

FKT

WWW.FKT-ONLINE.DE

FACHZEITSCHRIFT FÜR FERNSEHEN,
FILM UND ELEKTRONISCHE MEDIEN

AUDIO & VIDEO ÜBER IP

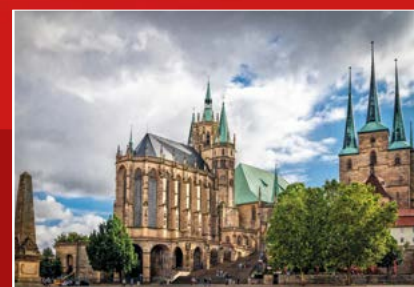
PRAKTISCHE ANWENDUNG UND BEWERTUNG VON SMPTE ST 2110



**CLOUD-PRODUKTION:
LIVE-ACTION IN ECHTER
RUNDFUNK-QUALITÄT**



**VIDEOBASIERTE ANPASSUNG
VON MULTICOLOR
LED-SCHNITTLICHTEN**



**„IP, KI, WIE WEITER?“:
THÜRINGER MEDIENSYMPOSIUM
AM 9. UND 10. NOVEMBER 2023**

PRAKTISCHE ANWENDUNG UND BEWERTUNG VON SMPTE ST 2110

ENTWICKLUNG EINES LEITFADENS FÜR DEN SELBSTSTÄNDIGEN EINSTIEG

MANUEL JOSIA HILDEBRANDT, DANIEL KUNER, PAUL MEINKEN, JAN NIETFELD, PHILIPP NÖCKER-PRIOR, AYLA REMMELE, MIKA RÖMER, JONAS SCHMITTE, JONAS STOLZMANN, PAUL WINTERSTEIN

SMPTE ST 2110 ist ein wegweisender Standard in der professionellen Videotechnik, der eine bedeutende Rolle bei der Umstellung von herkömmlichen Broadcast-Infrastrukturen auf IP-basierte Netzwerkinfrastrukturen spielt. ST 2110 spezifiziert eine Reihe von Standards, die im Zusammenspiel ermöglichen, audiovisuelle Medienströme in Echtzeit über IP-Netzwerke zu transportieren, zu synchronisieren und zu verarbeiten. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Gestaltung einer flexibleren und effizienteren Produktionsumgebung.

Die große Herausforderung beim Einstieg in diese neue Technologie liegt darin, fortschrittliche IT- und Rundfunktechnik miteinander zu vereinen. Dazu müssen komplexe Zusammenhänge beider Bereiche in der Theorie aufbereitet, verstanden und in der Praxis umgesetzt werden. Das Forschungsprojekt *HdMedia over IP* nimmt sich diesem Prozess mit zehn Masterstudierenden der Hochschule der Medien an und versucht eben diesen theoretischen, wie auch praktischen Zugang zu finden und ihn anderen zu ermöglichen.

Dazu wurde die Theorie durch Expertenschulungen erlernt. Anhand eines eigenen Testaufbaus mit Produkten auf dem neuesten Stand der Technik konnten darauf aufbauend praktische Erfahrungen gemacht werden. Durch diese Kombination konnten bisher gewohnte Workflows in neue Denkstrukturen transformiert werden.

Im Fokus des Artikels stehen Grundlagen der Netzwerktechnik für die selbstständige Einarbeitung in das Thema Media over IP sowie eine Darstellung des Einstiegs in die praktische Anwendung von ST 2110 und die Bewertung des aktuellen Standes.

► SMPTE ST 2110 is a groundbreaking standard in the professional video technology domain, playing a significant role in the transition from conventional broadcast infrastructures to IP-based networks. This Standard specifies a set of protocols that, when combined, enable the real-time transport,

synchronization, and processing of audiovisual media streams over IP networks. This opens up new possibilities for creating a more flexible and efficient production environment.

The major challenge in adopting this new technology lies in bridging advanced IT and broadcasting technologies. This necessitates the comprehensive understanding and practical implementation of complex concepts from both domains. The research project *HdMedia over IP* addresses this process with the participation of ten master's students from the Hochschule der Medien (Stuttgart Media University), aiming to facilitate theoretical and practical access to this technology for others.

The project participants acquired the necessary theoretical knowledge through expert training sessions. Subsequently, they gained practical experience by setting up a dedicated test environment equipped with state-of-the-art products. This combination of theoretical learning and hands-on experimentation facilitated the transformation of traditional workflows into innovative thought processes.

This article focuses on the fundamentals of network technology to enable independent exploration of the Media over IP topic. Additionally, it provides insights into the initiation of practical ST 2110 implementation and an assessment of the current state of affairs.

Der von der Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE) veröffentlichte Standard (ST) SMPTE ST 2110 ist wegweisend in der professionellen Videotechnik und spielt eine bedeutende Rolle bei der Umstellung von Baseband-Produktionsumgebungen auf IP-basierte Netzwerkumgebungen. ST 2110 spezifiziert eine Reihe von Standards, die im Zusammenspiel ermöglichen, audiovisuelle Medienströme in Echtzeit über IP-Netzwerke zu transportieren, zu synchronisieren und zu verarbeiten. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, eine flexiblere und effizientere Produktionsumgebung zu gestalten. Dazu müssen Ingenieur*innen ausgebildet werden, die auf die speziellen Anforderungen und die zukünftigen Herausforderungen im Media over IP Universum vorbereitet sind. Nur so können sie einen Beitrag zum Voranschreiten dieser Technologie leisten [1–2].



Einleitung

Mit ST 2110 hat die SMPTE eine Familie von Standards veröffentlicht, die einen neuen Ansatz für die Übertragung von audiovisuellen Inhalten über IP-Netzwerke ermöglicht. Die netzwerkbasierende Datenübertragung mit SMPTE ST 2110 unterscheidet sich grundlegend von der in traditionellen Baseband-Systemen. Das betrifft sowohl die Topologie als auch den logischen Systemaufbau. Baseband-Systeme verwenden dedizierte Kabel für die Übertragung verschiedener Signale, was zu einem hohen Verkabelungsaufwand führt.

Mit ST 2110 erfolgt die Übertragung aller Daten über ein gemeinsames IP-Netzwerk, in welches alle Geräte der gesamten Produktionsumgebung eingebunden sind. Dadurch ist es möglich, Mediendatenströme, Zusatzdaten und Steuerdaten von jedem Punkt des Netzwerks aus zu empfangen und zu senden, sowie eine gemeinsame, absolute Zeitsynchronisation für alle Datenströme zu ermöglichen. Es benötigt keine dedizierten Kreuzschienen und auch bei Erhöhung der Signalzahl bleibt die physische Verkabelung zunächst unberührt. Dadurch ist es möglich, die Allokation von Systemleistung für verschiedene Aufgaben und parallele Workflows flexibel zu gestalten. Es besteht die Möglichkeit, Systeme schnell zu skalieren und Ressourcen hinzuzufügen, ohne Leistung durch Kaskadieren einzubüßen. Mit ST 2110 erfolgt ein Paradigmenwechsel, der die Grundstruktur starrer Systeme aufbricht und dynamische Systemarchitekturen schafft. Das Forschungsprojekt *HdMedia over IP* hat das Ziel, diesen Prozess greifbar und anwendbar zu machen [1–2].

Problemstellung und Ziel

ST 2110 bezieht sich auf eine Vielzahl bereits etablierter Standards und Protokolle der klassischen Netzwerktechnik, um eine Übertragung von Mediendatenströmen zu realisieren. Um einen Einstieg aus der Baseband Audio- und Videotechnik in diese Technologie zu finden, erfordert es fundierte Kenntnisse in vielen Teilgebieten der Netzwerktechnik. Die Problematik ist die Verfügbarkeit von Dokumenten zum theoretischen und praktischen Einstieg in das Themenfeld Media over IP mit ST 2110. Denn das alleinige Wissen über die Funktionsweise der einzelnen Protokolle führt nicht

zwangsläufig zu einem Verständnis der Umsetzung von ST 2110. Mit *HdMedia over IP* soll hier angesetzt werden, um eine Brücke zwischen diesen beiden Welten zu schlagen und eine Arbeitsgrundlage für den Umgang mit ST 2110 Systemen zu schaffen.

Dafür wird zunächst ein theoretischer Zugang zur Thematik gesucht. Der Fokus liegt darauf, Wissen auf dem Gebiet der IP-Netzwerke aufzubauen und mit den Aspekten der Fernstechnik zu verknüpfen. Anschließend wird dieses Wissen in der Praxis umgesetzt und der Workflow für den Aufbau und die Nutzung eines Mediennetzes basierend auf ST 2110 erarbeitet. Dadurch entsteht eine solide Basis, um produktiv mit ST 2110 Systemen arbeiten zu können, auch wenn zuvor keine Vorkenntnisse in diesem Bereich vorhanden waren [1–2].

Projektrahmen

HdMedia over IP (www.mediaoverip.de) ist ein studentisches Forschungsprojekt im Rahmen des Masterstudiums *Audiovisuelle Medien* an der Hochschule der Medien Stuttgart (HdM). Das *HdMedia over IP*-Team besteht aus zehn Studierenden des Schwerpunkts Film/Fernsehen und des Schwerpunkts Ton. Im Zeitraum von Anfang März bis Ende Juli 2023 erarbeitete das Team das gesamte Projekt eigenständig in seinem Umfang wie auch in der praktischen Umsetzung. Die fachliche Betreuung übernahmen die Lehrbeauftragten Franz Baumann, Markus Berg und Herbert Guist – ehemalige Mitarbeiter des früheren *Instituts für Rundfunktechnik* und Spezialisten auf dem Gebiet Media over IP mit ST 2110.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird eine umfassende Dokumentation erstellt, die das hochaktuelle und zukunftsweisende Thema ST 2110 von Grund auf erklärt und einen Leitfaden für diejenigen bieten kann, die ebenfalls einen Zugang zu diesem Thema finden möchten.

Dieser Artikel gibt Einblicke in die Arbeit des Forschungsteams und beschreibt grundlegende Bausteine der Übertragung von Mediendatenströmen mit ST 2110. Darüber hinaus wird die Adaption für den praktischen Testaufbau beleuchtet und die persönlichen Learnings der Masterstudierenden zusammengefasst.

Projektaufbau und Methodik

Das Forschungsprojekt gliedert sich in drei Phasen: *Planung und Akquise, Praxis und Datenerhebung, sowie Dokumentation und Analyse*. Dabei musste das zehnköpfige Team parallel die Aufgabenfelder Akquise, kaufmännische Projektleitung, Projektkoordination, technische Planung, Forschung, sowie Außenkommunikation und Marketing bearbeiten. Für die erfolgreiche Umsetzung war das Team über die Projektphasen hinweg gezwungen, sich stets neuen Aufgaben und Herausforderungen über die eigentliche Kernaufgabe des Projektes hinaus zu stellen.

In der ersten Phase standen die Projektentwicklung und der Aufbau der dazu benötigten Grundlagen an. Das betraf zunächst die Schaffung einer gemeinsamen Wissensbasis. Hierzu konnte Prof. Roland Kiefer, Studiendekan des Studiengangs Medieninformatik an der HdM, für das Projekt gewonnen werden. Er gab dem Team in kompakten Workshops eine Einführung in die Netzwerktechnik. Zusammen mit den Vorlesungen von Franz Baumann, Markus Berg und Herbert Guist schaffte dies die Basis für das Team, ST 2110 verstehen zu können.

Für den Projekterfolg war darüber hinaus der Kontakt in die Wirtschaft von elementarer Bedeutung. Denn erst der Aufbau eines Unterstützernetzwerks und die Akquise von Material ermöglichten eine praktische Umsetzung des geplanten Testaufbaus. Den Startschuss dazu setzte die *Visual Media Lab Conference* (VMLC) Anfang März an der Hochschule der Medien. Dort konnten die ersten wichtigen Kontakte ge-

knüpft werden. Mit Dominique Hoffmann, Hauptabteilungsleiterin Distribution und Entwicklung des Südwestrundfunks (SWR), war die Rundfunkanstalt einer der ersten Partner im Projekt. Gemeinsam mit Michael Bauer, Head of Key Account bei Vizir, waren somit zwei treibende Kräfte der FKTG seit der ersten Stunde des Projekts mit an Bord. Auf der Konferenz gewann das Projekt zudem Dirk Ellis, EMEA Vertretung für AJA Video Systems und Hans Hoffmann, Senior Manager Media Production Technology der EBU und ehemaliger Präsident der SMPTE, als Kontakt zu ebendiesen Institutionen.

An die VMLC schlossen sich Wochen der Akquise und Verhandlungen mit Unternehmen an, die State of the Art Broadcast-Equipment herstellen oder vertreiben. Mit Arista Networks und Arkona Technologies waren sehr früh zwei wichtige Partner dabei. Insgesamt konnten für das Projekt 20 Unternehmen und über 40 persönliche Unterstützer*innen gewonnen werden. Von zwölf Firmen kamen Leihstellungen für den Testaufbau (siehe Tab. I). Dieser Prozess nahm insgesamt zwölf Wochen in Anspruch.

Über die reine Gabe der Leihstellungen hinaus wurde stets auch eine technische Unterstützung und wie im Fall der Logic media solutions auch eine Betreuung über den Projektzeitraum, sowie ein Workshop mit Deep Dive zu Redundanz und Orchestrierung vereinbart.

Der SWR stellte dem Team für die Praxisphase nicht nur die Räumlichkeiten im Funkhaus Stuttgart, sondern auch Know-How in den Bereichen Netzwerk, IT und ST 2110.

Grundlagen

Der Grundgedanke von ST 2110 ist es, die einzelnen Bestandteile eines Medienstroms, Bild-, Audio- und Zusatzdaten, nicht gebündelt, sondern als eigenständige Multicast-Streams, sog. Essence Streams, zu übertragen (siehe Abb. 1) [1, 4].

Für ein Verständnis der praktischen Implementierung im *HdMedia over IP*-Testaufbau und darüber hinaus werden folgend Grundlagen zur Standardfamilie, zugehörigen Protokollen und Aspekten der Netzwerktechnik zusammengefasst, bevor auf den Praxisaufbau eingegangen wird.

Multicast-Streaming ist ein effizienter und gut skalierbarer Ansatz zur Übertragung von Datenströmen an eine Gruppe von Empfängern (siehe Abb.2). Beim Multicast-Streaming wird der Datenstrom des Senders an eine den Netzgeräten bekannte Multicast-Adresse gesendet bzw. von Netzgeräten wie Switches oder Routern an die entsprechenden Gruppenmitglieder verteilt. Der Vorteil: Der Datenstrom muss nicht wie bei der Unicast-Übertragung mehrfach oder wie bei Broadcast an alle Geräte übertragen werden. Dadurch kann die zur Verfügung stehende Bandbreite effizienter genutzt werden [3, 4].

ST 2110 ist in verschiedene Sub-Standards gegliedert, welche die Übertragung der unterschiedlichen Datenströme definieren. Die genutzten Protokolle lassen sich im Open Systems Interconnection (OSI) Modell einordnen. Das OSI-Modell ist ein theoretisches Referenzmodell, das die Kommunikation und den Datenaustausch in Netzwerken beschreibt. Es besteht aus sieben Schichten, den sog. "Layern". Jede Schicht dient als Schnittstelle zwischen den benachbarten Layern und trägt dazu bei, dass die Kommunikation zwischen Geräten verschiedener Hersteller und unterschiedlicher Netzwerktechnologien reibungslos abläuft [1, 2, 4].

ST 2110-10: System Timing and Definitions

Der ST 2110-10 Standard legt die Formatierung, das Timing und die Synchronisierung der Medienströme fest und spezifiziert, welche Netzwerkprotokolle für eine ST 2110 In-

Tab. I: Leihstellungen für den Testaufbau

Leihsteller	Gerät	Funktion
AJA Video Systems	AJA IPR-10G2-SDI	Baseband I/O
	AJA IPT-10G2-SDI	Baseband I/O
Arista Networks	2x Arista 7280SR-48C6	Red/Blue-Switch
	Arista 7280TR-48C6	Management- & Core-Switch
Arkona Technologies	BLADE//runner Silent Frame mit 2x AT300	Core Processing, Baseband I/O, PTP Clock & Baseband Sync
Broadcast Solutions	Phabrix Qx	Messgerät
	hi human interface	Broadcast Controller
LANG	Panasonic Kairos	Bildmischer und Play-out-Server
	Panasonic UE 160	PTZ-Kamera
Logic media solutions	Nevion VideoPath	Orchestrator
NEP Germany	3x Grass Valley LDX 150	Kameras
Riedel Communications	Artist 1024 + SmartPanel	Intercom
	FusioN Serie	Baseband I/O
	MuoN Serie	Processing
SHM Broadcast	Bridge Technologies VB 440	Messgerät
Sony	Sony XVS-7000 System	Videomischer
SWR	Meinberg LANTIME M1000	PTP Grandmaster & Baseband Sync
	Imagine SNP	Baseband I/O & Processing
Telestream	Tektronix Prism MPI2-25	Messgerät
	Tektronix SPG8000A	PTP Clock & Baseband Sync

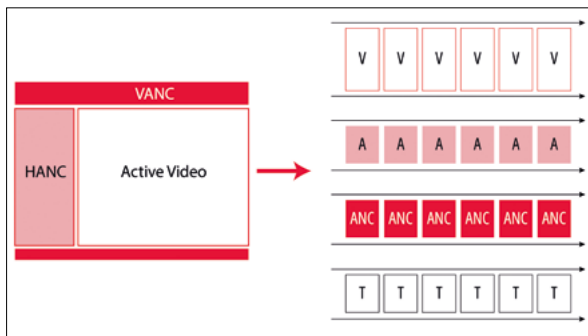


Abb. 1: SDI-Datenstrom und ST 2110 Essence Streams

frastuktur relevant sind und vorausgesetzt werden. Der Standard spezifiziert ebenso die präzise Beschreibung der Mediendatenströme mittels SDP und Synchronisierung mithilfe von RTP und PTP sowie die redundante Übertragung von Datenströmen nach den Mechanismen des SMPTE ST 2022-7 [1, 6–8].

Die **Internetprotokolle IPv4 und IPv6** sind Netzwerkprotokolle, die für die Übermittlung von Datenpaketen in Netzen (OSI-Layer 3) verwendet werden. Sie fungieren als Vermittlungs- und Adressierungsprotokolle, welche die Zustellung von Datenpaketen zwischen einer Quell- und einer Zieladresse ermöglichen. IP verwendet dabei eine logische Adressierung, in Form einer 4 Byte langen IP-Adresse bei IPv4 und 16 Byte bei IPv6, um Geräte innerhalb des Netzwerks zu adressieren. Es bietet eine skalierbare und zuverlässige Kommunikation in IP-Netzwerken, indem die Daten in Pakete aufgeteilt, anhand der Zieladresse weitergeleitet und am Zielort wieder richtig zusammengesetzt werden [2, 9].

Im Kontext von ST 2110 wird IP als grundlegendes Protokoll verwendet, um die Übertragung von Datenströmen über IP-Netzwerke zu realisieren. Es ermöglicht die Weiterleitung von Datenpaketen zwischen den beteiligten Netzwerkkomponenten und stellt so die Kommunikation zwischen den verschiedenen Geräten her. Die Routenplanung wird durch das Routingprotokoll OSPF (Open Shortest Path First) übernommen [1, 2, 10].

Die Netztechnologie **Ethernet** (OSI-Layer 2) verpackt IP-Pakete in bis zu maximal ca. 1500 Byte lange Ethernet-Rahmen und adressiert die Empfänger mit Hilfe von hardwarespezifischen MAC-Adressen. Das Konzept der virtuellen LANs (VLAN) ermöglicht es zudem, den Datenverkehr auf Layer 2 zu segmentieren und bei Bedarf zu priorisieren [5, 11–13].

Das **Real-Time Transport Protocol (RTP)** ist ein Netzwerkprotokoll (OSI-Layer 7), das für die Echtzeitübertragung von Multi-mediadaten über IP-Netze entwickelt wurde.

Es ermöglicht die Paketierung, Zeitstempelung und Synchronisierung von Datenströmen. Video-, Audio- oder Metadaten werden in RTP-Pakete verpackt, die jeweils einen Zeitstempel enthalten, um so die korrekte Synchronisation und Reihenfolge sicherzustellen und um im Empfänger Laufzeit-schwankungen (Jitter) auszugleichen. Zusammen mit dem Begleitprotokoll RTCP bietet es Mechanismen zur Fehlerbehandlung und Qualitätskontrolle, um eine zuverlässige und zeitgenaue Übertragung der Daten zu gewährleisten [5, 14–16].

Das **User Datagram Protocol (UDP)** ist ein Transportprotokoll (OSI-Layer 4), das auf der IP-Schicht aufbaut. Es bietet eine verbindungslose Kommunikation anhand einer Portnummer und ermöglicht den schnellen und effizienten Transport von Daten, ohne dass eine zuverlässige Übertragung oder eine Bestätigung der Zustellung vorhanden ist. UDP eignet sich besonders für Anwendungen, bei denen eine geringe Verzögerung besonders wichtig ist. Fehlende sowie fehlerhafte Pakete werden nicht nachgefordert, so dass hier ein fehlerminimiert arbeitendes Netzwerk vorausgesetzt wird [17].

Das **Session Description Protocol (SDP)**-File ist eine Textdatei, die Informationen über eine Multimedia-Session enthält (OSI-Layer 5). Sie enthält selbst keine Medienströme, sondern Details zu den Multicast-Streams wie die Netzwerkadresse, Portnummern, Medientypen, Formate und Parameter, um eine Kommunikation zwischen den beteiligten Parteien herzustellen. Das SDP wird in Netzen bisher überwiegend zur Übertragung von Media-Streaming-Anwendungen wie Voice over IP (VoIP) und Videokonferenzen eingesetzt [6–8, 18].

In ST 2110 wird SDP verwendet, um die Übertragungsparameter in ST 2110-Datenströmen zu beschreiben. Dies ist notwendig, da die einzelnen Mediendatenströme nicht mehr selbstbeschreibend sind, sondern nur die rohen Mediendaten enthalten. Es ermöglicht den beteiligten Geräten und Anwendungen, sich über die gemeinsame Konfiguration und Synchronisierung der Medienströme zu verständigen. Darüber hinaus übernimmt das SDP File eine ähnliche Rolle wie der "Video Payload Identifier" aus dem Baseband. Das SDP beinhaltet die Spezifikationen der Medienströme hinsichtlich Bildformat, Farbraum, Bittiefe oder Channelorder [1, 6–8].

Das **Precision Time Protocol (PTP)** ist ein Netzwerkprotokoll (OSI-Layer 5), welches ursprünglich für Bereiche wie Finanztransaktionen oder mobile Kommunikation entwickelt wurde, in denen eine präzise Synchronisation von Abläufen und Ereignissen in Echtzeit unverzichtbar ist. Im Laufe der Zeit wurde PTP auch für andere Anwendungsgebiete wie den Rundfunk erweitert. PTP basiert auf dem Master-Slave-Prinzip (auch Leader-Follower genannt), bei dem eine Hauptuhr (Leader) die Zeit nanosekundengenau an andere Uhren (Follower) im Netzwerk überträgt und somit für alle Geräte in

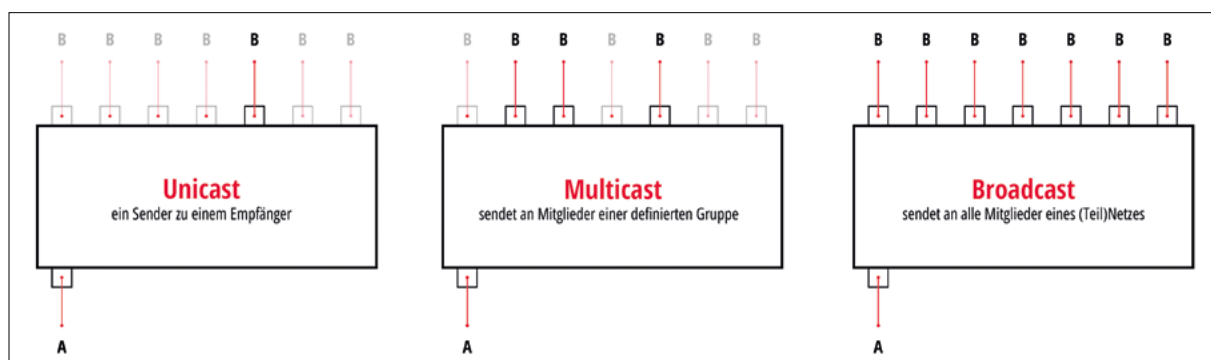


Abb. 2: Netzwerk-kommunikation via Uni-, Multi- und Broadcast

einem Netzwerk als Zeitgeber fungiert. Switches spielen bei der Verteilung von PTP eine entscheidende Rolle. Sie können dabei als Boundary Clock agieren, d.h. sie können PTP Nachrichten interpretieren, verarbeiten und senden, oder als Transparent Clock. In diesem Fall kennen sie ihre eigene Paketdurchlaufzeit und teilen diese der nachfolgenden Uhr mit [19-21]. Auch nicht-PTP-fähige Switches können in bestimmten Fällen in solchen Netzen eingesetzt werden. Dabei reichen diese die PTP-Pakete ausschließlich durch, ohne ihre eigene Laufzeit anzugeben.

Im Kontext von ST 2110 spielt PTP eine entscheidende Rolle bei der Synchronisation der Mediendatenströme. PTP referenziert auf einen absoluten Zeitpunkt, während im Gegensatz dazu mit Blackburst auf ein relatives Taktsignal synchronisiert wird. Bei Blackburst werden Synchronimpulse im Signal ausgewertet. Die zeitlichen Unterschiede zwischen den Impulsen können bei Ankunft der Signale gemessen werden. Bei einer absoluten Synchronisation wird ein externes Zeitreferenzsignal verwendet, um eine präzise und einheitliche Zeitbasis zu schaffen. Die Zeitstempel der Geräte werden anhand dieser Zeitreferenz kalibriert und sind dadurch absolut auswertbar. Dabei kann diese global z.B. mittels GPS oder Galileo synchronisiert werden. Diese Synchronisation hat den Vorteil, dass eine hohe Genauigkeit bei globaler Verfügbarkeit erreicht werden kann und sogar beliebig viele Standorte auf denselben Zeitstempel synchronisiert werden können [1, 21-23].

Zusammen bilden UDP, RTP und IP die Grundlage für eine zuverlässige Übertragung von Live-Mediendatenströmen über IP-Netzwerke. Während SDP für eine exakte Beschreibung der Datenströme zuständig ist, sorgen PTP und RTP für deren genaue Synchronisation.

ST 2110-20: Uncompressed Active Video

Der SMPTE ST 2110-20 Standard definiert die Übertragung von unkomprimierten Videoströmen in Echtzeit über IP-Netzwerke. Dabei wird im Vergleich zum Baseband nur der aktive Bildbereich übertragen. Das spart bei den hierzulande üblichen Bildformaten bis zu 30 % an Daten (siehe Abb. 3) [24].

Im ST 2110-20 Standard ist definiert, welche Parameter der zu übertragende Videodatenstrom haben darf. Der Standard ermöglicht eine flexible Skalierung und jegliche Auflösungen bis 32x32k sowie eine Vielzahl an Farbräumen. Des Weiteren bietet er die Möglichkeit, Videoströme mit verschiedenen Bildwechselfrequenzen zu übertragen. Um eine genaue und präzise Darstellung von Farbwerten und Bildinformationen zu gewährleisten, unterstützt der Standard eine Bittiefe von bis zu 16 Bit Floating Point.

Ebenso ist in -20 definiert, wie das SDP-File beschrieben werden muss und wie die Bilddaten in RTP-Pakete verpackt werden. Aufgrund der flexiblen Möglichkeiten hinsichtlich der Bildparameter, über die bisher spezifizierten Videonormen hinaus, bildet der ST 2110-20 Standard eine solide Grundlage für IP-basierter Broadcast-Netzwerke und wird so auch den Anforderungen zukünftiger Medienproduktionen gerecht [6, 16, 24].

ST 2110-21:

Traffic Shaping and Delivery Timing for Video

Dieser Standard legt Methoden und Regeln für die Lenkung des Datenverkehrs und Quality of Service (QoS)-Management in IP-Netzwerken fest. Traffic-Shaping ist eine Technik zur Steuerung und Kontrolle des Datenverkehrs in einem Netzwerk. Es ermöglicht die gezielte Beeinflussung von Da-

Format	SDI vs. SMPTE ST 2110-20 (Mb/s)	
2160p@50	12294,8	-30,3% → 8754,9
1080p@50	3074,1	-30,3% → 2143,9
1080i@25	1537,4	-30,3% → 1071,9
720p@50	1537,4	-39,9% → 953,0

Abb. 3: Datenraten bei der Videoübertragung mit SDI vs. ST 2110

Quelle: [43]

tenübertragungsraten, um die Netzwerkressourcen effizient zu nutzen und die QoS für bestimmte Anwendungen oder Geräte zu gewährleisten [25].

ST 2110-22: Constant Bit-Rate Compressed Video

Der ST 2110-22 Standard – Compressed Active Video – definiert die Übertragung von komprimierten Videoströmen über IP-Netzwerke. Er legt Protokolle, Formatierungen und Parameter fest, um eine effiziente und qualitativ hochwertige Übertragung von Videosignalen zu ermöglichen. Im *HdMedia over IP*-Testaufbau wurde dieser Standard nicht verwendet [26].

ST 2110-30: PCM Digital Audio

Im ST 2110-30 Standard wird der Austausch von Tonsignalen über IP-Netze definiert. Dabei wird auf den bereits existierenden Audio over IP-Standard AES67 der Audio Engineering Society (AES) zurückgegriffen. In diesem Standard geht es ausschließlich um den Transport von unkomprimierten PCM-Audiodaten ohne angehängte Metadaten. Die Beschreibung des Medienstroms wird auch hier über das SDP-File bewerkstelligt. Während AES67 die Grundlage für den Audio-transport darstellt, definiert ST 2110-30 Anforderungen an Sender und Empfänger, wie z.B. zu unterstützende Abtastraten, Kanalzahlen, Bittiefen und Packet Times. Die Packet Time kennzeichnet, wie viele Millisekunden an Audiomaterial in einem Paket übermittelt werden.

Des Weiteren werden im Standard mehrere Conformance Levels für Sender und Empfänger definiert. Diese legen fest, welche Rahmenbedingungen erfüllt werden müssen, um Audioströme richtig interpretieren zu können. Verpflichtend ist dabei nur Level A. Level A definiert Datenströme mit 48 kHz Samplerate, 16 oder 24 Bit, einer Packet Time von 1 ms und 1–8 Kanälen pro Datenstrom. Level B und Level C ermöglichen abweichende Kanalzahlen und Packet Times. Level AX, BX und CX beschreiben Datenströme mit 96 kHz. Durch die variable Mengen an erlaubten Kanälen pro Datenstrom können in der Praxis Probleme entstehen, wenn z.B. einzelne Geräte nur bestimmte Blockgrößen unterstützen. Da ST 2110-30 auf AES67 basiert, ist eine Interoperabilität zu Ravenna und anderen AES67 Geräten gegeben. Ravenna ist eine von Lawo entwickelte Technologie für den Echtzeittransport von Audiodaten über IP-Netzwerke [27].

ST 2110-31: AES3 Transparent Transport

AES3, auch als AES/EBU betitelt, spielt in Baseband-Systemen eine wichtige Rolle. Viele Geräte wie Dolby E Encoder/Decoder, viele Intercom Sprechstellen oder Digitalmikrofone sind auf den Transport der Metadaten im AES3 Signal angewiesen.

Im ST 2110-30 Standard wird aber nur die Übertragung von reinen PCM Audiodaten definiert. ST 2110-31 definiert den bittransparenten Transport von AES3 Signalen. Dabei wird das AES3 Signal unverändert, ohne Trennung von Audio und Metadaten, in RTP Pakete verpackt. Wenn diese Pakete wieder in ein AES3 Signal gewandelt werden, lassen sich Legacy Devices wie gehabt nutzen. Dadurch können bereits bestehende AES3 Workflows beibehalten werden. Da hier AES3 Wörter bittransparent übernommen werden, besteht hier keine Interoperabilität zwischen den ST 2110-30 und -31 Sendern und Empfängern. Ravenna definiert mit AM825 ein Profil, welches ST 2110-31 Datenströme senden und empfangen kann [28].

ST 2110-40: SMPTE ST 291-1 Ancillary Data

Der ST 2110-40 Standard definiert die Übertragung der vorher im SDI-Signal integrierten Zusatz- und Metadaten. Zu diesen zählen unter anderem Untertitel, Teletext oder auch Timecode. Der Aufbau dieses Datenstroms bleibt in den IP-Paketen identisch mit dem Aufbau der ANC-Daten in einem SDI-Signal. Dabei wird sich für den Aufbau auf SMPTE ST 291-1 berufen. Auch wenn Metadaten und der zugehörige Medienstrom nun getrennt voneinander transportiert werden, bleibt der Zusammenhang zwischen Frame und ANC-Datenblock bestehen. Die Synchronisation wird über den RTP-Timestamp der Pakete realisiert [16, 29].

NMOS

Die SMPTE ST 2110-Standards beschäftigen sich hauptsächlich mit der technischen Übertragung von Mediendatenströmen über IP-Netzwerke. Durch die Konsolidierung der früher unterschiedlichen Übertragungswege auf paketbasierte Netzwerke resultiert nun ein erhöhter Konfigurationsaufwand. Dies umfasst nicht nur die Einstellung des Netzwerks, sondern auch die Konfiguration von IP-Adressen und UDP-Ports an den Endgeräten sowie die Auswahl und Beschreibung, welche Daten überhaupt übertragen werden.

ST 2110 definiert allerdings nicht explizit den Aspekt der Konfiguration, der Steuerung und der Verwaltung der Geräte. Dies hat zur Entwicklung proprietärer Schnittstellen durch die Hersteller geführt, was wiederum in einer uneinheitlichen Steuerung und Konfiguration der Geräte mündet. Diese Situation steht im Widerspruch zum Ziel eines übergreifenden offenen Standards.

Die *Advanced Media Workflow Association* (AMWA) hat erkannt, dass die fehlende Steuerungskomponente im SMPTE ST 2110-Standard eine Herausforderung darstellt. Aus diesem Grund wurde das *Networked Media Open Specifications* (NMOS)-Projekt ins Leben gerufen. NMOS ist eine Sammlung von offenen Spezifikationen, die in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern kontinuierlich weiterentwickelt wird. Das Hauptziel besteht darin, einheitliche Schnittstellen in Form von APIs zu definieren, die von Herstellern in ihre Produkte implementiert werden können.

NMOS unterteilt sich in verschiedene Interface-Specifications (IS), die darauf abzielen, die Lücken in Bezug auf die Steuerungsfunktionen von ST 2110 zu schließen und eine nahtlose Integration und Interoperabilität von Geräten in IP-Netzwerken zu gewährleisten. Bisher sind sieben dieser Interface-Specifications veröffentlicht und drei weitere in Arbeit. Gegenwärtig finden vor allem die Spezifikationen IS-04, IS-05 und IS-08 in der Praxis Anwendung. Sie gelten als "Stable". Da die Entwicklung ein offener und fortlaufender Prozess ist, sind noch nicht alle Spezifikationen vollständig umgesetzt oder verbreitet (z. B. IS-07 Event & Tally) oder werden als nicht mehr relevant angesehen (wie IS-06) [30].

IS-04: Discovery & Registration: IS-04 beschreibt Mechanismen für die automatische Entdeckung und Registrierung von Geräten in einer IP-basierten Medieninfrastruktur. Sie ermöglicht die dynamische Erfassung und Verwaltung von Geräten, bei der Geräteinformationen in einer Datenbank, der Registry, gespeichert werden, auf die alle Teilnehmer zugreifen können [31].

IS-05: Device Connection Management: IS-05 ist eine Spezifikation für das Management von Verbindungen zwischen Geräten in einer IP-basierten Medienumgebung. Sie ermöglicht die dynamische Steuerung und Konfiguration der Endgeräte, einschließlich des Hinzufügens, Entfernens und Änderns von Verbindungen zwischen verschiedenen Geräten. Dies ist essentiell zur Schaffung einer flexiblen Medienproduktionsumgebung [32].

IS-06: Network Control: Diese Spezifikation legt Grundlagen für die Steuerung und Verwaltung des Netzwerks in einer IP-basierten Medieninfrastruktur fest. Sie bietet Mechanismen zur Überwachung, Konfiguration und Anpassung der Netzwerkkonnektivität, um eine optimale Leistung, Zuverlässigkeit und QoS für die Medienübertragung sicherzustellen. Die Implementierung dieser Spezifikationen durch die großen Hersteller von Netzwerkkomponenten blieb jedoch aus, daher wird sie inzwischen als veraltet angesehen [33].

IS-07 – Event & Tally: IS-07 spezifiziert die Übertragung von Ereignissen wie Zustandsänderungen oder Tally-Informationen in einer IP-basierten Medienumgebung. Es soll die Funktionalität von GPI in die IP-Welt übertragen und nutzt dafür die Protokolle WebSockets und MQTT. Da in einer Produktionsumgebung Tally eine sehr wichtige Funktion einnimmt, ist es umso problematischer, dass IS-07 derzeit nur von wenigen Herstellern unterstützt wird [34].

IS-08 – Audio Channel Mapping: Die Spezifikation IS-08 legt Standards für die Zuordnung und Steuerung von Audiokanälen in einer IP-basierten Medieninfrastruktur fest. Sie definiert Mechanismen, um die Kanalzuordnung und Audio-Formatierung zwischen Geräten zu verwalten und um auf das interne Audiorouting der Geräte zuzugreifen [35].

Netzwerkgrundlagen

Im Zuge der Einführung von ST 2110 und dem Transport von Mediendatenströmen durch IP-Netze ist eine Adaption der IP-Infrastruktur unverzichtbar.

Ein Beispiel verdeutlicht die gesteigerten Anforderungen: Eine herkömmliche Netzwerkschnittstelle eines Laptops unterstützt in der Regel eine Übertragungsrate von 1 Gbit/s. Eine Kamera oder ein Switch hingegen muss bereits bei der Übertragung eines einzigen 1080p50-Datenstroms eine deutlich höhere Datenrate von 2,2 Gbit/s bewältigen können. In einer Produktionsumgebung entstehen somit große Datenmengen, die von neuen Netzwerken verarbeitet werden müssen. Um diese gesteigerten Anforderungen zu erfüllen, sind spezielle Switches erforderlich. Sie müssen weit aus leistungsfähiger als herkömmliche Office-Switches sein, weshalb in diesen Fällen Data Center Switches verwendet werden. Diese Switches sind in der Lage, die hohen Datenraten der Videostrome zu verarbeiten und eine zuverlässige Übertragung zu gewährleisten. Darüber hinaus können sie entweder als Boundary- oder Transparent Clock fungieren.

Netzüberlastung

Die Bereitstellung von leistungsfähigen Netzwerken ist der elementare Schritt bei der Umstellung auf ST 2110. Während Baseband-Systeme eine deterministische Punkt-zu-Punkt-Verbindung bieten und keine Überlastung des Systems möglich ist, können IP-Netzwerke bei unzureichender Bandbreite



Abb. 4: Artefakte im Bildsignal bei einer Netzüberlastung

überlastet werden. Infolgedessen können Datenpakete entweder in falscher Reihenfolge beim Empfänger ankommen oder sogar irreversibel verloren gehen, was zu Artefakten und im schlimmsten Fall zu Bildausfällen führt. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer im Testaufbau herbeigeführten Netzüberlastung.

Es wird deutlich, dass es unabdingbar ist, das Netz so robust wie möglich aufzubauen. Hierfür gibt es in der IT-Welt neben dem Einbau von leistungsfähiger Hardware mehrere Stellschrauben, an denen gedreht werden kann. Es können Maßnahmen wie QoS, VLANs oder das Spanning Tree Protocol zusammen im Netz verwendet werden. Auch durch die Realisierung von gerouteten (Layer 3) oder geschwitchten (Layer 2) Netzen und der Aufteilung von Netzen in Subnetze kann die Robustheit des Netzes weiter erhöht werden. Die beiden letztgenannten bilden die Grundlage des *HdMedia over IP*-Praxisaufbaus [5, 12, 13, 36].

Subnetting ist ein Konzept in der Netzwerktechnik, bei dem ein IP-Adressbereich in kleinere Teilnetze unterteilt wird, um Netzwerkressourcen effizienter zu nutzen und den Netzwerkverkehr zu optimieren. Die Idee hinter Subnetting besteht darin, die Anzahl der Geräte in einem Netzwerk zu begrenzen. Auf diese Weise wird der Broadcast-Verkehr in den einzelnen Netzen reduziert. Durch Subnetting können separate IP-Adressbereiche für verschiedene Teile des Netzwerks erstellt werden, wodurch die Geräte in diesen Teilnetzen nur den Traffic sehen, der für das Subnetz bestimmt ist. Dies erhöht die Robustheit und ermöglicht eine einfachere Verwaltung auch in großen Netzwerken. Subnetting kann auch dazu beitragen, die Auswirkungen von Fehlern oder Angriffen zu begrenzen, da der Schaden auf das betroffene Teilnetz begrenzt bleibt. Im Projektrahmen werden ausschließlich IPv4-Adressen verwendet [2, 37].

Ein **/24 Subnetz** bedeutet, dass die ersten 24 Bits der 32 Bit langen IP-Adresse, folglich die ersten drei Oktette, für das Netz selbst reserviert sind, während die letzten 8 Bits für die Adressierung der IP-Geräte innerhalb dieses Netzwerks verwendet werden. In diesem Subnetz stehen 256 IP-Adressen zur Verfügung (2^8). Die erste Adresse wird als Netzkennung verwendet, die letzte Adresse ist die Broadcast-Adresse. Frei nutzbar sind somit 254 Adressen.

Ein **/30 Subnetz** hingegen verwendet die ersten 30 Bits für die Adressierung des Netzes und die letzten 2 Bits für Geräte. Dadurch können nach Wegfall der Netzkennung und der Broadcast-Adresse nur 2 IP-Adressen in diesem Subnetz für Geräte verwendet werden, was es ideal für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen macht, bei denen nur zwei Geräte miteinander kommunizieren müssen.

Layer 2, auch als Data Link Layer bezeichnet, arbeitet auf der Grundlage von MAC-Adressen, um den Netzwerktraffic anhand dieser Adressen an die entsprechenden physischen Ports weiterzuleiten. Dadurch wird eine direkte Kommunikation zwischen Geräten im selben Netzwerksegment ermöglicht. Diese Schicht ist weniger komplex und erfordert

weniger Konfiguration, eignet sich jedoch nicht für das Routing von Traffic zwischen verschiedenen Netzwerken [5, 11].

Layer 3, auch als Network Layer bekannt, arbeitet auf der Grundlage von IP-Adressen, um den Netzwerktraffic basierend auf diesen Adressen zu routen. Dadurch wird der Verkehr zwischen verschiedenen Netzwerksegmenten ermöglicht. Die Verwendung von Layer 3 führt zu einer höheren Robustheit und Skalierbarkeit des Netzwerks, da es eine effiziente Kommunikation zwischen mehreren Subnetzen ermöglicht [5, 37, 38].

Um ein robustes Netzwerk aufzubauen, kann eine Kombination von Layer 2 und Layer 3 eingesetzt werden. Während Layer 2 eine schnelle und niederschwellige Kommunikation innerhalb eines lokalen Netzwerksegments ermöglicht, kann mit Layer 3 eine sichere und gezielte Datenübertragung zwischen verschiedenen Netzwerken ermöglicht werden. Bis zu einer gewissen Größe kann es sinnvoll sein, das Mediennetz auf Layer 2 aufzubauen, da es den Administrationsaufwand gering hält. Die Nutzung von IP-Adressen wird hier durch das Address Resolution Protocol (ARP) ermöglicht, welches eine Zuordnung zwischen der MAC-Adresse und IP-Adresse herstellt. Mit steigender Komplexität und Größe des Netzes hat Layer 3 bedeutende Vorteile, da es mehr Sicherheit und Eingriffsmöglichkeiten mit sich bringt [5, 11, 12, 38, 39].

Testaufbau

Um zu zeigen, wie ein Videodatenstrom im Netzwerk mit ST 2110 von A nach B versendet werden kann, soll ein praktisches Beispiel aus dem *HdMedia over IP* Testaufbau (siehe Abb. 5) dienen. Dazu wird der Prozess der Einbindung eines Endgerätes in das Netzwerk sowie die Parametrierung eines Streams anhand einer Grass Valley LDX150 Kamera gezeigt. Das Livebild dieser soll an einen bereits eingebundenen Bildmischer gesendet werden. Anders als im Baseband muss die Kamera in der IP-Welt dafür nicht nur hardwareseitig verkabelt werden, sondern auch auf Softwareebene die Verbindung der Kamera bis zum Bildmischer konfiguriert werden. Die Grundkonfiguration der Switches als PTP-Boundary-Clocks erfolgt im Vorfeld.

Für die Netzwerkanbindung besitzt die Kamera drei Netzwerk-Ports. Zwei sind für das Mediennetz bestimmt und ermöglichen eine redundante Mediendatenübertragung. Sie sind für hohe Datenraten ausgelegt und werden i.d.R. als SFP-Ports ausgeführt. Der dritte Netzwerk-Port ist für das Management der Kamera bestimmt und meist als 1-Gigabit-Ethernet RJ45 Port ausgeführt. Das Management lässt sich technisch auf zwei Arten umsetzen:

Das **In-Band Management** verwendet das vorhandene Mediennetz, um darüber auch das Management zu realisieren. So ist keine separate Netzwerkanbindung für das Management eines Geräts erforderlich. Allerdings führt die Nutzung des gleichen Netzwerks für Management und Mediendatenübertragung zu einer höheren Komplexität beim Routing. Bei einer Bandbreitenüberlastung oder gar dem Ausfall der Verbindung mit dem Mediennetz ist zudem die Möglichkeit der Steuerung des Geräts nicht mehr gegeben.

Beim **Out-of-Band Management** wird ein separater Netzwerkanschluss verwendet. So wird das Mediennetzwerk von den Steuerungsinformationen getrennt. Allerdings erhöht die Verwendung eines zusätzlichen Netzwerks auch den Verkabelungsaufwand und die Kosten der Infrastruktur.

Die meisten Geräte unterstützen den parallelen Betrieb von In- und Out-of-Band Management. Im Testaufbau sind alle Geräte, die Outband Management erlauben, mit einer separaten Leitung an das Managementnetz angebunden. Ausnahme ist die LDX150. Diese bietet zwar einen separa-

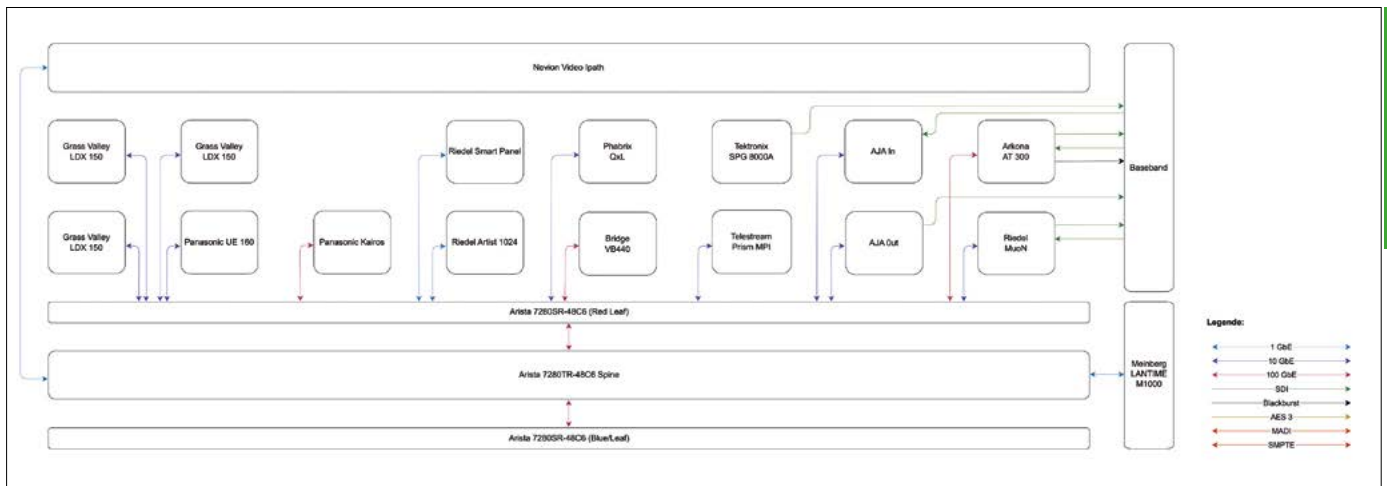


Abb. 5: Schematische Darstellung des HdMedia over IP-Testaufbaus

ten Management-Port am Kamerakopf, ist jedoch über eine SMPTE 311M Leitung mit Power Supply Unit und CWDM SFPs angebunden. Somit wäre eine zusätzliche Netzwerkleitung für Out-of-Band Management nötig und wird deswegen In-Band realisiert.

Sobald die Kamera physisch angeschlossen ist, muss die systemseitige Einrichtung erfolgen, beginnend mit der Vergabe der IP-Adressen. Im Testaufbau bildet jedes Endgerät mit seinem zugehörigen Netzwerk-Port am Switch durch Verwendung von kleinen Subnetzen ein eigenständiges Netz. Für die Vereinfachung wurde im Projekt eine Konvention eingeführt, bei der aus der IP-Adresse ablesbar ist, welches Gerät sich dahinter verbirgt und wo dieses physisch am Switch angeschlossen ist. Bei der IP-Adresse x.220.4.2 steht dahinter folgende Aufschlüsselung:

2. Oktett: an welchem Switch angeschlossen (210 Core, 220 Red, 230 Blue)
3. Oktett: an welchem Port angeschlossen (1 bis 54)
4. Oktett: x.x.x.1 → IP des Switchports oder x.x.x.2 → IP des Geräts

Durch die Gliederung in eigene Subnetze ist es den an den Switch angeschlossenen Geräten nicht möglich, über Switching im Layer 2 miteinander zu kommunizieren. Nur durch Routing im Layer 3 kann ein Datenaustausch zwischen den Subnetzen stattfinden. D. h. es muss erst explizit erlaubt werden, dass die Kamera aus ihrem Subnetz Daten in das Subnetz des Mischers senden darf. Um einen Videodatenstrom zu senden, muss im ersten Schritt der Multicast-Stream am Sender konfiguriert und aktiviert werden. Im Aufbau sind alle Ports der Switches bereits nach der o.g. Konvention vorkonfiguriert.

Zum Starten des Streams muss im ersten Schritt (1.) in der Kamera ein Videosignal einer Multicast-Adresse zugeordnet werden (siehe Abb. 6). Mit der Aktivierung des Streams wird ein SDP-File generiert, das alle Metadaten des Bildsignals, sowie die IP-Adresse des Senders, die Multicast-Adresse des Videodatenstroms und den entsprechenden UDP-Port enthält. Dieses File lässt sich per NMOS abrufen.

Im zweiten Schritt (2.) wird die Konfiguration auf der Empfängerseite vorgenommen. Dabei können die oben genannten Informationen dem Empfänger entweder händisch oder via NMOS über das generierte SDP-File mitgeteilt werden. Der Datenempfang ist damit vorbereitet, erfolgt jedoch noch nicht.

Erst der dritte und letzte Schritt (3.) ermöglicht die Weiterleitung des Multicast-Streams und ähnelt dem Routing in einer Video-Kreuzschiene. Hierbei wird der Multicast-Stream vom Sender-Netzwerk der Kamera in das Empfänger-Netzwerk des Bildmischers geroutet. Dies wird durch die Konfiguration einer Routing-Tabelle im Switch erreicht. Die Routing-Tabelle definiert die Beziehung zwischen der Multicast-Adresse des Streams, der IP-Adresse des Senders, dem Eingangs-Ethernet-Port des Senders und dem Ausgangs-Ethernet-Port des Empfängers. Nach Ausführung dieser drei Schritte erfolgt die Videoübertragung von der Kamera zum Bildmischer über einen Multicast-Stream. Um den Stream nun an weitere Empfänger wie einen Monitor zu senden, bedarf es lediglich einer Erweiterung der Konfiguration des Switches um den ausgehenden Ethernet-Port, um zusätzliche Verbindungen zu er-

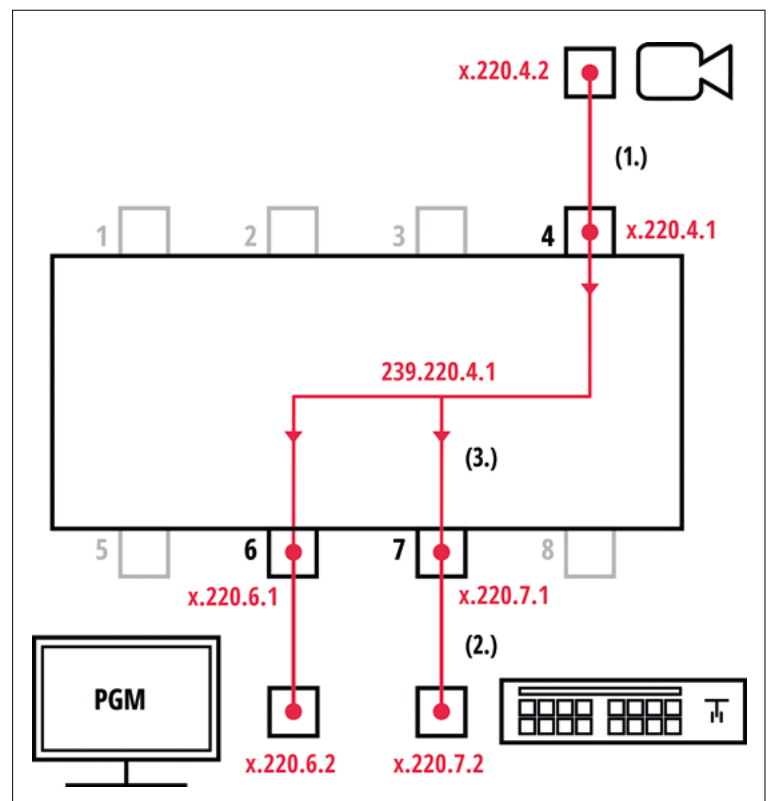


Abb. 6: ST 2110-Videoübertragung mit gerouteten Multicast-Streams



Abb. 6:
Live-Sendung
"Sunset Balcony"

möglichen. Dafür müssen für dieses Gerät nur die Schritte (2.) und (3.) wiederholt werden.

Dieser Prozess gewährleistet eine einfache Verteilung von Videodatenströmen im Netzwerk. Es besteht sowohl die Möglichkeit, das Signal an mehrere Empfänger zu leiten, als auch über dieselbe Netzwerkverbindung beliebig viele Datenströme wie bspw. ein Programm Rücksignal und ein Teleprompter-Signal ohne physische Umverkabelung hinzuzufügen. Hier liegt ein großer Vorteil der Systemarchitektur von Media over IP. Es macht hardwaretechnisch keinen Unterschied, ob einer oder 20 Videodatenströme an ein oder von einem Gerät gesendet werden. Limitiert ist die Menge an Streams nur durch die verfügbare Bandbreite der Netzwerkverbindung zwischen den Geräten.

Die aufgebaute Verbindung bildet einen Single Point of Failure, der die Videoübertragung im Fehlerfall abbrechen lässt. Innerhalb des ST 2110-10 Standards ist eine nahtlose Wiedergabe von Datenströmen bei Ausfall einer Verbindung nach den Mechanismen des SMPTE ST 2022-7 vorgesehen. Um diese Redundanz zu gewährleisten, wurde im Testaufbau auf eine Red/Blue-Architektur zurückgegriffen. Red/Blue bezieht sich auf die redundante Ausführung von Switches oder ganzen Netzen, bei der zwei separate Systeme (Red und Blue) vorhanden sind, die jeweils die gleichen Funktionen erfüllen und physisch redundante Verbindungen zu den Endgeräten haben. Dafür wird der zweite Medienport der Kamera genutzt. Der Aufbau des Blue-Netzwerks gleicht sowohl physikalisch als auch von der Konfiguration dem des Red-Netzes [40, 41].

Es wird deutlich, dass Media over IP-Netzwerke schnell eine hohe Komplexität erreichen. Die Vorteile bezüglich der gewonnenen Flexibilität durch Nutzung von IP-Netzen, resultieren gleichzeitig in einem hohen Konfigurationsaufwand dieser. Aus diesem Grund gibt es auch in der IP-Welt Steuerungssysteme, sogenannte Orchestrator, welche die Übertragung und Implementierung des SDP-Files sowie die Konfiguration des Multicast-Routings übernehmen. Diese stellen dem Anwender schlussendlich eine Matrix-UI zur Verfügung und automatisieren den oben gezeigten, im Hintergrund ablaufenden Prozess. Im Testaufbau stand das Produkt "VideoPath" des Unternehmens Nevion zur Verfügung [42].

Die aufgebaute Testumgebung bietet weitaus mehr Möglichkeiten und Aspekte, als an dieser Stelle erwähnt werden können. Einen ausführlichen Einblick in den Aufbau, durchgeführte Tests und weitere praktische Erfahrungen werden künftig sukzessive auf der Projekthomepage www.mediao-verip.de veröffentlicht.

Praxistest: "Sunset Balcony"

Einige Geräte aus dem Testaufbau konnten bereits produktiv als ST 2110-Insellösung in einem Videosystem, für die HD/



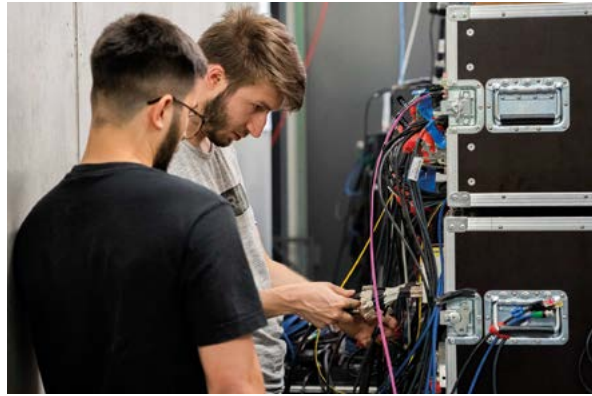
HDR Live-Musikproduktion Sunset Balcony (Abb. 6) an der Hochschule der Medien, eingesetzt werden.

Diese Produktion wurde ebenfalls von vielen Unterstützer*innen mit Material ausgestattet. Der Großteil des Bildsystems basiert dabei auf Baseband-Technologie. Der Kern des Bildsystems war jedoch ein Kairos-Bildmischer. Diese All-IP-Plattform erforderte den Einsatz von ST 2110-Technik, um eine Anbindung an das Baseband-System zu ermöglichen. Mithilfe zweier Arkona AT300-Karten wurden die Bildsignale in IP und zurück gewandelt. Die Signalübertragung erfolgte mittels 100 G Direct Attach Leitungen über die Netzwerkinfrastruktur des Testaufbaus. Die Multicast-Routen zur Signalverteilung in IP wurden händisch gesetzt. Zusätzliche Baseband-In- und Outputs konnten über Deltacast Flex Module des gelieferten Kairos-Systems realisiert werden. Insgesamt wurden Eingangsseitig 20 Kamerasignale und Ausgangsseitig drei Programmsignale, zwei Multiviewer und fünf Auxwege für die Bespielung von LED-Videostelen verarbeitet.

Drei Tonregionen für Binaural- und Stereo-Musikmischung sowie den Sendeton wurden in einem Nebengebäude mit Glasfaseranbindung abgesetzt. Die Übertragung des Multiviewers in die Region erfolgte über einen ST 2110-Stream, welcher dort mittels AJA ST 2110 zu SDI-Wandler in Baseband konvertiert wurde.

In zwei parallel laufenden Systemen muss die Taktung bzw. Zeitsynchronisation verknüpft werden. Dafür wurde eine Meinberg microSync HR als Grandmaster verwendet. Diese war für die Verteilung von PTP im ST 2110-Netz verantwortlich. Als Secondary Grandmaster und als Timing-Brücke in das Baseband-System fungierte ein SPG8000A. Dieser wurde über PTP synchronisiert und taktete alle Baseband-Geräte über Blackburst.

Um den gesamten IP-Aufbau zu monitoren und zu messen, wurden ein Bridge Technologies VB440 und ein Teletream Prism MPI2-25 verwendet. Darüber konnte neben den bildtechnischen messungen sowohl der Status der Videodatenströme überwacht als auch der PTP-Status eingesehen werden.



ST 2110 läuft, aber ...

Im Rahmen des Testaufbaus und der Live-Produktion konnte immer wieder festgestellt werden, dass es bei der praktischen Anwendung von ST 2110 zu Herausforderungen kommt. Im Gegensatz zu herkömmlichen SDI-Verbindungen, bei denen ein Signal an einem Punkt eingespeist wird und zum anderen Ende fließt, erfordert die Implementierung von ST 2110 ein tiefgehendes Verständnis der Mediendatenübertragung über IP-Netzwerke. Bei der Einrichtung und dem Betrieb eines Media over IP-Netzwerks muss mit anderen Problemstellungen umgegangen werden können. Die Fehlersuche gestaltet sich alleine durch den komplexeren Stack eines netzwerkbasierenden Systems schwieriger. Fehler können über Probleme in der Hardware und der Transport-Schicht hinaus, auf allen Ebenen des OSI-Modells, auftreten (siehe Abb. 7).

Die Komplexität kann daran verdeutlicht werden, dass es im Testaufbau von der Einrichtung des Netzwerks über die Anbindung einer Kamera und eines Messmonitors in das Netz bis hin zum laufenden Multicast-Stream anderthalb Wochen gebraucht hat. Obschon dieser Prozess von außen betrachtet langwierig scheint, ist er zugleich für das Team ein ebenso wertvoller. Die praktischen Erfahrungen im Umgang mit Netzwerktechnik und der Datenübertragung mit ST 2110 sind notwendig, um die Thematik wirklich begreifen zu können.

In dieser Anfangszeit ist zudem die Menge an möglichen Fehlerquellen deutlich geworden. Angefangen bei Fehlern auf Hardwareebene (Layer 1). Bspw. funktionieren SFPs verschiedener Hersteller nicht immer miteinander oder werden durch ihr Branding nicht in allen Geräten erkannt. Auf der Ebene von Layer 2 und Layer 3 können Fehler auftreten, die durch falsche Konfiguration der Switches und der im Netzwerk integrierten Geräte entstehen. Falsch eingegebene

ne IP-Adressen, fehlerhaft konfigurierte VLANs oder Multicast-Adressen sind dabei gängige Ursachen. Auch in Layer 6 und Layer 7 kann unterschiedlich implementierte Software oder eine unterschiedliche Auslegung der NMOS Spezifikation zu Kompatibilitätsproblemen führen.

„Layer-8“, dementsprechend der Mensch vor dem Gerät, ist zurzeit noch das größte Problem. Es muss, auch mit Hinzunahme eines Orchestrators, jedes Gerät händisch konfiguriert werden. Ein falsch konfigurierter Stream ist im ersten Moment nicht direkt sichtbar, hat aber zufolge, dass das Bildsignal nicht ankommt und zieht so eine Fehlersuche entlang des gesamten OSI-Stacks nach sich. Eine Fehlkonfiguration kann auch andere, vorher korrekt funktionierende Streams im Netzwerk beeinflussen. Ein vermeintlich kleiner Fehler kann, anders als in Baseband-Umgebungen, schnell Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben. Bei der großen Menge an möglichen Fehlerquellen wird deutlich, wie komplex sich die Fehlersuche gestalten kann, besonders im Hinblick auf die Potenzierung der technischen Fehler durch den Faktor Mensch.

Darüber hinaus können Herausforderungen in ST 2110-Umgebungen, vor denen auch das Projektteam stand, in vier Kategorien eingeteilt werden: Standardisierung, technische Reife, Interoperabilität und Steuerung.

Standardisierung

SMPT E 2110 standardisiert nur die Übertragung von Mediendatenströmen und deren Timing. Dabei bleiben jedoch Aspekte der Möglichkeiten zur Steuerung und Verwaltung von Geräten in produktiv eingesetzten Systemen außer Acht. Herstellerspezifische proprietäre Lösungen liefern zwar entsprechende Funktionen, sind aber oft nicht bzw. nur mit größerem Aufwand interoperabel. Die AMWA greift das Problem

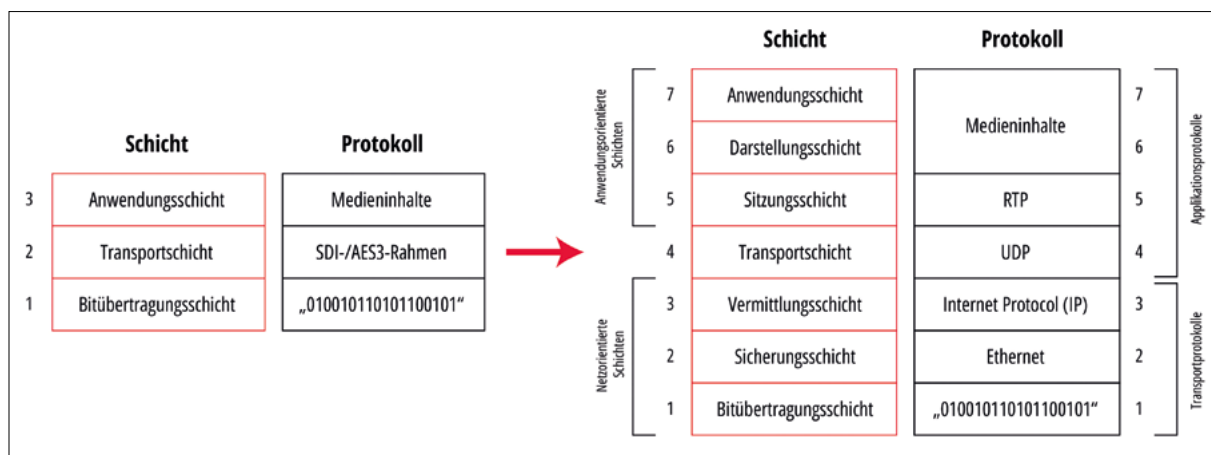


Abb. 7: Komplexität des Baseband-Stacks ggü. dem Netzwerk-Stack im OSI-Modell

mit den NMOS-Spezifikationen auf. Über diese erhalten Hersteller die Möglichkeit, sich auf eine gemeinsame Schnittstelle für o.g. Aufgaben zu einigen. Viele Spezifikationen sind jedoch noch in der Entstehung und darüber hinaus ist die Implementierung dieser nicht verpflichtend. So kann es zu Inkompatibilitäten im praktischen Einsatz kommen.

Technischen Reife & Interoperabilität

ST 2110 ist im Kontext als junge Technologie zu bewerten. Zusammen mit den Aspekten der Standardisierung lassen sich daraus Herausforderungen im Bereich der technischen Reife und Interoperabilität von Geräten in SMPTE ST 2110-Umgebungen ableiten. Selbst wenn Hersteller die Umsetzung der Standards und Spezifikationen strikt einhalten, ist das Zusammenspiel verschiedener Geräte zu prüfen und nicht garantiert. Dies kann nur praktisch getestet werden. Der gemeinsame Einsatz von Geräten verschiedener Hersteller im Testaufbau des Projekts hat dazu geführt, dass schlussendlich knapp die Hälfte der Geräte mit Patches oder Beta-Software liefen, um Interoperabilität herzustellen. Der Grad der technischen Reife ist im Bezug auf die eingesetzten Protokolle hoch, in ihrem spezifischen Zusammenspiel im ST 2110 und der entsprechenden Implementierung in Software und Endgeräten jedoch als ausbaufähig zu beurteilen.

Steuerung

Die größten Herausforderungen für ST 2110-Umgebungen liegen im Bereich der Steuerung und damit in der Implementierung und konsequenten Nutzung der NMOS-Spezifikationen. NMOS ist ein Schritt in die richtige Richtung, denn ohne eine einheitliche Regelung bleibt nur die Verwendung proprietärer Steuerungsprotokolle.

Fazit

In der Praxisphase des *HdMedia over IP*-Testaufbaus und der Live-Produktion konnte festgestellt werden, dass die Implementierung von ST 2110 bereits möglich, aber nicht unproblematisch ist. Die praktische Anwendung ist aktuell noch mit großen Hürden verbunden. Der Standard ist weit entfernt davon Plug&Play-fähig zu sein. Für den Aufbau und die Konfiguration eines ST 2110-Systems wird Personal gebraucht, das über ein tiefgreifendes und belastbares Wissen in der Video- und Netzwerktechnik verfügt. Die Kombination der beiden Themengebiete ist dabei genauso wichtig wie herausfordernd, um die komplexen Anforderungen zu erfüllen, Probleme zu verstehen und lösen zu können. Vor allem in den Bereichen der Interoperabilität und Steuerung von Geräten gibt es aufgrund der recht neuen Technologie viele Aspekte, die noch nicht rund laufen. Eine gesamteinheitliche Steuerungsmöglichkeit, wozu NMOS eine Lösung bieten könnte, ist dabei die Königsdisziplin.

Sind diese Hürden jedoch einmal überwunden, bietet ST 2110 eine Spielwiese für Systemingenieure und -integratoren. Mit ST 2110 kann ein flexibles und zukunftssicheres System aufgesetzt werden, das mit Aufgaben wachsen und auch an geänderte Anforderungen angepasst werden kann, ohne dabei den Kern der Systemarchitektur austauschen zu müssen.

Um in näherer Zukunft ST 2110 großflächig produktiv anwenden zu können, muss eine entsprechende technische Reife der Technologie erreicht werden. Dazu ist es nötig, Systeme mit dieser Technologie schon jetzt umzusetzen und daran weiterzuentwickeln – sei es in realitätsnahen Testumgebungen oder realen Anwendungen. Nur so können die "Kinderkrankheiten" behoben werden. Diese Aufgabe muss vom gesamten Markt, den Herstellern und großen Abnehmern

dieser Technologie übernommen werden. Die Zusammenarbeit mit Hochschulen und Universitäten schafft dabei ein Umfeld, wie im Projekt *HdMedia over IP*, in dem ohne wirtschaftlichen Druck geforscht werden kann.

So werden gleichzeitig Ingenieur*innen ausgebildet, die auf die speziellen Anforderungen und die zukünftigen Herausforderungen im Media over IP-Universum vorbereitet sind. Das Feedback aus diesen Projekten ist ein weiterer wichtiger Aspekt für die Weiterentwicklung der Geräte und Umsetzung des ST 2110-Standards. Die Resonanz aus dem Unterstützernetzwerk und darüber hinaus zeigt deutlich das Interesse an solchen Projekten – insbesondere an praxisnahen Testergebnissen. Denn die Problematik der Interoperabilität kann nur durch einen Austausch zwischen den Herstellern gelöst oder zumindest gemindert werden. Hierbei geht es vornehmlich um Themen wie Fehlerfindung und User Experience. Durch ein gemeinsames Voranschreiten von Herstellern, Kunden und Systemintegratoren, kann so Schritt für Schritt der Weg in Richtung eines Plug&Play Systems geebnet werden. Ein großer Meilenstein, um den Einstieg in ST 2110 zu vereinfachen.

Das *HdMedia over IP*-Team wird über das Projekt hinaus eine umfassende Dokumentation bereitstellen, die ST 2110 von Grund auf erklärt und als Leitfaden für Interessierte dienen kann. Mit dieser Initiative wird eine Brücke zwischen Video- und Netzwerktechnik geschlagen und eine solide Arbeitsgrundlage für den Umgang mit ST 2110-Systemen geschaffen. Denn ST 2110 bietet die Möglichkeit, den bisherigen Baseband-Workflow durch IP-basierte Systeme zu verbessern, zu vereinfachen und zukunftssicher zu gestalten. ➤



Danksagung

Ohne die zahlreichen Unterstützer*innen hätte dieses Projekt niemals ein so gewaltiges Ausmaß erreichen können. Mit großer Freude bedanken wir uns bei all jenen, die zum Erfolg des *HdMedia over IP*-Projektes beigetragen haben:

Franz Baumann, Markus Berg, Herbert Guist, Alexei Agueev, Michael Bauer, Jakob Bauer, Hacı Cengiz, Dirk Dern, Pascal Ertl, Prof. Dr. Jan Fröhlich, Christoph Graf, Manuel Helscher, Ralf Hermann, Carol Hoerner, Dominique Hoffmann, Hans Hoffmann, Prof. Roland Kiefer, Marco Kraft, Lukas Krück, Justus Künanz, Tobias Lang, Marcel Malchau, Hartmut Opfermann, Niklas Rautenberg, Jonas Reucher, Stefan Ringhoffer, Felix Scheuer, Lasse Schinckel, Sascha Schwoil, Igor Smierzewski, Georg Weber, Florian Weismann, Thomas Wildenburg, Thomas Will

Und danke an alle weiteren, die direkt oder indirekt an dem Forschungsprojekt beteiligt waren.



Quellenverzeichnis

- [1] „ST 2110-10:2017 - SMPTE Standard - Professional Media Over Managed IP Networks: System Timing and Definitions“, SMPTE, 2017, doi: 10.5594/SMPTE.ST2110-10.2017
- [2] „Internet Protocol“, RFC 791. RFC Editor, 1981. doi: 10.17487/RFC0791
- [3] „Source-Specific Protocol Independent Multicast in 232/8“, RFC4608, D. Meyer, R. Rockell, und G. Shepherd, RFC Editor, 2006. doi: 10.17487/rfc4608
- [4] „Multicast: Mehrpunktverbindungen für effiziente Datenübertragung“, Ionos, 6. Februar 2019. Zugriffen: 21. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/multicast/>
- [5] „OSI-Schichtenmodell“. Zugriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0301201.htm>
- [6] „SDP Session Description Protocol - RFC 8866“. RFC8866, RFC Editor, 2021. doi: 10.17487/RFC8866

- [7] „Sample SDP Specification“, Audinate, 2021. Zugriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://dev.audinate.com/GA/ddm/userguide/1.1/webhelp/content/appendix/sample_sdp_specification.htm
- [8] „SDP Whitepaper ST2110“, R. Lavoie, S. Viengkhou, S. Berthiaume, embrionix, 2019. Zugriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.embrionix.com/storage/app/media/white-papers/SDP%20Whitepaper%20ST2110.pdf>
- [9] „Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification“, S. Deering, R. Hinden, RFC Editor, 2017. doi: 10.17487/RFC8200
- [10] „OSPF for IPv6“, RFC 5340, D. Ferguson, A. Lindem, J. Moy, RFC Editor, 2008. doi: 10.17487/RFC5340
- [11] „Layer 2 Networking“, Juniper. Zugriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/junos/multicast-l2/topics/topic-map/layer-2-understanding.html>
- [12] „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks“, IEEE Std 802.1Q-2022, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.10004498
- [13] „Understanding IP Broadcast Production Networks: Part 8 - VLANs“, T. Orme, The Broadcast Bridge, 18. Juli 2023.

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.SC. MANUEL JOSIA HILDEBRANDT**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.ENG. AYLA REMMELE**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.SC. DANIEL KUNER**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.A. MIKA RÖMER**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.ENG. PAUL MEINKEN**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.ENG. JONAS SCHMITTE**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.SC. JAN NIETFELD**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.ENG. JONAS STOLZMANN**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.ENG. & B.SC. PHILIPP NÖCKER-PRIOR**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Quelle: Hochschule der Medien Stuttgart

**B.SC. PAUL WINTERSTEIN**

Hochschule der Medien Stuttgart

» www.mediaoverip.de

Zugegriffen: 30. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/7030/understanding-ip-networks-vlans>

[14] „Extended RTP Profile for Real-time Transport Control Protocol (RTCP)-Based Feedback (RTP/AVPF)“, J. Ott, S. Wenger, N. Sato, C. Burmeister, J. Rey, RFC Editor, RFC4585, Juli 2006. doi: 10.17487/rfc4585.

[15] „Real Time Control Protocol (RTCP) attribute in Session Description Protocol (SDP)“, C. Huitema, RFC Editor, RFC3605, Okt. 2003. doi: 10.17487/rfc3605.

[16] „RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications RFC 3550“, H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobsen, IETF, Juni 2003. doi: 10.17487/RFC3550

[17] „UDP User Datagram Protocol RFC 768“. RFC 768. RFC Editor, 2015. doi: 10.17487/RFC7687.

[18] „Was ist Voice over IP? - Rechenzentrum - Universität Würzburg“. Universität Würzburg. Zugegriffen: 13. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rz.uni-wuerzburg.de/dienste/kommunikation/voip/allgemeine-informationen/was-ist-voice-over-ip/>

[19] „PTP Within ST2110 Deployments“, R. Lavoie, S. Viengkhou, und J. Marte, Zugegriffen: 30. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.riedel.net/fileadmin/user_upload/800-downloads/07-Guides/PTP_Within_ST2110_Deployments.pdf

[20] „PTP Background and Overview“, J. Laird. 2012. Zugegriffen: 6. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iol.unh.edu/sites/default/files/knowledgebase/1588/ptp_overview.pdf

[21] „IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems“, IEEE 1588-2019, 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9120376/

[22] „Galileo - Das europäische Satellitennavigationssystem“, DLR. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2439/3577_read-5294

[23] „What is GPS?“, M. Wallace, NASA, 3. Juli 2019. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/what_is_gps/

[24] „Professional Media Over Managed IP Networks: Uncompressed Active Video ST2110-20-2017“, IEEE. 2017, doi: 10.5594/SMPTE.ST2110-20.2017

[25] „ST 2110-21:2017 - SMPTE Standard - Professional Media Over Managed IP Networks: Traffic Shaping and Delivery Timing for Video“, SMPTE, 2017. doi: 10.5594/SMPTE.ST2110-21.2017

[26] „SMPTE Standard - Professional Media Over Managed IP Networks: Constant Bit-Rate Compressed Video ST 2110-22“. IEEE, 17. August 2019. doi: 10.5594/SMPTE.ST2110-22.2019

[27] „Professional Media Over Managed IP Networks: PCM Digital Audio“, IEEE. doi: 10.5594/SMPTE.ST2110-30.2017.

[28] „RAVENNA AM824 / SMPTE ST 2110-31 Applications“. 17. Oktober 2020. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ravenna-network.com/ravenna-am824-smp-te-st-2110-31-applications-2/>

[29] „ST 2110-40:2018 - SMPTE Standard - Professional Media Over Managed IP Networks: SMPTE ST 291-1 Ancillary Data“. IEEE, 2018, doi: 10.5594/SMPTE.ST2110-40.2018

[30] „Networked Media Open Specifications: Introduction“. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://specs.amwa.tv/nmos/>

[31] „AMWA IS-04 NMOS Discovery and Registration Specification (Stable)“. AMWA. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://specs.amwa.tv/is-04/>

[32] „AMWA IS-05 NMOS Device Connection Management Specification“. AMWA. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://specs.amwa.tv/is-05/>

[33] „AMWA IS-06 NMOS Network Control Specification (Deprecated)“. AMWA. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://specs.amwa.tv/is-06/>

[34] „AMWA IS-07 NMOS Event & Tally Specification“. AMWA. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://specs.amwa.tv/is-07/>

[35] „AMWA IS-08 NMOS Audio Channel Mapping Specification“. AMWA. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://specs.amwa.tv/is-08/>

[36] „Was ist QoS (Quality of Service)?“, Juniper. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.juniper.net/de/de/research-topics/what-is-qos.html>

[37] „Subnetting (Subnetmask / Subnetzmaske)“. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektro-nik-kompodium.de/sites/net/0907201.htm>

[38] „Layer-3-Switch“. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1405171.htm>

[39] „An Ethernet Address Resolution Protocol“. IETF. doi: 10.17487/RFC0826

[40] „Video: Red and Blue, or Purple; Your IP Media Network, Your Way“. Zugegriffen: 27. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://thebroadcastknowledge.com/2019/09/04/video-red-and-blue-or-purple-your-ip-media-network-your-way/>

[41] „ST 2022-7:2019 - SMPTE Standard - Seamless Protection Switching of RTP Datagrams“. SMPTE, 2019, doi: 10.5594/SMPTE.ST2022-7.2019

[42] „SDN orchestration across single converged networks for uncompressed and compressed media flows“. Zugegriffen: 27. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://vsf.tv/events_archive/2022-04_NABShow2022/220308%20-%20IP%20Showcase%202022%20-%20Skyline_FINAL.pdf

[43] „IP Broadcast“, Igor Smierzewski, HdM Stuttgart, Vortrag am 13.01.2023

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AES	Audio Engineering Society
AMWA	Advanced Media Workflow Association
ANC	Ancillary Data (Space)
ARP	Address Resolution Protocol
BB	Black Burst
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
EBU	European Broadcasting Union
ETH	Ethernet
FKTG	Fernseh- und Kinotechnische Gesellschaft
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde
HdM	Hochschule der Medien
HDR	High Dynamic Range
I/O	Input / Output (dt.: Eingabe / Ausgabe)
IP	Internet Protocol
IS	Interface-Specification
LAN	Local Area Network
MAC	Media-Access-Control
NMOS	Networked Media Open Specifications
OSI	Open System Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PCM	Pulse-Code-Modulation
PTP	Precision Time Protocol
PTZ	Pan, Tilt und Zoom
QoS	Quality of Service
RJ45	Registered Jack (dt.: genormte Buchse)
RTCP	Real-Time Control Protocol
RTP	Real Time Transport Protocol
SDI	Serial Digital Interface
SDP	Session Description Protocol
SFP	Small Form-factor Pluggable
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers
ST	Standard
SWR	Südwestrundfunk
UDP	User Datagram Protocol
VLAN	Virtual Local Area Network