeigte sich in der Möglichkeit, Redundanzstrategien umzusetzen. Im Versuchsaufbau konnten alle Signale redundant im Netzwerk verteilt werden. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Produktionssicherheit, da der Betrieb auch bei einem Ausfall einzelner Übertragungswege oder Komponenten fortgesetzt werden kann.

Gleichzeitig offenbarten die Tests jedoch auch einige wesentliche Herausforderungen. Eine der größten Hürden für den Einsatz von 5G-Technologie in professionellen Produktionsumgebungen ist die höhere Latenz im Vergleich zu kabelgebundenen Verbindungen. Zwar konnten durch den Einsatz von Low-Latency-Protokollen die Latenzen im privaten Campusnetz reduziert werden, dennoch blieben sie messbar höher als in einer reinen SDI- oder IP-basierten Übertragung. Für Echtzeit-Anwendungen, wie Live-Übertragungen, stellt dies noch eine Herausforderung dar, da selbst geringfügige Verzögerungen die Qualität der Produktion beeinträchtigen können. Zusätzlich ist die fehlende Möglichkeit, den 5G-Transmitter direkt in die Taktung einzubinden, ein kritischer Punkt. Durch eine nachträgliche Synchronisation der Signale mithilfe des PTP-Zeitstempels aus dem ST 2110-fähigen Gateway können diese Herausforderungen teilweise gelöst werden. Hier muss nach dem spezifischen Produktionsszenario und die Anforderungen an Echtzeit-Über-

tragungen abgewägt werden. Die Nutzung öffentlicher 5G-Netze birgt weitere Herausforderungen. Während der Einsatz eines privaten Campusnetzes die Kontrolle über die Datenrate und Netzwerkauslastung ermöglicht, ist die Übertragungsqualität in öffentlichen 5G-Netzen weit weniger vorhersehbar. Sie hängt stark von der Auslastung des Netzes und der Anzahl der Nutzer in einem bestimmten Gebiet ab. Dies führt zu Schwankungen in der Bandbreite und Latenz, was die Zuverlässigkeit der Signalübertragung beeinträchtigen kann. Für professionelle Broadcast-Produktionen, die auf eine konstante und stabile Übertragung angewiesen sind, stellt dies ein erhebliches Risiko dar. Die Möglichkeit, Quality of Service (QoS) im öffentlichen Netz nach den spezifischen Anforderungen der Broadcast-Produktion zu konfigurieren, ist derzeit noch stark eingeschränkt, was die Planung und Durchführung von Produktionen erschwert. Dies macht den Betrieb eines privaten 5G-Campusnetzes in der Regel zur bevorzugten Lösung, erfordert jedoch zusätzliche Investitionen und technisches Know-how.

Insgesamt zeigt sich, dass die Kombination von 5G-Technologie und ST 2110 in der Lage ist, moderne Produktionsumgebungen zu bereichern und die Workflows zu vereinfachen. Die Vorteile liegen vor allem in der höheren Mobilität und Flexibilität bei der Möglichkeit zur drahtlosen Übertragung. Dies macht 5G zu einer attraktiven Ergänzung für IP-basierte Produktionssysteme. Allerdings wird die erfolgreiche Implementierung stark davon abhängen, wie die bestehenden Herausforderungen – insbesondere hinsichtlich der Latenz, Synchronisation und Abhängigkeit von privaten Campusnetzen – in Zukunft gelöst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die grundlegenden technischen Voraussetzungen für die Integration bereits vorhanden sind. Jedoch sind weitere Entwicklungen, insbesondere im Bereich der Latenzreduzierung, Synchronisation und Qualitätskontrolle, notwendig, um die Technologie optimal nutzen zu können. Das beinhaltet auch nationale bzw. globale Entwicklungen in der Netzabdeckung sowie Möglichkeiten für Quality of Service innerhalb öffentlicher Netze, sodass Betriebe nicht nur auf private Netze für eine fehlerfreie, stabile Übertragung angewiesen sind. Mit Weiterentwicklung der Technologie können zukünftig weitere Produktionsmethoden und Möglichkeiten für die Content-Erstellung eröffnet werden. Dazu gehört insbesondere die Einbindung neuer Produktionsmittel in die Arbeitsabläufe – z.B. Drohnen oder Smartphones.

Die kommenden Jahre werden entscheidend dafür sein, wie flexibel, effizient und qualitativ hochwertig Broadcast-Produktionen in einer zunehmend IP-basierten und drahtlosen Zukunft gestaltet werden können. Für Produktionsmitarbeiter:innen bedeutet dies, dass 5G bereits jetzt eine wertvolle Ergänzung für ihre Arbeitsprozesse darstellen kann.

Literaturverzeichnis

3GPP. (2022a, August 8). *5G System Overview*. <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>

3GPP. (2022b, Dezember 15). *Non-Public Networks (NPN)*. <https://www.3gpp.org/technologies/npn>

3GPP. (2023a, Juni 5). *Edge Computing*. Edge Computing. <https://www.3gpp.org/technologies/edge-computing>

3GPP. (2023b, Juli 10). *5G Network slice management* [5G Network slice management]. <https://www.3gpp.org/technologies/slice-management>

Baun, C. (2022). *Computernetze kompakt: Eine praxisorientierte Einführung für Studium und Beruf* (6. Auflage). Springer Vieweg.

Bundesumweltministeriums. (o. J.). *Welche Frequenzen nutzen die 5G-Netze?- BMUV - FAQ*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Abgerufen 2. August 2024, von <https://www.bmu.de/FA1144>

Cisco Application Centric Infrastructure—Cisco ACI Multi-tier Architecture White Paper. (o. J.). Cisco. Abgerufen 12. August 2024, von <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/application-centric-infrastructure/white-paper-c11-742214.html>

Haivision. (o. J.). *Unlocking the Potential of 5G for Live Broadcast Production*. haivision.com

Haivision. (2018, Oktober 17). *Secure Reliable Transport Protocol—Technical Overview*. Abgerufen 30. Juli 2024, von <https://github.com/Haivision/srt?tab=readme-ov-file>

Haivision. (2024). *Broadcast Transformation Report—The state of technology adoption in the broadcast industry* (Broadcast Transformation Report, S. 18) [Broadcast Transformation Report]. Haivision.

IEEE. (2019, November 7). *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE Std 1588-2019*. IEEE.

NMOS Technical Overview. (o. J.). Nmos. Abgerufen 20. August 2024, von https://specs.amwa.tv/nmos/branches/main/docs/Technical_Overview.html#introduction

Obermann, K., & Horneffer, M. (2013). *Datennetztechnologien für Next Generation Networks: Ethernet, IP, MPLS und andere*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

Schmidt, J., & Schmidt, U. (2023). *Digitale Film- und Videotechnik: Eine Einführung für Medientechnik und Filmhochschulen* (4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Hanser.

Schmidt, U. (2021). *Professionelle Videotechnik: Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotchnik in SD, HD, UHD, HDR, IP* (7., aktualisierte und erweiterte Auflage). Springer Vieweg.

Schreiner, R. (2019). *Computernetzwerke: Von den Grundlagen zur Funktion und Anwendung* (7., aktualisierte Auflage). Hanser.

Scott Shoaf & Marc Bernstein. (2006, Juni 1). *Introduction to IGMP for IPTV Networks*. Juniper Networks.

Shafi, M., Molisch, A. F., Smith, P. J., Haustein, T., Zhu, P., De Silva, P., Tufvesson, F., Benjebbour, A., & Wunder, G. (2017). 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(6), 1201–1221.

SMPTE. (o. J.-a). *SMPTE ST 2110: State of the Standard and Real-world Implementation Challenges*. Abgerufen 22. August 2024, von <https://www.smpte.org/webcast-events/smpte-st-2110-state-of-the-standard-and-real-world-implementation-challenges>

SMPTE. (o. J.-b). *SMPTE ST 2110—Society of Motion Picture & Television Engineers*. Abgerufen 5. August 2024, von <https://www.smpte.org/standards/st2110>

SMPTE. (2017, September 18). *SMPTE ST 2110-30:2017 -Professional Media Over Managed IP Networks: PCM Digital Audio*.

SMPTE. (2020, Dezember 9). *SMPTE ST 2059-2:2021—Profile for Use of IEEE-1588 Precision Time Protocol in Professional Broadcast Applications*. SMPTE.

SMPTE. (2022a, März 28). *SMPTE ST 2110-10:2022—Professional Media Over Managed IP Networks: System Timing and Definitions*.

SMPTE. (2022b, März 31). *SMPTE ST 2110-22:2022—Professional Media Over Managed IP Networks: Constant Bit-Rate Compressed Video*.

SMPTE. (2022c, Dezember 14). *SMPTE ST 2110-20:2022—Professional Media Over Managed IP Networks: Uncompressed Active Video*.

SRT and SST Transport Protocols: Understanding the Differences. (2023, Dezember 20). Haivision Blog. Abgerufen 30. Juli 2024, von <https://www.haivision.com/blog/all/srt-and-sst-transport-protocols-understanding-the-differences/>

Südwestrundfunk. (2023, Oktober 12). *Implementierung einer MoIP-basierten Test- & Staging-Regie in Baden-Baden*. SWR.

Technische Produktionsrichtlinie zur Herstellung von Fernsehproduktionen für ARD, ZDF und ORF. (2016, November). IRT. <https://www.ard.de/die-ard/TPRF-HDTV-2016-Technische-Richtlinien-zur-Herstellung-von-Fernsehproduktionen-in-HDTV-100.pdf>

The 3GPP's System of Parallel Releases. (o. J.). 3GPP. Abgerufen 20. August 2024, von <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases>

Trick, U. (2023). *5G: Die Mobilfunknetze der 5. Generation* (2nd ed). De Gruyter Oldenbourg.

Ultrix Carbonite Specifications. (o. J.). Ross Video. Abgerufen 23. September 2024, von <https://www.rossvideo.com/live-production/production-switchers/ultrix-carbonite/ultrix-carbonite-specifications/>

What Is Network Orchestration? (o. J.). Cisco. Abgerufen 20. August 2024, von <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/what-is-network-orchestration.html>

www.black-box.de, B. B. D. G. (o. J.). *8021 - SFP vs. SFP+ vs. QSFP: Was ist der Unterschied?* Black Box. Abgerufen 23. September 2024, von <https://www.black-box.de/de-de/page/45245/Information/Technische-Ressourcen/black-box-erklaert/lan/Unterschied-zwischen-SFP-und-QSFP>

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorstehende Bachelorthesis mit dem Titel

„Integration von 5G-Mobilfunktechnologie in eine ST 2110 IP-basierte Produktionsumgebung für Live-TV Multikamera Produktionen“

selbstständig ohne fremde Hilfe gefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang

Der Anhang enthält den Broadcast Transformation Report 2024, durchgeführt von Haivision, sowie nähere Informationen zum Versuchsaufbau. Dazu gehören die Systemskizze, die IP-Adressliste sowie die Ergebnisse der Laufzeitunterschiede.

Der Broadcast Transformation Report ist im Anhang mit den für diese Arbeit relevanten Statistiken enthalten. In der digitalen Version kann dieser in Gänze gefunden werden.

HAIVISION

BROADCAST TRANSFORMATION REPORT

THE STATE OF TECHNOLOGY ADOPTION IN THE BROADCAST INDUSTRY

haivision.com



KEY BROADCAST TRANSFORMATION TRENDS



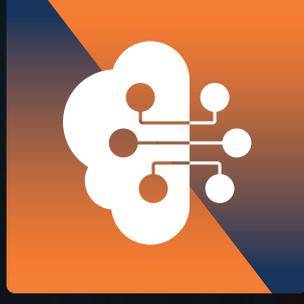
SRT IS THE MOST WIDELY ADOPTED TRANSPORT PROTOCOL

68% of respondents use SRT for live video transport, with 67% of those surveyed using the HEVC codec in their broadcast contribution workflows.



5G TAKES HOLD IN BROADCAST PRODUCTION

74% of broadcasters already use or plan to use 5G for broadcast contribution. 46% anticipate using 5G with private networks.



CLOUD IS EVERYWHERE BUT ON-PREM STILL RULES

84% of broadcasters use at least some cloud-based technology, but only 22% use it for more than half of their current workflow elements.



ARTIFICIAL INTELLIGENCE MAKES AN IMPACT

60% predict AI is the technology that will have the biggest impact on the broadcast industry in the next 5 years, with 49% planning to or already using AI in their workflows.



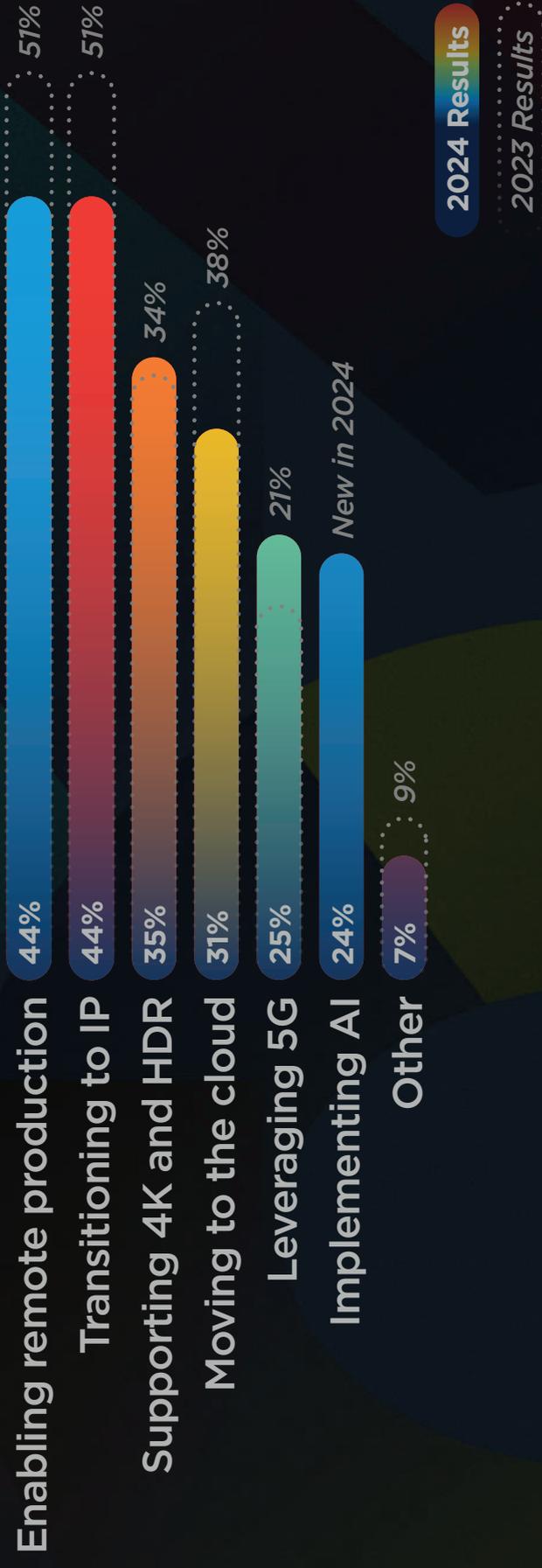
CELLULAR TRANSPORT IS NOW MAINSTREAM

60% of broadcasters currently use 3G, 4G, LTE, or 5G for live video contribution, making cellular the most popular network for transport after the internet (80%).

BROADCAST INDUSTRY TOP TECHNOLOGY PRIORITIES

Broadcasters responded that both enabling remote production (44%) and transitioning to IP (44%) are their key technology priorities. Compared to the 2023 report, Enabling Remote Production, Transitioning to IP and Moving to the Cloud all declined by 7% suggesting that many organizations have already executed on these technology priorities.

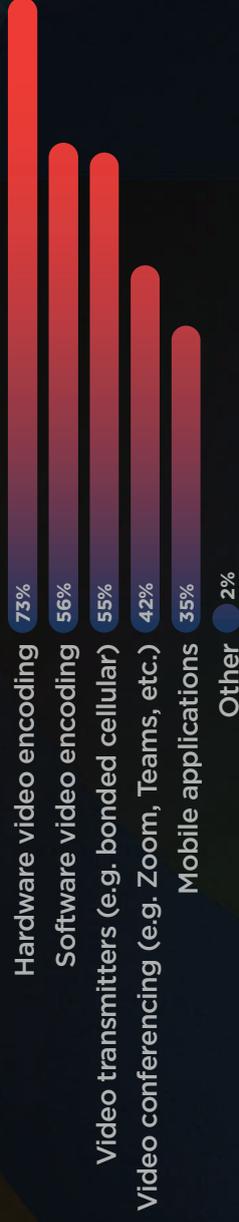
In the next 12 months, what are your organization's top technology priorities?



LIVE VIDEO CONTRIBUTION: ENCODING & CODECS

Live video contribution is the critical first step in remote production workflows, which was cited as a top priority in this year's findings. This year's report highlights broadcasters' mixed approach to contribution, using a blend of hardware encoders, transmitters, and software to contribute video into their live productions. While hardware encoding leads at 73%, approximately half of the respondents opt for software video encoding (56%) and video transmitters (55%), showcasing a reliance on a combination of solutions.

What solutions do you use for broadcast contribution?



73%

of respondents use **hardware video encoding**, followed by software and video transmitters.

LIVE VIDEO CONTRIBUTION: TRANSPORT NETWORKS

In 2024, the internet was selected by the respondents as the most popular option for video transport, followed by cellular networks and fiber.

Cellular network usage is a new addition to this year's report which combines all cellular network responses - 5G, 3G, 4G, and LTE. A breakdown of the types of cellular networks our respondents are using shows that most (44%) are leveraging all types, which has increased since last year's report (33%). Additionally, 15% are using 5G only which is an increase of 5% over last year's survey.

Satellite usage remained steady from last year's report, and fiber increased by 4%.

80% of respondents use **internet** for video transport, followed by **cellular networks** at 60%.

How do you transport live video for contribution?



Cellular Network Transport



IP ADOPTION

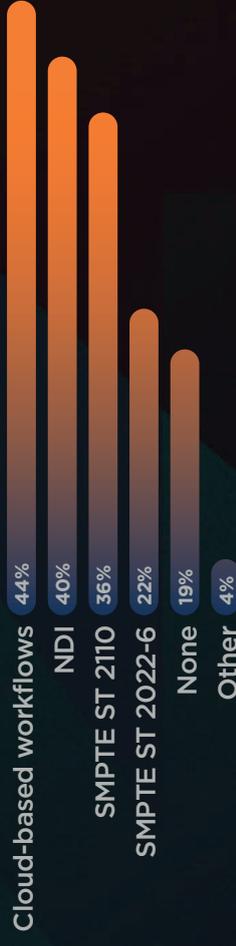
While more than half (58%) of broadcast professionals have implemented IP and cloud-based broadcast infrastructure, a substantial amount (86%) of those surveyed continue to use SDI. As highlighted earlier in this report, 44% of broadcasters identified transitioning to IP as a top technology priority, aligning with the industry's ongoing evolution in broadcast technologies.

A significant portion of this year's respondents employ cloud-based workflows (44%), an increase from 35% in 2023. However, this is not the only IP networking technology broadcasters rely on; besides cloud-based workflows, respondents indicated the use of other IP technologies, mainly NDI (40%) and SMPTE ST 2110 (36%).

What is your video infrastructure based on?



What IP networking technologies do you currently use within your production facilities?



TOP 3

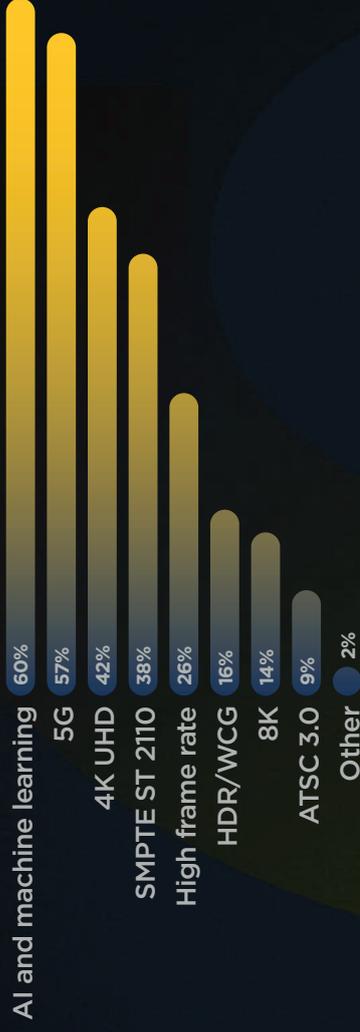
IP networking technologies in 2024 include **cloud-based workflows**, **NDI**, and **SMPTE ST 2110**.

EMERGING TECHNOLOGIES: OVERVIEW

For years now, 5G has led as the technology likely to have the biggest impact on broadcast. New this year, AI and machine learning were chosen as the technology that is most likely to have the biggest impact on broadcast production in the next five years. AI and machine learning grew by 17% to 60% as compared to last year's survey (43% in 2023), while 5G remains as a strong runner-up at 57%.

The other technologies remained steady within a couple of percentage points from last year, however the number of respondents citing HDR dropped by 5% and ATSC 3.0 dropped by 10%.

Which 3 technologies do you think will have the biggest impact on broadcast production in the next 5 years?



60%

of broadcasters surveyed anticipate **AI and machine learning** technology to have the biggest impact on broadcast production, closely followed by **5G** at 57%.

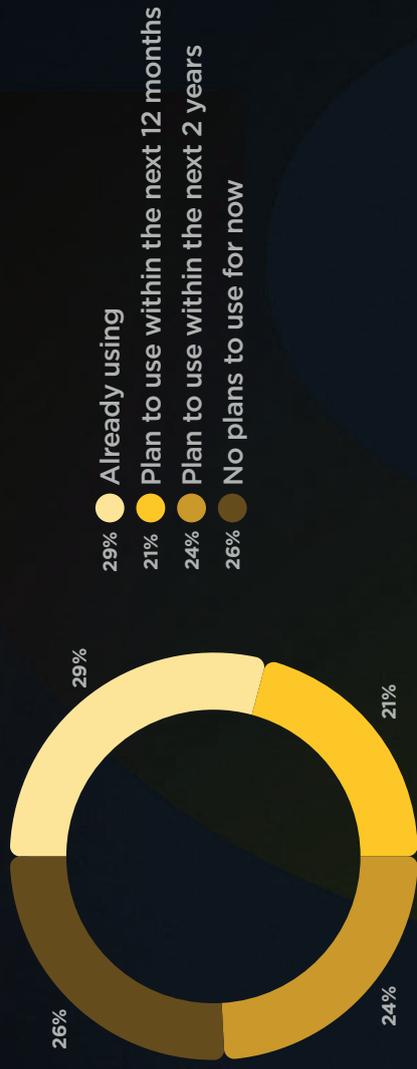
EMERGING TECHNOLOGIES: 5G

Regarding 5G adoption timeframes, 74% of broadcasters already use or plan to use 5G for broadcast contribution within the next two years.

More specifically, 29% of respondents are already using 5G for broadcast contribution, a 9% increase from last year's survey.

Regarding the types of 5G networks respondents use for live video contribution, 43% answered Public Network, 22% cited Private/Non-Public Network, and 12% selected Public Network with Network Slicing. 24% of respondents are using All Network Types for live video contribution over 5G.

What is your timeframe for using 5G for broadcast contribution?



What types of 5G networks are you/do you plan on using for live video contribution?



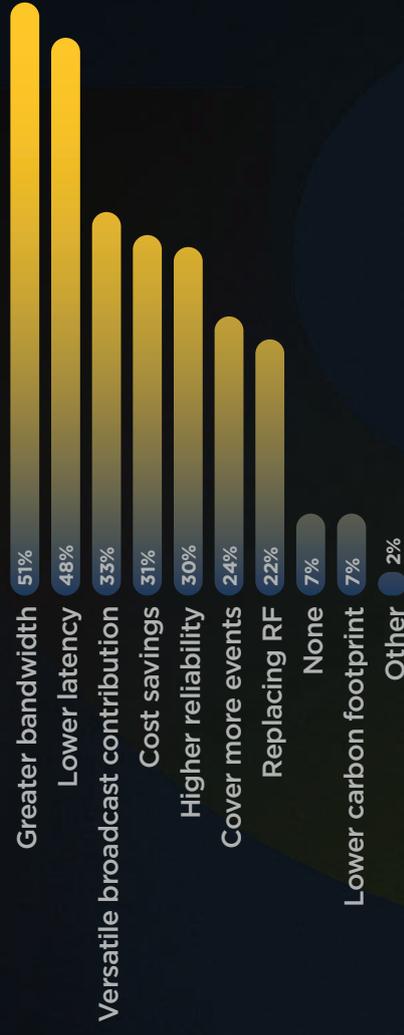
74%
of broadcasters expect to use 5G within the next two years.

EMERGING TECHNOLOGIES: 5G

This year's data indicates that 5G will be one of the most impactful technologies in broadcast production. Greater Bandwidth (51%) and Lower Latency (48%) are both touted as the top benefits 5G can offer within live production workflows. These percentages are relatively unchanged since last year's survey.

The 5G benefits with the biggest change compared to last year were Cost Savings and Covering More Events which each grew by almost 5%.

What are the top 3 benefits you anticipate 5G can offer your live production workflows?

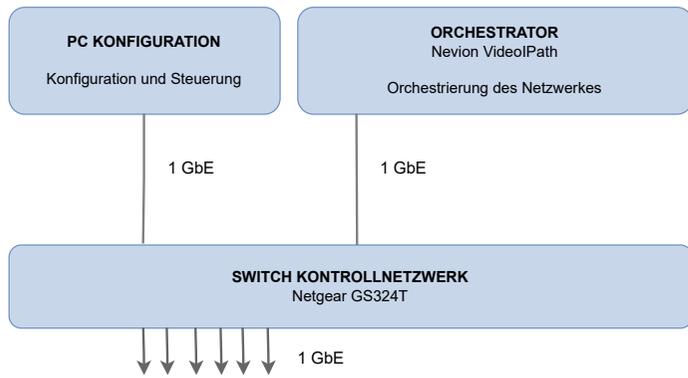


51%

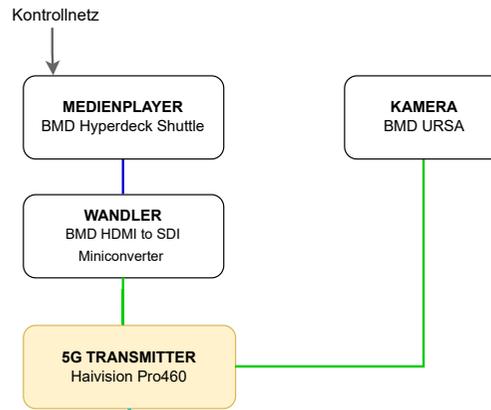
of broadcasters indicate that the most **impactful benefit** of **5G is greater bandwidth**; **lower latency** was next at **48%**.

Anhang B

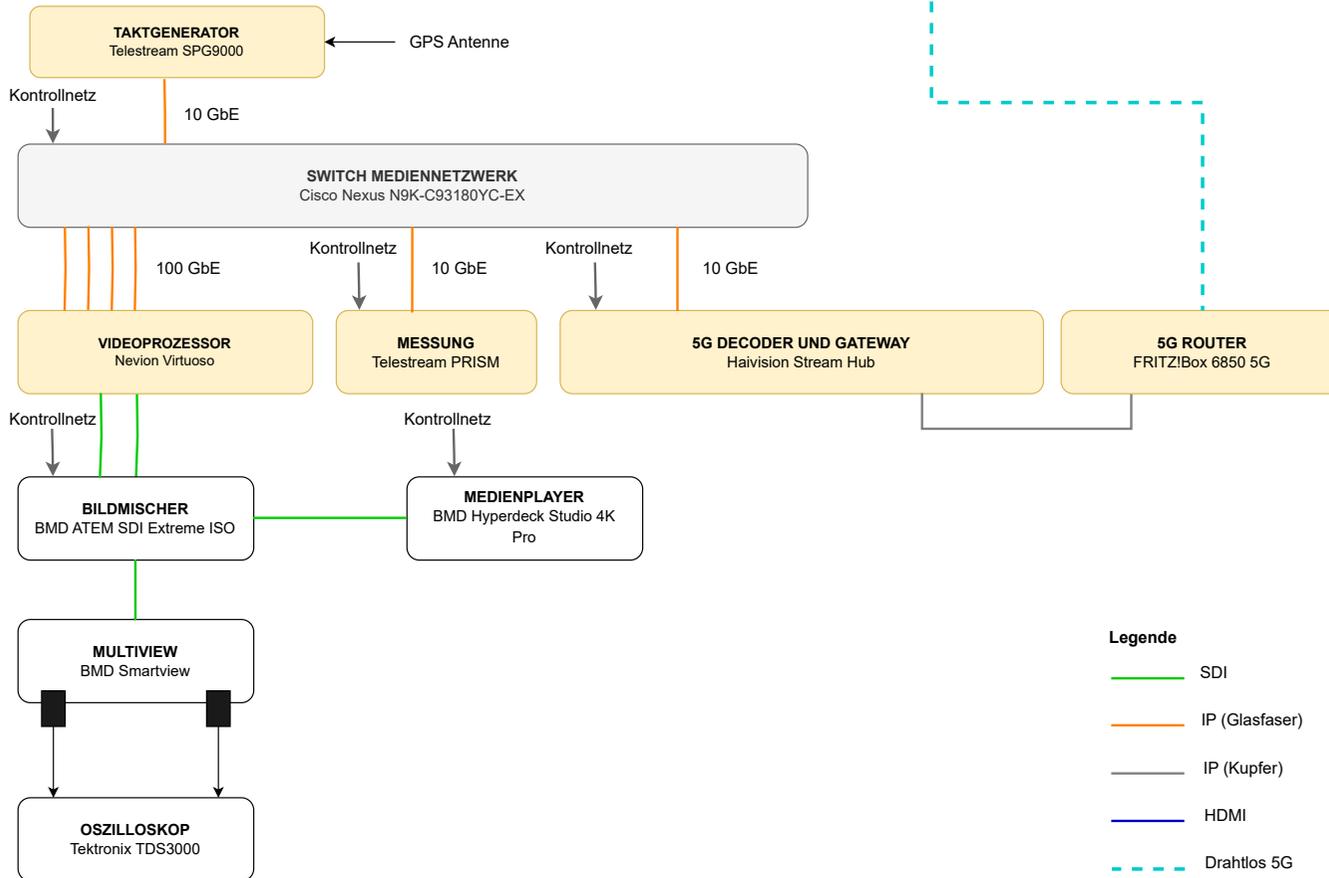
STEUERUNG / ORCHESTRATION



REMOTE STANDORT



ZENTRALE KOMPONENTEN



IP-Adressliste

Bezeichnung	Gerät	Beschreibung	Medien-Netzwerk	IP-Adresse	Subnetzmaske
CTRL-SW	Netgear Switch	Kontrollnetzwerk	Control	192.168.38.214	255.255.255.0
V-SW-SP	eMerge Switch	Mediennetzwerk	Control	192.168.38.208	255.255.255.0
V-SW	Cisco Switch	Mediennetzwerk statisches Routing	Control	192.168.38.206	255.255.255.0
IP-GW	Virtuoso	Media Node	Control	192.168.38.215	255.255.255.0
IP-GW	Virtuoso	Media Node	Mediennetz	10.1.1.1	255.255.255.0
ORCH	VideoIPath	Orchestrator	Control	192.168.38.217	255.255.255.0
PTP	SPG9000	PTP Taktgenerator	Control	192.168.38.207	255.255.255.0
PTP	SPG9000	PTP Taktgenerator	Takt	172.18.0.100	255.255.255.0
MESS	PRISM	Videomessgerät	Mediennetz	192.168.39.160	255.255.255.0
5G-GW	StreamHub	5G Gateway	Control	192.168.38.165	255.255.255.0
5G-GW	StreamHub	5G Gateway	Mediennetz	192.168.39.165	255.255.255.0
5G-GW	StreamHub	5G Gateway	5G Netz	192.168.120.165	255.255.255.0
5G-TRANSM	Pro460	5G Transmitter	Control	192.168.38.140	255.255.255.0
5G-TRANSM	Pro460	5G Transmitter	5G Netz	192.168.120.10	255.255.255.0
ROUTER	Fritz!Box 6850 5G	5G Router	Control	192.168.38.1	255.255.255.0
ROUTER	Fritz!Box 6850 5G	5G Router	5G Netz	192.168.120.9	255.255.255.0
PLAY-01	Hyperdeck Studio	Medienplayer Zentralkomponenten	Control	192.168.38.160	255.255.255.0
PLAY-02	Hyperdeck Shuttle	Medienplayer Remote	Control	192.168.38.161	255.255.255.0
BIMI	ATEM SDI Extreme ISO	Bildmischer	Control	192.168.38.170	255.255.255.0

Messung Laufzeitunterschiede mit Oszillator

vom 11.09.2024

SDI-ST2110	
Messung	Delta t [ms]
1	36
2	40
3	52
4	36
5	44
6	36
7	36
8	40
9	24
10	40
11	40
12	36
13	36
14	40
15	36
16	40
17	36
18	36
19	24
20	40
Mittelwert	37,4

SDI-5G (SST VBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	760
2	780
3	760
4	780
5	780
6	760
7	760
8	740
9	760
10	780
11	760
12	760
13	780
14	760
15	760
16	760
17	760
18	740
19	760
20	760
Mittelwert	763

SDI-5G (SST CBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	560
2	540
3	540
4	540
5	540
6	540
7	540
8	540
9	540
10	540
11	540
12	540
13	560
14	540
15	540
16	540
17	540
18	540
19	540
20	540
Mittelwert	542

SDI-5G (SST LL CBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	80
2	80
3	100
4	80
5	80
6	80
7	80
8	80
9	80
10	80
11	80
12	80
13	80
14	80
15	80
16	80
17	80
18	80
19	80
20	80
Mittelwert	81

2110-5G (SST VBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	780
2	780
3	760
4	780
5	780
6	780
7	780
8	780
9	760
10	800
11	780
12	780
13	780
14	780
15	780
16	780
17	780
18	780
19	780
20	780
Mittelwert	779

2110-5G (SST CBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	488
2	480
3	480
4	480
5	488
6	488
7	480
8	480
9	480
10	488
11	480
12	488
13	488
14	480
15	480
16	480
17	488
18	480
19	488
20	488
Mittelwert	483,6

2110-5G (SST LL CBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	32
2	40
3	40
4	40
5	40
6	40
7	40
8	40
9	40
10	40
11	32
12	40
13	48
14	32
15	40
16	48
17	48
18	40
19	40
20	40
Mittelwert	40

Messung Laufzeitunterschiede mit Oszillator inkl. UDP-Traffic am Stream Hub
vom 11.09.2024

2110-5G (SST VBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	800
2	792
3	800
4	800
5	800
6	808
7	792
8	808
9	800
10	824
11	784
12	800
13	792
14	800
15	800
16	808
17	792
18	800
19	808
20	800
Mittelwert	800,4

2110-5G (SST CBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	496
2	504
3	504
4	504
5	512
6	504
7	496
8	496
9	504
10	504
11	504
12	512
13	504
14	504
15	504
16	496
17	504
18	520
19	504
20	504
Mittelwert	504

2110-5G (SST LL CBR)	
Messung	Delta t [ms]
1	96
2	80
3	80
4	88
5	80
6	104
7	80
8	88
9	88
10	88
11	80
12	88
13	88
14	104
15	80
16	80
17	88
18	80
19	104
20	80
Mittelwert	87,2