

INSTITUT FÜR INFORMATIK  
DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Bachelorarbeit

# Live-Fernsehproduktion über LAN

Möglichkeiten und Grenzen von Video/Audio over  
Ethernet in einer professionellen Rundfunkanstalt

Roy Singer



INSTITUT FÜR INFORMATIK  
DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Bachelorarbeit

# Live-Fernsehproduktion über LAN

Möglichkeiten und Grenzen von Video/Audio over  
Ethernet in einer professionellen Rundfunkanstalt

Roy Singer

Aufgabensteller: Prof. Dr. Dieter Kranzlmüller  
Betreuer: Dr. Nils gentschen Felde  
Tobias Guggemos

Dipl.-Ing.(FH) Jürgen Tauer  
Prof. Dr. Elmar Hergenröder  
Bayerischer Rundfunk

Abgabedatum: 18.08.2016



Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

München, 18.08.2016

.....

*(Roy Singer)*



## Abstract

Die Durchführung und Abwicklung von Fernsehproduktionen ist gekennzeichnet von massiven Hardwarekomponenten, die durch eine große Menge von Kabeln miteinander verbunden sind. Aufgrund der physikalischen Beschaffenheit der Kupferkabel ist eine Absetzung von Regie und Veranstaltungsort nicht möglich. Ethernet Komponenten bieten nunmehr Möglichkeiten, durch bereits bestehende Netzwerke Audio- und Videostreams zu erzeugen, mit denen eine Liveproduktion abgewickelt werden kann. Daraus sind Protokolle, wie beispielsweise Audio-Video Bridging, RAVENNA und SMPTE 2022-x entstanden. Diese bieten allerdings nicht alle Lösungen, die zu einer unterbrechungsfreien Übertragung eines Audio-/Videostreams beitragen. Die Synchronisierung der angeschlossenen Geräte über einen Takt, sowie der Schutz vor Datenkollision und Paketverlust führen hierbei noch zu ungewünschten Signalausfällen. Um die Tauglichkeit von RAVENNA und SMPTE 2022-6 in einer professionellen Sendeanstalt zu bestimmen, wird in dieser Arbeit ein bestehendes Netzwerk des Bayerischen Rundfunks nachgebildet und in diesem Netzwerk eine Audio-/Video over LAN Produktion integriert. Ein vollfunktionsfähiger Gesamtaufbau mit vier HD-Bildsignalen und mehreren Audioquellen, der einer Konzertaufzeichnung ähnelt, wird mittels neuester Technologie via UDP durch ein Netzwerk mit Grundauslastung zu einer Regie übertragen, in der ein sendefähiges Fernsehsignal entsteht. Zusätzlich wird das Netzwerk von 10 Gbit/s in mehreren Szenarien absichtlich zur Auslastung gebracht und die daraus resultierenden sichtbaren und messbaren Daten protokolliert. Darauf aufbauend zeigt sich, dass eine Produktion über Netzwerkstrukturen nicht zu einer hundertprozentigen Sendungssicherheit beitragen kann. Das liegt zum einen an den Spezifizierungen der Protokolle und zum anderen an der Sensibilität der Nutzsignale, die bei einem einzigen Paketverlust schon zu sichtbaren Ausfällen führt. Trotz alledem wird in absehbarer Zeit zunehmend auf Netzwerktechnologie gesetzt werden, um Fernsehsignale zu transportieren und zu verarbeiten. Daran werden neue, noch in Entwicklung befindliche Protokolle, wie TR03, großen Anteil haben. Diese greifen die Vor- und Nachteile von SMPTE 2022-6 und RAVENNA auf und bieten neue Möglichkeiten und Perspektiven für Audio-/Video over LAN.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><u>EINLEITUNG</u></b>	<b>11</b>
1.1	NEUE PRODUKTIONSMETHODEN IM BAYERISCHEN RUNDFUNK	12
1.2	DAS PRODUKTIONSNETZ	12
1.3	AUFBAU DER ARBEIT	14
<b>2</b>	<b><u>TECHNISCHES KONZEPT EINER FERNSEHPRODUKTION</u></b>	<b>15</b>
2.1	KUPFERTECHNOLOGIE	16
2.2	GLASFASERTECHNOLOGIE	17
2.3	SYNCHRONISIERUNG VON AUDIO/VIDEOINHALTEN	18
<b>3</b>	<b><u>NETZWERKTECHNOLOGIEN</u></b>	<b>21</b>
3.1	PRECISION TIME PROTOCOL (PTP)	21
3.1.1	AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE	21
3.1.2	NUTZEN UND PROBLEMATIK	23
3.2	FORWARD-ERROR-CORRECTION (FEC)	23
3.2.1	AUFBAU	23
3.2.2	NUTZEN UND PROBLEMATIK	24
3.3	AUDIO-VIDEO BRIDGING	25
3.3.1	AUFBAU	25
3.3.2	OPTIONALE EINSTELLUNGEN	26
3.3.3	EINSATZ	27
3.4	SMPTE 2022-X	27
3.4.1	AUFBAU	27
3.4.2	VARIANTEN	28
3.4.3	OPTIONALE EINSTELLUNGEN	30
3.4.4	EINSATZ	30
3.5	RAVENNA MEDIA-STREAMS	31
3.5.1	AUFBAU	31
3.5.2	OPTIONALE EINSTELLUNGEN	32
3.5.3	EINSATZ	32
<b>4</b>	<b><u>TESTVERSUCH EINER AUDIO-/VIDEO ETHERNET ÜBERTRAGUNG</u></b>	<b>33</b>
4.1	ZIELE	33
4.2	AUFBAU	33
4.2.1	NETZWERK	34
4.2.2	AUDIO/VIDEO-ETHERNETWANDLUNG	37
4.2.3	VIDEO	39
4.2.4	AUDIO	40
4.2.5	TAKTUNG	41

<b>4.3</b>	<b>MESSEINRICHTUNGEN</b>	<b>41</b>
4.3.1	NETZWERK	42
4.3.2	VIDEO	42
4.3.3	AUDIO	43
4.3.4	AUDIO/VIDEO-DELAY	43
<b>4.4</b>	<b>TESTSZENARIEN</b>	<b>44</b>
4.4.1	TEILGEBIET I (CoS-DISACTIVE, CONSISTENT, INT)	45
4.4.2	TEILGEBIET II (CoS-DISACTIVE, INCONSISTENT, INT)	46
4.4.3	TEILGEBIET III (CoS-ACTIVE, CONSISTENT, EXT)	46
4.4.4	TEILGEBIET IV (CoS-ACTIVE, INCONSISTENT, EXT)	47
<b>4.5</b>	<b>MESSERGESBNISSE</b>	<b>47</b>
4.5.1	ALLGEMEINE BEOBACHTUNGEN	47
4.5.2	VIDEO	48
4.5.3	AUDIO	48
4.5.4	AUDIO/VIDEODELAY	50
4.5.5	NETZWERKTRAFFIC	50
<b>5</b>	<b><u>DISKUSSION</u></b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b><u>FAZIT</u></b>	<b>59</b>
6.1	AUSBLICK	60
6.2	ZUKÜNFTIGE PRODUKTION IM BAYERISCHEN RUNDfunk	61
	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS</u></b>	<b>63</b>
	<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b>66</b>
	<b><u>TABELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b>67</b>
	<b><u>ABKÜRZUNGEN</u></b>	<b>69</b>
	<b><u>ANHANG</u></b>	<b>71</b>
	<b><u>ANHANG A</u></b> <b><u>MESSERGESBNISSE DATENDURCHSATZ</u></b>	<b>73</b>
A.1	ÜBERTRAGENE DATENMENGEN TEILBEREICH I	73
A.2	ÜBERTRAGENE DATENMENGEN TEILBEREICH II	74
A.3	ÜBERTRAGENE DATENMENGEN TEILBEREICH III	76
A.4	ÜBERTRAGENE DATENMENGEN TEILBEREICH IV	77
	<b><u>ANHANG B</u></b> <b><u>ÜBERTRAGENE BROADCASTRAHMEN</u></b>	<b>79</b>
B.1	GESENDETE BROADCASTRAHMEN QUALITÄTSSTUFE 2 MBIT/S	79
B.2	GESENDETE BROADCASTRAHMEN QUALITÄTSSTUFE 50 MBIT/S	79
B.3	GESENDETE BROADCASTRAHMEN QUALITÄTSSTUFE 100 MBIT/S	79
B.4	GESENDETE BROADCASTRAHMEN QUALITÄTSSTUFE 120 MBIT/S	80
B.5	GESENDETE BROADCASTRAHMEN QUALITÄTSSTUFE RAW	80

# 1 Einleitung

Fernsehproduktionen der letzten 60 Jahre waren stets gekennzeichnet von massiven Einzelkomponenten, wie Bildmischer, Kameras, Audiopult etc., die sich aufgrund physischer und herstellerabhängiger Spezifikationen (Stecker Arten, Protokollsprachen) nur schwer miteinander koppeln ließen. Regie und Aufzeichnungsort waren dabei örtlich sehr nah aneinandergebunden um Peripheriegeräte und deren jeweilige Remotepanels betreiben zu können. Die Vernetzung der einzelnen Komponenten erfolgte dann über Kupferkabel mit individuellen Steckverbindungen. Übertragungswege waren abhängig von der Abschirmung und Leitfähigkeit des Kupferkabels. Bei Veranstaltungsorten ohne örtliche Regie wurde auf Übertragungsfahrzeuge gesetzt, spezielle Kraftfahrzeuge mit integrierter Regie und Gerätegestellen. Daraus resultierte ein größerer Aufwand verbunden mit hohen personellen und technischen Kapazitäten, die bei Großveranstaltungen, wie z.B. Sportübertragungen, zu mehr Kosten führte. Auch die genutzten Sendestrecken der örtlich produzierten Signale über eine Satellitenverbindung ließen zusätzliche Kosten entstehen. Im Zuge der Glasfasertechnik entwickelten sich in der Produktion neue Workflows, in denen es möglich war, mehrere Audio- und Bildsignale über ein Lichtwellenleiterkabel zu transportieren. Doch die individuellen Herstellerspezifikationen von Produktionssystemen und der Kostenfaktor bei der Beschaffung und Anmietung von Glasfasertechnik machten eine Entkopplung von Regie und Produktionsort nur bedingt möglich. Ideen für eine Abwicklung über Ethernet gab es bereits Anfang dieses Jahrtausends. So wurde die Übertragung eines einzelnen SDI-Signals über ein ATM-Netz bereits 2001 realisiert [1]. Doch die Etablierung des High-Definition Standards brachte die Entwicklung von netzwerkbasierenden Produktionssystemen ins Stocken. Die enorm erhöhten Datenraten von 1.500 Mbit/s für ein unkomprimiertes Bildsignal ließ die Übertragung mehrerer Signale über eine LAN-Verbindung an ihre Grenzen kommen. Hinzu kommt die Anforderung mehrere Audio- und Steuersignale bidirektional verarbeiten zu können. Ein weiteres Problem der Netzwerktechnik ist die Übertragung zeitkritischer Daten in deterministischer Reihenfolge. Sämtliche Peripheriegeräte in professionellen Studioumgebungen sind abhängig von einem gemeinsamen Taktgeber um die Kopplung vieler Signale zu synchronisieren. Sie werden über einen Taktgenerator in eine gleiche Zeitebene versetzt. Ethernet hingegen sendet je nach Konfiguration und zur Verfügung stehendem Traffic. Durch die mittlerweile preiswerte Möglichkeit Netzwerke mit 10 Gbit/s Bandbreitenspektrum zu integrieren, entwickelten sich daraus neue Standards, die Ansätze klassischer Fernsehstandards mit Netzwerkprotokollen, sowohl proprietär als auch International spezifiziert, koppeln. Mit dem Audio-Video Bridging wurden gleich mehrere Layer-2 basierte Spezifikationen herausgegeben, um eine Grundlage für Audio/Video over Ethernet zu schaffen. Vor allem die für Fernsehproduktion unerlässliche Taktübertragung wurde durch die Hinzunahme vom Precision Time Protocol eingeführt. Dennoch bilden Layer-2 basierte Protokolle, wie beispielsweise AVB, nicht genügend Flexibilität in der Umsetzung von Netzwerkstrukturen. Die in der Bitübertragungsschicht spezifizierten Protokolle ermöglichen keinen Aufbau von Subnetzen und Routingalgorithmen und schränken die Konfiguration von Netzwerken im Gegensatz zu Layer-3 und höher geschichteten Protokollen ein. Mit dem SMPTE 2022-x Standard gibt es zusätzlich nun Protokolle in der Anwendungsschicht, die klare Richtlinien definieren wie SDI (Serial Digital Interface) über Ethernet übertragen wird. Für Audiokomponenten gibt es mehrere Ethernet Spezifikationen, z.B. Dante, AES63 oder RAVENNA. Vor allem Letzteres soll im

## 1.1 Neue Produktionsmethoden im Bayerischen Rundfunk

Multimedialen Bereich zum Einsatz kommen und auch die Übertragung von komprimierten Videostreams ermöglichen.

### 1.1 Neue Produktionsmethoden im Bayerischen Rundfunk

Der Bayerische Rundfunk ist im Zuge struktureller Veränderungen bestrebt, Durchführungen von Live-Events am Standort Funkhaus in der Innenstadt über den Fernsehstandort in Freimann abzuwickeln. Im Funkhaus gibt es derzeit eine Fernsehregie, die täglich für eine Gesprächsaufzeichnung genutzt wird. Die Aufzeichnung und Verarbeitung anderer Produktionen, z.B. klassische Konzertaufführungen können nur in zeitlicher Abstimmung erfolgen. Um auch zeitgleich mehrere Veranstaltungen am Standort Funkhaus durchführen und senden zu können, bedarf es weiterer Regiekapazitäten. Dafür werden auch Lösungen mit einer Abwicklung in Freimann in Betracht gezogen, die auf vorhandene Infrastrukturen zurückgreifen sollen und das Übertragen der Signale mit bestmöglicher Ausnutzung der Ressourcen gewährleisten. Das bedeutet Konzerte und andere Veranstaltungen sollen mit Kameras und Mikrofonen abgegriffen und deren Einzelsignale über eine bestehende Netzwerkstruktur nach Freimann versendet werden, wo daraus ein fernsehtaugliches Signal entstehen soll. Die existierende Netzwerkstruktur könnte dabei ein entscheidender Faktor werden, um Umbaumaßnahmen, große Investitionen in Hardware, sowie Neuverkabelung zu vermeiden. Zukünftig soll dieses Prinzip auch in der Außenübertragung Anklang finden um bei geeigneten Produktionen, wie Sportereignissen, Aufwands- und Übertragungskosten zu minimieren und dem Fernsehzuschauer dennoch den gewohnten Standard zur Verfügung zu stellen. In den letzten Jahren wurde verstärkt auf Übertragungswege über LTE und an Internet angeschlossene W-LAN's über den sogenannten LiveU-Rucksack gesetzt. Es hat sich gezeigt, dass diese Technologien stark von der zur Verfügung stehenden Bandbreite abhängig sind und diese nicht garantiert zugesichert werden kann. Zusätzlich sind diese Methoden abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, Ausbau des LTE und Breitbandnetzes, und durch ihre drahtlose Verwendung auch störanfällig in Latenz und Ausfallsicherheit.

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit aktuellen Ansätzen, professionelle Audio-/Videosignale über Ethernetstrukturen zu transportieren und für Live-Produktionen zu nutzen. Dabei werden sowohl Lösungen, als auch Probleme durchleuchtet. Ein Versuchsaufbau mit den Streamingstandards RAVENNA und SMPTE 2022-6, die beide auf der Anwendungsebene des ISO/OSI Schichtenmodells implementiert sind, werden in einem nachgebildeten Produktionsnetz integriert. Der Versuchsaufbau bildet den Kern dieser Arbeit und verdeutlicht die Vor- und Nachteile höherschichtiger Protokolle. Dieser bildet die Grundlage für ein abschließendes Fazit, ob eine Fernsehproduktion über ein bestehendes Netzwerk zum derzeitigen Zeitpunkt möglich ist, welche Standards bevorzugt werden sollten und welche Umstrukturierungen für eine zukünftige Produktionsart über Netzwerk nötig sind.

### 1.2 Das Produktionsnetz

Das Produktionsnetz bildet die wichtigste Verbindung zum Austausch von senderelevanten Dateien innerhalb jedes Produktionsortes des BR. Jede Abteilung, die zur Produktion beiträgt, hat eine Anbindung an das Netz mit Zugriffsberechtigung für die abteilungsrelevanten Ordner. So werden sowohl Grafiken als auch Animation aus der Abteilung Grafikdesign dem Schnittbetrieb zur Verfügung gestellt. Dieser wiederum hat über das

Produktionsnetz Zugriff auf die Speicherkapazitäten, auf denen digitalisiertes Rohmaterial liegt. Ebenso können über das Produktionsnetz fertige Fernsehbeiträge und Sendungen auf den Senderserver gelegt werden, um diese über das lineare Fernsehen auszustrahlen. Dieses Netz bildet somit die „Aorta“ des Produktionsbetriebes sowohl für den Hörfunk, als auch für das Fernsehen. Die Verwaltung des Produktionsnetzes obliegt der Systemtechnik des BR. An jedem der drei Standorte des Bayerischen Rundfunks in München existiert ein solches Produktionsnetz. Verbunden sind die Standorte mit je 2x 20 GBit/s Duplex Glasfaserleitungen. Davon ist eine Leitung redundant zu anderen. Somit bestehen je Verbindung zwischen zwei Standorten 20 Gbit/s zur produktiven Verwendung. Die Strecke Freimann<->Funkhaus kann im Bedarfsfall auch über Unterföhring abgewickelt werden. Damit ist im Havarie-Szenario bei ungewollten physikalischen Eingriffen auf die direkte Verbindung das Fortbestehen abgedeckt. Diese Glasfaserverbindungen werden über NIMBRA-Switches am jeweiligen Standort abgewickelt und auf die verschiedenen Router und Switches im Haus geleitet. Die interne Vernetzung geschieht über Brocade ICX-Switches/Router mit verschiedenen Funktionen. So dienen einige Brocades als Router auf Layer3-Ebene um den Datenverkehr zu regeln, andere rein zur Signalübertragung verwendete Brocades sind als Layer-2 Switches implementiert.

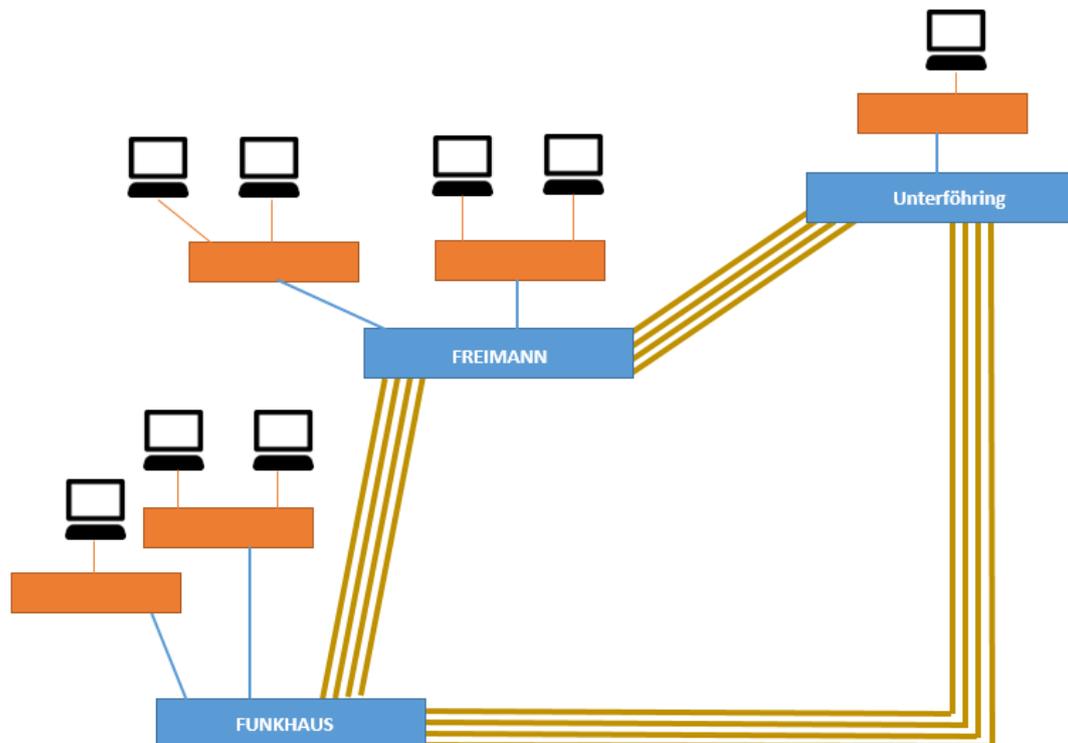


Abbildung 1.2-1 Schematische Darstellung der Vernetzung aller drei Standorte

Verbindungen zwischen verschiedenen Häusern innerhalb eines Standortes werden über die Glasfaser-SFP Module realisiert. Das Netzwerk wird autark und ohne direkten Zugang zum Internet betrieben. Geräte, sowohl Computer als auch Broadcastperipherie, bekommen eine fest zugeordnete IP-Adresse. Diese ist abhängig von Standort und Verwendung. So existieren mehrere Subnetze, die im Bedarfsfall durch eine Tunnelverbindung miteinander gekoppelt werden. Die Verwendung der Subnetze ist in produktionspezifische Bereiche gegliedert, so bilden z.B. Geräte im Fernsehstudio ein eigenes Subnetz, abgegrenzt von Komponenten im Postproduktionsbetrieb. Die Produkti-

### 1.3 Aufbau der Arbeit

onsnetze zwischen den Fernsehstandorten Freimann/Unterföhring sind derzeit noch nicht zusammen mit dem Produktionsnetz Funkhaus in der Innenstadt verwaltet. Im Zuge einer internen Prozessumstrukturierung, der sogenannten Trimedialität, wird derzeit an einer Umsetzung eines Gesamtproduktionsnetzes gearbeitet. Vor allem die Optimierung für den gemeinsamen Datenaustausch zwischen Redaktion, Technik und Produktion ist zentrales Ziel der Zusammenführung. Dazu müssen sämtliche Subnetze hinterfragt und zum Teil neu strukturiert werden. Durch Zusammenlegung von Ressourcen und Abteilungen wird es zur Neubildung von Aufgabenbereichen kommen, in denen ein stetiger Datenaustausch von Nöten ist. So soll der Zugriff auf Videomaterial zentral von jeder Redaktion erreichbar sein, um z.B. auf aufgezeichnete Interviews sowohl für Onlineartikel, als auch für Hörfunkbeiträge zugreifen zu können. Dies erfordert ein Umdenken bei der Rechtevergabe und der Belegung von Subnetzen. Der Versuchsaufbau nimmt die Ansätze des zukünftigen Produktionsnetzes auf und integriert in dieses eine Audio-/Video over Ethernet Übertragung. Dafür werden die Standards SMPTE 2022-6 und RAVENNA genutzt und auf ihre Tauglichkeit in einer professionellen Broadcastumgebung getestet. Über den von der Firma LAWO zur Verfügung gestellten Wandler können die Video- und Audioquellen sowohl per SMPTE 2022-6 als auch über RAVENNA übertragen werden. Das Produkt bietet die Möglichkeit, durch Komprimierung über JPEG 200 Codecs, die Übertragung auf 1 Gbit/s zu reduzieren oder über einen 10GbE Glasfasereinschub unkomprimiert die Audio-/Videoquellen zu übertragen. Das Verhalten der Signale bei einer Überlastung des Netzwerks ist dabei ein zentraler Punkt der Untersuchung, da eine unterbrechungsfreie Übertragung unabdingbar für eine erfolgreiche Umsetzung einer Fernsehproduktion ist. Dazu wurden mehrere Testszenarien erstellt und durch den Versuchsaufbau getestet. Die daraus resultierenden Testergebnisse sind Umfang dieser Arbeit und dienen als praktische Untersuchung für das abschließende Gesamturteil.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 das grundlegende Prinzip einer technischen Umsetzung von Fernsehproduktionen erklärt. Dabei wird auf grundlegende Bedingungen und digitale Standards für eine unterbrechungsfreie Durchführung eingegangen. Im Kapitel 3 werden diese Bedingungen dann mit vorhandenen Spezifikationen die es im ISO/OSI-Schichtenmodell gibt, verknüpft und die daraus resultierenden Probleme erklärt. Abschließend stellt dieses Kapitel drei Technologien vor, die sich in verschiedensten Bereichen etabliert haben und die eine Fernsehproduktion über LAN ermöglichen. In Kapitel 4 wird der Testaufbau erläutert und dessen Durchführung, Messung und Auswertung erklärt. Dabei kommen statistische Auswertungsmethoden zum Einsatz. Auf Grundlage dieser Messwerte wird im Kapitel 5 eine Diskussion der Ergebnisse durchgeführt, etwaige Messfehler in Betracht gezogen und die Auswirkung der Analyse auf zukünftige Produktionen über LAN reflektiert. Abschließend wird in Kapitel 6 ein Fazit formuliert, welches auf den subjektiven Eindrücken der vorhandenen Technologiemöglichkeiten und deren Verhalten im Testaufbau basiert. Auch zukünftige, in Entwicklung befindliche Standards werden für das Fazit in Betracht gezogen und eine Empfehlung für geplante Konzepte mit Audio-/Video over Ethernet gegeben.

## 2 Technisches Konzept einer Fernsehproduktion

Die Technik einer Fernsehproduktion hat sich in den vergangenen 40 Jahren stetig weiterentwickelt. Anfängen von der analogen Verarbeitung von Audio- und Videosignalen bis hin zur Einführung und Etablierung von High-Definition wurden viele Standards eingeführt, die bis heute fester Bestandteil von Broadcastperipherien sind. Zunächst sei das Serial Digital Interface (SDI) erwähnt, das 1989 von der SMPTE eingeführt wurde und die erste professionelle Schnittstelle von digitalem Audio/Video-Signalen in Fernsehstudios markierte. Dabei wird das Videosignal digitalisiert, in einen Datenstrom gepackt und zusätzlich bis zu 8 AES/EBU-Kanäle (Audio Engineering Society/ European Broadcast Union) integriert [2]. AES/EBU ist eine 1985 veröffentlichte Schnittstelle, die digitale Audioströme spezifiziert. AES/EBU beschreibt die Signalverarbeitung von einem Stereokanal (zwei Monokanäle). Sowohl für Hörfunksender als auch für Fernsehanstalten hat sich AES durchgesetzt und bildet die Grundlage weiterer Standards, wie z.B. Multi Channel Audio Interface (MADI). Dieser erlaubt es, bis zu 32 (64-Monospuren) AES-Kanäle über eine kabelgebundene Verbindung zu verschicken [3]. Auch die analoge Audiosignalverarbeitung ist bis heute fester Bestandteil von Broadcastkomponenten z.B. für Kommandoleitungen und externe Audioquellen, z.B. der Einbindung eines Mikrophones. Im Zuge dieser Bachelorarbeit bilden diese Spezifikationen die Grundlage für eine Live-Fernsehproduktion. Weitere seien hierbei außenvorgelassen. Der Großteil aller Hardwarekomponenten im Broadcastbereich kann diese Standards verarbeiten. Sämtliche Hardware wird in Produktionsstudios zentral in einem Geräteraum stationiert. Aufgrund der hohen Stabilitätsansprüche an Audio-/Videoperipherie sind die Produkte mit Hochleistungskernkomponenten ausgestattet und benötigen ausreichend Kühlung. Der benötigte Platzanspruch von Gerätegestellen, sowie die Lautstärke von Lüfter- und Klimatisierungssystemen macht eine Absetzung zu den Arbeitsplätzen notwendig. Die Peripherie wird in Regieräumen, in der die technische und redaktionelle Abwicklung stattfindet, ferngesteuert. Früher waren die Steuerungsschnittstellen herstellerspezifisch mit Mehrpolsteckverbindungen charakterisiert. Durch vernetzte Systeme können immer mehr Broadcastgeräte über IP gesteuert werden. Am Veranstaltungsort bzw. in der Studiohalle sind Kameras und Mikrophone positioniert, die eine Fernsehproduktion akustisch und optisch abgreifen und die Signale zum Geräteraum transportieren.



Abbildung 1.3-1 Konzept Studio 1 Freimann BR

Abbildung 1.3-2 Bildregie Studio 1 in Freimann

Um auch Veranstaltungen, die nicht in Studios von Rundfunkanstalten stattfinden, wie z.B. Konzerte oder Sportereignisse, zu übertragen, werden spezielle Fahrzeuge eingesetzt. Dort ist das Konzept von Geräteraum und Regie vereint. Daraus ergibt sich ein geringeres

## 2.1 Kupfertechnologie

Platzangebot, wodurch Übertragungswagen in der Funktionalität beschränkter sind als Fernsehstudios.



Abbildung 1.3-3 Übertragungswagen des BR



Abbildung 1.3-4 Innenansicht eines Ü-Wagen

## 2.1 Kupfertechnologie

Um die Signale von SDI, AES/EBU, MADI und analogem Audio zu übertragen wurde seit deren Einführung auf Koaxialkabel gesetzt. Diese Kupferkabel transportieren über ihren Innenleiter das Signal [4]. Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Impedanz, die für SDI und MADI Koaxialverbindungen mit 75 Ohm und für AES/EBU 110 Ohm Kabel benötigt [5]. Pro Kabel gibt es die Möglichkeit, ein Bildsignal zu übertragen. Für große professionelle Fernsehproduktionen erhöht dies den Aufwand, da vor allem für verschiedene Videosignale stets ein Kabel pro Quelle benötigt wird. Das Triaxkabel, eine Spezialform des Koaxialkabels, beinhaltet drei voneinander getrennte Innenleiter. Dadurch ist es möglich drei unabhängige Signale über ein Kabel zu übertragen. Aufgrund des hohen Herstellungsaufwands sind Triaxkabel allerdings erheblich teurer als herkömmliche Koaxialverbindungen [6].

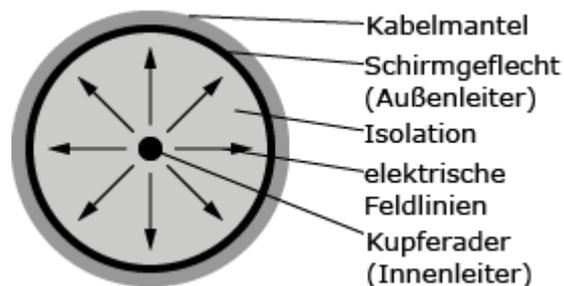


Abbildung 2.1-1 Aufbau eines Koaxialkabels [5]

Die Innenleiter in Koaxialkabeln sind allerdings anfällig für elektromagnetische Störungen. So können bei einer Übertragung von analogem Audio durch externe Störimpulse, z.B. Stromkabel, welches die Audioverbindung physisch kreuzt, Interferenzen entstehen, die sich durch akustisches Brummen bemerkbar machen. Zudem sind sie in ihrer Länge beschränkt. So können HD-SDI und MADI Signale aufgrund der hohen Bandbreite nur bis zu 90m, bei besserer Schirmung auch bis zu 100m übertragen werden [7]. Für AES/EBU und analogen Audio liegt die Länge, auch in Abhängigkeit von der Schirmung, bei etwa 200m. Diese Längeneinschränkung ist mit dem Effekt des Jitters zu erklären. Dabei weicht die optimale Position von Flankenwechseln innerhalb des Datensignals

durch den Widerstand des Koaxialkabels ab (siehe Abbildung 2.1-2). Je größer die Abweichung, desto schwieriger wird es, die Bits zu rekonstruieren [8]. Den Jitter-Effekt kann man in einem Augendiagramm durch entsprechende Messgeräte optisch darstellen.

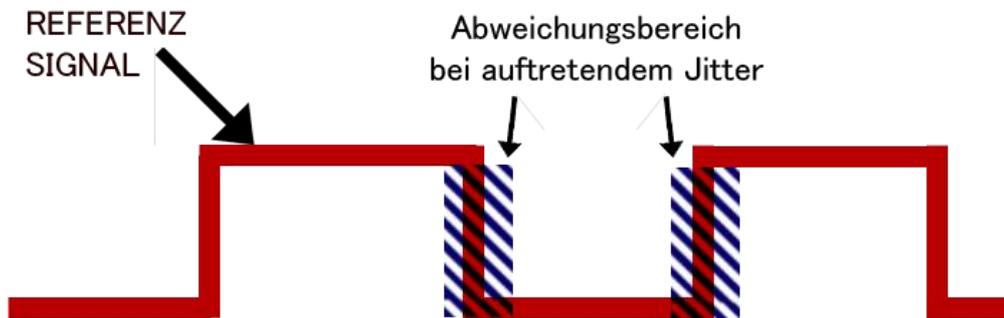


Abbildung 2.1-2 Jitter-Effekt

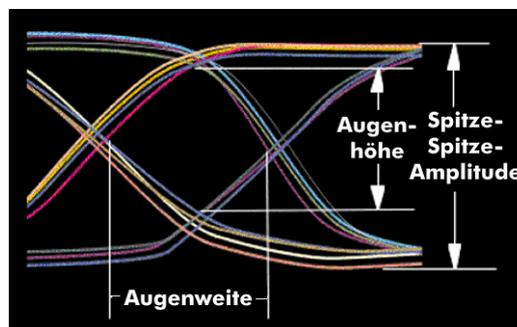


Abbildung 2.1-3 Darstellung des Augendiagramms [9]

Durch digitale Verstärker lässt sich dieser Effekt unterdrücken. Allerdings erfordert diese eine Unterbrechung der Signalführung und zusätzlichen Hardwarekomponenten. Eine Peer-To-Peer Verbindung wäre somit nicht mehr gegeben.

## 2.2 Glasfasertechnologie

Die Einführung von Lichtwellenleiter als Übertragungssystem ermöglichte es, mehrere Signale gleichzeitig und ohne Qualitätsverlust über weiter Strecken zu transportieren. Elektronische Signale werden in Elektronen gewandelt und über den Leiter zum Empfänger transportiert. Dort werden sie wieder in elektronische Signale zurückgewandelt und ausgegeben. Die Bandbreite eines Lichtwellenleiters beträgt bis zu 60 Terahertz [10]. Sie bestehen aus einem Kunststoff und haben einen geringen Durchmesser von 0,1mm. Dadurch sind sie flexibler und erheblich dünner als Koaxialkabel. Im Fasenkern wird das Licht geführt. Um nahezu verlustfrei zu übertragen wird an den Innenwänden das Licht reflektiert.



Abbildung 2.2-1 Aufbau eines Lichtwellenleiters [10]

## 2.3 Synchronisierung von Audio/Videoinhalten

Durch unterschiedliche Wellenlängen in verschiedenen Trägerwellen lässt sich die Anzahl übertragener elektronischer Signale erweitern. Allerdings reagiert ein LWL-Kabel empfindlich auf Biegung. Ab einem bestimmten Biegungsgrad ist der Lichtimpuls unterbrochen und es kommt zu Signalausfällen [11]. In die Glasfaser-technologie wurde in den letzten Jahren investiert und so eine große infrastrukturelle Fläche erzeugt, die überwiegend von Kommunikationsunternehmen genutzt wird. Auch in Fernseh- und Produktionsbetrieben findet die Lichtwellenleitertechnologie großen Anklang. So ist es nun möglich die Regie vom Veranstaltungsort abzusetzen und über große Entfernung abzuwickeln. Bei den Olympischen Winterspielen 2014 in Sotchi nutzten ARD und ZDF erstmals die Möglichkeit über Glasfaserstrecken das Studio vom Abwicklungsort über 1500 m abzusetzen [12]. Die Wandlung der elektronischen Signale in Lichtimpulse ist an zusätzliche Hardware gekoppelt [13], die nur herstellerspezifische Kompaktlösungen bieten. Das bedeutet, dass bei Verwendung von Lichtwellenleitersystemen auf proprietäre Komponenten gesetzt werden muss, z.B. RIEDEL Mediornet [14] oder TELECAST Cop-head [15], die zur Abhängigkeit führen und die Flexibilität von Signalanzahl bis hin zur elektronischen Schnittstelle einschränken. Zusätzlich erfordert Anschaffung, Wartung und Zubehör einen erheblichen kostenintensiven Aufwand, um die komplette Abwicklung einer Fernsehproduktion mit Lichtwellenleitertechnik auszustatten [13].

## 2.3 Synchronisierung von Audio/Videoinhalten

Die Synchronisierung von Audio- und Videosignalen ist wichtig für die störungsfreie Nutzung aller Quellen im Gesamtverbund. Durch das Zeilensprungverfahren wurde es notwendig, Videoquellen den zeitlichen Beginn einer Zeile vorzugeben. Das hat vor allem damit zu tun, dass asynchrone Videosignale einen vertikalen Versatz zueinander haben. Das bedeutet, wenn von einer Quelle auf eine andere geschnitten oder geblendet wird, springt das resultierende Bild und hat sichtbare schwarze Zeilen, je nach Lage des Taktes [16]. Bei analogen Videokomponenten wurde der Takt als Impuls in die sogenannte Austastlücke, nicht sichtbare vertikale Zeilen, integriert. Er gab den Rhythmus vor, wann ein Halbbild beginnt. In der horizontalen Austastlücke (links und rechts neben dem Bild) wurde ebenfalls ein Burst übertragen, der den Beginn einer Zeile markierte [17]. Im Zeitalter von SDI werden Beginn und Ende von Zeilen durch Bitworte übermittelt (siehe Abbildung 2.3-1). Als SAV (Start of Active Video) und EAV (End of Active Video) werden diese Bitworte bezeichnet. Bei mehreren Videoquellen ist es aber genauso wie in der analogen Bildübertragung notwendig, dass diese Bitworte identisch sind. Da der analoge Blackburst als Takt sehr leistungsfähig war, wurde er auch zur Synchronisierung von digitalem Video genutzt [16].

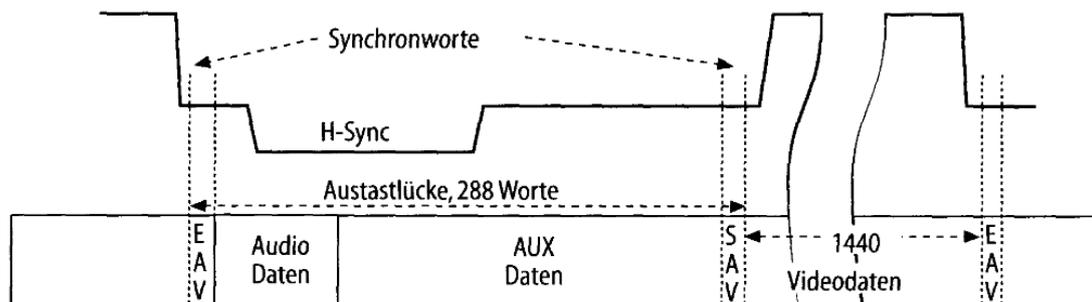


Abbildung 2.3-1 Aufbau eines SDI-Signals nach [18]

Erstellt wird dieser Takt von speziellen Taktgebern, die mehre Synchronsignale in der Zeitebene produzieren können. Für digitale Audioverarbeitung hat sich der sogenannte Wordclock etabliert. Er wird notwendig da analoge Frequenzen abgetastet und digitalisiert werden [7]. AES/EBU-Signale überliefern ihre Taktinformation in 4 Bit Worten. Für MADI-Signale ist es möglich, extern zu referenzieren, das bedeutet, dass die Hardware, die ein MADI-Signal verarbeitet, einen separaten Takteingang verwendet.

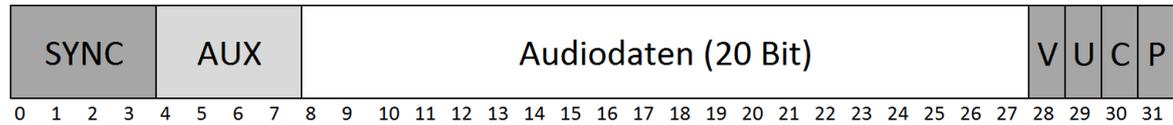


Abbildung 2.3-2 AES/EBU Datenstrom mit Sync-Information

In Produktionsanstalten ist der Taktgeber zentral positioniert und an ihm sind weitere Taktgeber in einer Baumstruktur angeschlossen. Somit können Taktinformationen über mehrere Räume hinweg übertragen werden.



## 3 Netzwerktechnologien

Die Limitierung von Koaxialkabeln, sowie die ausschließlich proprietäre Nutzung von Lichtwellenleitern, machen die Nutzung von Ethernetstandards für Produktionsbetriebe interessant. Durch die große Vielfalt von Netzwerken und der zur Verfügung stehenden Protokolle arbeiten gleich mehrere Arbeitsgruppierungen an einer Umsetzung, A/V-Signale in Ethernetframes zu packen, ohne deren eigentlichen Standard, also SDI und AES/EBU, zu verändern. Bestrebungen professionelle Audio/Videosignale über Netzwerk zu übertragen gab es bereits Anfang der 2000er Jahre. Aufgrund der damals limitierten Möglichkeiten, preiswerte Netzwerke mit großer Bandbreite aufzubauen, war die Übertragung von nativem SDI-Signalen mit 270 Mbit/s problematisch. ATM stellte erstmals nötige Parameter zur Verfügung, wie Quality of Service oder Cell Delay Variation zur exakten Bestimmung von Laufzeitunterschieden, um die hohen Anforderungen der SDI-Übertragung in einem Netzwerk zu gewährleisten. Durch die Skalierbarkeit der Datenrate war es machbar, die benötigte Kapazität zu konfigurieren und zusätzlich weiteren Datentransfer zu ermöglichen [1]. Spezielle SDI-ATM Wandler ermöglichten die Generierung eines SDI-Streams im ATM. Diese Technik war jedoch auf einen Kanal begrenzt und mit der Einführung von High Definition mit einer Datenrate von 1500 Mbit/s und der Fokussierung und Etablierung von Ethernet, gilt diese Methode mittlerweile als überholt. Broadcasthersteller wie SONY entwickelten im Folgenden proprietäre Standards, die für die Verwendung von SONY-Systemen optimiert waren, wie z.B. NXL-IP55 [19]. Diese dienen allerdings nur als Kompaktlösung und eignen sich nicht für zukunftsweisende Produktionsbetriebe, die völlig auf Ethernet aufbauen. Mit SMPTE 2022, Audio-Video Bridging und RAVENNA gibt es mittlerweile verschiedene Spezifikationen, die auf bereits vorhandene Protokolle und Mechanismen der Netzwerktechnik aufbauen, um den hohen Anforderungen der Audio-/Videoübertragung gerecht zu werden und Probleme wie Zeitsynchronisierung und Ausfällen zu entgegenen. Diese seien im Folgenden genauer erläutert.

### 3.1 Precision Time Protocol (PTP)

Im Zuge der Übertragung zeitkritischer Signale über Ethernet ist es zunehmend wichtiger geworden, sämtliche Geräte in einem Netzwerk miteinander zu synchronisieren, um deterministische Übertragungen von Paketen beim Empfänger zu realisieren. Bereits 1985 gab es mit dem Network Time Protocol (NTP spezifiziert in RFC 9505 [20]) von David L. Mills einen ersten Standard, der es ermöglichte Uhren über Netzwerkstrecken zu verschicken und damit Geräte im Millisekunden Bereich zu synchronisieren [21]. Daraus leitete sich später das Simple Network Time Protocol (SNTP) ab. Gerade in Bereichen wie Automatisierungstechnik oder Multimediestreams ist eine genauere Übertragung von Uhrzeiten von größter Bedeutung, da sie zur Impulswiedergabe genutzt wird. 2002 wurde mit dem Precision Time Protocol vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) der erste Standard auf den Markt gebracht, der es ermöglichte Uhren im Mikrosekunden Bereich über LAN-fähige Komponenten zu verschicken [22].

#### 3.1.1 Aufbau und Funktionsweise

PTP wird in der Anwendungsschicht des ISO/OSI Schichtenmodells angesiedelt und nutzt Multicastpakete über UDP um seine Taktinformationen auszutauschen [23]. Der große

### 3.1 Precision Time Protocol (PTP)

Vorteil besteht in der Größe der Nachrichten zum Taktaustausch, die nur minimale Anforderungen an das Netzwerk stellen [21]. Im PTP gibt es zwei unterschiedliche Arten von Uhren, den Master und die Slaves. Es ist zwingend notwendig, dass sich an jedem Gerät im Verbund, welches auf die Zeitsynchronisierung angewiesen ist, eine Uhr befindet. Aufgrund des Ausgleichs von Laufzeitunterschieden ist es in großen Netzwerken von Nöten, das alle Uhren im System nicht mehr als  $\pm 10$  Mikrosekunden voneinander abweichen [24]. Deshalb wird empfohlen, auf GPS-getaktete Uhren zurückzugreifen, die an allen Standorten eingesetzt werden. Zunächst wird in einer Initialisierungsphase die genaueste Uhr im System über den Best Master Clock Algorithmus bestimmt [21] und als Master festgesetzt. Alle anderen Clocks werden als Slave initialisiert. Der Synchronisierungsvorgang erfolgt nun in zwei Schritten. Zum einen sendet der Master eine Sync-Message, in der sich eine geschätzte Uhrzeit der angeschlossenen Geräte befindet und misst zeitgleich den Zeitpunkt der Verschickung. In einer zweiten Nachricht übermittelt der Master die gemessene Uhrzeit, an der die erste Message zum Slave erfolgte. Der Slave misst die jeweilige Zeit, an der die Sync-Message und der Kontrollwert eintreffen und berechnet daraus den Offset der Lokalen Uhr zum Master [21]. Damit haben Master und Slave theoretisch die gleiche Uhrzeit, jedoch sind die Verzögerungen im Netzwerk noch nicht mit einberechnet, da der Offset aus der Information in der Nachricht und der lokalen Uhr ermittelt wird. Dies erfolgt ähnlich zur ersten Phase. Der Slave verschickt einen Delay-Request und speichert den Zeitstempel bei Ausgang der Nachricht. Wenn der Master den Request erhält, misst er die Empfangszeit und schickt diese mit einer neuen Nachricht an den Slave. Der Unterschied zwischen Ausgangszeitstempel des Slaves und gesendeter Empfangszeit beim Master ist der Laufzeitunterschied. Der Slave kann nun seine lokale Zeit mittels Offset und Verzögerung an den Master anpassen [25]. Bei diesem Prinzip ist es extrem wichtig, dass Hin- und Rückweg die gleiche Verzögerung besitzen [21].

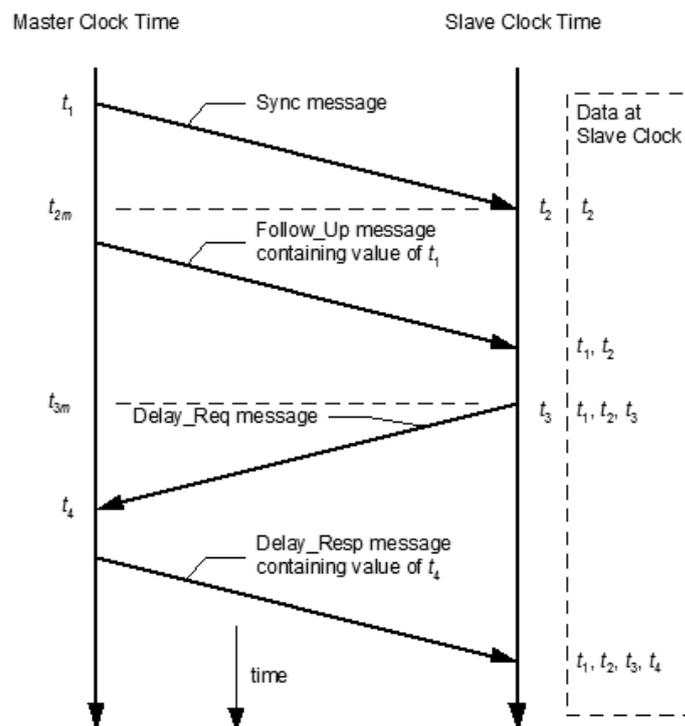


Abbildung 3.1-1 Prinzip der Synchronisierung von Uhren über PTP [26]

Da es in komplexen Netzwerken mit Switches und Routern zu unterschiedlichen Laufzeiten kommen kann, wurde für diese Geräte eine Boundary Clock eingeführt. Das Prinzip ist dabei ähnlich wie bei einer Direktverbindung zwischen Master und Slave. Die Boundary Clock in Switches und Routern synchronisiert sich als Slave zum Masterclock und dient an den Ausgängen als neuer Masterclock für die angeschlossenen Slaves. Somit können Uhren in einer Baumstruktur im Netzwerk aufgebaut werden [21]. Um durch unterschiedliches Transferaufkommen im Netzwerk eine dauerhafte Synchronität zu gewährleisten, erfolgt die Uhrensynchronisierung in fest definierten Abständen.

### 3.1.2 Nutzen und Problematik

Für den Broadcastbereich gibt es mit dem PTP nun erstmals die Möglichkeit, die notwendige Übermittlung der Taktinformation hinreichend in einem Ethernetnetzwerk zu übermitteln. Aufgrund der Verwendung von PTP-fähigen Geräten ist es möglich, mehrere Medienspezifische Uhren in den Komponenten zu verwenden, die sich alle auf einer Zeitebene befinden. So kann die Generierung von BlackBurst für Videoperipherie und Wordclock für Audiokomponenten lokal erfolgen und auch nicht PTP-fähige Endkomponenten damit getaktet werden [27]. Allerdings ist die Verwendung von PTP nur für kleinere Netzwerke optimiert [28]. Bei einem sehr komplexen Netzwerk mit vielen Switches und Routern ist eine ständige Synchronisierung notwendig um Laufzeiten auszugleichen. Dabei kann es durch Datenkollision und Routingverzögerung zu Ungenauigkeiten in der Informationsübertragung kommen. [25]. Zudem bedingt die Verwendung von GPS-Uhren eine infrastrukturelle Vernetzung von Außenantenne mit Indoorperipherie. Dies mag bei Produktionen in der Außenübertragung unproblematisch sein, da Fahrzeuge mit integrierten Gerätegestellen im Freien stehen, allerdings ist es aufwendig in Gebäudekomplexen eine Verkabelung zwischen Antenne und genutzter Hardware herzustellen [24], da professionelle Rundfunkanstalten auf zentralgelegene Taktgeber setzen, die im Inneren von Gebäuden stationiert sind, erfordert die Verwendung von GPS weitreichende Umstrukturierungsmaßnahmen sowohl in der Leitungsführung, als auch in der Geräteauswahl.

## 3.2 Forward-Error-Correction (FEC)

Die Forward-Error-Correction, zu Deutsch Vorwärtsfehlerkorrektur, ermöglicht es, Fehler, die bei der Übertragung digitaler Signale entstanden sind, auszugleichen. Sie wurde bereits in der Funkübertragung verwendet und findet auch in Ethernetsystemen Anwendung.

### 3.2.1 Aufbau

Bei FEC werden den Nutzdaten sogenannte Redundanzdaten hinzugefügt, die beim Empfänger ausgewertet und Fehler behoben werden können [29]. Bits oder Bitsequenzen werden zusätzliche Paritätsbits angefügt, die aus einer XOR-Verknüpfung der zu senden Bits errechnet wird. Kommt es bei der Übertragung der Pakete zu Verlusten von Bits, können diese beim Empfänger durch Berechnung von Paritätsbits und richtig übertragenen Bits neu errechnet werden [30].

### 3.2 Forward-Error-Correction (FEC)

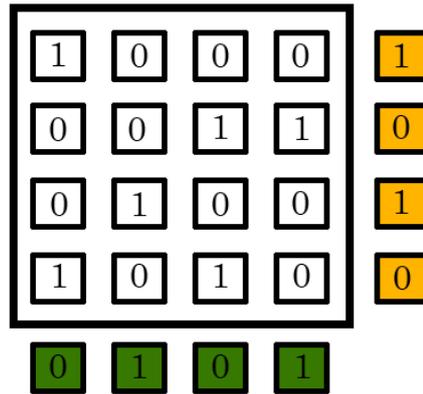


Abbildung 3.2-1 XOR-Verknüpfung horizontal und vertikal

In Abbildung 3.2-1 wird das Prinzip der FEC deutlich. Die Nutzdaten (in Weiß) werden horizontal und/oder vertikal XOR verknüpft und das Ergebnis an das zu übertragene Paket angefügt. Der Empfänger kann durch Berechnung der XOR Verknüpfung einen Fehler vertikal und horizontal lokalisieren und beheben. Von Vorteil gegenüber anderen Mechanismen ist, dass die Fehlerkorrektur beim Empfänger vorgenommen werden kann, ohne dass es zum erneuten Senden der Daten kommen muss. Die Vorwärtsfehlerkorrektur gibt es mit vielen Varianten. So ist es möglich, nur Fehler vertikal auszubessern, dies führt zur Schonung von Ressourcen beim Empfänger [31]. Die Größe der Bits in einem Paket lässt sich variieren, was zu ungewünschten Nebeneffekten führen kann:

Angenommen  $n$ -Bits werden horizontal verschickt:

- $n+1$  Bits werden verschickt  $\rightarrow$  benötigte Bandbreite erhöht sich um  $1/n$
- je kleiner  $n$ , umso größer die benötigte Bandbreite
- Vergrößerung von  $n$  erhöht die Abspielverzögerung (da Berechnung länger dauert)
- Ein größeres  $n$  kann dafür sorgen, dass mehr Bits verloren werden, da nur ein Fehler erkennbar [32]

#### 3.2.2 Nutzen und Problematik

FEC bietet die verzögerungsärmste Methode, fehlerhafte Bits bei der Übertragung zu korrigieren [33]. Allerdings benötigt es aufgrund der Übertragung zusätzlicher Bits mehr Bandbreite, was mehr Netzwerkjitter führen kann. Es schützt nur vor Bitfehlern in Paketen, nicht vor Verlusten von ganzen Paketen aufgrund von Kollisionen [30]. Speziell für die Anwendung von Audio/Video-over Ethernet führt es zu zusätzlichem Delay beim Empfänger, da die Paritätsbits erst ausgewertet werden müssen [34]. In der Netzwerkkonfiguration sollte deshalb explizit darauf geachtet werden, dass keine FEC benötigt wird, um Audio/Video zu übertragen [35]. Peter Hollaczek hat die Auswirkung von verschiedenen Verfahren der Forward-Error-Correction auf ein SD-SDI Signal gemessen und dabei Verzögerungsunterschiede bei Erhöhung von Paritätsbits festgestellt (siehe Abbildung 3.2-2)

FEC Verfahren	Ohne FEC	DBL 32	DBL 1024	PT 32-10	PT 32-25	PT 1024-10	PT 1024-25
Adaptionslatenz	1,8 ms	2,8 ms	80 ms	1,2 ms	4,8 ms	440 ms	180 ms
Bandbreite	295,7 Mbps	591,3 Mbps	591,3 Mbps	325,2 Mbps	369,6 Mbps	352,2 Mbps	369,6 Mbps

Abbildung 3.2-2 Auswirkung von FEC Verfahren auf Verzögerung/ Bandbreite (Peter Hollecsek [33])

Zudem ist trotz FEC keine fehlerfreie Übertragung garantiert. Sollten in einem Paket mit integrierter FEC mehr als ein Bitfehler auftreten, ist das Signal unbrauchbar und führt unweigerlich zu einem Ausfall in der Wiedergabe der Mediendateien. Die für HD-SDI erhöhte Datenrate wirkt sich bei FEC erheblich auf die genutzte Bandbreite aus, was in bestehenden Netzwerken zu mehr Verzögerung und Kollisionen führt [34].

### 3.3 Audio-Video Bridging

Audio-Video Bridging (AVB) ist ein 2010 von der IEEE 802.1 spezifizierter Standard zur Übertragung zeitkritischer Audio/Video-Daten in einem Netzwerk. Es wird lizenzfrei angeboten und bietet durch verschiedenste Protokolle die Möglichkeit einer unterbrechungsfreien Übertragung von Audio/Video-Streams.

#### 3.3.1 Aufbau

AVB ist ein auf Layer-2 basierender Standard, dessen Hardwarekomponenten alle AVB-fähig sein müssen. Die jeweiligen Switches in einem solchen Netzwerk nennt man AVB-Bridge, da sie die Komponenten miteinander verbinden. Eine Übertragung von Audio und Video innerhalb von AVB nennt man Stream. In solch einem Netzwerk gibt es:

**Talker:** Hardwarekomponente, die einen Stream sendet.

**Listener:** Empfangsgerät eines AVB-Streams.

**Controller:** Zur Konfiguration und Sicherstellung der Übertragung, sowie zur Verknüpfung von Talker und Listener vorhandene Einheit.

Die Komponenten spannen eine AVB-Domäne auf, die sogenannte AVB-Cloud. Jede AVB-fähige Hardware verfügt über die entsprechenden Protokolle, sich an einer solchen Domäne anzumelden und sowohl als Talker, als auch als Listener zu fungieren.



Abbildung 3.3-1 AVB-Dienste [36]

**Grand Master Clock Selection:** Jedes Gerät im Verbund wird an eine Uhr angeschlossen. Das ist ein GPS gesteuerter Zeitgeber, der die Komponenten miteinander synchronisiert. Durch den Best-Master-Clock Algorithmus wird der Haupttaktgeber bestimmt. Alle weiteren angeschlossenen GPS-Taktgeber sind hierarchisch als Baum angeordnet. [37]

**IEEE 802.1 AS Precision Time Protocol:** Übertragung des Haupttaktes an alle im Verbund befindlichen AVB-Geräte. [38]

**IEEE 802.1 Qav Queuing & Forwarding:** Priorisierung von zeitkritischen Daten innerhalb des AVB-Netzwerkes. Audio/Video-Daten werden höher priorisiert als zusätzliche Datenstreams [39]. Bei hoher Auslastung können andere Daten verzögert werden, wobei Pakete mit längerer Wartezeit individuell, also auf deren Inhalt bezogen, zunehmend höher priorisiert werden. [40]

**IEEE 802.1 Qat Stream Reservation:** Bandbreitenreservierung für geplante Audio/Video-Übertragung im Netzwerk. Talker und Listener fragen beim AVB-Controller an, ob für die geplante Übertragung genügend Bandbreite zur Verfügung steht. Bei positiver Antwort wird die benötigte Bandbreite zugesichert. Zum Senden und Empfangen anderer Daten wird zusätzlich noch individueller Bandbreitentraffic freigehalten. So werden bei einem 1 GbE-Netzwerk bei einer AVB-Audio Übertragung maximal 75% der Bandbreite reserviert, der Rest steht für zusätzlichen Datentraffic zur Verfügung [39]. [40]

**IEEE 1722 AVB-Transport-Protocol:** Gibt die Kapselung der Audio- und Videodaten in einen Ethernetframe an. Frames mit einem EtherType Wert von 0x88B5 sind AVB-Transportprotocol Frames [37].

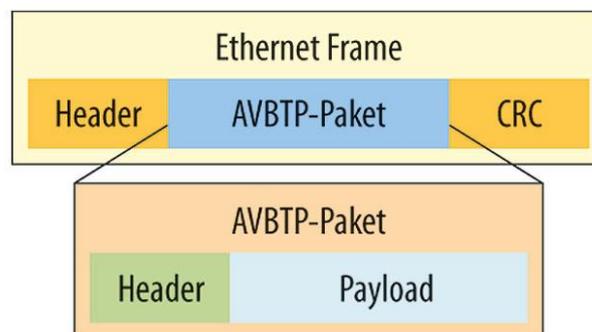


Abbildung 3.3-2 Aufbau eines AVB-Frames [37]

Die Audio-/Videodaten werden vor einer Übertragung entsprechend dem vorrangigen Takt synchronisiert. Dabei wird zu vor überprüft, ob Talker und Listener den gleichen Medientakt besitzen. Die Übertragung wird beim Controller angefragt und dort die benötigte Bandbreite reserviert und priorisiert. Der Talker verpackt die Daten in einen Ethernetframe und sendet sie, je nach Konfiguration des Netzwerkes, über Bridges zum Listener. Zusätzlich werden weitere Informationen über den Stream, sogenannte Metadaten, gesendet. Diese beinhalten z.B. Abtastrate, Auflösung, Videoformat etc. Dabei wird ein maximales Delay von 2 ms vom Hersteller garantiert, wenn der Stream über nicht mehr als sieben Hops übertragen wird [36].

#### 3.3.2 Optionale Einstellungen

Zusätzlich zum AVB-Netzwerk können weitere LAN-fähige Netzwerkkomponenten, die nicht AVB-fähig sind, in das AVB-Netz integriert werden. Allerdings dürfen diese nicht

als Kopplungspunkt zwischen Talker und Listener fungieren. So ist ein Aufbau eines parallelen Netzwerkes möglich, allerdings unterliegen diese Daten ebenfalls der Priorisierung und werden bei hoher Nutzlast der AVB-Streams zu späteren Zeitpunkten gesendet [39]. Zudem ist aufgrund des fehlenden CSMA/CD-Verfahrens ein Einsatz von Hubs nicht möglich [41]. Innerhalb der AVB-Domäne können einzelne Streams priorisiert werden, was zu einem individuellen Havariekonzept führen kann. Darin berücksichtigt werden kann auch die Multicastfähigkeit von AVB-Netzwerken. Mehrere Listener können von einem Talker die gleichen Daten erhalten, ohne dass das Netzwerk mehr belastet wird [41].

### 3.3.3 Einsatz

Vor allem im Automobilsektor hat sich Audio-Video Bridging etabliert. Die Nutzung von Onboard-Kameras in Kraftfahrzeugen bedingte eine Videoinfrastruktur. Hierbei setzen die Hersteller vor allem auf AVB, da es sich zusätzlich auch mit der Audiostruktur koppeln lässt und durch eingebaute Bridges beliebig erweiterbar ist [42]. Zusätzlich nutzen Firmen wie provideo die Technologie für Konferenztechniken in großen Unternehmen, um Audio/Videoschaltungen im gesamten Gebäude zur Verfügung zu stellen. Für das professionelle Broadcastsegment gibt es zu wenig etablierte Produkte. Das Institut für Rundfunktechnik testete 2014 erfolgreich ein auf AVB basiertes Beschallungsszenario mit unterschiedlichen Produkten in einem Netzwerk [35]. Allerdings setzen die Audiohersteller mittlerweile auf neue Spezifikationen wie Dante, AES 67 und RAVENNA. Für SDI-fähige Videoperipherie gibt es derzeit nur von AXON eine Gesamtlösung [43].

## 3.4 SMPTE 2022-x

Ein von der Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE) herausgegebener Standard um digitalisierten Videocontent über ein IP-Netzwerk zu transportieren. SMPTE 2022-x nutzt UDP-Verbindungen und RTP-Pakete und ist somit auf der Anwendungsschicht im ISO/OSI Schichtenmodell angesiedelt. Dies bietet physische Unabhängigkeit und mehr Flexibilität im Aufbau der Netzwerke. Nutzer sind nicht mehr an protokollabhängige Switches gebunden. Es wird keine Broadcastwolke aufgespannt, wie sie in der Bitübertragungsschicht typisch ist, sondern einzelne Pakete zwischen Sender und Empfänger verschickt. Die Verwendung von etablierten Netzwerktechniken, wie beispielsweise Quality of Service oder einer Fehlerkorrektur, wird damit erleichtert. Die Videoinhalte werden in den Payload des RTP gepackt und versendet. Seit 2007 wurden verschiedene Versionen ratifiziert, zuletzt SMPTE 2022-7 im Jahr 2013.

### 3.4.1 Aufbau

SMPTE 2022-x nutzt eine UDP-Verbindung zwischen Empfänger und Sender zum Transport des Videostreams. Dazu wird in der Anwendungsebene auf das Real-Time Transportprotokoll (RFC 3350 [44]) zurückgegriffen um die Sequenzierung der Rahmen fortzuführen [34]. Gerade bei zeitkritischen Datentransporten ist die Reihenfolge der RTP-Pakete entscheidend für eine verlustfreie Wiedergabe am Empfänger. Eine Audioübertragung kann mittels der im Videosignal befindlichen Audiospuren erfolgen. Das bedeutet, dass je nach verwendetem Standard (MPEG-2 in SMPTE 2/4 oder SDI in SMPTE 2022-6) die integrierten Audiokanäle mit übertragen werden. Das hat zur Folge, dass bei einer Tonbasierten-Übertragung eine Bildquelle (z.B. schwarz) als Träger in das

RTP-Paket integriert werden muss [31]. Alle SMPTE 2022 Varianten sind Multicast-fähig. So ist es möglich sowohl einen Sender und mehrere Empfänger, als auch mehrere Sender und einen Empfänger zu bedienen. Als Identifizierung für eine Multicastverbindung dient in der Regel die Zieladresse der Verbindung. Der Empfänger erkennt, dass es mehrere zur Verfügung stehende Quellen gibt und greift auf die benötigten zurück. Dafür wird auf das Internet Group Management Protocol zurückgegriffen. Der Empfänger schickt eine Nachricht zum jeweiligen Sender, dass dieser in den Multicaststream aufgenommen wird und schaltet danach auf den initiierten Stream um. Allerdings kann dies zu kurzzeitigem Bildausfall führen, da die Umschaltung einen Abbruch des vorherigen Streams benötigt [34]. Eine Taktung über den IP basierten Datenaustausch ist in SMPTE 2022-x nicht vorgesehen. Ebenfalls ist auch keine garantierte Übertragung in der richtigen Reihenfolge implementiert. Die Kodierung und Decodierung in ein SMPTE-2022 Frame führt zu einer Verzögerung von circa einem Videoframe (40 ms. bei 25 Vollbildern pro Sekunde) [35].

#### 3.4.2 Varianten

Die SMPTE 2022-x Varianten unterscheiden sich in der verwendeten Nutzung von Forward Error-Correction. Gerade Versionsnummern geben die Verwendung verschiedener Videoformate zur Übertragung an und die ungeraden Versionsnummern bieten zusätzlich die Möglichkeit einer Forward-Error Correction (FEC).

##### **SMPTE 2022-1 und 2022-2**

Dieses Pärchen spezifiziert eine Übertragung von komprimierten MPEG-2 Videostreams mit einer konstanten Bitrate (2022-2). Das bedeutet, dass zuvor eine Wandlung von nativem Videocontent auf den MPEG-2 Codec erfolgen muss, was zu einer zusätzlichen Verzögerung bei einer Liveproduktion führen kann. Zusätzlich gibt es die Option einer Forward-Error Correction (SMPTE 2022-1), in der für die übertragenen Payloads Prüfbits horizontal und vertikal mitgesendet werden [31]. Um Overhead in der Übertragung zu vermeiden, können verschiedene Varianten, z.B. nur horizontales gesendetes Prüfbit, eingestellt werden.

##### **SMPTE 2022-3 und 2022-4**

Diese beiden Versionen erweitern die Möglichkeit des Transports von MPEG-2 Material durch eine flexible Datenrate. Dabei ist es nun möglich, Encoder mit variabler Datenraten zu nutzen, die sich an die zur Verfügung stehende Bandbreite anpassen können. In SMPTE-2022-3 ist zudem die konstante Übertragung der Prüfbits für die in SMPTE 2022-1 spezifizierte FEC integriert.

##### **SMPTE 2022-5 und 2022-6**

Mit diesen beiden Varianten, erschienen 2013/2012, ist es erstmals möglich SDI-Signale in die RTP-Pakete zu packen. Für diese Variante ist die Nutzung eines 10 GbE Netzwerkes zwingend erforderlich, wenn man HD-SDI mit einer Übertragungsrate von 1500 Mbit/s übertragen möchte [31].

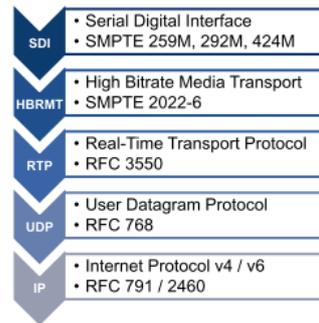


Abbildung 3.4-1 Protokollschichten im SMPTE 2022-6 Standard [35]

Ein solches Netzwerkpaket gliedert sich in 5 Bestandteile (siehe Abbildung 3.5-2). Neben den für UDP üblichen IP und UDP-Header sind im RTP-Header, sowie im HBRMT-Header Zeitstempel integriert, die alle übertragenen Pakete mit einer Sequenznummer nummerieren [34]. Zusätzlich werden im HBRMT-Header Informationen über Format, Auflösung und interlaced oder progressive Bildübertragung übermittelt [34].

## High bit rate audio/video over IP SMPTE ST 2022-6: encapsulation

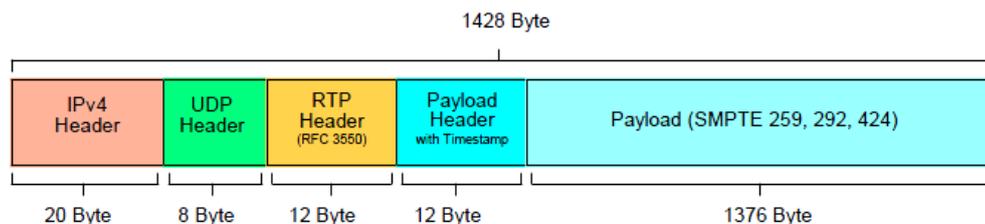


Abbildung 3.4-2 SMPTE 2022-6 Paket [45]

In der SMPTE 2022-5 Spezifizierung ist zusätzlich die Forward-Error Correction für High Bit Rate Media vorhanden. Diese baut auf die gleichen Technologien wie in SMPTE 2022-1 mit allen ihren Varianten. Die Prüfbits werden dann im SDI-Payload mit übertragen [31].

### SMPTE 2022-7

In der aktuellsten Fassung des SMPTE 2022 Standards steht die unsichtbare Umschaltung zwischen zwei übertragenen SDI-Signalen im Vordergrund. Zur Nutzung von SMPTE 2022 Quellen als adäquate Videoquellen für Bildmischer ohne vorherige Rückwandlung in das ursprüngliche SDI-Format müssen die Signale synchron sein, um einen Zeilensprung zu verhindern. Zusätzlich kann über die Verwendung von IGMP keine unterbrechungsfreie Umschaltung garantiert werden. Diese Umschaltung übernimmt nun ein Router, ähnlich aufgebaut wie eine Videokreuzschiene, der die Ziele der Sender ausliest und diese zu einer neuen Senke aufbaut [34]. Jegliche Netzwerkkomponente die im Netzwerk zur Verfügung steht, kann über einen Befehl der Senke eine neue Quelle zuordnen. Um das Umschalten lückenlos und ohne Fehler zu garantieren, wartet der Router auf den zeitgenauen Impuls und schaltet um, sobald die neue und alte Senke ein neues Bild aufbauen. Dazu ist es zwingend notwendig, dass beide Quellen in der gleichen Zeitebene sind und deren Taktinformationen in der siebten Zeile des Bildes, für High

Definition Content, übertragen wird [34]. Diese Möglichkeit der unterbrechungsfreien Umschaltung von unkomprimierten Videodatenströmen kann auch für Havarie Konzepte genutzt werden. Der Ausfall von Netzwerkkomponenten wie Switches und Kabeln kann zu einem Ausfall des gesamten Streams führen. Die Variante einer redundanten Wegführung, die im Bedarfsfall lückenlos umgeschaltet werden kann, führt zu einer höheren Sicherheit bei Produktionen mit Livecharakter.



Abbildung 3.4-3 Prinzip der Zwei-Wegeführung in SMPTE 2022-7 [31]

#### 3.4.3 Optionale Einstellungen

Je nach Bedarf kann auf Unicast oder Multicastübertragung gesetzt werden. Das hat vor allem den Vorteil, dass die Konfiguration individuell an die Produktion angepasst werden kann. Wenn es mehrere Empfänger von Quellen gibt, kann auf Multicast gebaut werden. Sollte eine Peer-to-Peer Verbindung benötigt werden, ist eine Unicastübertragung zu empfehlen. SMPTE 2022 liefert selbst kaum Schutzmechanismen für eine unterbrechungsfreie Übertragung. Die in den ungeraden Versionsnummern zur Verfügung gestellten FEC bieten keinen Schutz vor Paketverlusten. Da der Standard allerdings auf verbreitete Protokolle wie UDP und RTP baut, ist er in der Verwendung von Netzwerkkomponenten an keine speziellen Hersteller gebunden. Das bedeutet, dass auf optionalen Einbau von Mechanismen wie Quality of Service für Bandbreitennutzung oder Class of Service für Priorisierung in der Netzwerkkonfiguration zurückgegriffen werden kann [35]. Einzig die Broadcastkomponenten im Netzwerkverbund (z.B. Videospiele oder Bildmischer) müssen SMPTE-2022 fähig sein. Da auch keine Taktübertragung vorgesehen ist, kann zusätzlich auf das Precision-Time-Protocol integriert werden, um alle Signale zu synchronisieren. Innerhalb des Standards ist es möglich auf verschiedene Videoformate (MPEG-2, SD,-SDI HD-SDI, 3G) zurückzugreifen [46]. Dies ist besonders für professionelle Broadcastumgebungen von Vorteil, die im digitalen Zeitalter SDI als Format standardisiert haben.

#### 3.4.4 Einsatz

Broadcastfirmen wie Evertz (Kreuzschienen) und MACNIA (Wandler) stellen erste Produkte zur Nutzung von SMPTE 2022-6 zur Verfügung. Auch LAWO bietet Produkte an, die dementsprechende Videostreams verarbeiten können [47].

Aufgrund der transparenten Übertragung von nativen bewegten Bildmaterial über IP und der daraus resultierenden Unabhängigkeit von Netzwerkkomponenten wird SMPTE 2022 gerne als Grundlage für Weiterentwicklungen hergenommen. So ist das Sony Network Media Interface (NMI) eine Modifizierung von SMPTE 2022-6 [48]. Auch die vom Video Service Forum entwickelten TR03 und TR04 Spezifikationen beruhen im Wesentlichen auf SMPTE 2022 und versuchen die Ansätze weiterzuentwickeln [31].

### 3.5 RAVENNA Media-Streams

Ravenna ist ein von ALC NetworX herausgegebener Standard zur Übertragung von Mediendateien in IP-basierten Netzwerken. Ursprünglich zur Verwendung von Audionetzwerken kreiert, wird es immer häufiger auch für Videocontent genutzt [24]. Das ALC NetworX ist eine Zusammenkunft mehrerer im Broadcastsektor verankerter Firmen [49].

#### 3.5.1 Aufbau

RAVENNA baut grundlegend auf vorhandene Protokolle im ISO/OSI Schichtenmodell auf. Um einen Stream aufzubauen und verschiedene Quellen/senken mit diesem zu verankern, wird entweder das Real-Time Streaming Protocol oder das Session Description Protocol [27] verwendet. RAVENNA ist sowohl Unicast als auch Multicast fähig und benutzt eine UDP-Verbindung zwischen Sender und Empfänger in einer IPv4 Umgebung [50]. Zum Transport der Mediendateien wird auf RTP zurückgegriffen, was durch seinen Aufbau eine formatunabhängige Übertragung zulässt. Ein RAVENNA Packet hat eine Größe von 40 bis 1500 Bytes [50]. Somit kann auch komprimiertes Videocontent in einen Ethernet-frame gepackt werden. Allerdings kann pro Stream immer nur ein Format verwendet werden [27]. Die Zahl der Streams in einem RAVENNA-Netzwerk ist allerdings nicht begrenzt.

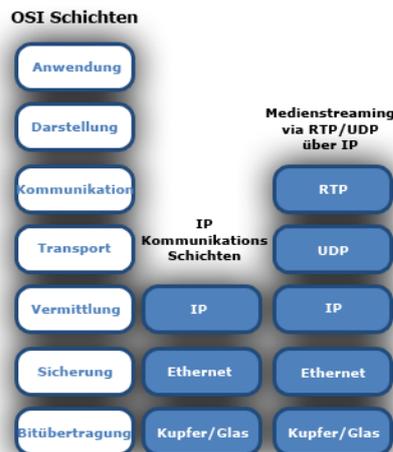


Abbildung 3.5-1 Einordnung der von RAVENNA genutzten Protokolle im ISO/OSI Schichtenmodell [27]

Die Taktung aller im Netzwerk befindlichen Broadcastgeräte übernimmt das Precision Time Protocol (PTPv2), das eine Taktung durch eine GPS an allen Geräten voraussetzt. Über den Best Master Clock Algorithmus wird der optimalste Takt ermittelt und an alle Geräte übertragen. Etwaige Differenzen, die während der Übertragung entstanden sind, gleicht das Empfängersystem durch Vergleichen der Lokalen Zeit aus [24]. Somit verfügt

### 3.5 RAVENNA Media-Streams

RAVENNA über minimale entstehende Zeitdifferenzen. Das jeweilige Peripheriegerät übernimmt anschließend die Wandlung in die für die Mediendateien entsprechenden Mediaclocks. So können in einem Netzwerk z.B. verschiedene Mediaclocks für unterschiedliche Abtastraten verwendet werden, die sich in der gleichen Zeitebene befinden [27].

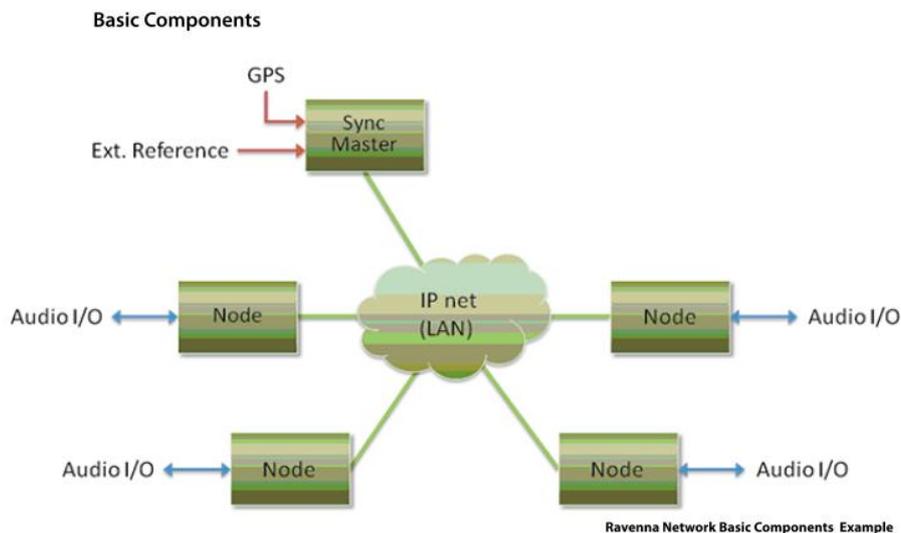


Abbildung 3.5-2 Beispiel eines Audiobasierten Netzwerkaufbaus [51]

Da RAVENNA ursprünglich von audiogeprägten Firmen entworfen wurde, bietet es Transparenz zum AES67 Standard, der sich auf audiobasierte Netzwerkübertragungen spezialisiert hat. Somit können RAVENNA-Produkte auch AES67 verarbeiten, was zu einer größeren Auswahl an Anbietern führt.

#### 3.5.2 Optionale Einstellungen

Da RAVENNA durch die Verwendung verbreiteter Netzwerktechnologien geprägt ist, lässt es sich problemlos in IP-basierte Netzwerke integrieren. Somit kann es auch auf dafür vorgesehene Mechanismen wie Quality of Service zurückgreifen. Explizit unterstützt RAVENNA Quality of Service im DiffServ Modus. Dies verlangt eine Priorisierung der RTP und PTP-Pakete, um die Bandbreitenreservierung sicherzustellen [50]. Die Multicast-Übertragung wird über das IGMP gesteuert. Bei Verwendung von Multicast sind IGMP-fähige Komponenten nötig. Die Netzwerkkonfiguration kann bei RAVENNA-Komponenten über DHCP/DNS oder zeroconf vorgenommen werden [52]. Zusätzlich verfügt jedes RAVENNA-Produkt über mehrere LAN-Ports, die redundant geschaltet werden können. Durch die im RTP-Header verankerten Zeitstempel ist eine unterbrechungsfreie Umschaltung bei Störung eines Streams möglich.

#### 3.5.3 Einsatz

Aufgrund der Formatttransparenz und der offenen Schnittstelle zu AES67 wird RAVENNA im Audibereich immer populärer [24]. Mittlerweile gibt es durch Hersteller wie Genelec (Lautsprecher), Neumann (Mikrofonintercae) oder RIEDEL (Kommando) Möglichkeiten, komplett auf IP-basierte Audioproduktionen zu setzen. Die Firma LAWO bietet mit ihren vRemotes erstmals auch die Möglichkeit, komprimierte Videostreams über RAVENNA zu übertragen.

## 4 Testversuch einer Audio-/Video Ethernet Übertragung

Grundlage für den Testaufbau ist das Produktionsnetz des Bayerischen Rundfunks in stark vereinfachter Form. Erste Ansatzpunkte waren ein Nachbau des Produktionsnetzes über zwei verschiedene Standorte. Dabei sollte eine Grundlast auf ein Netzwerk gelegt werden und in dieses eine Video/Audio-Ethernet Produktion integriert werden. Für die Nachbildung einer Fernsehproduktion wurde auf Produkte zurückgegriffen, die aktuellen Fernsehstandards der ARD entsprechen. Diese sind in Kapitel 4.3.1 genauer spezifiziert. Um eine Wandlung der Audio- und Videosignale in IEEE spezifizierte Protokolle zu realisieren wurde auf eine, von der Firma LAWO im Broadcastsektor veröffentlichte Kompaktlösung, zurückgegriffen. Der Versuchsaufbau gleicht einer Aufzeichnung für ein klassisches Konzert in den Studios des Bayerischen Rundfunks am Standort Rundfunkplatz. Die Durchführung erfolgte in einem Raum, in dem sämtlich genutzte Hardware installiert wurde.

### 4.1 Ziele

Auf vier Aspekte des Versuchsaufbaus lag ein besonderes Hauptaugenmerk und diese wurden in den Szenarien entsprechend gegliedert. Zum einen die Herstellung der vollen Funktionsfähigkeit aller Komponenten ohne deren Einstellungen genauer dem Versuchsaufbau anzupassen. So wurde im ersten Teil der Versuchsdurchführung auf eine Taktung aller relevanten Broadcastkomponenten verzichtet. Das bedeutet, dass jede Kameraeinheit, sowie Audio- und Zuspielhardware, auf einer eigenen Zeitebene arbeiten. Die Übertragung des sogenannten Blackbursts für Videokomponenten und Wordclocks für Audiokomponenten stellt wie im Kapitel 3.2 einen Problemraum da. Die Folgen sollten in den ersten 10 Testszenarien protokolliert werden. Auch auf netzwerktechnische Sicherheiten, wie etwa Class of Service (CoS), wurde verzichtet. Um Qualitätsunterschiede zwischen komprimierten Bildsignalen und unkomprimiertem Material aufzuzeigen, wurden fünf Qualitätsstufen der Bilddarstellung berücksichtigt. Im zweiten Teil des Versuchsaufbaus sollte das Verhalten aller Signale bei einer Überlastung des Gesamtnetzwerkes gezeigt werden. Der dritte Teilbereich konzentrierte sich auf die Errichtung von Sicherheitsvorkehrungen im Aufbau und zu welchen Verbesserungen diese beitragen. So wurden sämtliche Hardwarekomponenten auf eine Zeitebene gebracht und in den vorhandenen Netzwerkkomponenten Class of Service zugeschaltet. Auch hier wurde zunächst die Funktionsfähigkeit hergestellt und in den einzelnen Qualitätsstufen gemessen. Im letzten Teil der Testszenarien wurde dann das Netzwerk mit den zuvor eingestellten Sicherheitsvorkehrungen überlastet. Alle Teilbereiche sollen qualitativ und quantitativ die Möglichkeit einer Fernsehproduktion über Ethernet abdecken und deren etwaige Probleme aufdecken. Mit den gemessenen Daten, die in allen Bereichen des Aufbaus (Netzwerk, Video, Audio) berücksichtigt wurden, soll eine aussagekräftige Empfehlung über die Machbarkeit solcher Produktionen entstehen.

### 4.2 Aufbau

Der Gesamtaufbau (Abbildung 4.2-1) umfasst eine Vielzahl von unterschiedlichen Hardwarekomponenten, unterteilt in Netzwerk, Video, Audio. Dabei bildet die Audio-/Video Ethernetwandlung das Kernstück des Versuchsaufbaus. Berücksichtigt dabei wurde eine Teilung der Peripherie in zwei imaginäre Räume, die eine geographische Trennung zueinander besitzen. Die jeweiligen Geräte wurden mit einem A für Standort A und B für

## 4.2 Aufbau

Standort B bezeichnet. Für Messeinrichtungen und Aufzeichnungen wurden separate Bezeichnungen gewählt, in denen die Trennung in Standorte nicht berücksichtigt wurden. Die Vernetzung der einzelnen Geräte wurde vor dem Aufbau geplant und entsprechend realer Bedingungen angepasst (Abbildung 4.2-3 Schaltplan Gesamtaufbau)

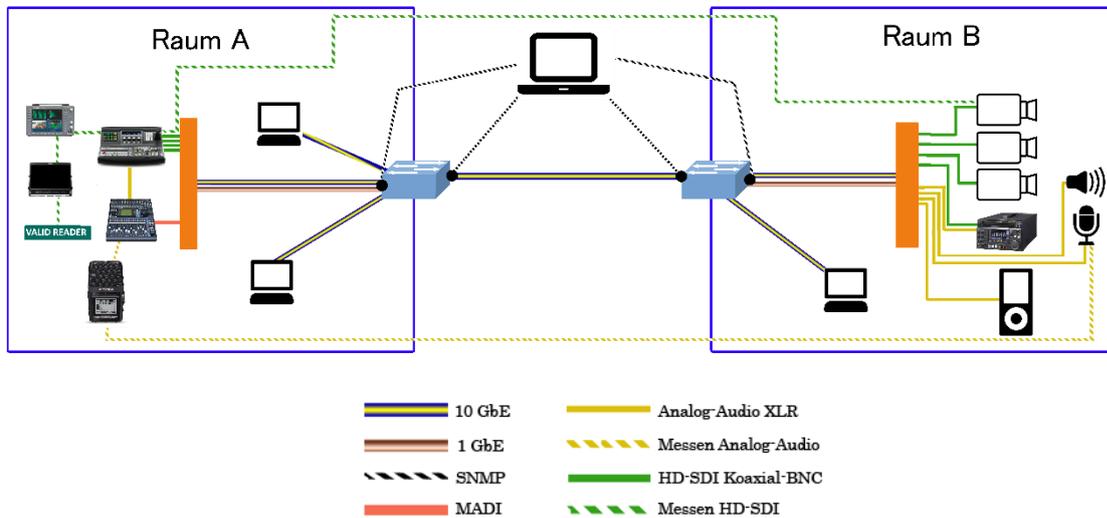


Abbildung 4.2-1 Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus

### 4.2.1 Netzwerk

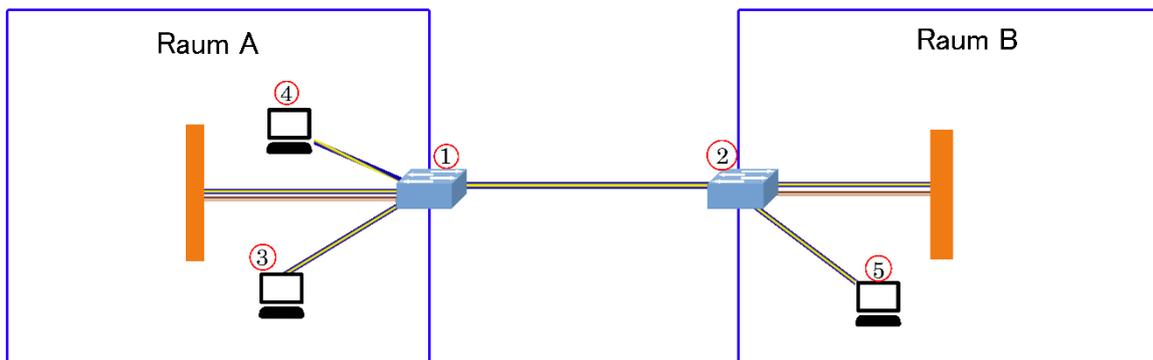


Abbildung 4.2-2 Schema Netzwerkaufbau

Um zwei geografisch voneinander getrennte Standorte zu simulieren, bildeten zwei NETGEAR M7100-x24 (Abbildung 4.2-2 Schema Netzwerkaufbau Markierung 1, 2) Switches das Zentrum des Versuchsaufbaus. Über die zur Verfügung stehenden Glasfaseranschlüsse wurden beide Geräte mit einem Duplex Lichtwellenleiter-Kabel mit LC-Steckern (entsprechende SFP-Module waren bereits im Gerät integriert) verbunden. Zur Vereinfachung diente die Bezeichnung „Switch A“ (1) für das auf der Regieseite positionierte Switch und dementsprechend „Switch B“ (2) für den Switch auf der Studioseite. Die Switches wurden rein auf Layer-2 Basis konfiguriert. Eine Zuschaltung von Class of Service erfolgte im dritten Teilbereich der Versuchsdurchführung.



## 4.2 Aufbau

Zur Grundlast und Überlasterzeugung des Netzwerkes wurde auf drei SUPERMicro Minitower SYS-5028D-TN4T (3, 4, 5) zurückgegriffen. Diese besitzen eine Dual 10 GbE Lan-Karte mit zwei 10 Gbit/s fähigen Netzwerkanschlüssen auf RJ45. Betrieben mit Linux Ubuntu 14.04 LTS wurde vor allem auf eine korrekte Installierung des Treibers geachtet. Der vom Hersteller empfohlene Treiber „Intel 10G LAN Linux driver (D-1500\_SoC)“ wurde auf allen drei Servern manuell nachinstalliert. Der erste SUPERMicro (3) bezeichnet mit „NAS“, simulierte einen Netzwerkspeicher auf dem Rohmaterial und fertig produzierte Beiträge abgespeichert werden und sowohl in Originalgröße als auch Low-Resolution, für Videovorschau, zurückgegriffen werden konnte. Ein weiterer SUPERMicro Minitower (4), als „Schnitt“ bezeichnet, simulierte ein Schnittsystem, welches auf Rohdaten vom NAS zugreift und fertige Beiträge darauf ablegt. Sowohl NAS als auch Schnitt wurden an Switch A angeschlossen, da diese Komponenten als sendenahe Produktionseinheiten innerhalb einer Rundfunkanstalt am Fertigungsort positioniert sind. Der dritte Server (5, „Ingest“) diente zur Importierung und Übertragung von Rohmaterial auf das NAS. Positioniert an Switch B charakterisierte „Ingest“ das Übertragen von High-Definition Rohmaterial von einem externen Standort auf das zentrale „NAS“. Hierzu wurden mxf Dateien im DNX HD 120 Codec auf dem Server abgelegt. Der Gesamtspeicherbedarf betrug 380 GByte.

Alle drei SUPERMicro Minitower wurden mit 5 Metern CAT 6 Kabeln mit RJ 45 Steckern an dem jeweiligen Switch angeschlossen und mit dem vorgesehenen 10 GbE Interface betrieben.

Jedes im Netzwerk angeschlossene Peripheriegerät wurde mit einer IP4-Adresse der Klasse B versehen. Der IP-Adressbereich betrug 169.254.100.10x bis 169.254.100.130

Gerät	IP-Adresse
Switch A	169.254.100.100
Switch B	169.254.100.101
NAS	169.254.100.102
Schnitt	169.254.100.103
Ingest	169.254.100.104
vRemote „Studio“	169.254.100.107
vRemote „Regie“	169.254.100.108
HP Envy 15	169.254.100.130

**Tabelle 4.2-1 Verwendete IP-Adressen**

Zusätzlich wurde ein HP Envy 15 Notebook zur Aufzeichnung, Steuerung und Auswertung der verwendeten Geräte genutzt. Sowohl die NETGEAR Switches, als auch die LAWO vRemotes verfügten über Weboberfläche, um benutzerdefinierte Einstellungen vorzunehmen. Die mitgelieferte Konsolenkonfiguration für die NETGEAR-Switches wurde nicht benutzt. Bei den vRemotes wurde zusätzlich über HTML 5 eine Videovorschau zur Verfügung gestellt, die zu einer Grundlast in Abhängigkeit der verwendeten Videostreams führte. In Abbildung 4.2-4 Schaltplan Netzwerk wird die Belegung der einzelnen Ports, sowie die Vernetzung untereinander ersichtlich.

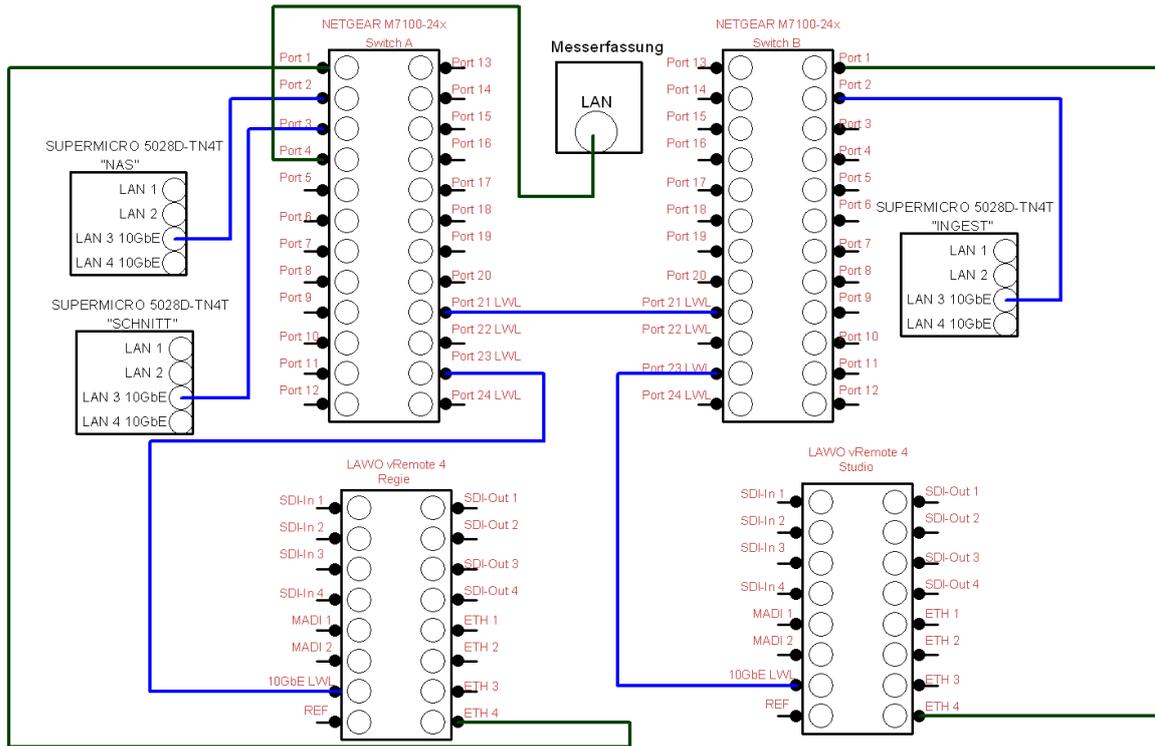


Abbildung 4.2-4 Schaltplan Netzwerk

#### 4.2.2 Audio/Video-Ethernetwandlung

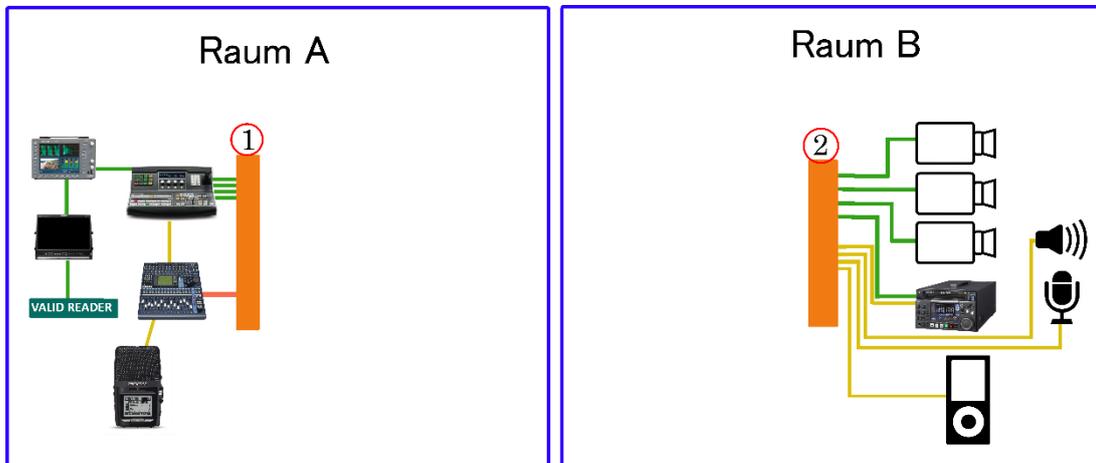


Abbildung 4.2-5 Schema des Audio-/Video Aufbaus

Es gibt aufgrund der Neu- und Weiterentwicklung der Standards von SMPTE 2066-x und RAVENNA nicht viele Hardwarelösungen, die beides vereinen. Eine Kompaktlösung bietet die Firma LAWVO mit ihrem vRemote4. Dieser ermöglicht es vier HD-SDI Videosignale, sowie 2x32 MADI-Audiosignale (angeschlossen über Glasfaserkabel) sowohl über 1 Gbit/s Kupferethernetkabel als auch über zwei SFP-Glasfasereinschübe mit 10 GbE an ein weiteres vRemote4 zu schicken. Gleichzeitig besitzt jedes Gerät vier HD-SDI Ausgänge, sowie drei weitere 1 GbE Ports. Um auch HD-Videosignale über eine 1 Gbit/s Verbindung zu schicken, gibt es je vier JPEG 2000 En/Decoder, die ein Videosignal in eine Datenrate von

## 4.2 Aufbau

0 bis 120 Mbit/s wandeln können. Über internes Routing können die Videosignale unkomprimiert über SMPTE 2066-6 und komprimiert über einen RAVENNA-Stream geschickt werden. Dabei ist sowohl eine Unicast als auch eine Multicastverbindung für weitere angeschlossene vRemotes möglich. Die Audiosignale werden, sofern nicht im Videosignal integriert, über einen separaten RAVENNA-Stream transportiert. Für den Versuchsaufbau wurden vom Institut für Rundfunktechnik zwei LAWO vRemote4 (Abbildung 4.2-5 Schema des Audio-/Video Aufbaus Markierung 1, 2) leihweise zur Verfügung gestellt. Ein vRemote4 (2) wurde auf der Studioseite positioniert und sowohl per CAT 6 Kabel an das Switch B angeschlossen, um Szenarien mit Videokomprimierung zu messen, als auch über die LC-Steckverbindung am Switch und am vRemote über Glasfaser für unkomprimierte Signalführung. Entsprechend den Testszenarien wurde im Vorfeld die entsprechende Ethernet Verbindung aktiviert. Am Switch A wurde ein vRemote (1), ebenfalls dem Test-szenario entsprechend, über Kupferverbindung (RJ45) oder über Lichtwellenleiterkabel (LC) angeschlossen. Die Signalführung im LAWO wurde der Anforderung an die fiktive Fernsehproduktion angepasst.

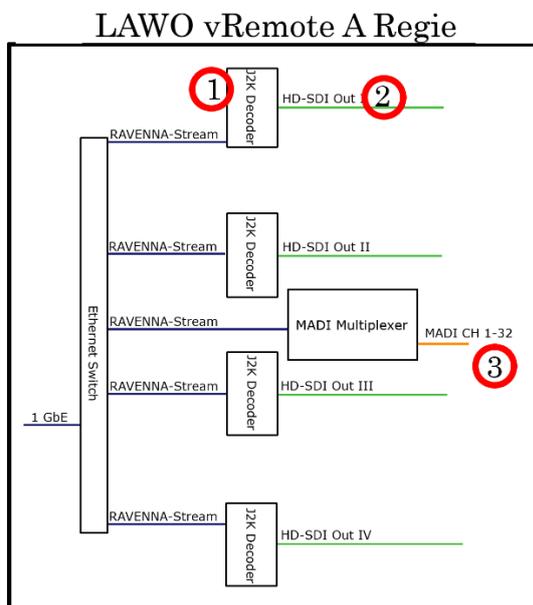


Abbildung 4.2-6 Schaltwege im vRemote A

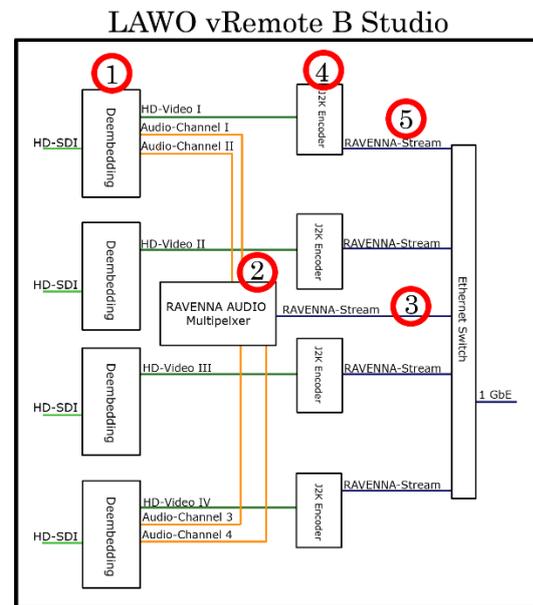


Abbildung 4.2-7 Schaltwege im vRemote B

Das HD-SDI Signal der Kamera 1, mit zwei integrierten Audiokanälen, wurde im LAWO vRemote „Studio“ Deembedded (Abbildung 4.2-7 Schaltwege im vRemote B Markierung 1). Das bedeutet, dass die Audiosignale vom Videosignal getrennt wurden. Die Audiosignale wurden auf den RAVENNA-Multiplexer geroutet (2), der nach selbigem Verfahren auch die Audiosignale des HD-SDI In 4 zugeschaltet hatte. Sämtliche verarbeitete Audiosignale wurden so separat über einen RAVENNA-Stream (3) zum LAWO vRemote4 geschickt. Die Videosignale durchliefen nach Deembedding den JPEG200-Encoder (J2K) (4), in dem die Übertragungsrate festgelegt wurde. Der Encoder lieferte am Ausgang ebenfalls einen RAVENNA-Stream pro Videokanal (5). Am LAWO vRemote „Regie“ wurden die Video RAVENNA-Streams im J2K-Decoder (Abbildung 4.2-6 Schaltwege im vRemote A Markierung 1) wieder zu HD-SDI Signale gewandelt und an dessen physikalische Ausgänge geroutet (2). Bei Verwendung der unkomprimierten Videoübertragung wurde statt des J2K-Coders ein RAW-Coder verwendet, der die Signale dem SMPTE 2022-6 Standard

entsprechend wandelte. Der Audio RAVENNA-Stream wurde auf die ersten vier Kanäle des MADI-Output 1 (3) geschaltet.

### 4.2.3 Video

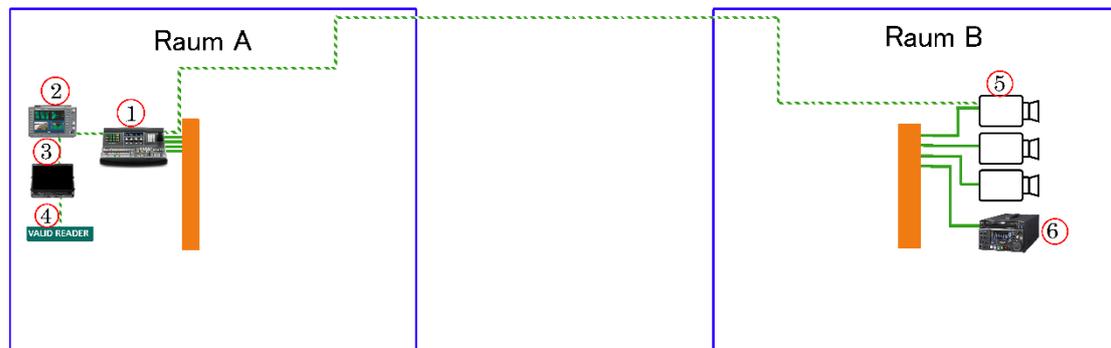


Abbildung 4.2-8 Schema Videoaufbau

Zwei SONY PMW 300 K1 Kameras (Abbildung 4.2-8 Schema Videoaufbau Markierung 5), sowie ein PIX 270i SDI Device (6) dienten als Videoquelle. Jede Kamera besitzt zwei physikalische HD-SDI Ausgänge im 1080i50-Modus (SMPTE 292M [53]). Zur Ressourcenschonung des Produktionsbetriebes des Bayerischen Rundfunks wurde eine Kamera zwei Mal als Signalquelle verwendet, damit alle vier möglichen Videokanäle ausgelastet werden konnten. Das PIX 270i SDI diente sowohl als Zuspieldquelle als auch zur Aufzeichnung von Messdaten (Messeinrichtungen 4.3). Die nach der Ethernet-Übertragung entstandenen HD-SDI-Signale (ebenfalls vier) wurden auf einen Blackmagic ATEM 1 M/E Production Switcher (1) aufgelegt und über den integrierten Multiviewer sichtbar gemacht. Zusätzlich wurde ein zweiter Ausgang der Kamera 2 direkt an einen Eingang des Production Switchers angeschlossen. Als Kontrolleinheiten des fertigproduzierten Bildes wurde ein Tektronix WFM 2200 Messgerät (2) und ein BON BSM-243N3G Monitor (3) in Reihe geschaltet. Das bedeutet, dass das SDI-Signal am Eingang des Gerätes aktiv durchgeschliffen und neu aufbereitet am SDI-Out dupliziert wird. Der aktive Ausgang des BON-Monitors diente als Signalquelle für den PIX 270i. Alle benutzten Videokomponenten wurden entsprechend der Standards mit Kupferkabeln 75 Ohm und BNC-Steckverbindungen miteinander gekoppelt. Die Länge der einzelnen Kabel variierte, was aber zu keinen nennenswerten Unterschieden in der Messauswertung führte. Die detaillierte Signalführung kann anhand des Schaltplans nachvollzogen werden (Abbildung 4.2-9 Schaltplan Video).

## 4.2 Aufbau

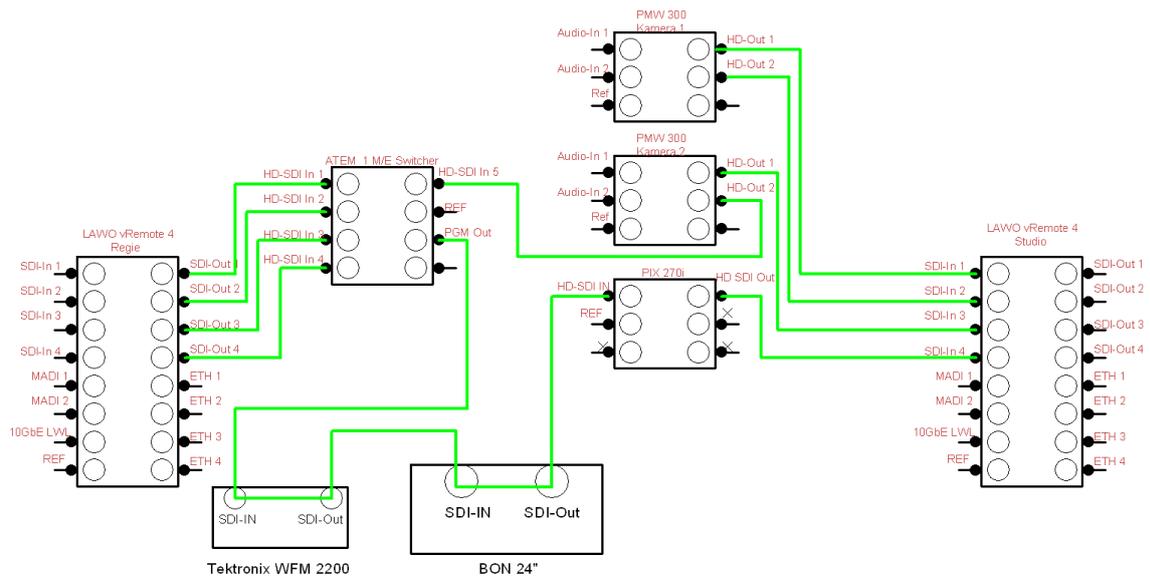


Abbildung 4.2-9 Schaltplan Video

### 4.2.4 Audio

Ein SM-65 Mikrophon, sowie ein Mobiltelefon als Musicplayer, wurden als Audioquellen im Versuchsaufbau installiert. Der Signalverlauf des Mikrophons verlief über einen Klarksplitter, zur Verdopplung des Signals, zu einem Audioeingang der Kamera 1. Das selbe Signal wurde direkt in einen H2-Zoom-Rekorder geführt. Das Mobiltelefon wurde über einen 3,5 mm Miniklinken auf XLR-Adapter auf den zweiten Audioeingang der Kamera 1 gesteckt. Nach der Netzwerkübertragung über das LAWO vRemote wurden die Audiosignale über eine MADI-Schnittstelle mit Lichtwellenleiter-Kabel auf SC-Stecker an eine Allen&Heath iDR 64 angeschlossen. Ein elektronischer Kupferausgang der iDR 64 war direkt mit einem weiteren Eingang des H2-Zoom-Rekorder verbunden. Zur akustischen Überprüfung der Audiosignale diente eine FOSTEX-Lautsprecherbox.

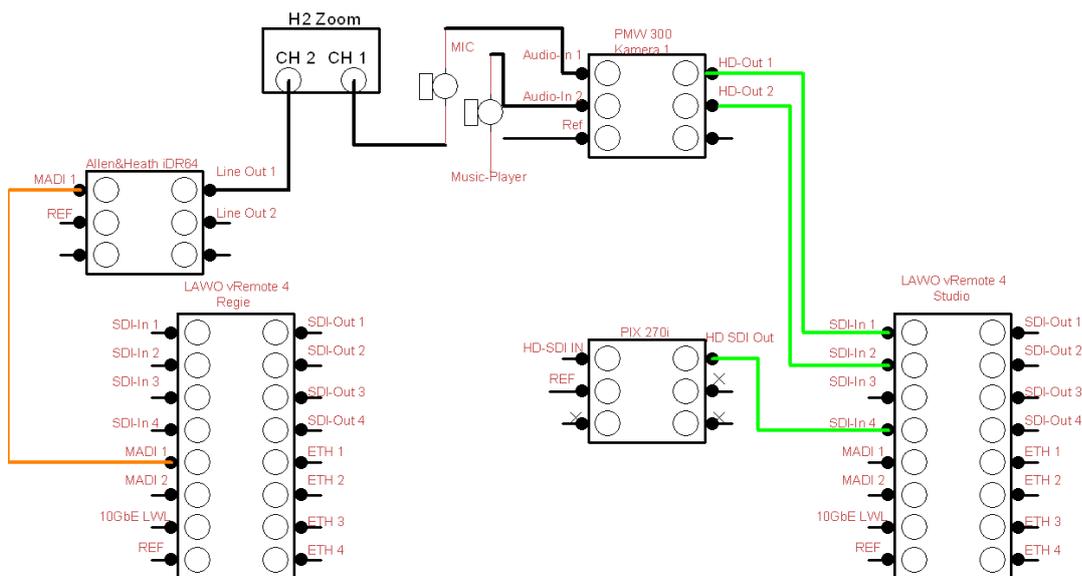


Abbildung 4.2-10 Schaltplan Audio

#### 4.2.5 Taktung

Um im dritten und vierten Teilbereich der Versuchsdurchführung jede Broadcast-Komponente in die gleiche Zeitebene zu bringen, wurde ein Tektronix 2200 verwendet. Dieser besitzt sowohl mehrere Blackburst-PAL Ausgänge für Videoperipherie als auch einen Wordclockausgang für Audioequipment. Dieser wurde zur Taktung des Allen&Heath iDR 64 genutzt. Die Blackburstports wurden sowohl für die Kameras als auch für den PIX 270i, den ATEM Production Switcher sowie für beide LAWO vRemote4 genutzt. Die Taktung war aufgrund der räumlichen Gegebenheiten möglich. Bei einer tatsächlichen räumlichen Trennung muss entweder auf eine Taktung über GPS, über eine sogenannte Grand Master, an jedem Ort zurückgegriffen werden, oder eine Taktung über das PTP realisiert werden. Bei diesem Versuchsaufbau waren allerdings nur die vRemotes PTP-fähig.

### 4.3 Messeinrichtungen

Für jedes Teilgebiet des Versuchsaufbaus wurden relevante Messdaten in der Vorbereitung herausgearbeitet und in dementsprechenden Messeinrichtungen berücksichtigt. Alle Messdaten wurden im Protokoll festgehalten oder aufgezeichnet.

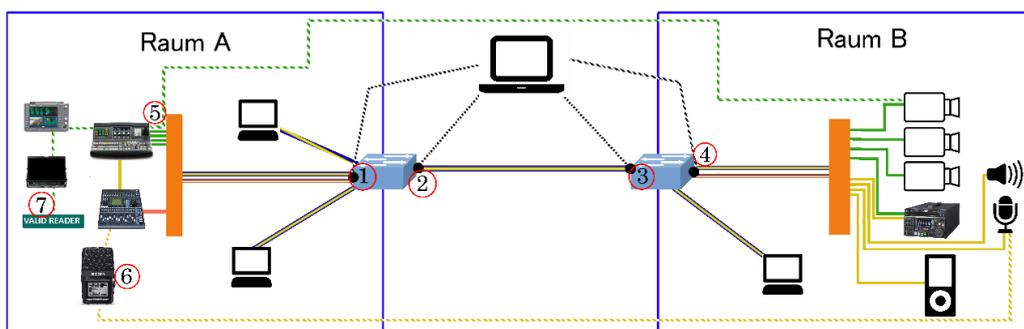


Abbildung 4.3-1 Nummerierung der Messpunkte

Im Versuchsaufbau wurden insgesamt vier relevante Messorte lokalisiert und aufgezeichnet (Abbildung 4.3-1 Nummerierung der Messpunkte)

#### Messpunkt ①:

Anschluss des vRemotes Regie an Switch A Port 1 bzw. Port 23 (Übertragungsrage, Datenmenge)

#### Messpunkt ②:

Link Switch A zu Switch B (Übertragungsrage, Datenmenge)

#### Messpunkt ③:

Link Switch B zu Switch A (Übertragungsrage, Datenmenge)

#### Messpunkt ④:

Anschluss vRemote Studio an Switch B Port 1 bzw. 3 (Übertragungsrage, Datenmenge, Anzahl übertragener Rahmen)

## 4.3 Messeinrichtungen

### Messpunkt ⑤:

Zweiter Ausgang der Kamera 1 in den Bildmischer ohne Ethernetwandlung (Videodelay)

### Messpunkt ⑥:

Mikrophonsignal über Ethernetwandlung und zusätzlich direkt in Audiorekorder (Audiodelay)

### Messpunkt ⑦:

Zusammengesetztes VALID-Signal mit separatem Video und Audioweg nach der LAN-Transportierung (Audio/Videodelay)

### 4.3.1 Netzwerk

Zur Messung und Aufzeichnung der Netzwerkdienste diente ein separates HP Envy Notebook mit Windows 10. Dieses wurde über die integrierte Netzwerkkarte an Switch A angeschlossen. Die installierte PRTG-Network-Software stellte Messsensoren für die produktspezifischen Protokolle zur Verfügung. So konnten Daten beider NETGEAR-Switches über das Simple Network Management Protocol im PRTG-Netzwerktool aufbereitet und sowohl als HTML als auch als CSV-Dokument lokal gespeichert werden. Die zur Verfügung stehenden Daten wurden automatisch pro genutztem Port am NETGEAR zugeordnet. Darunter fallen folgende Messwerte:

- Übertragungsrate der Daten in kByte/s (Summe, Eingehend, Ausgehend)
- Datenmenge der übertragenen Daten in kByte (Summe, Eingehend, Ausgehend)
- Anzahl übertragener Rahmen
  - Davon Anzahl übertragener Broadcastpackets
  - Davon Anzahl übertragener Multicastpackets
  - Davon Anzahl CRC-Errors

Diese Messwerte wurden pro Minute und pro Port erfasst und gespeichert.

### 4.3.2 Video

Die Erfassung des Videodelays wurde während der Messdurchführung von einer abgefilmten Uhr mit Zehntel-Anzeige abgelesen. Einer der beiden physischen Ausgangswege der Kamera 2 wurde direkt in den ATEM Production-Switcher geführt, der andere vollzog die Signalführung über Ethernet und wurde dann an den ATEM angeschlossen ⑤. Über einen DigitalVideoEffect (DVE) am Mischer entstand ein Splitbild mit beiden Signalen (Abbildung 4.3-2 Messung Videodelay), von denen die Differenz der Zeiten das Delay betrug.

Um mögliche Fehler im SDI-Signal zu protokollieren wurde ein Videokanal über ein Tektronix Oszilloskop geführt und dessen interne Fehleraufzeichnung verwendet. Die subjektiven Beobachtungen wurden protokolliert und durch einen Bildtechniker mit mehrjähriger Berufserfahrung bewertet.



Abbildung 4.3-2 Messung Videodelay



Abbildung 4.3-3 Messaufbau Video

### 4.3.3 Audio

Das Audiodelay musste nach der Testphase bestimmt werden. Dazu wurde das Mikrophonsignal über einen Klarksplitter verteilt und zum einen direkt in den H2 Zoom-Rekorder © und zum anderen über die Signalführung Kamera 1 -> LAW0 vRemote „Studio“ -> RAVENNA-Stream -> LAW0 vRemote „Regie“ -> iDR64 auf den zweiten Kanal des H2 Zoom-Rekorder gesteckt. Dieser konnte beide Eingänge gleichzeitig in zwei getrennte WAV-Files aufzeichnen. Während des Testszenarios wurde direkt vor dem Mikrophon einmal in die Hände geklatscht. Die dadurch erzeugte Pegelspitze konnte im Anschluss über AUDACITY-Audiotool sichtbar gemacht werden und der Versatz der beiden Kanäle durch Markierungen bestimmt werden.

Zur qualitativen Bestimmung des Audiosignals diene eine Lautsprecherbox, welche die Gesamtsumme der verwendeten Audiosignale nach der Ethernetübertragung wiedergab und über im Broadcastbereich herkömmliche Frequenzwiedergabe verfügt.

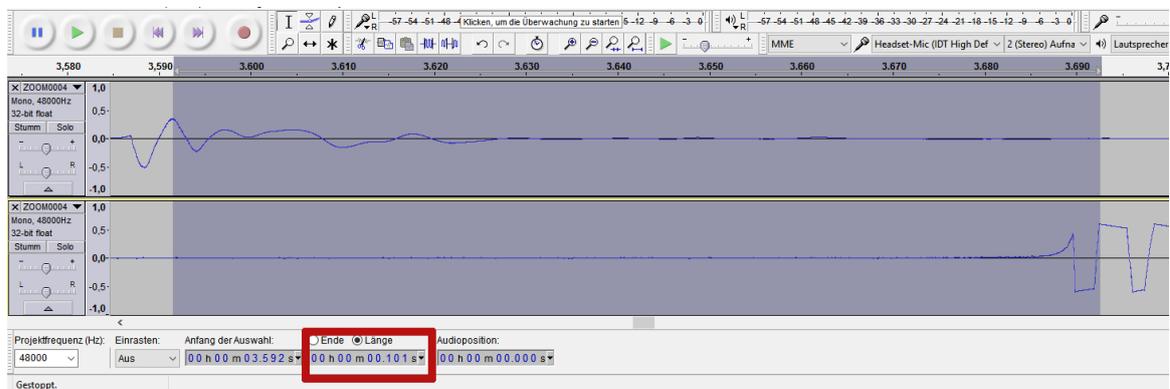


Abbildung 4.3-4 Messung Audiodelay

### 4.3.4 Audio/Video-Delay

Ein sogenannter VALID, ein Videotestsignal mit integriertem Pegelton, wurde vom PIX 270i abgespielt und nach der Ethernetübertragung in einen VALIDReader (Messpunkt 7), geschaltet. Dieser kann das Signal auswerten und den genauen Audio/Video-Versatz in Millisekunden anzeigen. Das Testsignal wurde im vRemote in Audio und Video aufgesplittet und erst nach der Übertragung wieder zusammengeführt. Das dadurch entstandene Delay zeigt an, welche Datensignale schneller verarbeitet und übertragen werden. Dabei muss auch die jeweilige Signalschaltung berücksichtigt werden, da sowohl Audio- als auch Videoprocessing zu einer Verzögerung führen kann.

## 4.4 Testszzenarien

Die verwendeten Produkte bieten eine große Möglichkeit, verschiedene Einstellungen zu verwenden. Im Zentrum dessen stehen die verschiedenen Parameter an der Schnittstelle der Übertragung - den LAWO vRemotes. Einen Überblick über die verschiedenen Einstellungen und deren Zwischenstufen zeigt Abbildung 4.4-1 Parametervarianten der LAWO vRemotes. Um einen möglichst originalen Aufbau einer Fernsehproduktion nachzubilden, wurde eine feste Anzahl von Video- und Audiosignalen festgelegt. Auch die Standards wurden entsprechend der ARD-Empfehlung angepasst. So wurde eine Auflösung von 1920x1080 im Interlaced-Verfahren bei 50 Hertz verwendet und eine Audiotaktung von 48000 kHz eingestellt. Die Ethernetwandlung kann in SMPTE 2066-6, RAVENNA und virtual BB erfolgen. Für den Versuchsaufbau wurden SMPTE 2066-6 für eine unkomprimierte Übertragung im 10 GbE-Modus verwendet und RAVENNA für eine komprimierte Videoübertragung sowie für die Audiosignalführung. Die Komprimierung des Videosignals konnte zwischen 0 Mbit/s und 1500 Mbit/s eingestellt werden. Aufgrund des Verhaltens des eingebauten Codecs, der sich noch in der Entwicklungsphase befindet und teilweise Fehlerhaft reagiert, wurde eine Komprimierung von 2 Mbits/s bis 120 Mbits/s getestet. Die Anzahl der möglichen Audiokanäle konnte auf bis zu 64 aufgestockt werden. Um realistische Bedingungen einer kleinen Konzertproduktion (2 Instrumente, ein Zupfspieler, zwei Gesangsmikrophone) darzustellen, wurden insgesamt 5 Audiokanäle verwendet. Die NETGEAR-Switches bieten ebenfalls verschiedene Parameter an, die qualitative und quantitative Aspekte berücksichtigen.

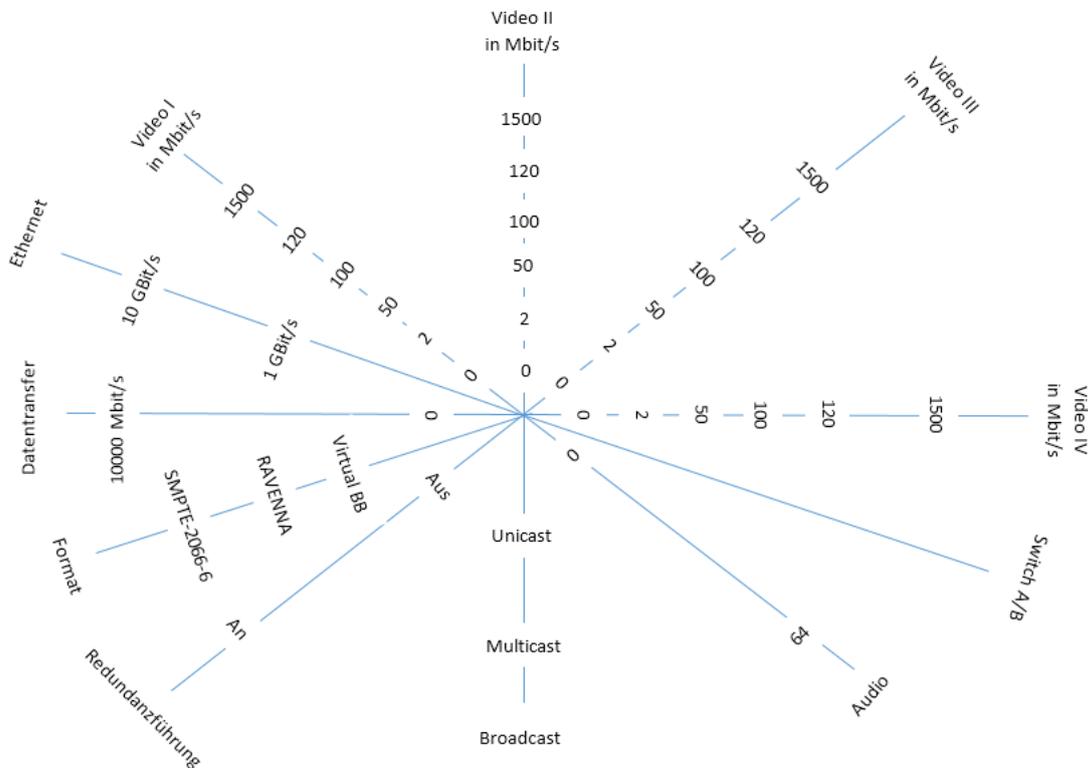


Abbildung 4.4-1 Parametervarianten der LAWO vRemotes

Die für alle Teilgebiete geltenden Parameter wurden wie folgt festgelegt:

Netzwerk:

- Quality of Service deaktiviert
- Portsperrung deaktiviert
- Bandbreitenlimitierung deaktiviert

Video:

- Vier HD-SDI Signale
- Interlaced mit 50 Halbbildern pro Sekunde

Audio:

- Vier analoge Audiosignale von vRemote B zu vRemote A
- Abtastung 48 000 Hz

Die für die Teilgebiete variablen Parameter konnten wie folgt konfiguriert werden:

Netzwerk:

- Class of Service
  - CoS-active – CoS ist aktiviert
  - CoS-disactive – CoS ist deaktiviert
- Netzwerkstabilität
  - Consistent – Netzwerk ist nicht ausgelastet
  - Inconsistent – Netzwerk wird voll ausgelastet

Qualitätsstufen-Video:

1. Komprimiert 2 Mbit/s
2. Komprimiert 50 Mbit/s
3. Komprimiert 100 Mbit/s
4. Komprimiert 120 Mbit/s
5. Unkomprimiert 1500 Mbit/s (RAW)

In jedem Messbereich sollten alle Qualitätsstufen getestet werden

Taktung der Signale:

- INT - Signale auf unterschiedlicher Zeitebene
- EXT - Signale auf gleicher Zeitebene

Daraus ergibt sich ein Vektor mit drei Werten (CoS, Stabilität, Taktung), die in den vier Teilgebieten variiert wurden.

#### 4.4.1 Teilgebiet I (CoS-disactive, consistent, INT)

Die ersten fünf Testszenarien waren auf qualitativen Begutachtung des JPEG200-Codex angelegt. In 5 Schritten (2 Mbit/s, 20, 50, 100, 200 und RAW) sollten Qualitätsunterschiede in Verzögerung und optischer Nutzbarkeit für eine Fernsehproduktion beurteilt werden. Der interne J2K-En/Decoder des LAWO vRemotes war dafür hinreichend optimiert. Der Aufbau des Netzwerkes war ohne besondere Merkmale gekennzeichnet. Eine

## 4.4 Testszzenarien

Zuschaltung von Class of Service und Quality of Service wurde bewusst ignoriert. Die angeschlossenen Broadcastkomponenten wurden nicht auf eine Zeitebene gebracht, da eine gemeinsame Taktung über denselben Taktgeber über größere Distanzen mit der zur Verfügung stehenden Peripherie nicht realisierbar ist. Das Netzwerk wurde mit einer Grundaustlastung von circa 300 kByte/s belegt. Dazu wurde ein Datenaustausch zwischen Ingest und NAS sowie zwischen Ingest und Schnitt mit einem SAMBA-Client eingerichtet. Der Kopiervorgang war auf 15 Minuten ausgelegt, so dass alle weiteren relevanten Messdaten innerhalb dieser Zeit gemessen werden konnten. Die LAWO vRemotes waren über den integrierten 1 GbE-Port an das jeweilige Netgear angeschlossen. Nur für den Test mit unkomprimierten Videosignalen wurde auf das 10 GbE Glasfasermodul umgepatcht.

### 4.4.2 Teilgebiet II (CoS-disactive, inconsistent, INT)

Im zweiten Teilgebiet wurde das Setup des Netzwerks so konfiguriert, dass die Verbindung zwischen den beiden Switches auf nahezu Vollaustlastung gebracht werden sollte. Dazu wurde statt des SAMBA-Clients eine Netcat Verbindung zwischen Ingest/NAS und Ingest/Schnitt eingerichtet. Damit eine Begrenzung der Geschwindigkeitsübertragung durch die Serverfestplatten ausgeschlossen werden konnte, wurde am Ingest-Platz ein Ramdisk gemounted und mit 17 GByte gefüllt:

```
sudo mkdir /test/ramdisk           // Erstellen des Ordners ramdisk
sudo chmod 777 /test/ramdisk       // Rechtevergabe
sudo mount -t tmpfs none /test/ramdisk //50% des Arbeitsspeichers als Laufwerk im
System als „ramdisk“ eingehängt
dd if=QUELLDATEI of=/test/ramdisk  //Belegen der RAMDISK mit Videocontent
```

Um die Auslastung zeitlich steuern zu können, wurden am „Ingest“-Server zwei Terminals mit folgenden Befehlen gestartet:

#### TERMINAL 1

```
while true; do; nc 169.254.100.102 8080 < /test/ramdisk; done // Netcat Verbindung
zu NAS als while-Schleife
```

#### TERMINAL 2

```
while true; do; nc 169.254.100.103 8080 < /test/ramdisk; done // Netcat Verbindung
zu Schnitt als while-Schleife
```

Die Ausführung der Terminals führte zu keiner Netzwerkbelastung. Erst beim Starten der dementsprechenden Shellbefehle auf NAS und Schnitt wurde die Übertragung gestartet:

```
while true; do; nc -l 8080 > dev/null; done // Netcat Verbindung zulassen und
nach dev/null speichern
```

Das Beenden des Terminals führte zum dementsprechenden Abbruch der Übertragung. So wurden alle fünf Qualitätsstufen aus Teilbereich I ebenso in Teilbereich II geführt und nach Herstellung der Funktionalität die Überlastung durchgeführt.

### 4.4.3 Teilgebiet III (CoS-active, consistent, EXT)

Im dritten Teil der Versuchsdurchführung wurde auf Mechanismen zurückgegriffen, welche beobachtete Fehler aus den vorangegangenen Teilgebieten (Audiodelay und Ausfall

der Videokanäle bei Überlastung) eingrenzen sollen. So wurde an beiden NETGEAR M7100-24x Class Of Service eingeschaltet. Durch diesen Mechanismus sollte eine Übertragung aller Datenpakete gewährleistet werden. Über Priorisierung des Datenverkehrs sollten die Übertragungswege für die LAWO vRemotes bevorzugt behandelt werden. Zusätzlich wurden alle Broadcastkomponenten getaktet und angeschlossen. Die Unterschiede in den verschiedenen Delayarten sollte so festgestellt und aufgezeigt werden. Dazu wurden alle Geräte mit Kupferkabel mit BNC-Verbindung über das Tektronix WFM 2200 angeschlossen und so in die gleiche Zeitebene gebracht. Die weiteren Testeinstellungen sowie die Qualitätsstufen blieben entsprechend Teilgebiet I.

#### 4.4.4 Teilgebiet IV (CoS-active, inconsistent, EXT)

Die Mechanismen aus dem vorangegangenen Teilgebiet wurden übernommen und auf Verhalten bei Überlastung des Netzwerks überprüft. Dazu wurde der gleiche Algorithmus wie in Teilgebiet II ausgeführt.

### 4.5 Messergebnisse

Die Durchführung erfolgte im Zeitraum von 17.05.2016 bis 19.05.2016, zusätzlich wurden am 23.05.2016 mehrere Messungen mit den BR hauseigenen Brocade ICX 6700 Switches durchgeführt. Diese Messungen dienen der Bestätigung für herstellerunabhängige Messergebnisse und werden nicht in die Gesamtwertung mit einbezogen. Die Testszenarien wurden chronologisch ihrer Teilgebiete durchgeführt, bis auf die Messungen, in denen auf das 10 GbE SFP-Modul der vRemotes zurückgegriffen wurde. Aufgrund von Umstrukturierungen am Messaufbau, wurden diese Versuche zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt.

#### 4.5.1 Allgemeine Beobachtungen

Die Inbetriebnahme und Funktionsfähigkeit der Videostreams wurde in allen Testgebieten erfolgreich hergestellt. Allerdings offenbarten sich bei der ersten Analyse der Netzwerkdaten Einschränkungen im JPEG200 Codec. So konnte die maximale Datenrate für die Kompression auf 120 Mbit/s gebracht werden, obwohl durch die Bedienungs-GUI Werte bis 500 Mbit/s einstellbar sind. In Rücksprache mit dem Hersteller musste dieser Teilbereich auf einen Umfang von 2-120 Mbit/s begrenzt werden. Wie erwartet gab es für die Teilbereiche II und IV Ausfälle aller vier Videokanäle in allen sechs Qualitätsstufen. Das zeigte sich durch ständiges Schwarzschalten sämtlicher HD-SDI-Signale nach der Ethernetwandlung. In unregelmäßigen Abständen gab es für circa zwei bis drei Sekunden ein Bildsignal, wobei dieses Phänomen kanalunabhängig war. Somit war eine Messung des Audio-/Video-Delays nicht mehr möglich. Der separate RAVENNA-Audiostream blieb stabil. Um einen Ausfall des Audiostreams herbeizuführen wurde ein weiteres Testszenario integriert, in dem die NETGEAR-Switches über eine 1 GbE Kupferleitung miteinander verbunden waren. Dazu wurde ein 1 GbE-Switch als Flaschenhals zwischen die Hauptschwitches geschaltet.

## 4.5 Messergebnisse

### 4.5.2 Video

#### Daten:

Bereich	2 Mbit/s	50 Mbit/s	100 Mbit/s	120 Mbit/s	RAW
Teilbereich I	200 ms	200 ms	200 ms	200 ms	0 ms
Teilbereich II	200 ms	200 ms	200 ms	200 ms	0 ms
Teilbereich III	200 ms	200 ms	200 ms	200 ms	0 ms
Teilbereich IV	200 ms	200 ms	200 ms	200 ms	0 ms

Tabelle 4.5-1 Gemessenes Videodelay

#### Auswertung:

Im Teilbereich I konnte vor allem die Qualität des J2K-Codecs gemessen und beobachtet werden. Die Hinzunahme des Codecs ergab bei allen Messungen ein Videodelay von 200 ms. (siehe Tabelle 4.5-1). Bei Verwendung des 10 GbE-Ports und der dadurch möglichen Übertragung des RAW-Signals konnte kein Delay gemessen werden. Die Werte konnten durch die Anzeige des Timecodes zehntelgenau ermittelt werden. Abweichungen darüber hinaus sind zu erwarten, konnten allerdings mit den zur Verfügung stehenden Messinstrumenten nicht ermittelt werden. Qualitativ war das Signal ohne Komprimierung am besten. Es konnten keine Qualitätsunterschiede vor und nach der Ethernetübertragung festgestellt werden. Die Verwendung des J2K-Codecs mit einer Kompressionsrate von 1:750 (entspricht 2 Mbit/s) zeigte eine Verfremdung des Bildes. Es konnten keine Details und Gegenstände erkannt werden - im Bild gab es Blockbildung. Auch eine Kompressionsrate von 1:150 (10 Mbit/s) ergab qualitative Fehldarstellungen im Signal. Gegenstände und Details konnten erkannt werden, dunkle Bildanteile wurden verpixelt und unscharf dargestellt. Zeichnungen bei einer abgefilmten Raufasertapete waren nicht vorhanden. In der nächsten Qualitätsstufe (1:30 = 50Mbit/s) waren Details und Zeichnungen in hellen Bildanteilen komplett vorhanden. Bewegungen wurden problemlos dargestellt. Einzig in dunkleren Bereichen des abgefilmten Motivs gab es ein Rauschen des Bildsignals. Ähnlich verhielten sich die Qualitätsunterschiede bei den Kompressionsraten 1:15 und 1:12,5. Gut ausgeleuchtete Motive wurden optimal wiedergegeben und das Rauschen in dunklen Bildanteilen blieb vorhanden. Bei den in Teilgebiet II und IV genutzten Verfahren zur Auslastung des Netzwerks zeigten sich unmittelbar nach Ausführung der Befehle Ausfälle auf allen Kanälen. Die Videostreams konnten nur noch für maximal zwei bis drei Sekunden lang aufrecht gehalten werden. Bei Abbruch der Terminals waren alle Bildquellen binnen einer Sekunde wieder stabil.

### 4.5.3 Audio

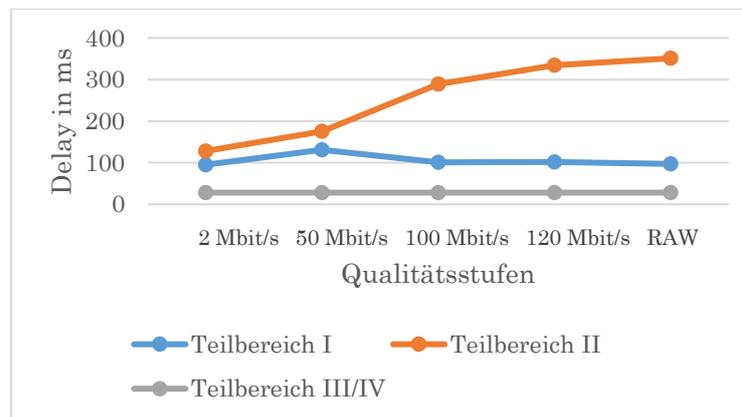
#### Daten:

Bereich	2 Mbit/s	50 Mbit/s	100 Mbit/s	120 Mbit/s	RAW
Teilbereich I	95 ms	131 ms	101 ms	102 ms	97 ms
Teilbereich II	128 ms	175 ms	289 ms	334 ms	351 ms
Teilbereich III	28 ms	28 ms	28 ms	28 ms	28 ms
Teilbereich IV	28 ms	28 ms	28 ms	28 ms	28 ms

Tabelle 4.5-2 Gemessenes Audiodelay

**Statistische Auswertung:**

Bereich	Mittelwert	Standardabweichung der Messwerte
Teilbereich I	105,2	14,70
Teilbereich II	255,4	88,48
Teilbereich III	28	0
Teilbereich IV	28	0

**Tabelle 4.5-3 Mittelwert und Standardabweichung in ms****Abbildung 4.5-1 Entwicklung des Audiodelays****Auswertung:**

In allen Teilbereichen des Versuchsaufbaus gab es keine Ausfälle des Audiosignals. Trotz Überlastung des Netzwerks konnte eine unterbrechungsfreie Übertragung garantiert werden. Zur Analyse des Delays wurde der Mittelwert aller Qualitätsstufen pro Teilbereich ermittelt, sowie die Standardabweichung (Tabelle 4.5-3). Es zeigt sich vor allem in der Standardabweichung der Teilbereiche I und II, dass ungetaktete Signale großen Schwankungen der Messwerte unterliegen. Das lässt sich schon in den Rohdaten (Tabelle 4.5-2) erkennen. Vor allem das steigende Delay im Teilbereich II als Folge der Netzwerkauslastung unterliegt einer Schwankung von mehr als 200ms.. Eine Stabilität zeigt sich erst bei Nutzung der Taktung (Teilbereich III und IV). Dort bleibt das Delay konstant auf 28 ms und führt auch bei Netzwerküberlastung im Teilbereich IV zu keiner Abweichung. Die im Testaufbau vorgenommene Taktung erfolgt durch einen zentralen Taktgeber. Das Taktsignal konnte jedem Peripheriegerät über ein Koaxialkabel mit ca. 2 m Länge zugeführt werden. Bei einer Produktion über räumlich komplett getrennte Systeme muss auf Komponenten mit PTP-Option zurückgegriffen werden, damit der Takt über die Ethernet-Verbindung übertragen werden kann. Der zusätzlich eingebaute Testablauf zur Überlastung des RAVENNA-Streams konnte keine Unterbrechung der Audiokanäle herbeiführen. Einzig ein elektronisches Knacksen bei Ausführung der Überlastung konnte akustisch festgestellt werden.

## 4.5 Messergebnisse

### 4.5.4 Audio/Videodelay

Daten:

Bereich	2 Mbit/s	50 Mbit/s	100 Mbit/s	120 Mbit/s	RAW
Teilbereich I	-157	-130	-148	-135	50
Teilbereich II	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Teilbereich III	-159	-158	-155	-155	50
Teilbereich IV	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Tabelle 4.5-4 Messung des Audio-/Videodelays in ms

Auswertung:

Die Messungen konnten nur in den Teilbereichen I und III durchgeführt werden, da zu einer exakten Bestimmung das VALIDSIGNAL circa sechs Sekunden stabil sein muss. Da die Videokanäle bei Überlastung in Teilbereich II und IV aussetzten, konnte der VALIRDREADER keine Ergebnisse anzeigen. Ähnlich wie beim Audiodelay ließ sich beim Audio/Videodelay eine deutliche Schwankung der Werte im ersten Teilbereich messen. Aufgrund des konstanten Videodelays ist hierbei auch von den ungetakteten Audiokomponenten als Ursache auszugehen. In den komprimierten Qualitätsstufen war das Bildsignal dem Audiosignal hinterher. Im RAW-Modus war der Videokanal 50 ms dem Audiosignal voraus, sowohl im ungetakteten als auch im getakteten Zustand. Das bedeutet, dass das Audioprocessing mehr Zeit erfordert als die Wandlung von SDI in SMPTE 2022.

### 4.5.5 Netzwerktraffic

Zur Auswertung dienen mitgezeichnete Trafficdaten aller verwendeten Ports an den NETGEAR-Switches über SNMP-Protokoll. Die Daten wurden minutengenau ausgegeben und pro Szenario bis zu 11 Intervalle protokolliert.

Minute	Messpunkt 1 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 2 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 3 Daten eingehend in kByte	Messpunkt 4 Daten eingehend in kByte
<b>2 Mbit/s</b> Ø	<b>168.657,90</b>	<b>2.539.366,70</b>	<b>2.536.952,70</b>	<b>186.872,50</b>
1	167.376,00	2.478.906,00	2.569.681,00	185.403,00
2	167.820,00	2.503.368,00	2.540.063,00	190.689,00
3	172.884,00	2.545.222,00	2.396.357,00	185.027,00
<b>50 Mbit/s</b> Ø	<b>1.641.510,27</b>	<b>4.112.275,73</b>	<b>4.115.507,64</b>	<b>1.659.321,27</b>
1	1.631.255,00	4.082.578,00	4.129.810,00	1.700.789,00
2	1.572.933,00	4.218.498,00	4.140.800,00	1.592.467,00
3	1.685.523,00	3.972.263,00	4.054.425,00	1.651.954,00
<b>100 Mbit/s</b> Ø	<b>3.196.644,18</b>	<b>5.780.366,45</b>	<b>5.779.157,36</b>	<b>3.215.295,55</b>
1	3.166.155,00	5.643.883,00	5.633.939,00	3.194.904,00
2	3.175.285,00	6.386.142,00	6.425.694,00	3.287.581,00
3	3.267.209,00	6.552.363,00	6.672.608,00	3.182.573,00
<b>120 Mbit/s</b> Ø	<b>3.161.426,00</b>	<b>5.734.677,25</b>	<b>5.583.240,13</b>	<b>3.179.240,13</b>
1	3.166.738,00	5.628.418,00	5.642.449,00	3.184.900,00
2	3.167.421,00	5.510.632,00	5.476.024,00	3.193.838,00
3	3.177.556,00	5.646.247,00	5.560.852,00	3.286.942,00
<b>RAW</b> Ø	<b>45.644.363,60</b>	<b>45.463.676,70</b>	<b>46.105.470,90</b>	<b>45.781.653,20</b>

1	45.285.570,00	43.628.180,00	45.311.829,00	45.912.168,00
2	45.530.900,00	45.299.012,00	45.320.501,00	46.277.925,00
3	46.660.435,00	45.345.498,00	45.833.615,00	45.308.204,00

Tabelle 4.5-5 Ausschnitt übertragene Datenmengen im Teilgebiet III

Minute	Messpunkt 1 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 2 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 3 Daten eingehend in kByte	Messpunkt 4 Daten eingehend in kByte
<b>2 Mbit/s</b> Ø	<b>167.169,36</b>	<b>69.203.748,73</b>	<b>68.230.342,64</b>	<b>183.375,18</b>
1	168.680,00	56.780.662,00	45.217.674,00	188.514,00
2	171.553,00	69.245.876,00	70.694.014,00	182.667,00
3	166.361,00	70.871.982,00	71.033.060,00	184.449,00
<b>50 Mbit/s</b> Ø	<b>3.317.458,75</b>	<b>70.664.510,08</b>	<b>69.964.269,25</b>	<b>3.339.820,00</b>
1	3.814.985,00	69.445.950,00	70.679.436,00	3.717.217,00
2	3.702.905,00	72.052.740,00	71.602.741,00	3.779.534,00
3	3.701.436,00	69.852.675,00	62.784.260,00	3.785.848,00
<b>100 Mbit/s</b> Ø	<b>3.452.085,89</b>	<b>71.063.288,33</b>	<b>71.083.993,33</b>	<b>3.468.456,00</b>
1	3.701.167,00	71.237.805,00	71.525.789,00	3.765.233,00
2	3.696.158,00	70.815.151,00	70.809.051,00	3.784.313,00
3	3.620.410,00	70.483.896,00	70.658.268,00	3.558.794,00
<b>120 Mbit/s</b> Ø	<b>3.317.805,60</b>	<b>68.143.599,00</b>	<b>67.457.632,60</b>	<b>3.373.273,00</b>
1	3.224.501,00	70.280.988,00	70.264.342,00	3.366.605,00
2	3.422.510,00	71.307.298,00	70.924.743,00	3.395.446,00
3	3.392.731,00	72.061.538,00	70.920.025,00	3.319.176,00
<b>RAW</b> Ø	<b>45.633.300,40</b>	<b>71.838.091,30</b>	<b>70.951.800,50</b>	<b>45.617.815,20</b>
1	46.612.877,00	68.462.958,00	64.541.743,00	45.314.181,00
2	45.308.084,00	73.786.423,00	73.279.767,00	45.322.655,00
3	45.283.579,00	71.903.039,00	71.609.417,00	45.906.785,00

Tabelle 4.5-6 Ausschnitt übertragene Datenmengen im Teilgebiet IV

Die Tabelle 4.5-5 Ausschnitt übertragene Datenmengen im Teilgebiet III und Tabelle 4.5-6 Ausschnitt übertragene Datenmengen im Teilgebiet IV zeigen beispielhaft die erfassten Datenkapazitäten an den einzelnen Messpunkten in Richtung Messpunkt 4 (LAWO vRemote Studio sendet vier Videostreams und einen Audiostream) über Messpunkt 3 und 2 (zusätzlicher Datentrainic von Ingest zu NAS und Schnitt) bis zum Messpunkt 1 (LAWO vRemote Regie empfängt Medienstreams), für die Teilbereiche III und IV. Die kompletten Tabellen, sowie die Messergebnisse der weiteren Teilgebiete befinden sich im Anhang.

Qualitätsstufe	Verhältnis Messpunkt 1 / Messpunkt 4				Verhältnis Messpunkt 2 / Messpunkt 3			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2 Mbit/s	0,94	0,97	0,90	0,91	1,00	1,00	1,00	1,01
50 Mbit/s	0,95	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,01
100 Mbit/s	0,97	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
120 Mbit/s	0,98	0,99	0,99	0,98	1,00	1,01	1,03	1,01
RAW	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,01

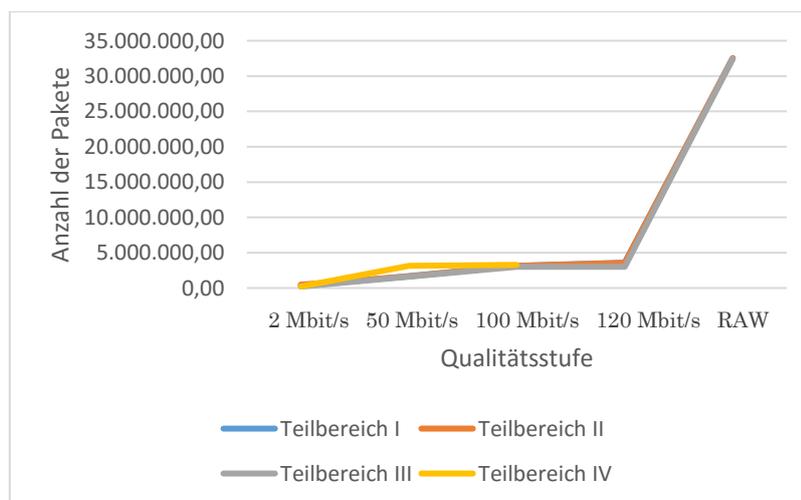
Tabelle 4.5-7 Verhältnis der ankommenden Daten zu gesendeten Daten der jeweiligen Messpunkte

## 4.5 Messergebnisse

Minute	Messpunkt 4 Anzahl von Rahmen				Messpunkt 4 Anzahl von Broadcast Packets				Messpunkt 4 Anzahl von Multicast Packets			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	32.205.725	32.242.371	32.229.125	32.612.809	5	5	5	5	13	14	8	8
2	32.243.744	32.251.803	32.229.929	32.968.563	5	5	5	5	6	6	9	9
3	33.299.741	33.280.647	32.605.643	32.219.536	5	5	5	4	11	11	8	8
4	32.225.781	32.239.097	32.969.193	32.221.967	5	5	5	5	6	6	9	9
5	32.235.574	32.267.624	32.227.506	32.577.477	5	6	5	5	11	11	8	8
6	32.261.689	33.297.784	32.232.565	32.950.737	5	5	5	5	8	6	9	9
7	33.306.318	32.226.414	32.596.801	32.226.001	5	5	5	4	11	11	8	8
8	32.212.715	32.248.562	32.978.983	32.236.082	5	5	5	5	6	6	9	9
9	32.233.088	32.274.735	32.220.940	32.609.240	5	5	5	4	11	11	8	7

**Tabelle 4.5-8 Gesendete Rahmen am Messpunkt 4 in der Qualitätsstufe**

Zunächst wurde überprüft, ob die Verhältnisse von angekommenen Daten zu gesendeten Daten Aufschluss über den Ausfall der Videokanäle bei Überlastung geben (Tabelle 4.5-7 Verhältnis der ankommenden Daten zu gesendeten Daten der jeweiligen Messpunkte). Auffällig ist ein vergleichsweise niedriges Verhältnis zwischen Messpunkt 1 und Messpunkt 4 in der Qualitätsstufe 2 Mbit/s. Scheinbar gibt es hier viel, für eine erfolgreiche Übertragung verzichtbares Datenaufkommen. Tendenziell lässt sich erkennen, dass bei höheren Qualitätsszenarien prozentual mehr Pakete ankommen als bei starken Kompressionsraten. Allerdings lässt sich damit nicht zeigen, dass es bei geringerer Empfangsrate zu Ausfällen der Videokanäle kommt. Im Teilbereich I kamen 94% aller Daten beim Szenario 2 Mbit/s am vRemote-Regie an. Es kam zu keinerlei Ausfällen, wohingegen im Teilbereich II, bei unkomprimierter Übertragung 98 % der Daten ankamen und dennoch Ausfälle beobachtet werden konnten. Bei einigen Intervallen zeigt sich, dass mehr Daten empfangen als gesendet wurden. Dies ist dem Webinterface der vRemotes geschuldet, die zusätzlich ihre GUI in den Paketen überliefern, um auf einem zusätzlichen Computer darauf zugreifen zu können. In dieser GUI werden alle zwei Sekunden die vorhandenen Videostreams in Low-Quality angezeigt, womit ein erhöhtes Datenaufkommen zu erklären ist.



**Abbildung 4.5-2 Anzahl durchschnittlicher Unicastpakete am Port 1 Switch B**

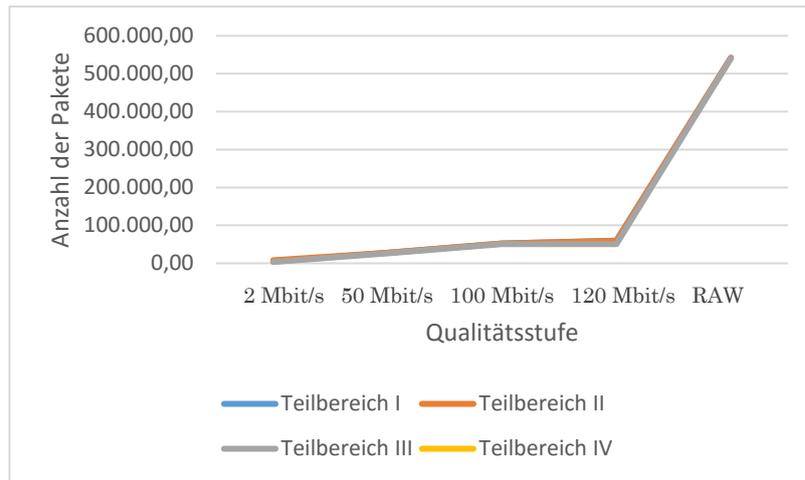


Abbildung 4.5-3 Standardabweichung der Unicastpakete am Port 1 Switch B

Einen weiteren Ansatz bildet die Anzahl der übertragenen Rahmen am Messpunkt 4 (Tabelle 4.5-8 Gesendete Rahmen am Messpunkt 4 in der Qualitätsstufe RAW (weitere Tabellen im Anhang)). Es zeigen sich keine großen Unterschiede zwischen den Teilbereichen. Im Gegenteil die gemittelte Anzahl aller übertragenen Rahmen pro Qualitätsstufe ist in den Teilbereichen identisch, wie die Abbildung 4.5-2 Anzahl durchschnittlicher Unicastpakete am Port 1 Switch B zeigt. Auch der Verlauf der Kurve, die die Standardabweichung der Rahmen pro Szenario zeigt (Abbildung 4.5-3 Standardabweichung der Unicastpakete am Port 1 Switch B), ist deckungsgleich und zeigt kein besonderes Verhalten in den Teilbereichen, in denen es zur Überlast kam.

Bereich	2 Mbit/s	50 Mbit/s	100 Mbit/s	120 Mbit/s	RAW
I	3.215,02	19.329,12	32.303,13	53.791,20	411.027,73
II	9.361,45	28.546,49	73.132,32	253.493,21	665.167,32
III	2.349,55	32.990,73	43.565,54	72.617,34	565.620,30
IV	2.191,32	287.147,65	172.479,35	85.787,64	629.208,79

Tabelle 4.5-9 Standardabweichung der ankommenden Datenpakete am Messpunkt 1 in kByte

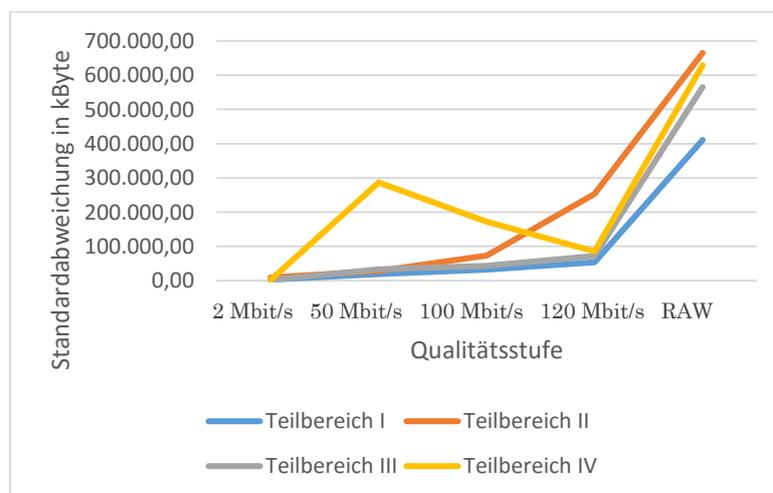


Abbildung 4.5-4 Graphische Standardabweichung empfangener Daten am Messpunkt 1

## 4.5 Messergebnisse

Aufgrund dessen wurde nochmals die empfangene Datenkapazität am Messpunkt 1 überprüft und miteinander verglichen. Um den Schwankungsbereich der einzelnen Intervalle zu verdeutlichen, wurde die Standardabweichung pro Qualitätsstufe in jedem Teilbereich bestimmt (Tabelle 4.5-9). Diese verdeutlicht, dass es bei Übertragungen von größerem Datenvolumen auch zu erheblich mehr Schwankungen in den Intervallen pro Minute kommt. Hier zeigt sich, dass die Abweichung der gesendeten Daten in den Intervallen im Teilbereich II und IV vor allem bei unkomprimierter Übertragung größer ist als in den stabilen Teilbereichen (Abbildung 4.5-4 Graphische Standardabweichung empfangener Daten am Messpunkt 1). Es zeigt sich, dass trotz der prozentualen Empfangsrate von 99 % die zeitliche Kontinuität ein großer Faktor in der Stabilität der Videokanäle ist. Die Daten werden gepuffert und zu einem weniger kritischen Zeitpunkt Übertragen, was aber zu einer Instabilität der Videokanäle führt. Je größer die übertragene Datenkapazität, desto deutlicher zeigt sich, dass große Schwankungen ein Nebeneffekt der Übertragung im Netzwerk sind, die für Video over Ethernet in einem Toleranzbereich liegen müssen. Damit lässt sich allerdings nicht vollkommen jeder Ausfall der Videokanäle in Teilbereich II und IV erläutern. Beispielsweise sind die Werte in der Qualitätsstufe 2 Mbit/s in allen Teilbereichen nahezu identisch. Auch bei 120 Mbit/s weichen Teilbereich I/III und IV kaum voneinander ab und dennoch kam es in Teilbereich IV zu Ausfällen der Videokanäle. Eine Erklärung bietet die hohe Wahrscheinlichkeit für Datenkollisionen bei einer Auslastung von 99% des Gesamtnetzes. Es genügt der Verlust von einem Datenpaket zwischen Messpunkt 1 und Messpunkt 3, der zu einem Ausfall führt, da eine Darstellung des Bildes nur bei Ankunft aller notwendigen Pakete gewährleistet werden kann.

## 5 Diskussion

Bei den Messungen kam es zu Unregelmäßigkeiten in der Erzeugung des bestehenden Traffic. Es konnte nie genau der gleiche Durchsatz an herkömmlichen Daten erzeugt werden. Allerdings zeigen die Messergebnisse, dass das Datenaufkommen zwischen den einzelnen Teilbereichen im Messpunkt 1 und 4 nahezu gleich sind. Einzig im Teilbereich II - 2 Mbit/s sind große Sprünge im Vergleich zu anderen Teilbereichen entstanden (Tabelle 5.0-1 Vergleich eingehender Daten in kByte bei Messpunkt 1 Qualitätsstufe 2 Mbit/s)

Minute	I	II	III	IV
1	270.813,00	520.642,00	167.376,00	168.680,00
2	268.514,00	520.528,00	167.820,00	171.553,00
3	268.555,00	519.747,00	172.884,00	166.361,00
4	275.842,00	507.860,00	167.453,00	165.393,00
5	270.335,00	498.646,00	167.539,00	166.215,00
6	268.086,00	508.510,00	168.057,00	169.019,00
7	268.035,00	506.629,00	172.871,00	165.227,00
8	275.695,00	498.877,00	167.417,00	165.436,00
9	273.706,00	498.982,00	167.360,00	165.723,00

**Tabelle 5.0-1 Vergleich eingehender Daten in kByte bei Messpunkt 1 Qualitätsstufe 2 Mbit/s**

Dieses Phänomen lässt sich mit dem verwendeten JPEG200 Encoder erklären, der bei zu großen Sprüngen in der Kompressionsrate oft auf einen Standardwert zurückgesprungen ist (50 Mbit/s) und in der WebGUI dennoch den eingestellten Wert anzeigte. Der Encoder ist laut Hersteller für Datenkompression zwischen 20 und 120 Mbit/s optimiert. Da die Qualität bei 2 Mbit/s nicht sendefähig ist, da keinerlei Details im Bild zu erkennen sind und eine starke Blockbildung sichtbar ist, kann diese Qualitätsstufe zur realistischen Betrachtung einer Audio-/Video over Ethernet-Produktion außenvorgelassen werden. Ebenso wurde während der Messführung festgestellt, dass trotz höherer Eingabeoption, eine höhere Qualitätsstufe als 120 Mbit/s im JPEG200-Coder nicht erreicht werden kann. Auf Nachfrage bei der Firma LAWO wurde dieses Problem registriert und in zukünftigen Updates behoben. Der integrierte Codec wurde nicht bei LAWO entwickelt und ist nicht speziell auf ein vRemote angepasst. Da sich das Produkt gerade noch in der Einführungsphase befindet, wird es in kommenden Generationen zuverlässigere Kompressionsmethoden geben. Qualitativ betrachtet ist eine Bitrate von 50 Mbit/s für eine Liveproduktion geeignet. Dies setzt allerdings eine gut ausgeleuchtete Szenerie voraus, da es in dunklen Bildanteilen zu einem sichtbaren Rauschen kam. 10 Mbit/s genügen aufgrund der unzureichenden Detaildarstellung nicht den Ansprüchen an eine fernsehtaugliche Produktion. Die entstandenen Videoverzögerungen kommen von der Verarbeitung der Bilder innerhalb der LAWO vRemotes. Dabei ist die Komprimierung am zeitaufwendigsten. Hier konnte ein Delay von 200 ms ermittelt werden. Allerdings konnte diese Zeit nur zehntelgenau bestimmt werden, da die eingesetzte Uhr keine genauere Anzeige zur Verfügung stellte. Dieses Delay liegt noch im Toleranzbereich für die Steuerung von Bildsignalen. In professionellen Umgebungen werden Kameras mittels Remotecontroller gesteuert und farblich angeglichen. Erfahrungen aus dem Broadcastbereich zeigen hier, dass ein Delay unter 500 ms zu kaum spürbaren Nebeneffekten führt. Eine genauere Abweichung des

Delays, sowohl in den einzelnen Kompressionsstufen als auch zwischen getakteten und ungetakteten Signalen konnte nicht bestimmt werden. Diesen Aspekt gilt es in späteren Versuchsdurchführungen zu ermitteln um einen Bildversatz zwischen verschiedenen komprimierten Signalen zu vermeiden. Im Allgemeinen konnten in den Teilbereichen I und III befriedigende Resultate in Performance und Stabilität erzielt werden. Sowohl der RAVENNA-Stream als auch SMPTE 2022-6 konnten problemlos aufgebaut werden und genügten vollkommen den genormten Qualitätsansprüchen. Gerade bei der Verwendung von SMPTE 2022-6 über Glasfaser mit einer unkomprimierten Datenrate von 1.500 Mbit/s konnte kein mess- und sichtbares Delay festgestellt werden. Bei einer Übertragungsunterbrechung, durch Ziehen der Kabelverbindung und Wiederanstecken, waren die Streams und damit auch die nutzbaren Signale im Bildmischer binnen sechs Sekunden wiederhergestellt, ohne dass es zu weiteren Einstellungsveränderungen kommen musste. Dies ist ein akzeptabler Wert für nicht vorhersehbare physische Unterbrechungen. Die über SMPTE 2022-7 spezifizierte redundante Signalführung und die damit einhergehende unsichtbare Umschaltung konnte mangels Hardwarekomponenten nicht getestet werden, verspricht aber eine nahezu ausfallsichere Methode Video over Ethernet zu betreiben. Der RAVENNA Standard stellt ein ähnliches Konzept zur sendungssicheren Verwendung zur Verfügung. Die hier genutzte Videoübertragung ist für RAVENNA bisher nur bei Produkten von LAWO möglich. Trotz der Probleme mit dem Coder im hohen Kompressionsbereich ist eine 50 Mbit/s Bitrate absolut ausreichend und konnte im Test als ausfallsicher betrachtet werden. Der Standard erlaubt es auch andere Kompressionsverfahren, wie z.B. MPEG-2 und H.264 zu verwenden. Derzeit gibt es leider keine dementsprechenden Live-coder, die für den Versuchsaufbau genutzt werden konnten. Es zeigt sich, dass der RAVENNA Standard vor allem für Audio over Ethernet geeignet ist. Die Qualität der Signale erleidet während der Wandlung und Übertragung keinerlei Verlust und kann unterbrechungsfrei beim Empfänger wiedergegeben werden. Alle vier gesendeten Audiotöne wurden ohne Ausfall, auch während der Netzwerküberlastung, übertragen. Es gilt zu prüfen, wie sich die Signale bei einer größer genutzten Bandbreite verhalten. Die nur für Audio verwendete Bandbreite lag bei circa 28 Mbit/s und wäre bei entsprechender Nutzung aller 64 möglichen Audiokanäle größer. Ein zusätzlicher Test mit einem künstlich erzeugten Flaschenhals, der über eine Verbindung eines 1 GbE Switches zwischen den NETGEAR-Switches erzeugt wurde, brachte ebenfalls keinen Tonausfall hervor. Das Netzwerk wurde dabei auf 100 % ausgereizt. Die für RAVENNA-Audiostreams verwendeten Datenpakete scheinen in der Größe dementsprechend angepasst, dass eine Datenkollision nahezu ausgeschlossen ist. Das aufgetretene schwankende Audiodelay in den ersten zwei Teilbereichen zeigte erste Probleme durch nicht synchronisierte Geräte auf. Ein nicht stabiles und somit unzuverlässiges Audiodelay ist bei Liveproduktionen besonders kritisch, da somit die Lippensynchronität nicht mehr gewährleistet ist, die für den Fernsehzuschauer notwendig ist, um den Inhalt der Information zu verarbeiten. Dieses Problem ließ sich mit der Taktung der Geräte auf eine Zeitebene in Teilbereich III und IV beheben. Allerdings ist die verwendete Verkabelung für eine reale Produktion von Video/Audio over Ethernet über zwei Standorte nicht realisierbar. In so einem Fall muss auf eine Taktübertragung über LAN zurückgegriffen werden, z.B. über PTP, die allerdings eine Kompatibilität aller verwendeten Geräte mit dem Protokoll erfordert. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Lippensynchronität bereits beim Sender, also auf der Studioseite zwischen Audio und Video, herzustellen und die Signale embedded, also Bild und Ton integriert, an den Empfänger zu verschicken. Über SMPTE 2022-6 ist es aufgrund der Verwendung von SDI möglich, die dort spezifizierte Integrierung von 8 AES/EBU-Kanälen

zu nutzen. RAVENNA bietet diese Möglichkeit durch integrierte Embedder ebenfalls. Bei beiden Standards ist dies optional einstellbar. Ein Deembedding ist auf Empfängerseite ebenfalls realisierbar, um Audiotöne über ein Tonmischpult gegebenenfalls zu bearbeiten. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass es bei Ausfall des jeweiligen Videostreams zu Tonunterbrechungen kommt. Dies konnte vor allem in den Teilbereichen II und IV beobachtet werden, indem durch die Netzwerklast die Bildsignale keine Stabilität erreichten. Gerade hier zeigte sich, dass durch hohes Datenaufkommen entstandene Paketkollision zu irreparablen Signalausfällen führt. Der Effekt war so stark, dass eine Abwicklung einer Veranstaltung über Audio/Video over Ethernet in diesem Fall nicht mehr möglich wäre. Beobachtungen ergaben, dass sobald die künstlich erzeugte Auslastung abgebrochen wurde, die Streamquellen binnen weniger Millisekunden wieder stabile Bilder wiedergaben. Die Verwendung von Class of Service für die Priorisierung entsprechender RTP-Daten an den Ports 1 der NETGEAR-Switches brachte, wie der Messbereich IV zeigt, keinerlei Besserung. Ein Ausfall der Kanäle ließ sich kurz nach Beginn der Auslastung registrieren. Die Videostreams waren bereits bei 2 Mbit/s so empfindlich, dass es zwischen dieser und der Qualitätsstufe RAW keinerlei Unterschiede im Verhalten bei Vollaustung gab. Eine komplett unterbrechungsfreie Übertragung lässt sich nur in Netzwerken mit niedriger Auslastung realisieren. Eine Verringerung der Ethernetrahmengröße für Videoquellen ähnlich wie bei Audio könnte zur Verbesserung der Quantität beitragen. Allerdings muss hier auf sehr Performance orientierte Komponenten gesetzt werden, die kleine Frames schnell verarbeiten und zusammensetzen können, um eine störungsfreie Wiedergabe zu gewährleisten.



## 6 Fazit

Die Arbeit zeigt, dass es bereits viele Methoden gibt Audio und Videosignale über LAN zu transportieren. Das erleichtert die Durchführung von Fernsehproduktionen an verschiedenen Standorten, wenn eine ausreichende Netzwerkinfrastruktur besteht. Somit können Veranstaltungsort und Regie voneinander abgesetzt werden und dennoch alle technischen Anforderungen, wie verschiedene Kamera- und Kommandosignale, Rotlicht und Audiomonitoring realisiert werden. Allerdings zeigt der Testaufbau auch, dass eine einfache Implementierung in ein bestehendes Netzwerk nicht möglich ist. Um eine Sendungssicherheit, wie bei derzeitigen Produktionsverfahren, sicherzustellen, bedarf es verschiedener Eingriffe in das Netzwerk. Zunächst sollte dem Produktionsverfahren, sowohl mit SMPTE 2022-x als auch RAVENNA, eine Bandbreite über Quality of Service zugesichert werden. Die Einstellung sollte so flexibel sein, dass sie je nach Produktionsbedarf (Anzahl der Kamera-, Video- und Audiosignale) angepasst werden kann. Es darf bei der Übertragung zu keinerlei Verzögerung der zeitkritischen Signale kommen. Verzögerte Pakete implizieren einen sichtbaren Signalausfall. Somit sollte im Netzwerk eine Priorisierung von Daten bzw. angeschlossene Stellen erfolgen, damit andere relevante Daten, wie Sendebiträge und Rohmaterial, nicht unter der Implementierung von Audio/Video over LAN leiden und es dadurch zu Verzögerungen im laufenden Produktionsbetrieb kommt. Letztendlich ist unter den derzeitigen Gegebenheiten mit den zur Verfügung stehenden Standards eine Installation eines autarken Netzwerkes zu empfehlen. Im Hinblick auf ungewollte Störungseinflüsse von angeschlossenen Arbeitsplätzen, die nicht unmittelbar zur Produktion einer Audio-/Video over LAN Produktion beitragen, sollte das Netzwerk bestmöglich abgeschottet werden. Ebenso ist auf eine Fehlerkorrektur, wie die Forward-Error Correction, zu verzichten. Dadurch entstehen unnötige Latenzen und eine fehlerfreie Übertragung kann dennoch nicht garantiert werden, da sie nicht vor Paketskollision schützt. SMPTE 2022-1/2/3/4 sind überholt und sind durch ihre Einschränkung, nur MPEG-2 Transportstreams zu übertragen, nicht so flexibel wie RAVENNA. SMPTE 2022-5/6 sind derzeit die einzigen Möglichkeiten, native Video-streams mit SDI über Layer-3 basierte Protokolle zu senden. Dies erfordert aufgrund der hohen Datenrate eine Netzwerkkonfiguration von mindestens 10 Gbit/s. Die damit erhöhte Anforderung an ein bestehendes Netzwerk schränkt den Standard ein und ist damit für Außenproduktionen und andere Produktionsstandorte ohne vorhandene Glasfaserleitung ungeeignet. Zusätzlich erhöht es die Kosten, da Switches und Kabelleitung ebenfalls Lichtwellenleitertechnik besitzen müssen. Für Hochglanzproduktionen, die nachträglich in Farbe bearbeitet werden und in denen Effekte, wie Zeitlupen und Slowmotions, integriert werden, ist eine unkomprimierte Übertragung erforderlich. Derzeit ist es besser, auf herkömmliche Produktionsmethoden zu setzen, als auf SMPTE 2022-6, da eine Implementierung aufwendiger und kostenintensiver ist. Da eine Audioübertragung nur mit einem Bildsignal stattfinden kann, ist SMPTE 2022-6 sehr unflexibel. Es bedarf immer einer Bandbreite von mindestens 1.500 Mbit/s um 8 AES/EBU Kanäle zu übertragen, obwohl deren Größe wesentlich geringer ist. Somit ist SMPTE 2022-6 nicht der Standard, der es zukünftig ermöglichen wird, professionelle Broadcaststrukturen komplett über Ethernet abzuwickeln. Eine Option, alle angeschlossenen Geräte in die gleiche Zeitebene zu bringen, gibt es bei SMPTE 2022-x nicht. In der Versuchsdurchführung wurde deutlich, dass eine gemeinsame Taktgebung maßgeblich ist, um Delay's bestmöglich einzuschränken. Dafür steht mit dem Precision Time Protocol ein seit Jahren etablierter Standard zur

Verfügung. Allerdings bedarf es auch hier Änderungen in bestehenden Hardwarestrukturen. Um das PTP in einer professionellen Produktionsumgebung einzusetzen, ist eine Taktung über GPS erforderlich. Damit wird sichergestellt, dass Master- und Slaveclocks zeitlich nah beieinanderliegen. Ebenso ist es erforderlich, die vorhandenen Taktgeber durch PTP-fähige Geräte zu ersetzen und deren Vernetzung mit der GPS-Außenantenne auch in Innenräumen zu realisieren. Um nicht sämtliche Hardware zu ersetzen, muss in Multifunktionsgeräte investiert werden, die sowohl PTP, als auch Broadcastsynchronisationssignale, wie Wordclock und Blackburst, verarbeiten können. Da PTP ein für kleine Netzwerke optimierter Standard ist, sollte bei der Signalführung auf eine geringe Anzahl von Switches geachtet werden. SMPTE 2022-x bietet nicht explizit die Möglichkeit, alle verwendeten Geräte über PTP zu synchronisieren, dennoch ist es durch separate Implementierung möglich dies zu verwenden. Der RAVENNA-Standard bietet eine kompakte Lösung, sowohl Bild- als auch Tonsignale zu übertragen und mit PTPv2 zu synchronisieren. Innerhalb der Videoübertragung ist eine Komprimierung notwendig, die im JPEG 2000-Codec qualitativ gut umsetzbar ist. Auch hier ist eine Einstellung je nach Produktion zu wählen. Prinzipiell bietet eine Übertragungsrate von 50 Mbit/s schon eine sendbare Qualität. Für Sendungen mit Informationscharakter, z.B. Nachrichten oder Gesprächsaufzeichnungen ist dies ausreichend. Bei Konzertveranstaltungen oder Unterhaltungssendungen sollte auf eine Bitrate von mindestens 100 Mbit/s gesetzt werden. Hier werden Details, auch in dunklen Bildanteile, sehr genau dargestellt. RAVENNA bietet die Möglichkeit, auch andere Komprimierungscodes zu verwenden. Das bedeutet, dass sowohl H.265, MPEG als auch JPEG 2000 Codecs verwendet werden können. Die bei einer Komprimierung entstehenden Latenzen von ca. 200 ms. liegen in einem Toleranzbereich, sind aber möglichst genau zu messen um Verzögerungen zwischen Ton und Bild zu vermeiden. Messungen sollten stets auf Regieseite durchgeführt werden und vor jeder Produktion stattfinden. Unkomprimierte Videosignale sind derzeit noch nicht möglich und bedürfen einer Überarbeitung des Standards mit einem größeren RTP-Payload, da viele kleine RTP-Pakete einen Datenstrom von 1.500 Mbit/s nicht unterbrechungsfrei wiedergeben können. Die Möglichkeiten, separate Audiostreams in RAVENNA zu erzeugen, macht diesen Standard sehr flexibel. Der Versuchsaufbau hat gezeigt, dass diese Audiostreams sehr stabil und auch qualitativ hochwertig sind. Auch die Flexibilität mit AES67-fähigen Geräten machen RAVENNA gerade für Audiostudios lukrativ. Mit RAVENNA gibt es einen Standard, der es ermöglicht eine Fernsehproduktion, wie ein Konzert in einem Studio des Bayerischen Rundfunks im Funkhaus, mit einer abgesetzten Regie in Freimann abzuwickeln. Aufgrund der Layer-3 basierten Implementierung und dem Aufbau auf bereits bestehende Netzwerkspezifikationen wie RTP und PTP ist es möglich, RAVENNA transparent über Switches zu übertragen.

## 6.1 Ausblick

Audio/Video over LAN ist die Produktionsart der Zukunft. Die Flexibilität, die die Netzwerktechnik bildet, gepaart mit preiswerten Installationen von Netzen ist für professionelle Fernsehanstalten ein Schritt zu transparenteren Produktionsmethoden. Diese ermöglichen es, künftig überall zu produzieren und zu senden, wo Netzwerkleitungen verlegt sind. SMPTE 2022-x bildet dabei das Grundgerüst, auf das künftige, derzeit in Entwicklung befindliche Formate aufbauen. Das VSF hat mit TR 03/04 Standardempfehlungen entwickelt, welche die Vorzüge von SMPTE 2022, unkomprimiertes und komprimiertes Übertragen von SDI, mit den Vorteilen von RAVENNA und AVB, Nutzung

von PTP, separate Audioübertragung, paart. TR 04 baut dabei auf eine unkomprimierte Übertragung, wie bei SMPTE 2022-6, zusammen mit dem AES67-Standard, um Audio von Video zu separieren. TR03 bietet die Möglichkeit, ähnlich wie bei RAVENNA, über RTP jegliche Form von Videoinhalten, unabhängig der Komprimierungsmethode, zu übertragen. Darauf aufbauend wurde im Januar 2016 die Erstellung eines neuen Standards, mit SMPTE 2110 benannt, eingeleitet. Dieser greift die Erkenntnisse des Video Service Forums auf und bietet eine Komplettlösung für Audio/Video over Ethernet, ähnlich dem Audio Video Bridging, an. Dieser Standard soll, im Gegensatz zu AVB, mindestens Layer-3 basiert sein um hardwaretechnische Transparenz zu liefern und um in bestehende Netzwerkstrukturen integriert werden zu können. Das bedeutet auch für die Hersteller von Broadcastperipherie ein Umdenken. Kommende Kamerasysteme, Kreuzschienen, Bild- und Audiomischer, sowie Monitore und Lautsprecher sollten mit streamingfähigen Netzwerkschnittstellen ausgestattet werden, die Audio/Video über Netzwerkprotokolle verarbeiten können. Unabhängig von den Standards können bei höherschichtigen Lösungen, wie RAVENNA oder SMPTE 2022, Softwareupdates für mehr Flexibilität sorgen. Somit wären Zwischenlösungen und Wandler, wie es im Versuchsaufbau angeordnet wurde, nicht mehr nötig und würden für zu mehr Herstellerunabhängigkeit führen. Proprietäre Lösungen bieten keine Alternative und werden bei der immer schnelleren Entwicklung neuer Standards zwangsläufig zu keinem Kostenvorteil führen.

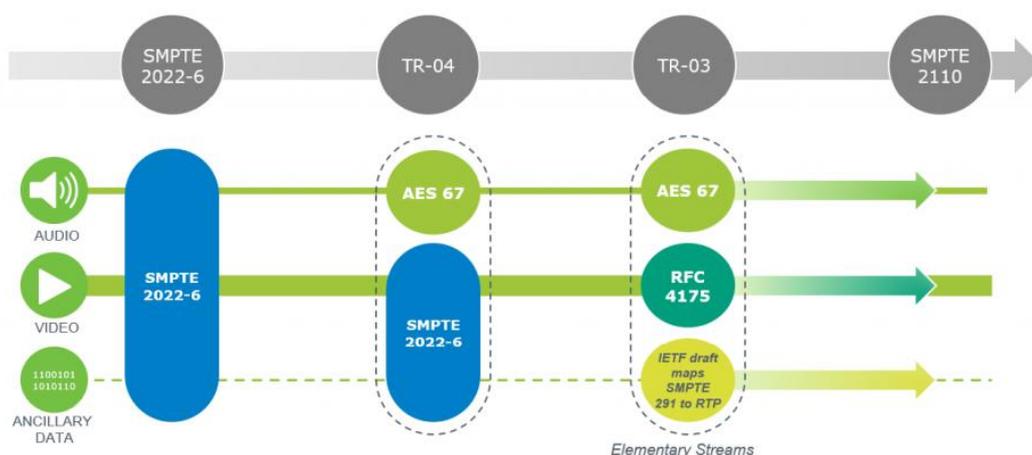


Abbildung 6.1-1 Entwicklung neuer Audio-/Video over Ethernetstandards [54]

Bei der Europameisterschaft 2016 wurden die im Testaufbau genutzten LAWO vRemotes erfolgreich zur Distribution der im Stadion erzeugten Signale zum International Broadcast Center eingesetzt. Auch in der Formel 1 wird seit 2016 verstärkt auf Remoteproduktionen gesetzt, die dort vor allem mit Kompaktlösungen von RIEDEL betrieben werden. Vor allem bei zukünftigen sportlichen Großereignissen wird die Entwicklung und Etablierung von Audio/Videostreams über Netzwerkverbindungen weiter voranschreiten und zukünftig Kosten für technisches Personal vor Ort einsparen.

## 6.2 Zukünftige Produktion im Bayerischen Rundfunk

Der Technische Fernsehbetrieb des Bayerischen Rundfunks hat sich im Jahr 2016 intensiv mit Produktionen über Ethernet beschäftigt. Im Juni gab es die erste Produktion im Funkhaus, die in Freimann abgewickelt wurde. Dabei wurden Remotecameras über die integrierte Ethernetschnittstelle ferngesteuert und auch die Kommandoleitungen über hausinterne Netzwerkstrukturen geführt. Die Übertragung der Audio- und Videosignale

erfolgte sowohl über die bestehenden SDI-Verbindungen zwischen Freimann und Funkhaus, als auch über SONY NXLIP55. Ein proprietärer Standard, aufgebaut auf SMPTE 2022-6, der über eine 1 Gbit/s Netzwerkverbindung komprimiertes SDI übertragen kann. Künftig sollen auch in der Außenübertragung regelmäßige Produktionen, wie z.B. die Abwicklung der Fussballdrittliga-Spiele in Regensburg über Netzwerkstreams realisiert werden. Eine gebuchte 1 Gbit/s Glasfaserleitung direkt nach Freimann bildet dabei die Sendestrecke. Ein kleines Team soll den notwendigen Aufbau der Kameras und Mikrofone im Stadion durchführen und über die im Versuchsaufbau verwendeten LAWO vRemotes alle Signale nach Freimann senden. Dort steht die entsprechende Gegenstelle, die alle ankommenden Signale in Broadcaststandards zurückwandelt und es ermöglicht, die Bild- und Tonquellen in den Regieräumen des Studio 1 auszusteuern. Weiterhin sollen über die 1 Gbit/s Strecke Rotlicht und Kommandosignale übertragen werden, um vor Ort den gewohnten Produktionsstandard zu garantieren. Kosten für Satellitenverbindungen und zusätzliche Transportleistungen für Technik und Personal würden dadurch entfallen. Im Herbst 2016 sind dafür erste Testläufe parallel zur Liveübertragung geplant.

## Literaturverzeichnis

- [1] P. Holleczeck, B. Vogel-Heuser, Echtzeitkommunikation und Ethernet/Internet: PEARL 2001 Workshop über Realzeitsysteme Fachtagung der GI-Fachgruppe 4.4.2 Echtzeitprogrammierung, PEARL Boppard, 22./23. November 2001, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [2] SMPTE, 3Gb/s SDI for Transport of 1080p50/60, 3D, UHD TV1 / 4k and Beyond.
- [3] Audio AG for RME Operations, Germany, RME: Produkte, available at <http://www.rme-audio.de/products/madi-center.php> (accessed on June 18, 2016).
- [4] Reicheltpedia, Koaxialkabel, available at <http://www.reichelt.de/reicheltpedia/index.php5/Koaxialkabel> (accessed on June 18, 2016).
- [5] Elektronik Kompendium, Koaxialkabel / Koaxialleitung, available at <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0308051.htm> (accessed on June 18, 2016).
- [6] Wikipedia, Triaxialkabel, available at <https://de.wikipedia.org/w/index.php?ol-did=154917538> (accessed on June 19, 2016).
- [7] S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, 1st ed., Springer-Verlag, s.l., 2008.
- [8] D. von Miles, Jitter- und Timing-Analyse bei Übersprechen, available at <http://www.elektroniknet.de/messen-testen/sonstiges/artikel/92439/> (accessed on June 18, 2016).
- [9] ITWissen.info, Augendiagramm eye pattern :, available at <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Augendiagramm-eye-pattern.html> (accessed on June 19, 2016).
- [10] Elektronik Kompendium, Lichtwellenleiter (LWL / Glasfaser), available at <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0301282.htm> (accessed on June 18, 2016).
- [11] Reicheltpedia, Lichtwellenleiter, available at <http://www.reichelt.de/reicheltpedia/index.php5/Lichtwellenleiter> (accessed on June 18, 2016).
- [12] film-tv-video.de, Olympia in Sotschi: So übertragen ARD und ZDF die Winterspiele 2014, available at <https://www.film-tv-video.de/productions/2014/02/01/olympia-in-sotschi-so-ubertragen-ard-und-zdf-die-winterspiele-2014/> (accessed on June 19, 2016).
- [13] InfoTip Kompendium, Kupfer- und Lichtwellenleiter bei Übertragungsmedien, available at <http://kompendium.infotip.de/uebertragungsmedien-kupfer-und-lichtwellenleiter.html> (accessed on June 18, 2016).
- [14] RIEDEL, » Medien-Netzwerke » MediorNet Compact, available at <https://www.riedel.net/de/produkte/media-networks/mediornet-compact/> (accessed on June 18, 2016).
- [15] Grass Valley, a Belden Brand, CopperHead 3200, available at [https://www.grass-valley.com/products/copperhead\\_3200](https://www.grass-valley.com/products/copperhead_3200) (accessed on June 18, 2016).
- [16] Jim Alfonse, Timing is Everything, available at <http://www.tri-sysdesigns.com/Articles/TimingisEverything.html> (accessed on June 18, 2016).
- [17] National Instruments, Grundlagen zur Videosignalmessung und -erzeugung, available at <http://www.ni.com/white-paper/4750/de/> (accessed on June 19, 2016).
- [18] M. Herzog, Videotechnik\_full.key.

- [19] Film-TV-VIDEO, IP-Special: Sony, Norbert Paquet - film-tv-video.de, available at <https://www.film-tv-video.de/technology/2015/07/02/ip-special-sony-norbert-paquet/> (accessed on May 27, 2016).
- [20] D.L. Mills, Internet time synchronization: the network time protocol, IEEE Transactions on communications 39 (10) (1991) 1482–1493.
- [21] croubeau, White\_Paper\_IEEE1588\_de\_v1-2.
- [22] J. Kannisto, T. Vanhatupa, M. Hannikainen, T. D. Hamalainen (Eds.), Software and hardware prototypes of the IEEE 1588 precision time protocol on wireless LAN, IEEE, 2005.
- [23] Andrew Gallo, Präzises Timing in Ethernet-Netzwerken mit SyncE und PTP, available at <http://www.searchnetworking.de/tipp/Praezises-Timing-in-Ethernet-Netzwerken-mit-SyncE-und-PTP> (accessed on June 16, 2016).
- [24] Scope Online, RAVENNA-Technologie wird noch flexibler - SCOPE ONLINE, available at <http://www.scope-online.de/elektrotechnik-elektronik/ravenna-technologie-wird-noch-flexibler.htm> (accessed on June 13, 2016).
- [25] Alex McCarthy, Zeitsynchronisation gemäß dem Standard IEEE 1588.
- [26] Real-Time Systems - GmbH, IEEE 1588 Precision Time Protocol PTP Zeitsynchronisierung für LXI und Ethernet, available at [https://www.real-time-systems.com/de/ieee\\_1588/index.php](https://www.real-time-systems.com/de/ieee_1588/index.php) (accessed on June 16, 2016).
- [27] ALC NetworX GmbH, Technology Overview, available at <http://ravenna.alcnetworx.com/technology/technology-overview.html> (accessed on June 16, 2016).
- [28] ITWissen.info, PTP precision time protocol ITWissen.info, available at <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/precision-time-protocol-PTP.html> (accessed on June 16, 2016).
- [29] Wikipedia, Vorwärtsfehlerkorrektur, available at <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=139808524> (accessed on June 18, 2016).
- [30] R. Steinmetz, Multimedia-Technologie: Grundlagen, Komponenten und Systeme, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2000.
- [31] T. Nutt, Standards for Distributing Video over IP.
- [32] Jim Kurose, Keith Ross, Addison-Wesley, Computer Networking: A Top Down Approach.
- [33] Peter Holleczeck, Verteilte Interaktive TV-Produktion Die Herausforderung an Kommunikationsnetze.
- [34] M. Laabs, SDI over IP - seamless signal switching in SMPTE 2022-6 and a novel multicast routing concept.
- [35] Markus Berg, Sonja Langhans, Franz Baumann, Andreas Metz, Neue Netzinfrastrukturen für Studio und Produktion?
- [36] ITWissen.info, AVB audio video bridging ITWissen.info, available at <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/AVB-audio-video-bridging.html> (accessed on June 13, 2016).
- [37] Tim Grai, Schnelle Datenübertragung, available at <http://www.elektro-niknet.de/automotive/bussysteme/artikel/121066/> (accessed on June 15, 2016).
- [38] Hyung-Taek Lim, Daniel Herrscher, Lars Völker, Martin Johannes Walzl (Eds.), IEEE 802.1 AS time synchronization in a Switched Ethernet based in-car network, IEEE, 2011.
- [39] M.S. Peter Schut, AVB Presentation german.

- [40] G.M. Garner, F. Feng, K. Den Hollander, H. Jeong, B. Kim, B.-J. Lee, T.-C. Jung, J. Joung, IEEE 802.1 AVB and Its Application in Carrier-Grade Ethernet [Standards Topics], IEEE Communications Magazine 45 (12) (2007) 126–134.
- [41] Dirk Srocke, Andreas Donner, Audio Video Bridging vor dem Durchbruch, available at <http://www.ip-insider.de/audio-video-bridging-vor-dem-durchbruch-a-425852/> (accessed on June 15, 2016).
- [42] Simon Oudin, Nobukatsu Kitajima, Das zukünftige ETHERNET-AVB-NETZWERK.
- [43] AXON, Video/audio over Ethernet - Products, available at <https://www.axon.tv/EN/products/90-videoaudio-over-ethernet> (accessed on June 15, 2016).
- [44] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson, RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, available at <https://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt> (accessed on June 26, 2016).
- [45] W. Kumeling, NAB 2015 part one: IP preview, available at <http://www.wkumeling.net/nab2015-1.htm> (accessed on June 15, 2016).
- [46] Artel, THE BROADCASTER'S GUIDE TO SMPTE 2022: APPLICATIONS IN VIDEO CONTRIBUTION AND DISTRIBUTION.
- [47] LAWO, Prodcut Page LAWO vRemote, available at <https://www.lawo.de/de/produkte/video-processing-core-infrastructure/v-remote4.html> (accessed on June 16, 2016).
- [48] Sebastian Ruchti, Broadcast meets IP.
- [49] ALC NetworX GmbH, Partner Companies, available at <http://ravenna.alcnetworx.com/partners/partner-companies.html> (accessed on June 16, 2016).
- [50] A. Hildebrand, RAVENNA – Network Requirements.
- [51] Rob, Merging-Ravenna V 8 1.0.book.
- [52] Wikipedia, Ravenna (networking) - Wikipedia, the free encyclopedia, available at <https://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=720602921> (accessed on June 16, 2016).
- [53] R.W. Corrigan, B.R. Lang, D.A. LeHoty, P.A. Alioshin, An Alternative Architecture for High Performance Display, Nov 20 (1999) 1–5.
- [54] Standards for media transport over IP - Nevion, available at <https://nevision.com/blog/standards/> (accessed on June 26, 2016).

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1.2-1 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VERNETZUNG ALLER DREI STANDORTE	13
ABBILDUNG 1.3-1 KONZEPT STUDIO 1 FREIMANN BR	15
ABBILDUNG 1.3-2 BILDREGIE STUDIO 1 IN FREIMANN	15
ABBILDUNG 1.3-3 ÜBERTRAGUNGSWAGEN DES BR	16
ABBILDUNG 1.3-4 INNENANSICHT EINES Ü-WAGEN	16
ABBILDUNG 2.1-1 AUFBAU EINES KOAXIALKABELS [5]	16
ABBILDUNG 2.1-2 JITTER-EFFEKT	17
ABBILDUNG 2.1-3 DARSTELLUNG DES AUGENDIAGRAMMS [9]	17
ABBILDUNG 2.2-1 AUFBAU EINES LICHTWELLENLEITERS [10]	17
ABBILDUNG 2.3-1 AUFBAU EINES SDI-SIGNALS NACH [18]	18
ABBILDUNG 2.3-2 AES/EBU DATENSTROM MIT SYNC-INFORMATION	19
ABBILDUNG 3.1-1 PRINZIP DER SYNCHRONISIERUNG VON UHREN ÜBER PTP [26]	22
ABBILDUNG 3.2-1 XOR-VERKNÜPFUNG HORIZONTAL UND VERTIKAL	24
ABBILDUNG 3.2-2 AUSWIRKUNG VON FEC VERFAHREN AUF VERZÖGERUNG/ BANDBREITE (PETER HOLLECZEK [33])	25
ABBILDUNG 3.3-1 AVB-DIENSTE [36]	25
ABBILDUNG 3.3-2 AUFBAU EINES AVB-FRAMES [37]	26
ABBILDUNG 3.4-1 PROTOKOLLSCHICHTEN IM SMPTE 2022-6 STANDARD [35]	29
ABBILDUNG 3.4-2 SMPTE 2022-6 PAKET [45]	29
ABBILDUNG 3.4-3 PRINZIP DER ZWEI-WEGEFÜHRUNG IN SMPTE 2022-7 [31]	30
ABBILDUNG 3.5-1 EINORDNUNG DER VON RAVENNA GENUTZTEN PROTOKOLLE IM ISO/OSI SCHICHTENMODELL [27]	31
ABBILDUNG 3.5-2 BEISPIEL EINES AUDIOBASIERTEN NETZWERKAUFBAUS [51]	32
ABBILDUNG 4.2-1 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES GESAMTAUFBAUS	34
ABBILDUNG 4.2-2 SCHEMA NETZWERKAUFBAU	34
ABBILDUNG 4.2-3 SCHALTPLAN GESAMTAUFBAU	35
ABBILDUNG 4.2-4 SCHALTPLAN NETZWERK	37
ABBILDUNG 4.2-5 SCHEMA DES AUDIO-/VIDEO AUFBAUS	37
ABBILDUNG 4.2-6 SCHALTWEGE IM vREMOTE A	38
ABBILDUNG 4.2-7 SCHALTWEGE IM vREMOTE B	38
ABBILDUNG 4.2-8 SCHEMA VIDEOAUFBAU	39
ABBILDUNG 4.2-9 SCHALTPLAN VIDEO	40
ABBILDUNG 4.2-10 SCHALTPLAN AUDIO	40
ABBILDUNG 4.3-1 NUMMERIERUNG DER MESSPUNKTE	41
ABBILDUNG 4.3-2 MESSUNG VIDEODELAY	43
ABBILDUNG 4.3-3 MESSAUFBAU VIDEO	43
ABBILDUNG 4.3-4 MESSUNG AUDIODELAY	43
ABBILDUNG 4.4-1 PARAMETERVARIANTEN DER LAW0 vREMOTES	44
ABBILDUNG 4.5-1 ENTWICKLUNG DES AUDIODELAYS	49
ABBILDUNG 4.5-2 ANZAHL DURCHSCHNITTLICHER UNICASTPAKETE AM PORT 1 SWITCH B	52
ABBILDUNG 4.5-3 STANDARDABWEICHUNG DER UNICASTPAKETE AM PORT 1 SWITCH B	53
ABBILDUNG 4.5-4 GRAPHISCHE STANDARDABWEICHUNG EMPFANGENER DATEN AM MESSPUNKT 1	53
ABBILDUNG 6.1-1 ENTWICKLUNG NEUER AUDIO-/VIDEO OVER ETHERNETSTANDARDS [54]	61

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 4.2-1 VERWENDETE IP-ADRESSEN .....	36
TABELLE 4.5-1 GEMESSENES VIDEODELAY .....	48
TABELLE 4.5-2 GEMESSENES AUDIODELAY .....	48
TABELLE 4.5-3 MITTELWERT UND STANDARDABWEICHUNG IN MS .....	49
TABELLE 4.5-4 MESSUNG DES AUDIO-/VIDEO DELAYS IN MS .....	50
TABELLE 4.5-5 AUSSCHNITT ÜBERTRAGENE DATENMENGEN IM TEILGEBIET III .....	51
TABELLE 4.5-6 AUSSCHNITT ÜBERTRAGENE DATENMENGEN IM TEILGEBIET IV .....	51
TABELLE 4.5-7 VERHÄLTNIS DER ANKOMMENDEN DATEN ZU GESENDETEN DATEN DER JEWEILIGEN MESSPUNKTE .....	51
TABELLE 4.5-8 GESENDETE RAHMEN AM MESSPUNKT 4 IN DER QUALITÄTSSTUFE RAW .....	52
TABELLE 4.5-9 STANDARDABWEICHUNG DER ANKOMMENDEN DATENPAKTE AM MESSPUNKT 1 IN KBYTE .....	53
TABELLE 5.0-1 VERGLEICH EINGEHENDER DATEN IN KBYTE BEI MESSPUNKT 1 QUALITÄTSSTUFE 2 Mbit/s .....	55



## Abkürzungen

1 GbE	1 Gbit/s
10 GbE	10 Gbit/s
AES/EBU	Audio Engineering Society/ European Broadcast Union
ATM	Asynchronus Transfer Modus
AVB	Audio Video Bridging
BB	BlackBurst
BMCA	Best Master Clock Algorithm
BNC	Bayonet Neill Concelman
CoS	Class of Service
CRC	Cyclic redundancy check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection
DVE	Digital Video Effect
FEC	Forward Error Correction
FH	Funkhaus
FM	Freimann
GPS	Global Positioning System
HBRMT	High Bitrate Media Transport
HD	High-Definition
i	interlaced
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internetprotocol
J2K	JPEG200
LAN	Local Area Network
LC	lucent connector
LWL	Lichtwellenleiter
MADI	Multi Channel Audio Digital Interface
MPEG	Moving Picture Experts Group
NAS	Network Attached Storage
NMI	Network Media Interface
p	progressiv
PAL	Phase Alternating Line
PTP	Precision Time Protocol
QoS	Quality of Service
Ref	Reference
RFC	Request for Comments
RTP	Real-Time Transport Protocol
RTSP	Real-Time Streaming Protocol
SC	Subscriber Connector
SD	Standard-Definition
SDI	Serial Digital Interface
SFP	Small Form-factor Pluggable
SMPTE	Society of Motion Picture & Television Engineers

## *Abkürzungen*

SNMP	Simple Network Management Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TR-03/04	Technical Recommendation
UDP	User Datagram Protocol
UFÖ	Unterführung
VSF	Video Service Forum

## Anhang

- Dokumentation/PDF/sing16.pdf  
Digitale Version der Arbeit im pdf-Format
- Dokumentation/word/  
Word-Datei der Arbeit
- Dokumentation/Abstract.txt  
Abstract-Text der Arbeit im txt-Format
- Literatur/  
Verwendete Quellen im pdf-Format, sofern vorhanden
- Sources/Drawings/  
Verwendete Abbildungen in der Bachelorarbeit



## Anhang A Messergebnisse Datendurchsatz

### A.1 Übertragene Datenmengen Teilbereich I

Minute	Messpunkt 1 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 2 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 3 Daten eingehend in kByte	Messpunkt 4 Daten eingehend in kByte
<b>2 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>271.404,18</b>	<b>330.171,45</b>	<b>329.469,64</b>	<b>288.474,55</b>
1	270.813,00	310.275,00	313.355,00	285.358,00
2	268.514,00	333.193,00	324.376,00	284.961,00
3	268.555,00	330.081,00	327.514,00	286.738,00
4	275.842,00	328.386,00	336.951,00	292.483,00
5	270.335,00	329.513,00	332.348,00	284.350,00
6	268.086,00	336.456,00	327.754,00	284.475,00
7	268.035,00	331.141,00	328.636,00	286.316,00
8	275.695,00	330.132,00	338.769,00	292.856,00
9	273.706,00	329.284,00	332.352,00	287.668,00
10	272.930,00	341.588,00	332.455,00	291.040,00
11	272.935,00	331.837,00	329.656,00	296.975,00
<b>50 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>1.748.483,45</b>	<b>2.437.665,64</b>	<b>2.432.159,18</b>	<b>1.844.659,64</b>
1	1.730.119,00	2.395.826,00	2.442.818,00	1.867.337,00
2	1.730.465,00	2.508.617,00	2.423.077,00	1.826.972,00
3	1.770.624,00	2.401.577,00	2.384.480,00	1.818.413,00
4	1.735.556,00	2.405.083,00	2.464.633,00	1.832.939,00
5	1.735.873,00	2.438.762,00	2.461.631,00	1.873.773,00
6	1.747.413,00	2.521.920,00	2.458.253,00	1.855.019,00
7	1.783.924,00	2.448.797,00	2.426.646,00	1.831.389,00
8	1.734.502,00	2.412.712,00	2.483.521,00	1.828.426,00
9	1.735.191,00	2.458.189,00	2.485.755,00	1.871.446,00
10	1.746.751,00	2.441.249,00	2.365.000,00	1.854.012,00
11	1.782.900,00	2.381.590,00	2.357.937,00	1.831.530,00
<b>100 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>3.283.693,11</b>	<b>3.357.252,22</b>	<b>3.359.561,44</b>	<b>3.382.503,89</b>
1	3.269.389,00	3.345.700,00	3.373.276,00	3.429.318,00
2	3.308.753,00	3.242.708,00	3.141.544,00	3.354.435,00
3	3.245.897,00	3.443.182,00	3.416.035,00	3.332.078,00
4	3.268.449,00	3.358.934,00	3.445.296,00	3.357.472,00
5	3.291.277,00	3.345.700,00	3.373.276,00	3.432.764,00
6	3.354.069,00	3.432.043,00	3.344.193,00	3.394.302,00
7	3.263.157,00	3.367.427,00	3.430.711,00	3.353.590,00
8	3.263.718,00	3.340.037,00	3.371.096,00	3.356.350,00
9	3.288.529,00	3.339.539,00	3.340.626,00	3.432.226,00
<b>120 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>3.696.605,91</b>	<b>3.657.524,18</b>	<b>3.647.995,73</b>	<b>3.791.271,64</b>
1	3.766.667,00	3.310.295,00	3.338.321,00	3.816.783,00
2	3.650.902,00	3.405.651,00	3.316.792,00	3.751.747,00
3	3.639.070,00	3.344.647,00	3.321.075,00	3.731.862,00
4	3.770.180,00	3.579.524,00	3.577.475,00	3.839.229,00

## Anhang

5		3.668.305,00	3.698.929,00	3.801.689,00	3.815.443,00
6		3.668.693,00	3.930.910,00	3.853.845,00	3.768.082,00
7		3.696.447,00	3.885.416,00	3.858.997,00	3.771.834,00
8		3.768.379,00	3.855.540,00	3.958.579,00	3.857.958,00
9		3.668.648,00	3.855.633,00	3.891.787,00	3.816.002,00
10		3.670.204,00	3.963.016,00	3.858.067,00	3.767.679,00
11		3.695.170,00	3.403.205,00	3.351.326,00	3.767.369,00
<b>RAW</b>	<b>Ø</b>	<b>45.644.301,64</b>	<b>45.729.666,45</b>	<b>45.734.507,18</b>	<b>45.722.546,73</b>
1		45.307.333,00	46.591.329,00	45.315.522,00	46.695.338,00
2		45.308.501,00	45.333.175,00	45.343.664,00	45.288.786,00
3		45.997.659,00	45.286.298,00	46.797.657,00	45.307.657,00
4		46.154.358,00	45.586.187,00	45.333.381,00	45.437.645,00
5		45.286.199,00	46.565.184,00	45.358.317,00	46.745.293,00
6		45.280.839,00	45.284.367,00	46.821.751,00	45.309.120,00
7		45.982.632,00	45.580.225,00	45.307.702,00	45.326.323,00
8		46.142.964,00	46.582.384,00	45.331.674,00	45.412.763,00
9		45.302.410,00	45.319.447,00	45.375.747,00	46.749.601,00
10		45.307.964,00	45.324.003,00	46.787.229,00	45.349.789,00
11		46.016.459,00	45.573.732,00	45.306.935,00	45.325.699,00

## A.2 Übertragene Datenmengen Teilbereich II

Minute		Messpunkt 1 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 2 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 3 Daten eingehend in kByte	Messpunkt 4 Daten eingehend in kByte
<b>2 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>508.599,27</b>	<b>49.912.243,82</b>	<b>50.018.466,09</b>	<b>524.768,45</b>
1		520.642,00	51.259.711,00	52.189.852,00	537.011,00
2		520.528,00	51.591.340,00	53.965.452,00	548.050,00
3		519.747,00	49.932.329,00	47.240.841,00	533.133,00
4		507.860,00	48.307.877,00	49.030.987,00	516.019,00
5		498.646,00	50.543.328,00	49.013.114,00	514.512,00
6		508.510,00	52.187.924,00	53.731.236,00	525.351,00
7		506.629,00	47.225.337,00	50.624.280,00	521.738,00
8		498.877,00	47.716.443,00	45.236.549,00	514.905,00
9		498.982,00	50.256.058,00	49.719.013,00	514.934,00
10		508.000,00	49.133.973,00	49.923.288,00	525.302,00
11		506.171,00	50.880.362,00	49.528.515,00	521.498,00
<b>50 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>1.764.461,18</b>	<b>59.959.538,09</b>	<b>60.063.848,64</b>	<b>1.784.174,09</b>
1		1.719.704,00	29.089.875,00	30.340.655,00	1.741.656,00
2		1.718.286,00	54.939.940,00	56.049.509,00	1.774.692,00
3		1.791.139,00	63.266.393,00	62.961.667,00	1.798.593,00
4		1.785.093,00	64.529.668,00	63.019.207,00	1.774.005,00
5		1.757.764,00	63.492.509,00	62.949.532,00	1.773.724,00
6		1.757.686,00	63.020.313,00	63.977.465,00	1.810.583,00
7		1.791.408,00	63.745.066,00	63.678.953,00	1.798.792,00
8		1.784.330,00	62.766.036,00	63.177.173,00	1.773.073,00

9	1.755.825,00	62.300.481,00	61.530.924,00	1.771.720,00	
10	1.756.239,00	64.997.999,00	66.390.356,00	1.809.897,00	
11	1.791.599,00	67.406.639,00	66.626.894,00	1.799.180,00	
<b>100 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>3.292.810,00</b>	<b>60.362.738,00</b>	<b>60.255.423,36</b>	<b>3.327.816,64</b>
1	3.292.762,00	25.793.110,00	27.906.693,00	3.304.957,00	
2	3.106.580,00	58.470.191,00	56.910.847,00	3.149.918,00	
3	3.344.665,00	65.803.557,00	64.281.265,00	3.420.025,00	
4	3.293.149,00	63.468.226,00	64.172.346,00	3.328.862,00	
5	3.292.762,00	64.458.451,00	64.550.603,00	3.304.957,00	
6	3.350.898,00	66.100.863,00	62.939.774,00	3.375.174,00	
7	3.339.331,00	57.981.736,00	60.874.219,00	3.352.704,00	
8	3.290.133,00	63.432.877,00	63.847.704,00	3.308.116,00	
9	3.288.975,00	64.206.831,00	65.007.324,00	3.306.529,00	
10	3.355.890,00	65.172.081,00	65.013.047,00	3.397.923,00	
11	3.265.765,00	69.102.195,00	67.305.835,00	3.356.818,00	
<b>120 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>3.582.956,09</b>	<b>65.526.303,73</b>	<b>65.540.142,55</b>	<b>3.598.390,73</b>
1	3.265.149,00	69.003.866,00	65.454.769,00	3.280.133,00	
2	3.264.291,00	63.910.787,00	66.031.064,00	3.281.453,00	
3	3.328.112,00	64.299.901,00	66.366.510,00	3.351.732,00	
4	3.570.040,00	60.514.884,00	62.069.445,00	3.588.720,00	
5	3.689.889,00	67.460.811,00	62.828.641,00	3.693.436,00	
6	3.740.223,00	66.607.859,00	67.675.541,00	3.763.660,00	
7	3.875.873,00	64.889.419,00	66.485.182,00	3.900.518,00	
8	3.862.221,00	63.890.920,00	64.007.087,00	3.875.360,00	
9	3.804.489,00	67.740.495,00	65.582.056,00	3.822.459,00	
10	3.838.217,00	67.682.420,00	67.683.385,00	3.801.827,00	
11	3.174.013,00	64.787.979,00	66.757.888,00	3.223.000,00	
<b>RAW</b>	<b>Ø</b>	<b>45.530.785,64</b>	<b>71.961.190,18</b>	<b>72.005.846,91</b>	<b>45.603.841,09</b>
1	44.071.880,00	73.301.360,00	71.401.114,00	45.321.802,00	
2	45.301.010,00	70.451.673,00	70.363.139,00	45.283.986,00	
3	45.995.873,00	71.086.421,00	73.487.444,00	45.422.863,00	
4	46.143.632,00	71.656.340,00	71.090.806,00	46.753.836,00	
5	45.281.309,00	73.470.952,00	71.534.236,00	45.314.268,00	
6	45.289.205,00	71.563.705,00	71.670.013,00	45.295.746,00	
7	45.989.452,00	71.527.197,00	73.951.971,00	45.447.610,00	
8	46.155.647,00	72.007.906,00	71.573.474,00	46.763.287,00	
9	45.303.235,00	73.421.879,00	71.443.071,00	45.334.913,00	
10	45.318.691,00	71.464.980,00	71.533.521,00	45.265.924,00	
11	45.988.708,00	71.620.679,00	74.015.527,00	45.438.017,00	

## A.3 Übertragene Datenmengen Teilbereich III

Minute	Messpunkt 1 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 2 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 3 Daten eingehend in kByte	Messpunkt 4 Daten eingehend in kByte
<b>2 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>168.657,90</b>	<b>2.539.366,70</b>	<b>2.536.952,70</b>	<b>186.872,50</b>
1	167.376,00	2.478.906,00	2.569.681,00	185.403,00
2	167.820,00	2.503.368,00	2.540.063,00	190.689,00
3	172.884,00	2.545.222,00	2.396.357,00	185.027,00
4	167.453,00	2.545.003,00	2.555.786,00	185.095,00
5	167.539,00	2.454.890,00	2.505.751,00	185.624,00
6	168.057,00	2.639.189,00	2.711.260,00	190.966,00
7	172.871,00	3.074.659,00	2.947.122,00	184.981,00
8	167.417,00	2.600.994,00	2.618.940,00	184.947,00
9	167.360,00	2.282.931,00	2.283.033,00	185.365,00
10	167.802,00	2.268.505,00	2.241.534,00	190.628,00
<b>50 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>1.641.510,27</b>	<b>4.112.275,73</b>	<b>4.115.507,64</b>	<b>1.659.321,27</b>
1	1.631.255,00	4.082.578,00	4.129.810,00	1.700.789,00
2	1.572.933,00	4.218.498,00	4.140.800,00	1.592.467,00
3	1.685.523,00	3.972.263,00	4.054.425,00	1.651.954,00
4	1.632.659,00	4.163.202,00	4.140.476,00	1.654.940,00
5	1.632.683,00	4.180.918,00	4.148.756,00	1.702.413,00
6	1.637.047,00	4.133.027,00	4.095.791,00	1.650.093,00
7	1.682.989,00	4.080.466,00	4.144.159,00	1.648.312,00
8	1.631.343,00	4.148.181,00	4.158.452,00	1.651.912,00
9	1.631.255,00	4.079.268,00	4.079.525,00	1.700.789,00
10	1.635.896,00	4.183.447,00	4.266.271,00	1.649.340,00
11	1.683.030,00	3.993.185,00	3.912.119,00	1.649.525,00
<b>100 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>3.196.644,18</b>	<b>5.780.366,45</b>	<b>5.779.157,36</b>	<b>3.215.295,55</b>
1	3.166.155,00	5.643.883,00	5.633.939,00	3.194.904,00
2	3.175.285,00	6.386.142,00	6.425.694,00	3.287.581,00
3	3.267.209,00	6.552.363,00	6.672.608,00	3.182.573,00
4	3.168.807,00	6.009.783,00	5.882.739,00	3.183.776,00
5	3.163.813,00	5.520.393,00	5.529.805,00	3.194.821,00
6	3.174.883,00	5.602.566,00	5.642.431,00	3.286.626,00
7	3.268.105,00	5.680.986,00	5.632.140,00	3.187.411,00
8	3.168.667,00	5.746.395,00	5.732.948,00	3.184.956,00
9	3.166.993,00	5.489.381,00	5.468.461,00	3.195.603,00
10	3.178.221,00	5.473.387,00	5.485.487,00	3.286.712,00
11	3.264.948,00	5.478.752,00	5.464.479,00	3.183.288,00
<b>120 Mbit/s</b> <b>Ø</b>	<b>3.161.426,00</b>	<b>5.734.677,25</b>	<b>5.583.240,13</b>	<b>3.179.240,13</b>
1	3.166.738,00	5.628.418,00	5.642.449,00	3.184.900,00
2	3.167.421,00	5.510.632,00	5.476.024,00	3.193.838,00
3	3.177.556,00	5.646.247,00	5.560.852,00	3.286.942,00
4	3.266.786,00	5.456.660,00	5.626.640,00	3.183.527,00

5	3.167.172,00	5.632.183,00	5.538.656,00	3.186.101,00
6	3.167.227,00	5.965.396,00	5.968.093,00	3.194.627,00
7	3.175.867,00	6.008.826,00	5.885.756,00	3.284.854,00
8	3.002.641,00	6.029.056,00	4.967.451,00	2.919.132,00
<b>RAW</b>	<b>Ø</b>	<b>45.644.363,60</b>	<b>45.463.676,70</b>	<b>46.105.470,90</b>
1	45.285.570,00	43.628.180,00	45.311.829,00	45.912.168,00
2	45.530.900,00	45.299.012,00	45.320.501,00	46.277.925,00
3	46.660.435,00	45.345.498,00	45.833.615,00	45.308.204,00
4	45.340.834,00	46.730.042,00	46.357.351,00	45.314.522,00
5	45.312.989,00	45.509.439,00	45.304.558,00	45.915.649,00
6	45.546.011,00	45.319.382,00	45.316.660,00	46.280.218,00
7	46.615.568,00	45.304.155,00	45.828.724,00	45.308.066,00
8	45.322.374,00	46.707.431,00	46.366.060,00	45.321.515,00
9	45.286.551,00	45.489.624,00	45.295.252,00	45.898.350,00
10	45.542.404,00	45.304.004,00	50.120.159,00	46.279.915,00

#### A.4 Übertragene Datenmengen Teilbereich IV

Minute	Messpunkt 1 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 2 Daten ausgehend in kByte	Messpunkt 3 Daten eingehend in kByte	Messpunkt 4 Daten eingehend in kByte
<b>2 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>167.169,36</b>	<b>69.203.748,73</b>	<b>68.230.342,64</b>
1	168.680,00	56.780.662,00	45.217.674,00	188.514,00
2	171.553,00	69.245.876,00	70.694.014,00	182.667,00
3	166.361,00	70.871.982,00	71.033.060,00	184.449,00
4	165.393,00	71.111.312,00	70.220.465,00	183.926,00
5	166.215,00	70.092.151,00	70.363.243,00	181.117,00
6	169.019,00	69.920.064,00	70.479.867,00	181.344,00
7	165.227,00	71.421.551,00	70.936.182,00	184.390,00
8	165.436,00	69.138.234,00	68.762.641,00	183.955,00
9	165.723,00	69.353.845,00	69.843.297,00	180.940,00
10	170.518,00	70.705.325,00	71.382.600,00	181.735,00
11	164.738,00	72.600.234,00	71.600.726,00	184.090,00
<b>50 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>3.317.458,75</b>	<b>70.664.510,08</b>	<b>69.964.269,25</b>
1	3.814.985,00	69.445.950,00	70.679.436,00	3.717.217,00
2	3.702.905,00	72.052.740,00	71.602.741,00	3.779.534,00
3	3.701.436,00	69.852.675,00	62.784.260,00	3.785.848,00
4	3.154.412,00	71.173.410,00	69.693.061,00	3.225.109,00
5	3.154.926,00	70.631.874,00	70.099.447,00	3.228.122,00
6	3.166.165,00	70.212.010,00	71.305.827,00	3.172.187,00
7	3.248.775,00	71.326.749,00	71.139.691,00	3.162.928,00
8	3.143.084,00	70.078.472,00	69.200.403,00	3.214.517,00
9	3.167.229,00	70.514.814,00	70.558.414,00	3.226.828,00
10	3.250.474,00	69.664.914,00	70.558.604,00	3.171.899,00
11	3.153.169,00	72.033.508,00	71.647.844,00	3.171.430,00
12	3.151.945,00	70.987.005,00	70.301.503,00	3.222.221,00

Anhang

<b>100 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>3.452.085,89</b>	<b>71.063.288,33</b>	<b>71.083.993,33</b>	<b>3.468.456,00</b>
1		3.701.167,00	71.237.805,00	71.525.789,00	3.765.233,00
2		3.696.158,00	70.815.151,00	70.809.051,00	3.784.313,00
3		3.620.410,00	70.483.896,00	70.658.268,00	3.558.794,00
4		3.397.452,00	70.335.773,00	71.159.191,00	3.304.408,00
5		3.256.421,00	73.328.355,00	72.522.237,00	3.351.227,00
6		3.300.269,00	71.208.152,00	70.901.737,00	3.443.307,00
7		3.348.519,00	70.590.295,00	70.479.817,00	3.351.347,00
8		3.395.013,00	71.529.643,00	70.462.862,00	3.325.181,00
9		3.353.364,00	70.040.525,00	71.236.988,00	3.332.294,00
<b>120 Mbit/s</b>	<b>Ø</b>	<b>3.317.805,60</b>	<b>68.143.599,00</b>	<b>67.457.632,60</b>	<b>3.373.273,00</b>
1		3.224.501,00	70.280.988,00	70.264.342,00	3.366.605,00
2		3.422.510,00	71.307.298,00	70.924.743,00	3.395.446,00
3		3.392.731,00	72.061.538,00	70.920.025,00	3.319.176,00
4		3.259.989,00	70.468.544,00	71.899.037,00	3.320.090,00
5		3.289.297,00	56.599.627,00	53.280.016,00	3.465.048,00
<b>RAW</b>	<b>Ø</b>	<b>45.633.300,40</b>	<b>71.838.091,30</b>	<b>70.951.800,50</b>	<b>45.617.815,20</b>
1		46.612.877,00	68.462.958,00	64.541.743,00	45.314.181,00
2		45.308.084,00	73.786.423,00	73.279.767,00	45.322.655,00
3		45.283.579,00	71.903.039,00	71.609.417,00	45.906.785,00
4		45.544.153,00	71.642.814,00	71.598.335,00	46.260.205,00
5		46.604.569,00	73.765.489,00	72.395.396,00	45.276.599,00
6		45.279.905,00	71.856.043,00	73.221.953,00	45.286.425,00
7		45.317.675,00	71.659.279,00	71.611.262,00	45.893.568,00
8		45.548.831,00	71.633.889,00	71.648.517,00	46.286.035,00
9		46.647.987,00	73.818.486,00	72.469.690,00	45.325.735,00
10		44.185.344,00	69.852.493,00	67.141.925,00	45.305.964,00

## Anhang B Übertragene Broadcastrahmen

### B.1 Gesendete Broadcastrahmen Qualitätsstufe 2 Mbit/s

Minute	Messpunkt 4 Anzahl von Rahmen				Messpunkt 4 Anzahl von Broadcast Packets				Messpunkt 4 Anzahl von Multicast Packets			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	278.690	497.942	218.372	214.679	5	5	5	5	10	8	8	10
2	278.639	484.700	213.957	212.081	5	5	5	5	9	12	9	9
3	281.497	475.943	214.060	215.993	5	4	5	6	11	7	8	9
4	285.037	469.259	216.955	214.596	6	5	5	5	7	11	8	8
5	278.421	483.215	218.734	211.763	5	6	6	5	10	6	9	9
6	281.385	470.512	214.139	211.802	5	5	5	5	6	11	8	8
7	285.213	468.851	214.157	215.838	5	4	5	5	8	7	9	8
8	279.344	469.686	216.999	214.235	5	5	4	5	9	11	8	8
9	281.781	483.741	218.610	211.951	5	5	5	5	7	7	9	7

### B.2 Gesendete Broadcastrahmen Qualitätsstufe 50 Mbit/s

Minute	Messpunkt 4 Anzahl von Rahmen				Messpunkt 4 Anzahl von Broadcast Packets				Messpunkt 4 Anzahl von Multicast Packets			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	1.709.585	1.638.765	1.315.905	3.510.725	5	6	5	5	12	7	9	9
2	1.660.574	1.639.473	1.525.186	3.580.512	5	5	5	5	22	11	9	8
3	1.657.132	1.643.986	1.614.124	3.559.891	4	6	5	5	23	7	8	7
4	1.667.281	1.643.008	1.625.306	3.056.559	5	5	5	6	18	8	10	9
5	1.708.407	1.692.429	1.596.682	3.039.763	5	5	5	5	14	9	10	8
6	1.676.537	1.650.948	1.608.940	2.995.485	5	4	5	5	18	6	10	9
7	1.661.848	1.645.352	1.636.946	3.046.403	5	5	5	5	18	11	8	8
8	1.659.213	1.644.682	1.648.856	3.026.405	5	5	5	5	22	6	9	9
9	1.701.885	1.692.322	1.613.330	2.987.883	5	5	5	5	17	11	9	8

### B.3 Gesendete Broadcastrahmen Qualitätsstufe 100 Mbit/s

Minute	Messpunkt 4 Anzahl von Rahmen				Messpunkt 4 Anzahl von Broadcast Packets				Messpunkt 4 Anzahl von Multicast Packets			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	3.186.704	3.213.310	3.053.879	3.565.103	6	6	5	5	12	10	9	10
2	3.081.990	3.040.039	2.989.161	3.561.228	5	5	5	5	13	7	8	8
3	3.075.091	3.169.344	2.990.744	3.362.198	4	4	4	5	23	11	9	9
4	3.097.947	3.123.733	3.030.458	3.137.546	5	5	5	6	17	6	8	9
5	3.174.810	3.213.310	3.054.239	3.194.388	6	6	5	5	23	10	10	10
6	3.117.751	3.117.253	2.992.697	3.217.507	5	5	5	4	19	7	10	8
7	3.088.452	3.109.427	2.995.537	3.160.428	5	5	5	5	21	9	11	9
8	3.095.882	3.111.640	3.037.466	3.140.638	5	4	5	5	12	8	8	10
9	3.175.725	3.208.441	3.063.651	3.181.029	5	5	5	5	25	10	10	11

## B.4 Gesendete Broadcastrahmen Qualitätsstufe 120 Mbit/s

Minute	Messpunkt 4 Anzahl von Rahmen				Messpunkt 4 Anzahl von Broadcast Packets				Messpunkt 4 Anzahl von Multicast Packets			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	3.547.325	3.469.719	3.032.521	3.202.005	4	5	5	5	19	11	9	10
2	3.525.654	3.151.851	3.057.611	3.205.931	5	5	5	5	23	6	8	9
3	3.605.312	3.328.947	2.993.727	3.120.661	6	5	5	5	22	10	9	10
4	3.592.707	3.300.914	2.988.364	3.146.859	5	4	4	6	14	7	8	8
5	3.578.789	3.469.719	3.027.700	3.277.867	5	5	5	5	17	11	9	9
6	3.577.327	3.798.456	3.055.359		6	6	5		19	6	8	
7	3.678.047	3.721.630	2.991.171		5	5	5		21	11	9	
8	3.615.809	3.707.853	2.988.742		5	5	5		24	6	8	
9	3.581.122	3.711.054			5	4			19	11		

## B.5 Gesendete Broadcastrahmen Qualitätsstufe RAW

Minute	Messpunkt 4 Anzahl von Rahmen				Messpunkt 4 Anzahl von Broadcast Packets				Messpunkt 4 Anzahl von Multicast Packets			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	32.205.725	32.242.371	32.229.125	32.612.809	5	5	5	5	13	14	8	8
2	32.243.744	32.251.803	32.229.929	32.968.563	5	5	5	5	6	6	9	9
3	33.299.741	33.280.647	32.605.643	32.219.536	5	5	5	4	11	11	8	8
4	32.225.781	32.239.097	32.969.193	32.221.967	5	5	5	5	6	6	9	9
5	32.235.574	32.267.624	32.227.506	32.577.477	5	6	5	5	11	11	8	8
6	32.261.689	33.297.784	32.232.565	32.950.737	5	5	5	5	8	6	9	9
7	33.306.318	32.226.414	32.596.801	32.226.001	5	5	5	4	11	11	8	8
8	32.212.715	32.248.562	32.978.983	32.236.082	5	5	5	5	6	6	9	9
9	32.233.088	32.274.735	32.220.940	32.609.240	5	5	5	4	11	11	8	7