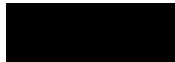


Evaluation von AES67-Audiostreams im heterogenen Netzwerk anhand virtueller Soundkarten

Bachelor-Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

Daniel Raetzel



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Design, Medien und Information
Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr. Nils Martini

Zweitprüfer: Marc Schettke

Hamburg, 4. 2. 2019

Zusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Übertragung von AES67-Audiostreams unter dem Einsatz von virtuellen Soundkarten in einem heterogenen Netzwerk. Im Mittelpunkt steht hierbei die Untersuchung von zwei virtuellen Soundkarten hinsichtlich ihrer Funktionsweise, ihrer Latenzzeiten und des Durchsatzes beim Zusteuern von Fremdtraffic zum Audiostream.

Als Ergebnis der Untersuchung sind bei den beiden Soundkarten deutlich abweichende Latenzen festzustellen, was letztlich auch das unterschiedliche Anforderungsprofil der virtuellen Soundkarten unterstreicht. Eine Soundkarte mit geringer Latenz ist gut für Echtzeitanwendungen geeignet. Die andere Karte mit Ergebnissen, die für eine sichere, fehlerfreie Übertragung im Broadcastbereich sprechen.

Bei einer parallelen Anwendung von Audiostreams und weiterem Traffic zeigen die Streams eine hohe Belastbarkeit, welche mit Dienstgüteparametern reguliert werden kann.

Die Arbeit ist für alle von Interesse, die sich mit AES67-Audiostreams auseinandersetzen wollen und ein grundlegendes Wissen zum Einsatz von virtuellen Soundkarten aufbauen wollen. Zudem wird der Messaufbau für die Prüfung der Latenzen und des Durchsatzes und der damit verbundenen Herausforderungen für den Leser erörtert. Die Arbeit liefert somit sowohl theoretische Informationen, als auch praxisnahe Erfahrungen.

Abstract

This bachelor's thesis discusses the transmission of AES67 audio streams using virtual sound cards in a heterogeneous network. The main focus is the investigation of two virtual sound cards regarding their functionality, their latencies and the throughput when adding external traffic to the audiostream.

As a result of the investigation, the latencies of two sound cards differ significantly, which ultimately emphasizes the different requirement profiles of the virtual sound cards. A sound card with low latency is well suited for real-time applications. The other card stands for secure and error-free transmission in the broadcast sector.

With a parallel application of audio streams and further traffic, the streams show a high resilience, which can be regulated with quality of service parameters.

The scientific findings is of interest for everyone who is dealing with AES67 audio streams and wants to build basic knowledge in the use of virtual sound cards. In addition, the measurement setup for testing latencies and throughput and the associated challenges for the reader will be discussed. This honours thesis provides theoretical information as well as practical experiences.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung, Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen Netzwerktechnik.....	3
2.1 OSI-Modell	3
2.1.1 Bitübertragungsschicht	4
2.1.2 Sicherungsschicht	6
2.1.3 Vermittlungsschicht.....	7
2.1.4 Transportschicht	8
2.1.5 Kommunikationssteuerungsschicht.....	9
2.1.6 Darstellungsschicht.....	9
2.1.7 Anwendungsschicht	10
2.2 IPv4 und Multicast.....	10
2.3 Transportprotokolle	13
2.3.1 UDP und TCP	13
2.3.2 RTP (Real-Time Transport Protokoll)	15
2.3.3 PTP (Precision Time Protocol).....	17
2.4 Connection Management und Discovery.....	19
2.5 Technische Dienstgüte	21
2.6 Heterogenes Netzwerk	23
3 Audio over IP Netzwerke	24
3.1 Grundlagen von AoIP	24
3.2 Virtuelle Soundkarten	25
3.3 Konzeption von AES67.....	27

4	Untersuchung von virtuellen AES67-Soundkarten	32
4.1	Beurteilungsgrundlage der Untersuchung	32
4.2	Zielsetzung der Untersuchung	36
4.3	Wahl der Systemkomponenten.....	36
4.4	Konfiguration des Systems	41
5	Messtechnische Untersuchung.....	44
5.1	Messaufbau.....	44
5.2	Messtechnische Überprüfung	45
5.2.1	Hardware-Messung	45
5.2.2	LAWO R3LAY Soundkarte	46
5.2.3	MERGING VAD Soundkarte.....	48
6	Bewertung.....	52
6.1	Technische Dienstgüte	52
6.1.1	Signallaufzeit	52
6.1.2	Durchsatz	56
7	Fazit	59
8	Literaturverzeichnis.....	61
9	Anhang	IX
10	Eigenständigkeitserklärung.....	XV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Das OSI-Schichtenmodell	4
Abb. 2: (a) Aufbau einer Twisted-Pair-Verbindung. (b) Aufbau einer Glasfaser-Verbindung	5
Abb. 3: Aufbau eines 802.1q-Ethernet-Frames	6
Abb. 4: Aufbau und Struktur eines IGMPv2-Paketes.....	12
Abb. 5: Aufbau und Struktur eines UDP-Paketes.....	14
Abb. 6: Aufbau und Struktur eines TCP-Paketes	14
Abb. 7: (a) Position von RTP im Protokollstapel. (b) Paketverschachtelung.....	16
Abb. 8: Verteilung der PTP-Pakete.....	18
Abb. 9: Synchronisationsablauf von PTP.....	19
Abb. 10: Schematischer Aufbau der PTP- und Audio-Signalverteilung im AoIP-Netzwerk.....	25
Abb. 11: Visualisierung der ASIO- und WDM-Kommunikation	26
Abb. 12: Zustandsdiagramm von ASIO.....	27
Abb. 13: Visualisierung der Zusammensetzung der Latenz	29
Abb. 14: Aufnahme einer fehlerfreien Audiospur (oben) und einer Audiospur mit Dropouts (unten)	30
Abb. 15: Oberfläche der Virtual PatchBay mit ASIO- und WDM-Patchfeldern von R3LAY..	38
Abb. 16: ASIO-Panel der virtuellen Soundkarte von MERGING	39
Abb. 17: Oberfläche von RavennaEasyConnect von MERGING	40
Abb. 18: Browser-Oberfläche der AES67-Soundkarte	41
Abb. 19: Messaufbau zur Messung der Latenz mit einem AES67-Interface	44
Abb. 20: Messaufbau zur Messung der Latenz zwischen zwei virtuellen Soundkarten.....	44
Abb. 21: Messaufbau zur Messung der Latenz des A/D-Umsetzers.....	45
Abb. 22: Ergebnis der Burst-Messung der Umsetzzeit des HAPI-Interfaces vom Oszilloskop.	46
Abb. 23: PTP-Diagnose der R3LAY-Software	46
Abb. 24: (a) Analyse der IGMP-Daten. (b) Auflistung der SDP-Daten durch Wireshark von MERGING	47

Abb. 25: PTP-Status des Interface HAPI von MERGING	48
Abb. 26: (a) Analyse der IGMP-Daten. (b) Auflistung der SDP-Daten durch Wireshark von LAW0 R3LAY	48
Abb. 27: Gemessener Schwellenwert zwischen fehlerfreien und fehlerbehafteten Audiostreams durch die prozentuale Zugabe von Fremdtraffic von PC107 Richtung PC203	51
Abb. 28: Gemessener Schwellenwert zwischen fehlerfreien und fehlerbehafteten Audiostreams durch die prozentuale Zugabe von Fremdtraffic von PC203 Richtung PC107	51
Abb. 29: (a) Gemessene Latenzzeiten der R3LAY VPB. (b) Gemessene Latenzzeiten der MERGING VAD.....	52
Abb. 30: Eingestellte Parameter des LANTIME M600 PTP-Grandmasters.....	54
Abb. 31: Konfiguration des Streams vom PC220 an die Senke PC190.....	54
Abb. 32: Verteilung der Latenzzeiten zwischen drei virtuellen Soundkarten.....	56
Abb. 33: Sample-/Waveformspektrum eines fehlerbehafteten Streams.....	57
Abb. 34: (a) Frequenzspektrum eines fehlerfreien Streams. (b) Frequenzspektrum eines fehlerbehafteten Streams	58
Abb. 35: Netzschema und Verkabelung des Netzwerkes	IX
Abb. 36: Terminal-Befehle zur Router-Konfiguration NETGEAR M4300-8X8F	X
Abb. 37: Einstellung der DSCP-Dienstgüteparameter in den Netzwerkknoten.....	XI
Abb. 38: Reihenfolge-Schema der Streams bei der Durchsatz-Messung	XIII
Abb. 39: Ablauf-Schema der Streams bei der Durchsatz-Messung.....	XIII

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufbau der IP-Adressen und -Gruppen.....	10
Tab. 2: Verfügbare Versionen im IGMP-Header-Feld »Type«.....	12
Tab. 3: Auflistung und Erklärung von SDP-Typen	20
Tab. 4: Gruppenbeschreibung der Differentiated Services Code Points	22
Tab. 5: Übersicht über die Zusammenstellung der Assured Forwarding Klassen	22
Tab. 6: Übersicht der einzelnen Systemparameter wo Latenzen auftreten können	33
Tab. 7: Übersicht der verwendeten Systeme mit ihrer Konfiguration	38
Tab. 8: Übersicht über die verwendeten Systeme mit VLAN Kennung, IP-Adresse und Funktion.....	42
Tab. 9: Gemessene Latenz zwischen dem Signalgenerator und der R3LAY VPB	47
Tab. 10: Angezeigte ASIO-Latenzen in der DAW Ableton Live 10	49
Tab. 11: Gemessene Latenz zwischen dem Signalgenerator und der LAW0 VAD	49
Tab. 12: Gemessene Latenz zwischen den virtuellen Soundkarten von MERGING und LAW0	49
Tab. 13: Gemessene Latenzen der vier Streams am PC190	50
Tab. 14: Aufgezeichnete IGMP-Multicast-Gruppen im Router	XI
Tab. 15: Aufgezeichnete Messwerte der LAW0 R3LAY VPB	XII
Tab. 16: Aufgezeichnete UDP-Streams einer Durchsatzmessung durch Wireshark.....	XIV

Abkürzungsverzeichnis

ACK	Acknowledgement-Tag
AES	Audio Engineering Society
AF	Assured Forwarding
AoE	Audio over Ethernet
AoIP	Audio over IP
ASIO	Audio Stream Input Output
AVB	Audio/Video Bridging
BE	Best Effort
BPF	Blockprüfzeichenfolge
DAW	Digital Audio Workstation
DiffServ	Differentiated Service
DP	Drop Precedence
DSCP	DiffServ Code Points
EF	Expedited Forwarding
FCS	Frame Check Sequence
FIFO	First-In-First-Out
FTP	File Transfer Protokoll
GM	Grandmaster
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGMP	Internet Group Management Protocol
IntServ	Integrated Service
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnik
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
OSI	Open Systems Interconnection
PCM	Pulse Code Modulation
PoE	Power over Ethernet
PT	Payload Type
PTP	Precision Time Protocol
QoS	Quality of Service
RFC	Request for Comments
RJ-45	Registered Jack 45 (genormte Buchse 45)
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTP	Real-Time Transport Protocol
SAP	Session Announcement Protocol
SDP	Session Description Protocol
SYN	Synchronization-Tag
TCP	Transmission Control Protokoll
TOS	Type of Service
UDP	User Datagram Protokoll
VAD	Virtual Audio Device
VLAN	Virtual Local Area Network
VoIP	Voice over IP
VPB	Virtual PatchBay
VSC	Virtual Soundcard
WDM	Windows Driver Mode

1 Einleitung

Die digitale Übertragung von Audio auf Netzwerkbasis schreitet immer mehr voran. Selbst in Privathaushalten ist dieser Trend angekommen. Audiodaten werden immer öfter an kabellose Receiver geschickt und übertragen. Als Beispiele sind hier die aktiven Lautsprechersysteme von SONOS oder Smart Speaker wie Amazons Echo oder Apples HomePod, die drahtlos miteinander kommunizieren, aufzuführen. Im Audio-/Videobereich findet derzeit ein großer Umbruch statt, denn Audio wird, anstatt über analogem Wege, immer mehr digital über das Netzwerk verbreitet.¹

Dies ist auch in der professionellen Audiotechnik zu erkennen. Denn immer mehr Hersteller erkennen den Trend und implementieren eine Audionetzwerk-Schnittstelle, sodass z.B. Funkmikrofone, Lautsprecher und digitale Mischpulte über solch eine Schnittstelle verfügen. Um jedoch alle Geräte verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren lassen zu können, benötigt es einen Standard, wie die XLR- oder SDI-Verbindungen der analogen Welt. Hierfür wurde der Standard AES67 festgelegt. Seit ein paar Jahren wird der Bedarf größer, Audiodaten direkt von einem Computer aus mit einem Audionetzwerk auszutauschen. Das erfolgt mittels Einbaunetzwerkkarte oder virtueller Soundkarte, die mit der normalen, bereits vorhandenen Netzwerkkarte des Rechners agiert.

Virtuelle Soundkarten werden von den Herstellern erst seit ein paar Jahren angeboten. Deren Verbreitung und Anwendung ist dementsprechend noch relativ gering, ausführliche Bewertungen und Analysen von virtuellen Soundkarten sind infolge dessen noch rar gesät. Das Verhalten der virtuellen AES67 Soundkarten im Netzwerk und deren Latenzen sind interessante Untersuchungsgegenstände, auf die in dieser Arbeit am Beispiel zweier virtuellen Soundkarten eingegangen wird.

Ein weiterer Punkt in der Abschlussarbeit ist der Einsatz von AES67 in heterogenen Netzwerken, also normalen Daten-Netzwerken. In der täglichen Praxis wird immer noch vermieden, ein Audionetzwerk mit einem heterogenen Netzwerk zu verbinden. Es wird geklärt, ob sich Daten-traffic regulieren lässt, um einen fehlerfreien Audiostream im Netzwerk zu garantieren und ab wann Audio im Netz aussetzt.

¹ vgl. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, S. 1014.

In dieser Arbeit wird zuerst auf die Grundlagen der Netzwerktechnik eingegangen. Darauf folgt ein Überblick über Audionetzwerke und die Konzeption des Standards AES67.

Die konkrete Messung wird mit zwei virtuellen Soundkarten verschiedener Hersteller durchgeführt. Gemessen wird bei den Soundkarten jeweils die Signallaufzeit sowie die Behandlung von AES67-Paketen im Netzwerk bezüglich der Einhaltung des Standards AES67.

Mit der Durchführung der Messung und Bewertung der daraus resultierenden Ergebnisse wird versucht, virtuelle Soundkarten anhand einer Beurteilungsgrundlage zu evaluieren und Einblicke in die Technologie zu erhalten.

Um die Technologie zu beurteilen, gibt es verschiedene Anforderungen als Beurteilungsgrundlage. Die Anforderungen werden anhand der Kommunikationsdienstgüte festgelegt. Die Dienstgüte legt verschiedene Schwerpunkte dar, wie Kosten, Zuverlässigkeit, Schutz oder technische Leistung. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der technischen Leistung, die sich durch den Durchsatz und die Signallaufzeit im Netzwerk bewerten lässt.

2 Grundlagen Netzwerktechnik

Um sich mit den Details von AoIP (Audio over IP) auseinander setzen zu können, bedarf es vorher eines Einblicks in die Grundlagen der Netzwerktechnik. In diesem Kapitel werden Grundbegriffe geklärt und die Zusammenhänge des Kommunikationssystems eines Netzwerkes skizziert.

2.1 OSI-Modell

Kommunikation bildet die Grundlage für den Austausch von Informationen zwischen einem Sender und Empfänger. Egal ob mündlich, schriftlich oder durch Austausch von digitalen Dateien. In der Netzwerktechnik bilden Protokolle die Kommunikationsgrundlage.

Um Protokolle zu standardisieren und einen Austausch zwischen Sender und Empfänger in der Netzwerkwelt zu garantieren, wurde das OSI-Referenzmodell (Open Systems Interconnection) entwickelt. Dieses Modell behandelt die Verbindung und Kommunikation zwischen offenen, technischen Systemen und besteht aus sieben Schichten. Das Modell beschreibt viele unterschiedliche Aspekte, wie die Übertragung der Daten im lokalen Netz, der Wegfindung im Internet oder der Überprüfung der korrekten Datenübertragung zwischen den Systemen.

Es besteht aus sieben Schichten, die sich in zwei Bereiche einteilen lassen. Die transportorientierten Schichten sind [Bitübertragungsschicht (Schicht 1), Sicherungsschicht (2), Vermittlungsschicht (3) und Transportschicht (4)], die anwendungsorientierten Schichten sind [Kommunikationsschicht (5), Darstellungsschicht (6) und Anwendungsschicht (7)].

Um die unterschiedlichen Operationen und Zugehörigkeiten in dem Modell zu unterscheiden, werden zwei Begriffe benutzt, welche völlig isoliert fungieren: Dienste und Protokolle.

Die Schnittstellen zwischen den Schichten, z. B. zwischen Schicht 1 und 2, nennt man Dienste. Sie legen fest, welche Vorgänge vom Benutzer durchgeführt werden und welche Hauptaufgabe die Schicht der anderen Nachbarsschicht zur Verfügung stellt. Im Modell agieren diese Operationen in vertikaler Richtung (Abb. 1).

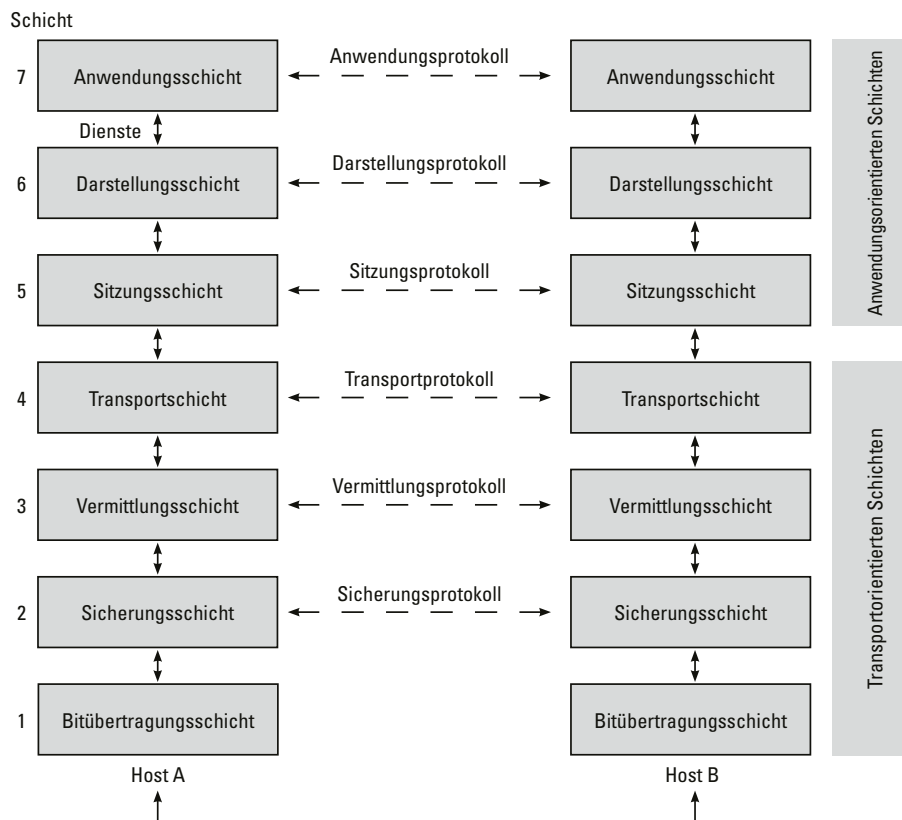


Abb. 1: Das OSI-Schichtenmodell²

Protokolle, die aus Regeln und Vorgaben bestehen, kommunizieren in virtueller, horizontaler Richtung, also zwischen zwei Systemen in der identischen Schicht, wie etwa Transportprotokoll von Host A mit dem Transportprotokoll von Host B. Virtuell deshalb, weil die Kommunikation in der Realität vertikal verläuft, um sich mit der identischen Schicht austauschen zu können.³

Als Einheit in den Schichten eins bis vier spricht man in der Bitübertragungsschicht von Bits und Symbolen, bei der Sicherungsschicht von Rahmen und Frames, bei der dritten, folgenden Vermittlungsschicht von Paketen und in der vierten Schicht von Segmenten oder Datagrammen. Die einzelnen Schichten werden in den folgenden Abschnitten kurz erörtert.

2.1.1 Bitübertragungsschicht

Die erste und unterste Schicht im OSI-Modell ist die Bitübertragungsschicht. Sie bildet die Grundlage aller Netze. Als Aufgabe hat sie unter anderem die Beförderung von Bits zwischen zwei benachbarten Systemen, ist für den Auf- und Abbau von physikalischen Verbindungen zuständig und definiert die Bandbreite zwischen den Systemen. Für die Übertragung und den Transport von Bits können verschiedene physikalische Medien eingesetzt werden: Gerichtete

² vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 67.

³ vgl. Ebd., S. 54.

Medien wie Netzkabel, Repeater oder Hubs, ungerichtete Medien wie Satelliten oder Bodenfunk⁴.

Für diese Arbeit sind nur die gerichteten Medien, welche über Glas und Kupfer angebunden werden, relevant. Diese beiden Kabeltypen werden nachfolgend kurz erläutert.

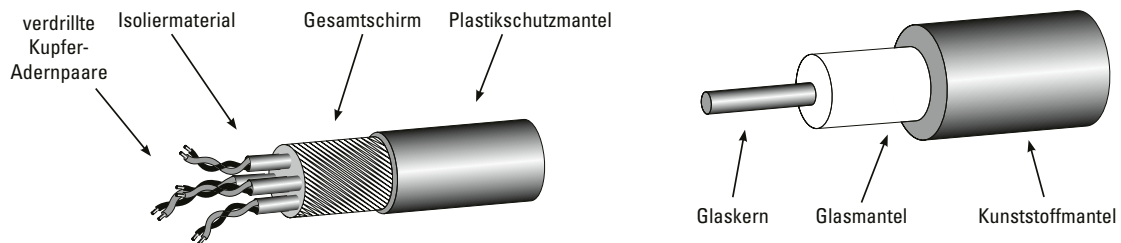


Abb. 2: (a) Aufbau einer Twisted-Pair-Verbindung. (b) Aufbau einer Glasfaser-Verbindung⁵

Glasfaser

Der Leiter einer Glasfaser besteht aus Kunststoff oder Glas und transportiert mit Photonen Licht bestimmter Wellenlängen. Es gibt zwei Kabeltypen von Lichtwellenleitern: Singlemode und Multimode. Der Unterschied liegt in der Verarbeitung des Kabels und Brechung des Lichts. Singlemode-Kabel besitzen einen kleineren Faserkerndurchmesser (Core) um die 9 μm , bei Multimode beträgt er rund 50 μm .⁶ Somit kann sich das Licht und die Welle bei Multimode-Kabeln unterschiedlich ausbreiten, was sich auf die Leitungslänge auswirkt.

Die maximale Kabellänge bei Multimode Lichtwellenleiter in Abhängigkeit der genutzten Wellenlängen beträgt etwa 300 bis 600 m, bei Singlemode beträgt die Länge rund 10 000 m.⁷

Die Vorteile von Glasfaser, sind eine größere Reichweite sowie eine größere Datenrate von bis zu mehreren Gigabit pro Sekunde. Auch die gute Abhörsicherheit und Leitungsdämpfung bei höheren Frequenzen, sowie die nicht auftretenden Masseprobleme, sprechen für die Lichtwellenleiter.

Die Nachteile von Glasfaser zu Kupfer sind neben höhere Anschaffungskosten und einem höheren Aufwand bei der Installation, auch die fehlende PoE-Fähigkeit und eine größere Anfälligkeit hinsichtlich des Biegeradius. Dieser ist bei Lichtwellenleiter-Kabeln größer und darf ein Mindestmaß nicht unterschreiten, da bei Stauchung oder Überdehnung der Fasern Informationen falsch oder gar nicht weitergeleitet werden.⁸

4 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 120.

5 vgl. Scherff, Grundkurs Computernetzwerke, S. 137.

6 vgl. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, S. 956.

7 vgl. Meinel / Sack, Internetworking, S. 213.

8 vgl. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, S. 956.

Kupfer / Twisted-Pair

Kupferleitungen sind, trotz der stark zunehmenden Bedeutung von Lichtwellenleitern, ein immer noch weitverbreitetes Übertragungsmedium. Ein verdrilltes Kupferkabel nennt man Twisted-Pair Kabel, welches sich zusammen mit dem RJ-45 Konnektor als Buchse in der IT-Welt etabliert hat.⁹ Verdrillte Adernpaare bieten besseren Schutz gegenüber nicht gedrillten. Sie schützen vor äußeren Störeinflüssen, wie magnetische Wechselfelder oder elektrostatische Beeinflussungen.¹⁰ Für Twisted-Pair-Kabel gibt es acht verschiedene Leistungsfähigkeiten, auch Komponentenkategorien genannt:

Die Kategorien 1 und 2 sind nicht für aktuelle Netzwerke geeignet, da sie für Modemleitungen und ältere Terminalsysteme gelten und eine maximale Bandbreite bis 1,5 MHz besitzen. Die nachfolgenden zwei Kategorien 3 und 4 sind heutzutage veraltet, da sie eine maximale Übertragungskapazität von nur 16 MBit/s haben dürfen. Kategorie 5 war bis vor ein paar Jahren der meist benutzte Twisted-Pair-Kabel-Typ, da sie Fast- und Gigabit-Ethernet unterstützen. Heutzutage werden jedoch Kupferkabel der Kategorien 6 und 7 verlegt, die eine höhere Bandbreite von 500 MHz für Kategorie 6 und bis zu 1 000 MHz für Kategorie 7 aufweisen können und somit eine viel höhere Übertragungsgeschwindigkeit besitzen.¹¹ Besonders Kategorie 7 erfüllt die Anforderung der Norm IEEE 802.3an und ist für 10-Gigabit-Netzwerke geeignet. Die aktuellste Kategorie 8 wurde im Oktober 2018 in der DIN-Norm DIN EN 50173-1:2018-10 festgelegt und kann eine maximale Bandbreite von 2 000 MHz aufweisen. Aufgrund der Leitungsdämpfung bei Kupferleitungen beträgt die maximale Länge ohne Einsatz von Repeatern von Twisted-Pair Kabeln rund 100 m.¹²

2.1.2 Sicherungsschicht

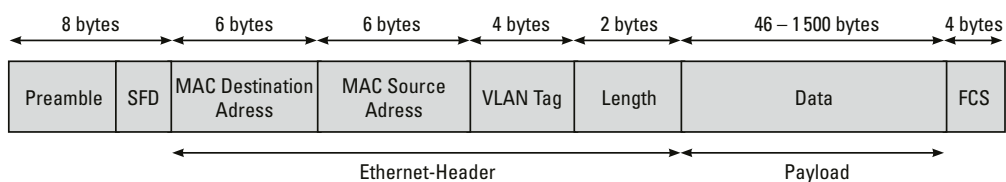


Abb. 3: Aufbau eines 802.1q-Ethernet-Frames¹³

Die zweite Schicht hat die Aufgabe, den Bitstrom aus der Bitübertragungsschicht in eine Leitung umzuwandeln und für die Vermittlungsschicht fehlerfrei weiterzuverarbeiten. Um eine

9 vgl. Baun, Computernetzwerke kompakt, S. 60.

10 vgl. Meinel / Sack, Internetworking, S. 121 f.

11 vgl. Ebd., S. 123 f.

12 vgl. Ebd., S. 213.

13 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 403.

fehlerfreie Weiterverarbeitung zu ermöglichen, werden bei dieser Rahmenbildung Fehlerüberwachungsmethoden angewendet, damit fehlerbehaftete Rahmen erkannt und korrigiert, sowie verloren gegangene Rahmen erneut übertragen werden können. Diese Fehlerüberwachung wird als Prüfsumme in der Blockprüfzeichenfolge (BPF), die auch Frame Check Sequence (FCS) oder Trailer genannt wird, am Schluss der Nutzdaten angefügt und bildet zusammen mit dem Header einen Rahmen (Abb. 3).¹⁴

Ab dieser Schicht wird immer vor den Daten ein Header angefügt. Dieser Header enthält Protokollinformationen über die Nutzdaten der jeweiligen Schicht. Geräte wie Bridges oder Switche werden dieser zweiten Schicht zugeordnet. Sie verbinden zwei oder mehrere LANs und verfügen über mehrere Ports. Switche haben einzelisolierte Ports, die es ermöglichen, dass eintreffende Verbindungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verarbeitet werden können. In der Praxis gibt es häufig Bridges und Switche, die gleichzeitig 10/100/1 000-Mbit/s-Ethernet verarbeiten können. Protokolle in dieser Schicht sind beispielsweise IEEE 802.11 (WLAN) und IEEE 802.3 (Ethernet).

Um nun jedes Gerät identifizieren zu können, welches im Netzwerk kommuniziert, wird in jedem Header der Sicherungsschicht die MAC-Adresse der Quelle und Senke eingetragen.

Die MAC-Adresse besteht aus einer 12-stellige Hexadezimalzahl und besitzt eine Länge 48 Bit. Jede Netzwerkkarte eines Systems besitzt eine eindeutige MAC-Adresse. So ist jedes Gerät einwandfrei zu identifizieren.¹⁵

8C:85:90:8B:8D:AA

Ein Beispiel für eine MAC-Adresse, welche durch Doppelpunkte oder Trennstriche getrennt wird.

2.1.3 Vermittlungsschicht

In der dritten Schicht findet zwischen den lokalen Netzwerken eine Vermittlung und Routing von Paketen statt. Dies sichert, dass zwischen den Netzen Pakete ankommen und nicht ankommende Pakete entfernt werden. Endlosschleifen werden reduziert. Anders als bei der Sicherungsschicht, die Frames zwischen den Systemen innerhalb der Leitung austauschen, agiert die Vermittlungsschicht als Transportdienst. Hauptaufgabe ist deshalb die Festlegung der Route, d. h. über welchen Weg die Pakete von der Quelle zur Senke transportiert werden. Deshalb ist erst in dieser Schicht eine Adresse des Ziels enthalten.¹⁶

14 vgl. Meinel / Sack, Internetworking, S. 195.

15 vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 58.

16 vgl. Scherff, Grundkurs Computernetzwerke, S. 78.

Ferner stellt die Vermittlungsschicht den höheren Schichten zwei Dienste bereit, den verbindungslosen und verbindungsorientierten Dienst. Adressierte Pakete verfügen bei verbindungslosen Diensten über keine vorgeschriebenen Routen und werden unabhängig von anderen Nachrichten vom Absender im System verschickt. Dies kann dazu führen, dass beim Empfänger die Reihenfolge der ankommenden Pakete von der ursprünglichen Reihenfolge abweicht.¹⁷

Bei den verbindungsorientierten Diensten werden erst, nachdem die Route festgelegt und eine Verbindung aufgebaut wird, die Pakete versendet. Dies hat den Vorteil, dass alle Pakete in ihrer vorher festgelegten Reihenfolge beim Empfänger eintreffen können. Der Nachteil besteht darin, dass die Verbindung erst aufgebaut werden muss, was natürlich eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. Bei zeitkritischen Anwendungen wie Audio oder Video ist dies nicht gewollt. Zuständig für diese Flusststeuerung sind beispielsweise Router. Diese lesen Pakete nach ihrer Zieladresse aus und vermitteln die Pakete weiter. Diese Wegfindung nennt man Routing. Es gibt statistisches Routing, hierbei erfolgt die Wegfindung mit Routingtabellen, und dynamisches Routing, wo die Route von äußeren Faktoren, wie Ausfällen von Geräten oder Überlastung von Netzen beeinflusst wird.¹⁸ Der Router entfernt bei einem eintreffenden Paket den Header und Trailer vom Rahmen aus der Sicherungsschicht und übergibt die Nutzdaten, den Kern des Paketes, an die Routing-Software. In diesen Nutzdaten gibt es zwei unterschiedliche Paket-Header. Eine 32-Bit-Adresse bei IPv4 oder 128-Bit-Adresse bei IPv6. Protokolle für die Adressierung sind z.B. das Internet-Protokoll Version 4 und 6 sowie AppleTalk oder DECnet. Einen detaillierten Einblick in den IPv4 Adressbereich folgt im Kapitel 2.2.

2.1.4 Transportschicht

Die vierte Schicht agiert als Quintessenz innerhalb des Schichtmodells. Die Schichten 1 bis 3 sind nur für die Adressierung und Wegfindung zuständig. Sie werden für interne Verbindungsprotokolle für Switches und Router benötigt. Die Transportschicht ist für die oberen Schichten von wichtiger Bedeutung.¹⁹ Sie stellt sicher, dass die Daten von den oberen Schichten zum Adressaten korrekt ankommen. Fungiert also als transparente Verbindung und zuverlässiger Dienst für die Schichten 5 bis 7 und trennt die höheren Schichten so ab, dass sie von hardwareseitigen Änderungen nicht betroffen werden, falls in der Zukunft Netzwerkgeräte ausgetauscht werden sollen.²⁰ Somit verkörpert die Transportschicht eine logische Ende-zu-Ende Verbindung zwischen den Systemen und Anwendungen, deshalb agiert sie als Quintessenz.

17 vgl. Meinel / Sack, Internetworking, S. 39.

18 vgl. Ebd., S. 38.

19 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 567.

20 vgl. Ebd., S. 69 f.

Die Funktionen einer Transportschicht beim Verbindungsaufbau sind unter anderem die Auswahl des Vermittlungsdienstes, die Festlegung der Anzahl der Teilnehmerverbindungen und der maximalen Größe der Datenpakete. Bei der Datenübertragung ist die Transportschicht für die Nummerierung der Daten sowie für das Multiplexen und Demultiplexen zuständig, falls dies vom Benutzer gefordert wird.

Es gibt zwei Arten von Diensten, die für den Auf- und Abbau sowie der Datenübertragung von Transportverbindungen zuständig sind. Verbindungslose Dienste werden mit dem »User Datagram Protokoll« (UDP) und verbindungsorientierte Dienste mit »Transmission Control Protokoll« (TCP) verschickt, welche im Kapitel 2.3.1 kurz dargelegt werden.

2.1.5 Kommunikationssteuerungsschicht

Die Kommunikationssteuerungsschicht, auch Sitzungsschicht genannt, hat die Aufgabe, Sitzungen zwischen den Anwenderinstanzen auf- und abzubauen, diese zu synchronisieren und letztlich als Dialogsteuerung und Verwaltung dieser Sitzungen zu fungieren.²¹ Besonders hervorzuheben ist hier die Zuordnung von Prioritäten und Güteparametern.²² Bekannte Protokolle der fünften Schicht sind FTP oder Telnet, welche in der Literatur manchmal auch der Anwendungsschicht zugeordnet sind, da diese von Anwendungsprogrammen wie FTP-Clients benutzt werden.²³ Wichtige Protokolle, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind SDP und SAP, worauf ab Kapitel 2.4 näher eingegangen wird.

2.1.6 Darstellungsschicht

Diese Schicht ist zuständig für eine einheitliche und für alle interpretierbaren Kommunikationsgrundlage. Sie steuert die Konvertierung für die Anwendungsschicht und stellt sicher, dass Daten auf der Anwendungsschicht verstanden werden können. Dafür wurden einige Standards für den Bild-, Ton- und Videobereich entwickelt, um Daten zwischen den Anwendungsschichten auszutauschen. Beispiele hierfür sind ASCII, JPG oder WAV. Hinzukommend wird auch die Datenkomprimierung wie JPEG oder MP3, die Datenverschlüsselung sowie die Chiffrierung wie SSL der Darstellungsschicht zugeordnet.²⁴

21 vgl. Meinel / Sack, Internetnetworking, S. 44.

22 vgl. Kaderali, Digitale Kommunikationstechnik, S. 17.

23 vgl. Scherff, Grundkurs Computernetzwerke, S. 92 - A. A. Baun, Computernetzwerke kompakt, S. 41.

24 vgl. Scherff, Grundkurs Computernetzwerke, S. 82.

2.1.7 Anwendungsschicht

Die oberste, siebte Schicht ist die Zielschicht und zudem auch die Komplexeste. Hier sind zwar nicht die Anwendungen implementiert, die der Benutzer ausführt, aber die Schicht unterstützt diese und bildet innerhalb der Kommunikation den Start- und Zielpunkt. Weitere Dienste sind neben der Feststellung der Erreichbarkeit der Senke, der Nachfrage von Zugriffsrechten, auch Kostenregelungen und die Datenintegrität. Das bekannteste Protokoll ist HTTP, welches als Standardkommunikation im WWW gilt.²⁵

2.2 IPv4 und Multicast

Wie im vorigen Kapitel erläutert, geschieht das Routing und die Adressierung in der Vermittlungsschicht anhand von IP-Adressen auf Basis des Internet-Protokolls. Nun folgt ein Einblick in die Bereiche der Adressierung von IPv4 sowie Multicast.

IP-Adressen besitzen immer eine Länge von 32 Bits, die aus vier Segmenten, den sogenannten Oktetten, bestehen.

Jedes Oktett wiederum ist eine 8 Bit große Binärzahl und bietet 256 verschiedene Werte (0-255). Gebräuchlich ist jedoch nicht die Binär- sondern die punktierte Dezimalschreibweise. Hier wird die Binärzahl in eine Dezimalzahl umgewandelt und mit Punkten getrennt.²⁶

Als Beispiel steht folgende Adresse:

11000000 10101000 00000000 00000001

Umgewandelt in eine Dezimalschreibweise ergibt das die Adresse: 192.168.0.1.

Klasse	IP-Adressräume			IP-Adressformate				
	Adressbereich	Anzahl Netze	Anzahl Hosts	8 Bits	8 Bits	8 Bits	8 Bits	
A	1.0.0.0 - 126.0.0.0	126	16 777 214	0	Netz	Host	Host	Host
B	128.0.0.0 - 191.255.0.0	16 384	65 534	10	Netz	Netz	Host	Host
C	192.0.0.0 - 223.255.255.0	2 097 152	254	110	Netz	Netz	Netz	Host
D	224.0.0.0 - 239.255.255.255	-	-	1110	Multicast-Gruppe			
E	240.0.0.0 - 254.255.255.255	-	-	1111	Experimentell			

Tab. 1: Aufbau der IP-Adressen und -Gruppen²⁷

²⁵ vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 70.

²⁶ vgl. Scherff, Grundkurs Computernetzwerke, S. 298.

²⁷ vgl. Ebd.

Mit diesem System bietet die Vermittlungsschicht 2^{32} , also 4 294 967 296 verschiedene Adressen (Tab. 1). Funktional sind die IP-Adressen in Präfixe bzw. Netze und Suffixe bzw. Hosts unterteilt. Als Vergleich hierzu kann man sich Postadressen mit Straßen und Hausnummern vorstellen.

Des Weiteren wird der große Adressbereich in einzelne Klassen unterteilt. Bei IPv4 gibt es 5 unterschiedliche Klassen (Klasse A - E). Als Vergleich dient hier die Postleitzahl, wo jedes Gebiet eine feste Postleitzahl besitzt. Klasse A bis C sind für Unicast-Adressen, Klasse D für Multicast und Klasse E für experimentelle Zwecke reserviert.²⁸ Bei Unicast-Adressen steht jede Adresse für einen Host bzw. System. Bei Multicast steht die Adresse für eine Gruppe von Systemen.

So ist es möglich, dass die Quelle ihren Multicaststrom an eine Klasse-D-Adresse sendet, und jede Senke, die den Strom empfangen will, sich dieser Gruppe bedient. Alle Hosts können innerhalb des Subnetzes diesen Multicaststrom empfangen und werden über das Bestehen der Multicast-Adresse informiert. Dies kann zu Traffic-Engpässen führen, da jeder Host im System alle Multicastströme sieht und die gesendeten Pakete empfangen kann. Um zu verhindern, dass Systeme, die sich nicht an den Multicaststrom beteiligen wollen, mit Traffic überschüttet werden, wird das Anfrage-Antwort-Protokoll IGMP (Internet Group Management Protocol) benutzt.²⁹

Mit diesem Protokoll verwaltet der Router die Multicast-Gruppen innerhalb eines Netzwerks und gibt sie an andere Router im Netz weiter. Im Anhang ist eine Auflistung von IGMP-Gruppen des Routers zu finden (Tab. 14).

Bei IGMP muss zwischen zwei Phasen unterschieden werden. In der ersten Phase tritt ein System einer Multicast-Gruppe bei. Um nun mitzuteilen, dass das System dieser Gruppe beigetreten ist, sendet dieses eine IGMP-Nachricht an die Multicast-Adresse der Gruppe. Der Multicast-Router, der die Gruppen verwaltet, empfängt diese Nachricht und gibt diese Informationen an andere Router im Netzwerk weiter. In der zweiten Phase sendet der Multicast-Router in periodischen Abschnitten eine Nachricht an die teilnehmenden Hosts der Gruppe. Hierbei wird überprüft, ob die Hosts noch an der Multicast-Gruppe teilnehmen, da die Mitgliedschaft dynamisch ist. Antwortet ein Host auf diese Anfrage, signalisiert der Router die Multicast-Verbindung des Hosts als aktiv. Derzeit gibt es drei Versionen von IGMP. Die letzte und dritte Version wurde 2002 in RFC 3376 spezifiziert.³⁰ Da AES67 als Mindestanforderungen IGMPv2 verlangt³¹, wird im Folgenden speziell auf diese Version eingegangen. Die Pakete des IGMPv2-Protokolls besitzen eine Größe von 64 Bit und bestehen aus acht Oktetten.

28 vgl. Scherff, Grundkurs Computernetzwerke, S. 299.

29 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 552.

30 vgl. Wendzel, Tunnel und verdeckte Kanäle im Netz, S. 19.

31 vgl. Audio Engineering Society Inc., AES67-2018, S. 14.

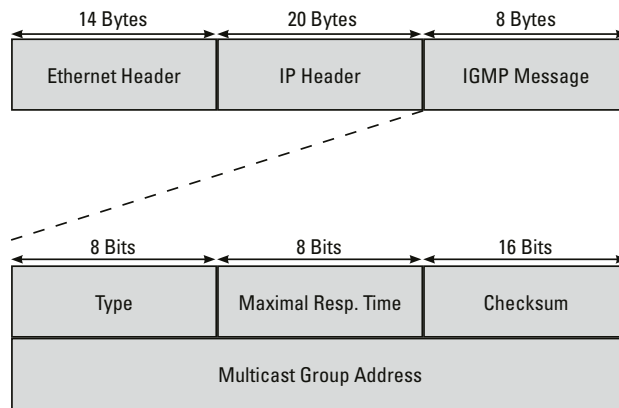


Abb. 4: Aufbau und Struktur eines IGMPv2-Paketes³²

Bei IGMP werden Typ, Antwortzeit, Prüfsumme sowie die Gruppenadresse hinterlegt (Abb. 4). Im Feld »Type« gibt es bei IGMPv2 fünf verschiedene Typen. Mit diesen ist es realisierbar die Mitgliedschaften abzufragen, anzumelden und die Gruppe zu verlassen. Anders als bei der ersten IGMP Version, ist es bei IGMPv2 möglich, den Query eigenständig zu bestätigen oder schneller aus der Gruppe auszutreten.

Binärzahl	Benutzung	Beschreibung
0x11	Nicht benutzt (Null)	Mitgliedschaften abfragen (allgemein)
0x11	Benutzt	Mitgliedschaften abfragen (spezifische Gruppe)
0x16	Benutzt	Mitgliedschaften melden
0x17	Benutzt	Gruppe verlassen
0x12	Benutzt	Mitgliedschaften melden

Tab. 2: Verfügbare Versionen im IGMP-Header-Feld »Type«³³

Der Typ »0x12« wurde aus der ersten Version von IGMP übernommen und stellt eine Abwärtskompatibilität von Version 2 auf Version 1 sicher.³⁴

Das Feld »Maximal Resp. Time« enthält die maximale Dauer der Antwortzeit von Gruppenmitgliedern in Sekunden. Die Standardzeit beträgt 10 Sekunden, so dass die Hosts die Antwortzeit zwischen 0 und 10 Sekunden wählen können. Die »Checksum« stellt sicher, ob die Datenpakete korrekt sind. Im Feld »Multicast Group Address« wird die genutzte Multicastadresse hinterlegt.³⁵

32 vgl. RFC 2236, <https://tools.ietf.org/html/rfc2236>.

33 vgl. Comer, TCP-IP: Konzepte, Protokolle, Architekturen, S. 324.

34 vgl. Ebd.

35 vgl. Ebd., S. 322.

2.3 Transportprotokolle

Im vorherigen Kapitel wird ein Blick auf die Vermittlungsschicht und der zugehörigen vierten Version des Internet Protokolls geworfen. Um nun eine Echtzeitkommunikation wie Audio over IP zwischen den Anwendungen realisieren zu können, werden Transportprotokolle wie UDP und TCP eingesetzt, welche im Folgenden erläutert werden.

2.3.1 UDP und TCP

Das User-Datagram-Protokoll (UDP) ist in RFC 768 definiert. Hauptaufgabe von UDP ist es, die Nutzdaten aus den höheren Schichten in Datagramme zu verteilen und gibt sie zusammen mit dem Header an die Vermittlungsschicht weiter. Damit nun die nächste Schicht weiß, für welche Anwendung an der Senke die Datagramme sind, werden im Header Quell- und Zielports festgelegt.³⁶ Damit ist es möglich, dass UDP-Pakete für die Anwendungen identifizierbar bleiben. Bestimmte Anwendungen, die in dieser Arbeit verwendet werden, haben solche vorher festgelegten Ports. Die Zeitsynchronisation über das Protokoll PTP etwa, hat immer den Zielport 319 und 320, RTP für die Echtzeitdatenübertragung hat dagegen den Zielport 5004.³⁷ Auf beide Protokolle wird im Kapitel 2.3.2 (RTP) und 2.3.3 (PTP) noch genauer eingegangen.

Das UDP Protokoll eignet sich besonders für Echtzeit- sowie Audio- und Videoübertragungen, da Datagramme schnellstmöglich ohne Verzögerung übermittelt werden.³⁸ Das hat Vor- wie Nachteile. Nachteile sind, neben einem erhöhten Sicherheitsrisiko, auch die mangelnde Zuverlässigkeit. Denn UDP überträgt die Datagramme ohne eine Verbindung zur Senke aufzubauen. Somit ist es möglich, dass Pakete verloren gehen, ohne dass die Quelle und Senke davon erfahren. Es kann Datenverlust entstehen.³⁹

Wenn die Gegenstelle ein Paket nicht bekommen hat, wird an der Quelle das Paket erneut angefordert. So kann es passieren, dass verloren gegangene Pakete mehrmals angefordert werden und so die Reihenfolge der Pakete nicht mehr mit der Reihenfolge der Quelle übereinstimmt. Eine Folge daraus wäre ein höheres Datenaufkommen.⁴⁰

Die Datenübertragung ohne Verbindungsaufbau zur Senke bringt aber auch Vorteile mit sich und geschieht in deutlich niedrigerer Komplexität. Die Gründe hierfür sind unter anderem der kleinere Header und die Protokollmechanismen. Auch eine fehlende Fluss- und Ende-zu-Ende-

36 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 627.

37 vgl. Audio Engineering Society Inc., AES67-2018, S. 31.

38 vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 86 ff.

39 vgl. Meinel / Sack, Internetnetworking, S. 60.

40 vgl. Ebd.

Kontrolle sind dafür ausschlaggebend, dass mit UDP eine höhere Geschwindigkeit als mit TCP erzielt werden kann. Aufgrund der eben genannten Vorteile basieren weitere Protokolle für Echtzeitanwendungen wie RTP auf dem UDP-Protokoll.

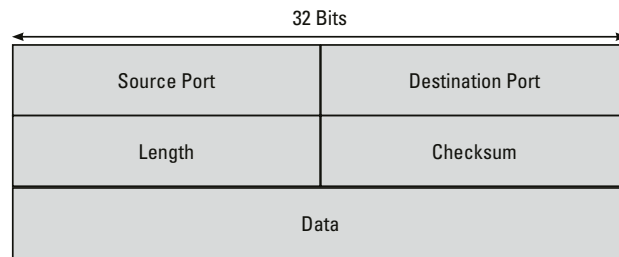


Abb. 5: Aufbau und Struktur eines UDP-Paketes⁴¹

In Abb. 5 ist ein UDP-Datagramm dargestellt. Der Header besteht aus vier Elementen und hat eine Größe von 8 Byte. Da für die Evaluation von AES67 Streams das Übertragungssteuerungsprotokoll TCP eine geringe Rolle spielt, wird die Funktionalität und Beschreibung im Folgenden nur kurz angeschnitten.

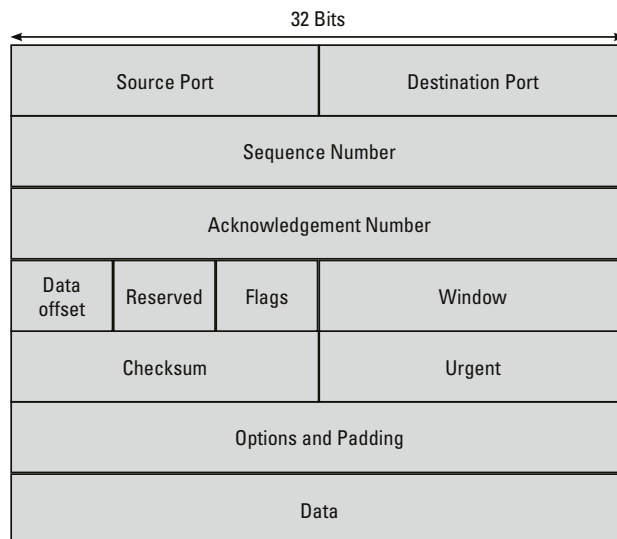


Abb. 6: Aufbau und Struktur eines TCP-Paketes⁴²

TCP wird für eine gesicherte und zuverlässige Übertragung genutzt und ist in RFC 7232 definiert. Der erste Blick auf den TCP-Header in Abb. 6 zeigt, dass neben den Quell- und Zielports, sowie der Checksumme und Datenlänge viel mehr Felder als bei UDP genutzt werden. Deswegen beginnt das TCP-Segment mit einem 20 Byte großen Header.⁴³

⁴¹ vgl. RFC 768, <https://tools.ietf.org/html/rfc768>.

⁴² vgl. RFC 7232, <https://tools.ietf.org/html/rfc7232>.

⁴³ vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 633 f.

Auch werden die Daten bei TCP nicht Datagramme sondern Segmente genannt. Für den gesicherten Aufbau einer Verbindung wird der Dreiwege-Handshake benutzt. Dies ist ein mehrstufiges Verfahren. Die Quelle schickt der Senke eine Synchronisationsanforderung (SYN), die die Senke zulassen muss und mit einer Bestätigung, dem »Acknowledgement-Tag« (ACK), wieder zur Quelle zurückschickt. Der Quellrechner bestätigt wiederum den ACK-Tag und sendet ein SYN- und ACK-Tag zur Senke. Somit ist eine gesicherte Dreiwege-Verbindung hergestellt.⁴⁴

Die Verbindung bei TCP bleibt bis zum Abbau bestehen. Werden keine Daten von der Quelle gesendet, erzeugt die Leitung weniger Verkehr. Des Weiteren ist eine Flusssteuerung möglich. Der Empfänger kann etwa den Fluss steuern, falls die Daten nicht schnell genug verarbeitet werden können, was im Gegensatz zu UDP einen großen Vorteil bietet. Aufgrund der eben genannten Funktionalitäten hat TCP eine geringere Geschwindigkeit als UDP und ist für Echtzeitanwendungen nicht geeignet.⁴⁵

2.3.2 RTP (Real-Time Transport Protokoll)

Im Audio-over-IP Bereich gibt es zwei wichtige Clocks. Die eine Clock ist eine Netzwerk-Clock, die mit dem Protokoll PTP realisiert wird, um den Takt im Netzwerk zu synchronisieren. Weiteres hierzu siehe Kapitel 2.3.3. Die zweite Clock ist eine Audio-Clock. Für die Audiosynchronisation wird das Signal in Samples unterteilt. Diese Samples gelten als Taktgeber und somit als Audio-Clock. Es entsteht eine Clock, die sich genau dem Verhalten der Anwendung und Abtastrate widerspiegelt und mit dem Real-Time Transport Protokoll (RTP) bewerkstelligt wird. Das Zusammenspiel beider Clocks wird in Kapitel 3.1 beschrieben.

RTP ist ein Transportprotokoll und nutzt für die Übertragung Datagramme (UDP). Das Protokoll ist in RFC 3550 spezifiziert. Mithilfe von RTP werden Multimediadaten wie Audio oder Video in Paketen transportiert. Es agiert als Schnittstelle zwischen der Anwendung und der Transportschicht (Abb. 7a).⁴⁶

44 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 637 f.

45 vgl. Ebd., S. 822.

46 vgl. Ebd., S. 622.

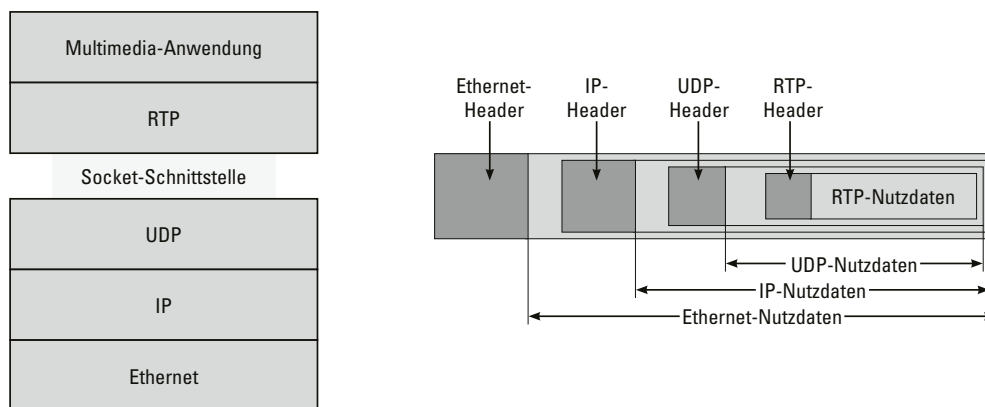


Abb. 7: (a) Position von RTP im Protokollstapel. (b) Paketverschachtelung⁴⁷

Wie die anderen Elemente im Schichtenmodell besitzt RTP neben den Nutzdaten auch einen Header. Dieser ist zwischen 12 und 72 Byte groß und enthält wichtige Steuerinformationen. Nachfolgend werden die wichtigsten Steuerinformationen kurz dargestellt:

Im Feld »Payload Type«(PT) wird der Codec der übertragenen Daten angegeben, welchen die Senke benötigt, um die Daten korrekt zu decodieren. Diese Information wird auch für das Feld »Timestamp« benötigt. Die »Sequence Number« gibt die Reihenfolge der Pakete an. Diese wird am Start zufällig gewählt und pro nachfolgendem Paket um eins erhöht. So ist es dem Empfänger möglich, trotz der UDP-Problematik, welche im Kapitel 2.3.1 beschrieben wird, die richtige Reihenfolge zu erkennen und ggf. mit Puffer die Abfolge einzuhalten und fehlende Pakete erneut anzufordern. Der »Timestamp« gibt an, zu welchem Abtastzeitpunkt das Paket von der Quelle generiert wurde. Dieser Wert erhöht sich pro Sample und nicht pro Paket.⁴⁸ Somit ist es möglich, dass ein Paket mehrere Samples enthält. Wenn zwischen zwei Paketen 48 Samples auseinanderliegen enthält ein Paket 1 ms Audio. Durch die Angaben im Header wird also die Synchronisation für das Echtzeitverhalten der Pakete sichergestellt. Dadurch ist es möglich, Audiodaten in CD-Qualität oder kleinere, bandbreitensparende Audiosignale wie Telefongespräche, über das Netzwerk mit RTP zu streamen.

Das Real-Time Transport Protokoll unterstützt Unicast-Ströme, also eine Quelle zu einer Senke, wie auch Multicast-Ströme, eine Quelle und mehrere Senken. Sollten mehrere Kanäle über RTP übertragen werden, werden die Daten durch ein Multiplexing-Verfahren zu einem Paket zusammengefasst.⁴⁹ Dies wird in RFC 5761 spezifiziert.

⁴⁷ Tannenbaum und Wetherall, Computernetzwerke, S. 622.

⁴⁸ vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 91 f.

⁴⁹ vgl. Bless, Sichere Netzerkommunikation, S. 456.

Um ein Audiosignal digital zu reproduzieren, wird es einerseits mit einer bestimmten Frequenz abgetastet, welche im Audiobereich bei 44,1 oder 48 kHz liegt und andererseits quantisiert. Hier wird die Höhe der Amplitude in einzelne Blöcke unterteilt. Bei Audio liegt die Quantisierungshöhe bei 16 bis 24 bit. Als Folge erhalten wir ein zeit- und wertediskretes Signal. Diese Technik nennt man Pulse-Code-Modulation (PCM).

Zusammengefasst kapselt die Audioanwendung die Daten in RTP, und RTP wiederum wird in UDP gekapselt. Somit ist RTP eng mit UDP und der Anwendungsschicht verknüpft. Siehe Abb. 7 (b).

Das Steuerungsprotokoll RTCP ergänzt RTP, welches ebenfalls in RFC 3550 spezifiziert ist. Darin werden keine Audiodaten transportiert, sondern Steuerungsdaten und Dienstgüte-Parameter bereitgestellt. Das RTCP übermittelt Informationen über die Verbindungsqualität an die Empfänger. Dazu gehören Jitter, Latenzen oder auch Informationen bei Überlastung des Netzwerkes.⁵⁰

2.3.3 PTP (Precision Time Protocol)

Um innerhalb des Netzwerks eine einheitliche Echtzeit zwischen allen AES67-Geräten herzustellen und zu synchronisieren, ist ein präzises Zeitprotokoll nötig. Dies kann mithilfe von PTP erfolgen, welches in IEEE-1588 spezifiziert ist.

Die Hauptaufgabe von PTP ist die präzise Zeitsynchronisierung unterschiedlicher Endgeräte, also der Austausch von genauen Zeitinformationen innerhalb des Netzwerkes (Abb. 8).

Mit PTP ist es möglich eine hohe Präzision zu erzielen und die Synchronisation der Uhren auf die Nanosekunde genau zu timen. Dies ist besonders in der Telekommunikation notwendig. Auch Audio-over-IP greift auf das Precision-Time-Protokoll zurück.

Früher war zum Austausch der Taktinformationen mit anderen Geräten ein zusätzliches Kabel notwendig. Heutzutage sollten alle Informationen zum Endgerät idealerweise über ein Medium übertragen werden, was mit PTP möglich wird. PTP basiert auf der IP-Kommunikation und kann, neben einer Übertragung via Ethernet, auf jedem beliebigen Bussystem eingesetzt werden.⁵¹

50 vgl. Tannenbaum / Wetherall, Computernetzwerke, S. 625.

51 vgl. Gramann / Mohl, Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis, S. 86.

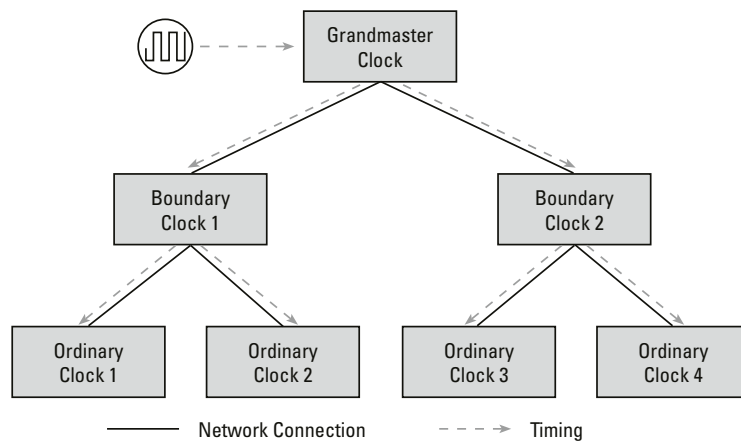


Abb. 8: Verteilung der PTP-Pakete⁵²

Grandmaster Clock (GM)

Die genaueste Uhr im System ist die Grandmaster Clock. Sie gilt für alle Teilnehmer und gibt die Clock für andere Clocks weiter, die wiederum auf Basis dieser Daten als Master Clock agieren. Wer als Master Clock definiert wird, obliegt dem »Best Master Clock Algorithmus«. Dieser Algorithmus legt fest, welches Gerät als Master ausgewählt wird, welches die besten Eigenschaften hinsichtlich Genauigkeit, Drift und Varianz besitzt.

Boundary Clocks (BC)

Das sind Geräte mit mehreren Ports und agieren einerseits als Slave, in Verbindung zu einem Master bzw. Grandmaster, und andererseits als Master für andere Senken oder Slaves-Geräte. Beispielgeräte sind hier spezielle PTP-Switches, Router oder auch Gateways. BC sind also für die Weitergabe von Zeitinformationen auch über Netzwerkgrenzen hinweg zuständig.

Ordinary Clocks (OC)

Ordinary Clocks können entweder als Endgeräte, die als Slaves bzw. Senken agieren, oder als Quelle und PTP-Master eingesetzt werden. Ordinary Clocks besitzen überwiegend nur einen einzigen Netzwerkport.⁵³

⁵² vgl. Gramann / Mohl, Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis, S. 87.

⁵³ vgl. Ebd.

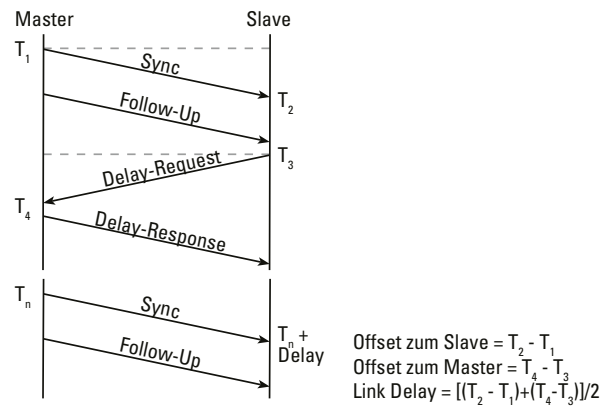


Abb. 9: Synchronisationsablauf von PTP⁵⁴

Die Synchronisierung zwischen einem Master und Slave verläuft immer mit drei oder vier Zeitstempeln in sogenannten »Event Messages«, welches über UDP durch das Netzwerk verschickt werden. Zuerst wird die Offset-Zeit zwischen den Geräten ermittelt, gefolgt von der Latenzzeit. Zur Synchronisierung gibt es eine einstufige und zweistufige Methode. Die einstufige Methode verschickt nur drei Zeitstempel, benötigt jedoch ein schnelles Netzwerk mit PTP-fähigen Geräten. Die Zweistufige hingegen versendet vier Zeitstempel und ist für alle Netzwerke geeignet.⁵⁵ Zu Beginn sendet der Master bei der einstufigen Methode konstant in definierten Intervallen eine Synchronisationsnachricht (SYNC) zum Slave. Falls die zweistufige Methode angewandt wird, folgt die FOLLOW-UP-Message, sie kann analog zum SYNC angesehen werden und enthält auch den Zeitstempel. Als nächstes sendet der Slave einen »DELAY-REQUEST« zum Master und fordert einen erneuten Zeitstempel. Der Master wiederum erwidert den Request und schickt den vierten und letzten Zeitstempel zum Slave zurück (DELAY-RESPONSE).⁵⁶ Mit den Zeitstempeln lässt sich die Latenz und die Offset-Zeit zwischen beiden Geräte errechnen (Link Delay), wie in Abb. 9 abgebildet ist. Für die Latenzberechnungen werden jeweils die Offset-Zeit zum Slave und Master addiert und danach halbiert.

2.4 Connection Management und Discovery

In den vorigen Kapiteln wurde die Grundlage für Audio over IP dargestellt. Es ist möglich, mithilfe von PTP eine Zeitsynchronisation zwischen den Hosts zu realisieren, sowie mit RTP Audiodaten zu transportieren und auszutauschen. Jedoch hat die Senke bis jetzt keinerlei Informationen darüber, welchen Stream sie empfangen kann und welcher Medientyp, Codec oder

54 vgl. Gramann / Mohl, Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis, S. 88.

55 vgl. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, S. 5.

56 vgl. Gramann / Mohl, Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis, S. 88.

Kontaktparameter mit diesem Stream verbunden ist. Dies wird durch das nachfolgend beschriebene Connection Management und die Discovery-Funktionalität sichergestellt. Die Beschreibung eines Streams wird mithilfe des SDP (Session Description Protokoll) bewerkstelligt, es ist für die Verwaltung von Kommunikationssitzungen zuständig (Connection Management).

SDP wurde in RFC 4566 spezifiziert und besitzt immer den gleichen Aufbau mit festgelegten Feldern, wie etwa der Protokollversion (v), dem Namen der Verbindung (s), dem Medientyp (m) als auch weiterer Attribute (a).⁵⁷ In Tab. 3 ist eine SDP mit Erklärungen abgebildet. Dieses Protokoll wird von der Multicastquelle generiert und bereitgestellt.

SDP-Typ	Beschreibung
v=0	Protokollversion
o=- 1542024577638202 0 IN IP4 192.168.100.90	Quelle / Gerät mit IP-Adresse
s=WIN100 streamed by »Lawo R3LAY«	Session Name, ggf. mit Kennung der Quelle
t=0	Zeit der aktiven Verbindung
a=clock-domain:PTPv2 0	Benutzte Zeitsynchronisation, hier PTPv2
a=recvonly	Multicast-Stream ist nur empfangbar
m=audio 5004 RTP/AVP 98	Medientyp (RTP-Audio mit Port 5004)
c=IN IP4 239.1.200.100/1	IPv4-Multicastadresse für den Empfang
a=rtpmap:98 L24/48000/8	Payload-Informationen (Typ: 98, Bittiefe 24 Bit, Abtastrate 48 kHz, 8 Kanäle)
a=framecount:48	Framegröße pro Paket 48 Samples
a=source-filter: incl IN IP4 239.1.200.100 192.168.100.90	zusätzliche Sitzungsinformationen
a=ts-refclk:ptp=IEEE1588-2008:00-50-c2-ff-fe-c2-df-c8:0	Die zugehörige PTP-Masterclock inkl. MAC-Adresse
a=mediaclock:direct=0	Versatzzeit der Audiodclock, hier 0 ms
a=ptime:1	Vorgegebene Packetzeit

Tab. 3: Auflistung und Erklärung von SDP-Typen

Mit SDP ist es also möglich, den gewünschten Stream zu beschreiben und aufzubauen. Jedoch ist es oft umständlich, diese Daten manuell in der Senke einzugeben, um einen Stream zu empfangen. Besonders dann, wenn mehrere Senken oder Streams zur Verfügung stehen. Abhilfe schafft hier eine automatische Erkennung von Streams, der sogenannten Discovery.

Dies geschieht mithilfe von Netzwerkdiensten wie ZeroConf, auch mDNS bzw. Bonjour genannt, oder SAP (Session Announcement Protokoll). Die Dienste erstellen eine Liste mit teilnehmenden Multicaststreams und stellen sie der Senke zur Verfügung. Wird ein neuer Multicaststream ins Netzwerk eingebunden, so wird dieser Stream mit den bereits vorhandenen in einer Liste aufgeführt und der Senke bereitgestellt, so dass der Stream von der Senke gefunden werden kann.⁵⁸

⁵⁷ vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 153 f.

⁵⁸ vgl. Schreiber / Zürl / Zimmermann, Web-basierte Anwendungen virtueller Techniken, S. 133 f.

2.5 Technische Dienstgüte

Der Begriff Dienstgüte, auch Quality of Service (QoS) genannt, steht für zwei verschiedene Bereiche, welche miteinander nicht viel zu tun haben. Einerseits ist mit der Dienstgüte die Definition einer Kommunikationsdienstgüte gemeint. Dort werden Vorgaben und Mindestanforderungen für ein System festgelegt, z.B. wie zuverlässig ein System sein soll oder welche Bedingungen das Signal in Bezug auf die Signallaufzeit und den Durchsatz hat. All diese Vorgaben sollen für eine Bewertung des Systems dienen und werden im Kapitel 4.1 näher erläutert. Andererseits wird mit der Dienstgüte eine technische Spezifikation innerhalb des Netzwerkes beschrieben, welches primär in Routern oder Layer-3-Switchen eingesetzt wird. Diese Definition der Dienstgüte wird in diesem Kapitel näher erläutert. Wenn mehrere Datenströme zusammenlaufen und auf eine Leitung gebracht werden, ist es notwendig, IP-Pakete in Klassen zu unterteilen und zu priorisieren.

Um genügend Bandbreite bereitzustellen und zu regulieren, ist es am einfachsten, immer ausreichend Kapazität zur Verfügung zu stellen. Jedoch ist das in einem bereits vorhandenen Netzwerk, wo verschiedene Anwendungen parallel fungieren, nicht immer realisierbar, da es sehr kostenintensiv werden kann.

Mit der Dienstgüte wird versucht, unter schon vorhandener Hardware die Ansprüche zwischen konkurrierenden Paketen auszugleichen. Router und Layer-3-Switches verfügen meist über einstellbare Dienstgüte-Parameter. Die beiden am meisten verwendeten Dienstgüte-Varianten sind integrierte Dienste (IntServ) und differenzierte Dienste (DiffServ).

IntServ unterstützt absolutes QoS. Das heißt, QoS wird garantiert, da im Router jederzeit Bandbreite für priorisierende Dienste bereitgestellt wird, auch wenn gerade keine reservierte Dienstgüte benötigt wird. Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass alle Geräte das verbindungsorientierte Protokoll RSVP (Resource Reservation Protocol) unterstützen, welches eine bestimmte Bandbreite aushandelt und reserviert.

DiffServ dagegen unterstützt relatives QoS. Hierbei werden nur priorisierende Pakete bevorzugt, wenn mehrere unterschiedliche Pakete in der Warteschlange vorliegen und so verglichen werden können.⁵⁹ Multimediaanwendungen wie VoIP benutzen für die Sicherung des Transports die differenzierten Dienste, welche in RFC 2474 und 2475 genauer beschrieben werden. Bei DiffServ wird vom Sender aus eine Priorisierung von IP-Paketen vorgenommen und im IP-Header im TOS -Feld (Type of Service) implementiert. Das Feld hat eine Größe von 8 Bits, die letzten zwei Bits werden derzeit jedoch nicht genutzt.

⁵⁹ vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 118 ff.

Mit 6 Bits stehen theoretisch 64 Qualitätsklassen, sogenannte Differentiated Services Code Points (DSCP), zur Verfügung, die wiederum in 3 Gruppen (Pools) unterteilt sind. Das fünfte und ein Teil des vierten Bits definieren diese drei Pools. Im Pool 1 stehen 32 Qualitätsklassen zur Verfügung, im Pool 2 und 3 je 16. Die Zuordnung zu den einzelnen Pools ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen (Tab. 4).

Gruppe	Beschreibung
xxxx0	Standards Action
xxxx11	Experimental or Local Use (Reserved for experimental or Local Use)
xxxx01	Standards Action

Tab. 4: Gruppenbeschreibung der Differentiated Services Code Points⁶⁰

In den meisten Fällen reichen die 32 Qualitätsklassen vom ersten Pool vollkommen aus. Grundsätzlich haben sich bei DiffServ drei unterschiedliche Klassen durchgesetzt:

- Expedited Forwarding (EF)
- Assured Forwarding (AF)
- Best Effort (BE)

Wenn keine Priorisierung vorliegt und das TOS-Feld mit 000000 gekennzeichnet wird, arbeitet ein Router normal und Pakete werden nach dem Best Effort Prinzip (BE) behandelt. Dies bedeutet, dass alle Pakete nacheinander abgearbeitet werden müssen und keine Priorisierung stattfindet (First-In-First-Out-Prinzip).⁶¹

Für eine gesicherte Übertragung ist Assured Forwarding (AF, RFC 2597) zuständig und besitzt eine kleinere Priorität als EF. AF besitzt insgesamt 12 unterschiedliche Prioritätsmöglichkeiten, die in 4 Klassen und 3 Drop-Prioritätsstufen unterteilt werden. Die ersten drei Bits definieren die 4 unterschiedlichen Klassen der Bandbreite (Class) 001 - 100. Die Bits vier bis sechs die Wahrscheinlichkeit für das Verwerfen eines IP-Paketes (DP, Drop Precedence), wobei das sechste Bit innerhalb des ersten Pools unberührt bleibt (010 - 110), siehe Tab. 5.

DP-Typen	Klassen			
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Low Drop Precedence	001010	010010	011010	100010
Medium Drop Precedence	001100	010100	011100	100100
High Drop Precedence	001110	010110	011110	100110

Tab. 5: Übersicht über die Zusammenstellung der Assured Forwarding Klassen

⁶⁰ vgl. Comer, TCP-IP: Konzepte, Protokolle, Architekturen, S. 101.

⁶¹ vgl. Detken, Echtzeitplattformen für das Internet, S. 174.

Für eine Clock-Übertragung mit PTP innerhalb eines AES67-Netzwerkes, werden die PTP-Pakete mit AF41 (Class 4, Drop Precedence Low = 1), also DSCP Wert 34, deklariert.

Expedited Forwarding (EF, RFC 3246) steht für eine beschleunigte Weiterleitung. Dies ist besonders für Echtzeitanwendungen von Vorteil und zeichnet sich durch kleine Werte bei Latenzen, Jitter und der Paketverlustrate aus.⁶² EF hat den DSCP Wert 46 (101110). Mit dieser 6 Bit Angabe im Header eines IP-Paketes ist es nun möglich, einzelne Pakete vor anderen zu bevorzugen und gegen aufkommende Last entgegenzuwirken. Bei AES67 werden RTP-Pakete mit der Klasse EF (46) kategorisiert.

2.6 Heterogenes Netzwerk

Bei einem heterogenen Netzwerk ist die Standard-Netzwerkconfiguration anzusehen. So kann ein heterogenes Netz aus mehreren Schichten des OSI-Modells bestehen und eine OSI-Schicht mehrere unterschiedliche Strukturen vereinen. Bei der Bitübertragungsschicht können gerichtete und ungerichtete Medien gleichzeitig eingesetzt werden und das Netzwerk aus mehreren Topologien bestehen. In der Anwendungsschicht können unterschiedliche Dienste miteinander kommunizieren, wie etwa beim Datentransfer divergenter Betriebssysteme.⁶³

⁶² vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 118.

⁶³ vgl. Heterogenes Netzwerk, <https://www.itwissen.info/Heterogenes-Netzwerk-heterogeneous-network.html>

3 Audio over IP Netzwerke

Nachfolgend gibt dieses Kapitel einen Einblick in die Grundlagen von AoIP. Ferner wird gezeigt, wie virtuelle Soundkarten funktionieren und welches Konzept AES67 verfolgt.

3.1 Grundlagen von AoIP

Unter der Bezeichnung »Audionetzwerk« werden zwei Verbreitungsarten definiert, welche heutzutage standardmäßig angewendet werden, Audio over IP (AoIP) und Audio over Ethernet (AoE). Diese beiden erlauben mit ihrer bidirektionalen Kommunikation eine kompressionsfreie und fast latenzfreie Übertragung von hunderten Audiokanälen und werden in lokalen Netzen eingesetzt. Als Audionetzwerke hatten sich bis vor ein paar Jahren CobraNet von CirrusLogic (für AoIP) sowie EtherSound von Digigram (für AoE) auf dem Audiomarkt etabliert.⁶⁴ Diese werden heutzutage von AVB (Audio/Video Bridging) bei AoE und Dante/Ravenna bei AoIP abgelöst. Bei AoE erfolgt die Kommunikation über die Sicherungsschicht (Layer 2). Jedoch wird AoE folgend nicht weiter betrachtet, da der Fokus auf AoIP und der Layer-3-Kommunikation liegt.

Die Grundlage für das paketorientierte Übertragungsverfahren in lokalen Netzen bei AoIP ist der Standard IEEE 802.3. Darauf folgend kommen die IP-Protokolle UDP und RTP für die Echtzeitkommunikation zum Einsatz. Wie bei der AES3-Audioschnittstelle enthalten die Pakete einen Header mit Informationen sowie einer Nutzlast, der sogenannten Payload.

Für die Synchronisation eines AoIP-Netzwerks wird PTP eingesetzt. Jedes Gerät muss die PTP-Zeitinformationen empfangen, um eine einheitliche Clock im Netzwerk realisieren zu können, sodass jedes Gerät dieselbe Zeit besitzt. Aus diesen Informationen des PTP-Masters, generiert jedes Gerät die Sample-Rate des Audiosignals. Jedes Sample wird so mit einem Zeitstempel versehen, welches im RTP-Header hinterlegt wird (Abb. 10).

⁶⁴ vgl. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, S. 1022 ff.

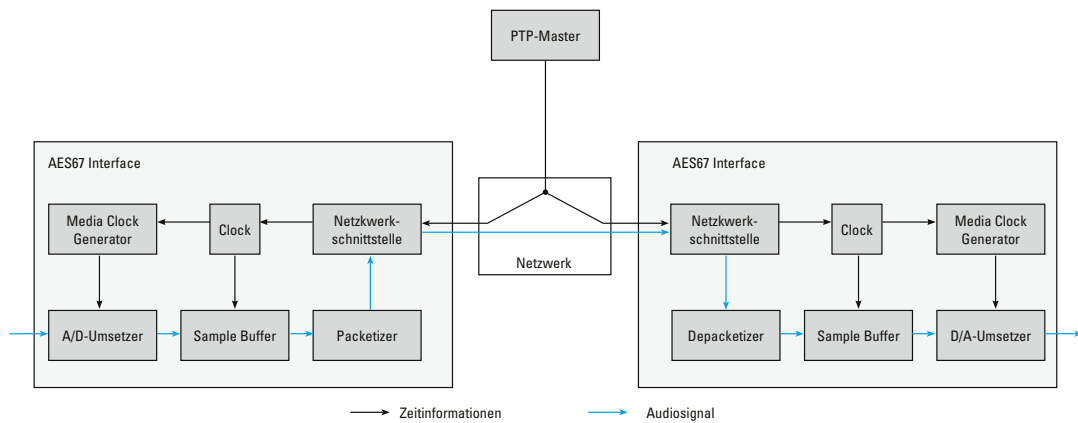


Abb. 10: Schematischer Aufbau der PTP- und Audio-Signalverteilung im AoIP-Netzwerk⁶⁵

Audio over IP weist, wie jede Anwendung, Vor- und Nachteile auf. Der große Vorteil ist die Flexibilität in der Netzwerkstruktur. Diese Struktur muss keiner strengen Topologie unterliegen. Das Netzwerk kann als Spin-Leaf, DaisyChain (in Reihe geschaltet) oder Stern-Netz aufgebaut werden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit des Einsatzes von handelsüblichen Layer-3-Geräten, wie z.B. Switches. Außerdem ist die Einbindung in eine normale heterogene Netzwerkstruktur, inkl. der Unterstützung von Diensten wie DHCP, möglich. Diese vergeben zudem automatisch IP-Adressen an neue Geräte, was weniger zeitintensiv für die Netzadministration ist. Ferner ist auch ein Plug & Play denkbar. Geräte können in das laufende Netzwerk eingebunden und mit Discovery-Diensten wie Apples Bonjour oder mDNS (ZeroConf) (siehe Kapitel 2.4) automatisch erkannt werden. Außerdem können die Datenpakete mit Dienstgüteparametern zur Priorisierung versehen werden.

Ein Nachteil bei Audio over IP ist die auftretende Latenz. Grund ist die Pufferung von Paketen sowie der Übertragungsweg im Netzwerk.⁶⁶

Innerhalb des Netzwerkes gibt es eine feste Übertragungszeit, das sogenannte Propagation-Delay. Dazu kommen variable Verzögerungen, sogenannte Processing- und Queuing-Delays, die in den Quellen, Senken als auch in Switchen auftreten können. Die variablen Verzögerungen sind abhängig von der Verarbeitungsgeschwindigkeit und Puffergröße der Systeme. Im Kapitel 3.3. wird gesondert auf die Latenzproblematik eingegangen.

3.2 Virtuelle Soundkarten

Um Audiosignale auch auf einem normalen Computer ohne eingebauter AES67-Netzwerkkarte paketbasiert zu empfangen sowie zu versenden, kann eine sogenannte virtuelle Soundkarte (Vir-

⁶⁵ vgl. Hildebrand, Overview on IP Audio Networking, S. 114.

⁶⁶ vgl. Lajmi, Paketsubstitution in Audiosignalen bei paketorientierter Audioübertragung, S. 42 ff.

tual Audio Device) eingesetzt werden. Diese Software emuliert ein Audiogerät und kann mit der normalen, aktiven Netzwerkschnittstelle des Computers, UPD/RTP- und PTP-Pakete empfangen und verarbeiten. Diese empfangenen Pakete werden weiter zum Audiotreiber des Systems geschickt und weiterverarbeitet.

Da die Funktionalität der Hardware nur in Software emuliert ist und nicht als solches implementiert ist, weisen virtuelle Soundkarten höhere Latenzen als Netzwerkkarten, die reine AES67-Signale empfangen können, auf. Auch betriebseigene Audiotreiber müssen umgegangen werden, da sie für Echtzeitanwendungen nicht geeignet sind. Daher muss zusätzlich eine latenzarme Treibersoftware installiert werden. Zum Beispiel das asynchrone ASIO (Audio Stream Input Output) von der Firma Steinberg, welche sich als latenzarmer Treiber fürs Windows Betriebssystem oder Core Audio von Apple durchgesetzt hat.⁶⁷

Da der Windows-Audiotreiber WDM nur Stereo⁶⁸, also zweikanaliges Audio senden und empfangen kann, hat Steinberg eine Schnittstelle entwickelt, die an keine feste Anzahl von Ein- und Ausgängen gebunden ist. WDM kommuniziert zudem mit Windows und dem Kernel⁶⁹, so dass immer Latenzzeiten gegeben sind, was für Echtzeitanwendungen weniger zu gebrauchen ist. ASIO dagegen spricht direkt mit der untersten möglichen Schicht, der Hardwareabstraktionsschicht, wo Software und Hardware kommunizieren können. So umgeht ASIO den Kernel-Treiber und besitzt eine kürzere Latenzzeit. Eine Visualisierung der Abläufe ist in Abb. 11 dargestellt.

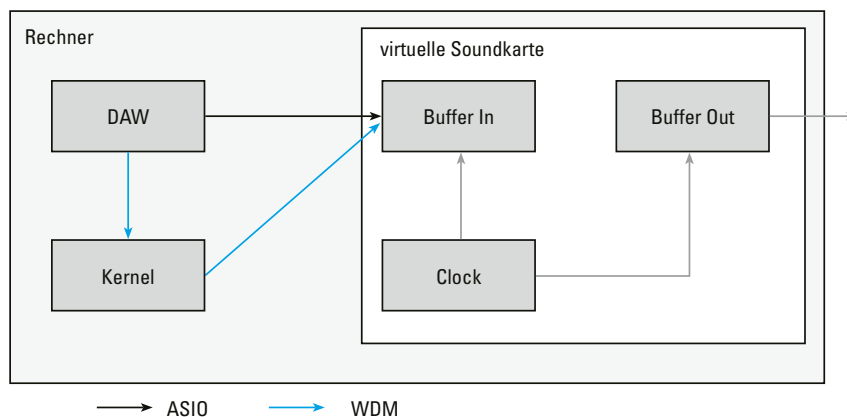


Abb. 11: Visualisierung der ASIO- und WDM-Kommunikation

Der Datenaustausch zwischen der Soundkarte und der Anwendungssoftware erfolgt über einen Doppelpuffermechanismus mit Datenblöcken. Während die Soundkarte in den ersten Puffer schreibt, liest die Software den zweiten Puffer aus.⁷⁰ Das Initialisieren von ASIO unterliegt ei-

⁶⁷ vgl. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, S. 1017 f.

⁶⁸ vgl. Stoermer, SIO 2.3 Audio Streaming Input Output Development Kit, S. 3.

⁶⁹ Hildebrand, RAVENNA WDM Virtual Sound Card (RVSC) Specification, S. 4.

⁷⁰ vgl. Stoermer, SIO 2.3 Audio Streaming Input Output Development Kit, S. 3.

nem festgelegten Ablauf (Abb. 12). Die Größe der Datenblöcke und der Puffer wird in Samples angegeben und vom Audiotreiber der Soundkarte ermittelt, um so die Soundkarte optimal ausnutzen zu können. Diese Größe wird dann in ASIO implementiert und weiter an die Anwendungssoftware, wie bspw. eine Digital-Audio-Workstation wie Cubase, Ableton Live oder Reaper, gegeben. Diese übernimmt im Slave-Modus die Puffergröße und kann keine eigenen Größen einstellen.⁷¹ Jeder Puffer enthält Daten immer nur für einen Kanal. So müssen für mehrkanalige Anwendungen mehrere Puffer gegeben sein. Der ASIO-Treiber kann nun gestartet werden.

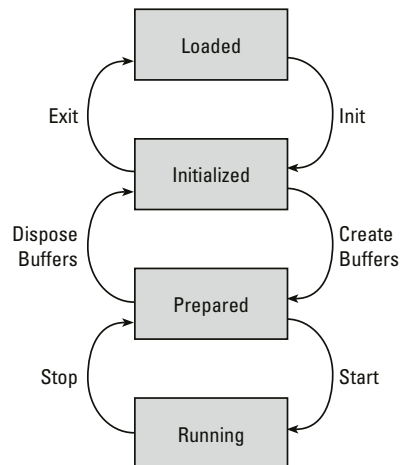


Abb. 12: Zustandsdiagramm von ASIO⁷²

3.3 Konzeption von AES67

Nachdem immer mehr Hersteller für ihre Audiogeräte eigene Audio-over-IP-Protokolle implementierten, konnte man nur bestimmte Produkte der Hersteller nutzen, um Audionetzwerke aufzubauen. Die Übertragungsprotokolle der unterschiedlichen Hersteller waren nicht miteinander kompatibel. Somit war es an der Zeit, einen Standard zu entwickeln, der eine Interoperabilität zwischen den Herstellern und ihren Protokollen ermöglicht.

Dies wurde mit dem offenen Standard AES67 realisiert. AES67 basiert auf keinem neuen Protokoll oder einer neuen Systemlösung, sondern ist von allen bestehenden Lösungen der kleinste gemeinsame Nenner. Er ermöglicht eine Basis für den Austausch der Audiodaten zwischen den Herstellern auf Layer-3-Ebene. AES67 wurde 2013 veröffentlicht, die dritte und aktuelle Aktualisierung des Standards wurde 2018 vorgenommen. Als Referenz für die Arbeit wird die Version von 2018 beansprucht.⁷³

⁷¹ vgl. Stoermer, SIO 2.3 Audio Streaming Input Output Development Kit, S. 8.

⁷² vgl. Ebd., S. 5.

⁷³ vgl. Audio Engineering Society Inc., AES67-2018.

AES67 steht für eine hochqualitative Audioübertragung. Dazu zählen eine lineare, unkomprimierte PCM-Codierung mit einer Abtastrate von 44,1 kHz oder höher, eine Bittiefe von 16 Bit und höher, sowie eine maximale Latenzzeit von 10 Millisekunden zwischen Quelle und Senke.⁷⁴

Neben Vorgaben, wo Protokolle, Paketgrößen und Codecs verlangt werden, gibt es auch Vorgaben hinsichtlich der Dienstgüte. Die wichtigsten Anforderungen werden nachfolgend beschrieben.

Synchronisation

Für die Zeit-Synchronisierung wird eine Netzwerk-Clock und Media-Clock gefordert. Die Netzwerk-Clock wird mit PTPv2 (siehe Kapitel 2.3.3) und die Media-Clock mit RTP (siehe Kapitel 2.3.2) realisiert. Beide Uhren haben eine feste Beziehung zueinander und müssen als Zeitreferenz die Unixzeit, welche auch in IEEE 1588-2008 festgelegt wird, unterstützen. Diese hat den 01.01.1970 00:00:00 als Startpunkt und läuft aufsteigend, so dass als Zeitskala nur die Anzahl der vergangenen Sekunden seit 1970 akzeptiert werden. Als Beispiel nehmen wir den 31.12.2018, 18:53:15 Uhr, in Unixzeit haben wir somit 1 546 278 795 Sekunden.

Das übers Netzwerk übertragene Audiosignal wird mithilfe der Media-Clock abgetastet und konvertiert. Als Einheit wird bei der Media-Clock von Samples gesprochen. Um beide Uhren mit derselben Geschwindigkeit laufen zu lassen, ist es notwendig, die Abtastrate der Media-Clock analog der Abtastrate des Audiofiles einzustellen⁷⁵. Als Beispiel dient eine Media-Clock eines Audiostreams, die mit 44,1 kHz, also 44 100 Samples pro Sekunde, abgetastet wird. Für jede Sekunde der Netzwerk-Clock verstreichen 44 100 Samples der Media-Clock. Beide Clocks agieren somit synchron (Abb. 10).

Transport und Dienstgüte

Die Transportgrundlage bei AES67 schafft das UDP-Protokoll auf Basis von IPv4. Darauf aufbauend folgt das RTP für die Audioübertragung. Die maximale RTP-Paketgröße beträgt laut Standard 1 440 Bytes. Um eine Audioübertragung auch in einem normalen Netzwerk garantieren zu können, verlangt der AES67-Standard bestimmte Dienstgüte-Einstellungen. Diese werden mit den differenzierten Diensten realisiert (siehe Kapitel 2.5). PTP-Pakete werden mit EF (46) und RTP-Pakete mit AF41 (34) im IPv4-Header gekennzeichnet.⁷⁶

74 vgl. Audio Engineering Society Inc., AES67-2018, S. 7.

75 vgl. Ebd., S. 13 f.

76 vgl. Ebd., S. 15 f.

Bei der IPv4 Adressierung mit Multicast gibt der Standard einen Adressraum zwischen 239.0.0.0 und 239.255.255.255 vor. Somit ist innerhalb eines Netzwerkes der restliche Multicast-Adressraum von Klasse D zwischen 224.0.0.0. und 238.255.255.255 für andere Tätigkeiten verfügbar.

Payload und Encoding

Die geforderte Audiolänge pro Paket beträgt 1 Millisekunde. Dies entspricht bei einer Abtastrate von 48 kHz genau 48 Samples.⁷⁷ Beim Encoding lässt der Standard mehrere Möglichkeiten zu, da für jede Audioanwendung andere Abtastraten oder Bittiefen benötigt werden. Grundsätzlich sollten jedoch alle Geräte eine Abtastrate von 48 kHz und eine Bittiefe von 16 Bit und PCM unterstützen. Die Anzahl der übertragbaren Kanäle hängt von der Abtastrate, Bittiefe und Paketzeit ab, um die maximale Paketgröße von 1 440 Bytes zu erreichen. So wird erlaubt, bei 24 Bit, 48 kHz und einer Paketzeit von 125 ms max. 80 Kanäle zu übertragen.

Latenz

Neben den technischen Anforderungen und vorgegebenen Protokollen, gibt es auch Vorgaben hinsichtlich der Latenzzeit in einem Mediennetzwerk. Dies wird bei AES67 als »Link Offset« bezeichnet.

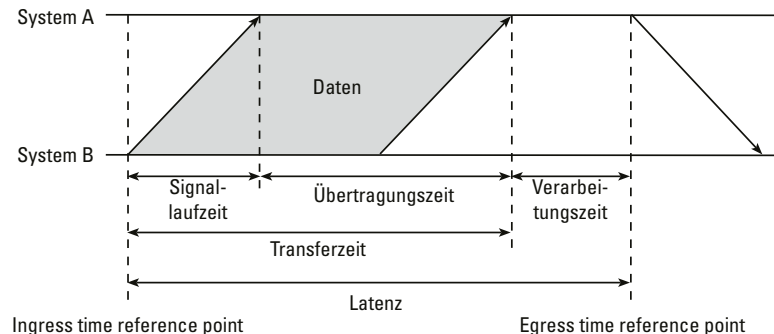


Abb. 13: Visualisierung der Zusammensetzung der Latenz⁷⁸

Die Latenz setzt sich aus der Signallaufzeit, der Übertragungszeit und der Verarbeitungszeit zusammen. Signallaufzeit gibt die Entfernung zwischen zwei Systemen an, die ein Paket im Netzwerk durchlaufen muss. Unter die Übertragungszeit fällt die Bandbreite und Paketgröße. Je größer das Paket und kleiner die Bandbreite, desto länger die Übertragungszeit. Mit der Verarbeitungszeit wird die Dauer der Verarbeitung in Systemen festgelegt. Errechnet wird die Latenz aus zwei Zeitpunkten, der Start- und Ankunftszeit.

⁷⁷ Zwar gibt es laut AES67-Standard weitere akzeptierte Paketlängen, die jedoch andere Umstände benötigen. Wie etwa ein Einsatz unter AVB oder mit einer Interoperabilität von EBU Tech 3323, weiteres siehe Audio Engineering Society Inc., AES67-2018, S. 18 f.

⁷⁸ Wismüller, Rechnernetze I, S. 36.

Als Startpunkt und Grundlage dient der Zeitstempel im RTP-Paket, welcher bei der Paketgenerierung hinterlegt wird, der sogenannte »Ingress time reference point«. Sobald das Paket in der Senke entkapselt, also das RTP-Paket ausgelesen wurde, markiert dieser Zeitpunkt die Ankunftszeit beim Empfänger. Dieser Augenblick wird »Egress time reference point« genannt. Die Differenz aus beiden Zeiten bildet die Latenzzeit eines Paketes.

In Abb. 13 wird dieser Vorgang abgebildet.

Receivers shall have a buffer capacity at least 3 times the packet time. Receivers should have a buffer capacity at least 20 times the packet time or 20 ms whichever is smaller. Senders nominally send packets associated with a stream at packet time intervals. Sender should transmit at the nominal transmission time with a variation of 1 packet time or less. Senders shall transmit data at the nominal transmission time with a variation of no more than 17 packets time or 17 ms whichever is smaller.⁷⁹

Um Fehler und Jitter vorzubeugen, die durch eine zu kleine Latenzzeit entstehen können, gibt AES67 eine bestimmte Pufferungszeit jeweils für die Quelle und Senke vor. Mit der Pufferung ist es möglich, eine Reserve für eine bestimmte Zeit zu erzeugen, falls Pakete zu spät beim Empfänger eintreffen sollten.

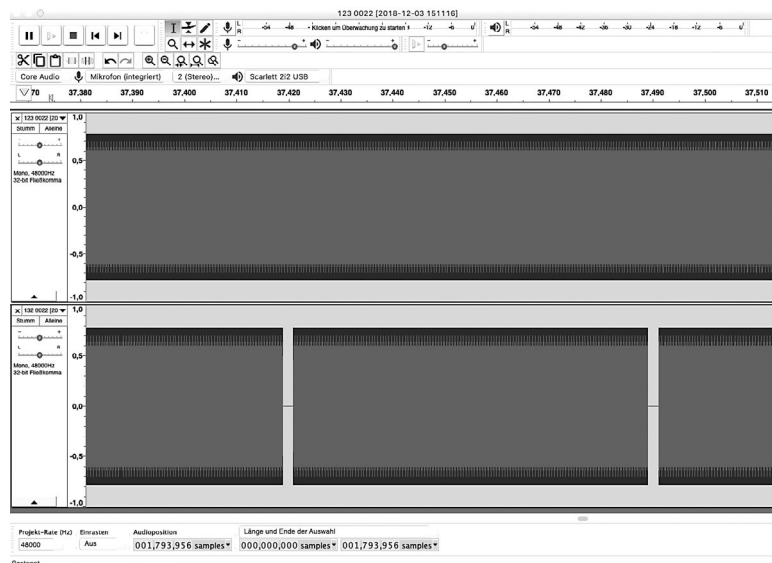


Abb. 14: Aufnahme einer fehlerfreien Audiospur (oben) und einer Audiospur mit Dropouts (unten)

Wenn die Pufferungszeit zu kurz ausfällt, kann es zu Dropouts, also Unterbrechungen, kommen (Abb. 14). Bei einem zu großen Puffer läuft die Übertragung zwar flüssig, jedoch mit einer großen Latenz, was im Echtzeitbereich nicht akzeptabel ist.⁸⁰ Diese Puffergrößen sind als Richtlinien zu verstehen und für jedes Netzwerk benutzerdefiniert anzuwenden.

⁷⁹ Audio Engineering Society Inc., AES67-2018, S. 20.

⁸⁰ vgl. Ebd., S. 20.

Zusammengefasst gelten für AES67 folgende Vorgaben:

- Synchronisierung des IP-Netzwerk und Audiodaten über PTPv2
- Netzwerk-Clock und Media-Clock
- Netzwerkgrundlage: IPv4 mit IGMP
- Transportebene mit UDP und RTP
- Paketgröße max. 1440 Bytes
- Samples pro Paket: 48
- Audiolänge pro Paket: 1 ms
- Encoding: 16/24 bit, 48 kHz, Kanäle: 1-8
- Priorisierung vom Takt und der Audiodaten über QoS DiffServ
- PTP (Clock): EF (DSCP 46)
- RTP (Media): AF41 (DSCP 34)
- Discovery über Bonjour mDNS
- Kanalbeschreibung über SDP

4 Untersuchung von virtuellen AES67-Soundkarten

Nachdem im Kapitel 2 alle technischen Grundlagen geschaffen worden sind und es im Kapitel 3 einen Einblick in den Bereichen Audio over IP und virtuellen Soundkarten gegeben hat, folgt in diesem Kapitel die Beschreibung der Zielsetzung der messtechnischen Untersuchung und eine Beschreibung der Vorgaben und Mindestanforderungen hinsichtlich der Dienstgüte von virtuellen Soundkarten. Es wird gezeigt, welche Parameter im Netzwerk für virtuelle Soundkarten eine erhöhte Latenz bereiten. Im Anschluss werden die benutzten Systemkomponenten der Messung erläutert.

4.1 Beurteilungsgrundlage der Untersuchung

In folgendem Kapitel wird die Bewertungsgrundlage der Untersuchung festgelegt. Als Ausgangspunkt der Betrachtung werden die Gesichtspunkte der Kommunikationsdienstgüte⁸¹ herangezogen. Diese sind:

- Technische Leistung
- Angemessenheit
- Kosten
- Zuverlässigkeit
- Schutz

Diese Arbeit fokussiert sich auf einen Gesichtspunkt und greift als Schwerpunkt die »technische Leistung« aus den Dienstgüteparametern heraus. Mit dem Aspekt »Technische Leistung« ist es möglich, erste Erkenntnisse in die Technologie zu erhalten und diese zu bewerten. Bewertungskriterien hierfür sind die Signallaufzeit sowie der Durchsatz zwischen den Systemen.

Durchsatz

Beim Durchsatz wird die Leistung des Netzwerkes gemessen. Es wird bewertet, ob Engpässe im Netzwerk auftreten, die die Übertragungsrate dämpfen und deswegen nicht die gesamte Bandbreite ausgenutzt werden kann.

⁸¹ vgl. Seitz, Kommunikationsnetze, S. 6.

Latenz

Bei der Signallaufzeit wird die Dauer eines Paketes gemessen. Diese setzt sich, wie schon unter Punkt 3.3 erwähnt, aus der Differenz zweier Zeitpunkte zusammen, die Start- und Ankunftszeit. Zusammen mit der Übertragungszeit und Transferzeit erhält man die Latenz.

Für die Bewertung der Latenz zwischen zwei Systemen wird das Netzwerk in drei Systeme aufgeteilt: der Sender, das Netzwerk sowie der Empfänger. In allen drei Punkten können Verzögerungen oder auch Paketverluste auftreten und müssen für die Echtzeitkommunikation hinsichtlich von AES67-Audiostreams untersucht werden.

In Tab. 6 werden die wichtigsten Parameter der drei Schwerpunkte dargelegt:

Systeme	Parameter
Sender	Codierung Paketierung Versendung
Netzwerk	Routing / Switching Versendung Übertragungsstrecken Transcodierung
Empfänger	Jitter Ausgleich Depaketierung Decodierung

Tab. 6: Übersicht der einzelnen Systemparameter wo Latenzen auftreten können⁸²

Codierung / Decodierung

Unter Codierung versteht man die Wandlung des Audiosignals in das erforderliche Format. Bei AES67 kommt das Protokoll RTP zum Einsatz. Falls Analog-Digital-Umsetzer als Quelle eingesetzt werden, wird die erforderliche Verzögerung, die benötigt wird, um das Signal digital zu wandeln, diesem Parameter zugerechnet. Bei der Decodierung auf Empfängerseite gilt diese Zeitverzögerung vice versa.

In dieser Arbeit wird angenommen, dass bei der Verarbeitung und Codierung von Signalen innerhalb des Computers keine Verzögerungen auftreten werden, weil Computerprozessoren heutzutage ausreichend schnell arbeiten und die daraus entstehenden sehr geringen Latenzen im nanosekunden Bereich keine Berücksichtigung finden würden.

⁸² vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 40.

Paketierung / Depaketierung

Bei der Paketierung auf Seite des Senders sowie Depaketierung auf Empfängerseite ist mit Verzögerungen zu rechnen. Um Daten zwischen zwei Systemen austauschen zu können, müssen diese in IP-Pakete verpackt, abschnittsweise übertragen und wieder in der Senke entpackt und zusammengelegt werden. Wie in den vorherigen Kapiteln schon erläutert, wird bei der Paketierung immer eine vorgegebene Zeit gewartet, bis genügend Sprachabstastwerte zur Bildung eines kompletten IP-Datagramms vorliegen.⁸³

Ein AES67-Datenpaket mit einem Audiokanal, 48 kHz Abtastrate, 24 Bit Samplingtiefe und 48 Samples Audiolänge benötigt vor dem Versenden eine Verzögerung (Buffersize) von 1 ms. Denn erst wenn die 48 Samples vollständig im Payload des RTP-Protokolls vorhanden sind, werden die Samples als Paket verpackt und zusammen mit den UDP- und IP-Headern abgeschickt. So tritt eine Verzögerung auf.

$$t = \frac{48 \text{ samples}}{48 \text{ kHz}} = 0,001 \text{ s} \hat{=} 1 \text{ ms}$$

Bei der Verpackung von 48 Samples besitzt das Datenpaket einen Payload von 144 Bytes:

$$p = 24 \text{ Bit} \cdot 48 \text{ kHz} \cdot \frac{48 \text{ Samples}}{48 \text{ kHz}} = 1152 \text{ Bit} \hat{=} 144 \text{ Bytes}$$

Mit den Verschachtelungen der einzelnen Protokolle hat das Datenpaket eine Bruttobitrate von 198 Byte. Diese Bruttobitrate setzt sich aus dem Payload, den Headern von RTP, UDP und IP sowie den Rahmen aus Layer 2 zusammen: 144 Bytes Payload + 12 Byte RTP Header + 8 Byte UDP Header + 20 Byte IP-Header + 14 Byte Rahmen = 198 Bytes.

Versendung

$$t_{100 \text{ MBit/s}} = \frac{1206 \text{ Byte} \cdot 8}{100 \text{ MBit/s} \cdot 1024^2} = 92 \mu\text{s} \quad t_{1 \text{ GBit/s}} = \frac{1206 \text{ Byte} \cdot 8}{1 \text{ GBit/s} \cdot 1024^3} = 9 \mu\text{s}$$

Nachdem das IP-Paket mit Payload und Headern vollständig ist, wird es über die Schnittstelle versendet. Dieser Vorgang benötigt, je nachdem welche Bitrate und welches Übertragungsverfahren bei der Schnittstelle gewählt wurde, eine gewisse Zeit. Beim oben genannten Beispiel dauert die Übertragung des 1206 Byte großen Paketes über eine 100 Mbit/s Schnittstelle rund 92 μs und bei 1 Gbit/s etwa 9,0 μs .

⁸³ vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 43 f.

Jitter Ausgleich

Auf der Gegenseite wird das Buffer-size-Verfahren ebenfalls angewendet, weil der Empfänger ein konstantes Audiosignal empfangen soll und sich die ankommenden Pakete nicht isochron verhalten. Um dies zu ermöglichen, muss die Senke eine gewisse Zeit warten, um Verzögerungsschwankungen innerhalb des Netzwerkes oder an der Netzwerkschnittstelle auszugleichen. So können verzögerte Pakete noch innerhalb der Buffer-size verarbeitet werden und ein stabiles Audiosignal nicht gefährden. Dieses Verfahren wird Jitter-Ausgleich genannt und in der Praxis oft angewendet.⁸⁴

Routing / Switching

Beim Routing und Switching kann es ebenfalls zu einer Verzögerung und Paketausfall kommen. Router und Switche müssen Pakete bzw. Rahmen auslesen und verarbeiten. Diese Informationsverarbeitung kann zu einer Überlast oder einer Verzögerung an den Geräten führen. Falls mehr Datenverkehr anliegt als verarbeitet werden kann, zieht dies innerhalb des Netzwerkes Paketverluste nach sich. Wie andere Systeme im Netzwerk auch, besitzen Router einen Pufferspeicher. Bei Überlastung des Pufferspeichers gehen Pakete verloren, man nennt dies »Dropping«.

Übertragungsstrecken

Minimale Verzögerungen können im Router auftreten, wenn alle Pakete nach bestimmten Dienstgüteparametern, wie in Kapitel 2.5 erläutert, durchsucht werden müssen. Auch die Wegfindung, für die der Router zuständig ist, kann zu einer Verzögerung führen. Diese werden aber aufgrund der sehr geringen Zeiten in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Ebenso werden die Verzögerungen bei Übertragungsstrecken nicht einkalkuliert. Dies wäre nur notwendig, wenn die Pakete eine Strecke von über 1 000 km zurücklegen müssten.⁸⁵ Bei dieser Arbeit und Messung jedoch wird eine maximale Übertragungsstrecke von 10 Metern nicht überschritten.

Transcodierung

Die Transcodierung ist notwendig, wenn zwischen Quelle und Senke andere Codecs verwendet werden. Hier wird, um zwischen den Systemen kommunizieren zu können, das Signal decodiert und dann erneut codiert. Dies trifft bei AES67-Audionetzwerken nicht zu, da der Codec vom Standard festgelegt wird.

84 vgl. Trick / Weber, SIP und Telekommunikationsnetze, S. 47.

85 vgl. Ebd., S. 46.

4.2 Zielsetzung der Untersuchung

Mit folgenden Zielen wird es möglich sein, Aufschlüsse über die AES67-Audiostreams zu geben und eine Evaluierung zu realisieren.

- Ziel 1: Der Aufbau und die Inbetriebnahme eines heterogenen Netzwerks
- Ziel 2: Eine Übertragung eines AES67-Streams anhand von virtuellen Soundkarten
- Ziel 3: Eine Überprüfung der virtuellen Soundkarten.

Hierbei liegt der Fokus auf der richtigen Anwendung der Protokolle. Es wird untersucht, welche Latenzen die Audiostreams aufweisen und wie hoch der Durchsatz im Netzwerk ist.

4.3 Wahl der Systemkomponenten

Um die gesetzten Ziele erreichen zu können, muss eine Auswahl an Systemkomponenten getroffen werden. Die meisten Geräte werden seitens der Hochschule gestellt, wie Rechner, Switche, ein Signalgenerator sowie Oszilloskop. Spezielle AES67-fähige Geräte und Software, ein PTP-Grandmaster, ein AES67-Analog/Digital-Umsetzer und zwei verschiedene virtuelle AES67-Soundkarten müssen jedoch als Leihgaben direkt von den Herstellern bezogen werden. Glücklicherweise stellen die Hersteller für einige Wochen die Geräte und Anwendersoftware zur Verfügung, so dass der Aufbau und Messung ohne Probleme realisiert werden kann.

Als Netzwerkknoten werden zwei NETGEAR M4300-8X8F eingesetzt. Einer als Router, der andere als Switch. Diese Geräte unterstützen Layer-3-Dienste, wie verschiedene Dienstgüteparameter und bestimmte Wegefindungen, und können sowohl über Kupfer mit 1 Gigabit als auch über Glasfaser mit bis zu einer Übertragung 10 Gigabit angeschlossen werden. Der M4300-8X8F bietet neben einer Konsolenschnittstelle 8 Fiber- und 8 Kupferports. Besonders in kleinen und mittleren Netzwerken ist es wichtig, jedem Port dieselbe Geschwindigkeit zu garantieren.

Dies wird mit der Non-Blocking-Architektur erreicht, was das NETGEAR Gerät ebenfalls unterstützt. Das Gerät ist in der Lage, alle Ports mit der vollen Geschwindigkeit zu versorgen. Ist dies nicht gegeben, müssen sich alle Ports eine unterstützte Geschwindigkeit teilen. Auf den Einsatz eines PTP-fähigen Routers bzw. Switches wird verzichtet, da solche Geräte in einer heterogenen Umgebung, wie in Unternehmen, nicht anzutreffen sind.

Beim IEEE 1588 PTP-Grandmaster wird sich für den MEINBERG LANTIME M600 entschieden. Die Firma MEINBERG bietet ein breites Produktsortiment für Zeit- und Frequenzsynchronisationen und ist neben den Firmen TEKTRONIX, EVERTZ und TRILOGY einer

der Hauptanbieter für PTP- und NTP-Geräte. Der M600 im 1HE Serverschrankgehäuse bietet neben zwei Konsolenschnittstellen, einer GPS-Antennenschnittstelle, vier BNC Synchronisationsschnittstellen auch zwei PTP-Schnittstellen sowie 4 Ethernet-Schnittstellen.

Für die Signalgenerierung wird der AFG310 der Firma TEKTRONIX ausgewählt. Dieses Gerät bietet neben den gängigen Signalen wie Sinus, Rechteck und Sägezahn auch die Möglichkeit eines Burst-Signals. Ein Burst ist ein Sinus oder Rechteck mit einer bestimmten Anzahl von Schwingungen, also einer vorher festgelegten Signaldauer. So ist es möglich, kleinste Latenzen anhand der ersten Flanke des Burstsignals mit einem Oszilloskop zu messen.

Zur Signalmessung kommt das Oszilloskop TDS 3012C von der Firma TEKTRONIX zum Einsatz. Das TSD 3012C ist ein handelsübliches 2-Kanal Digitalspeicher-Oszilloskop mit zwei BNC-Eingängen um unterschiedliche Signale zu analysieren. Außerdem besitzt es eine Printfunktion, um die Messungen auf einem USB-Stick abzuspeichern. Zur Netzwerkanalyse wird die freie Software Wireshark eingesetzt.

Als Trafficerzeugung und zur Simulation von normalem Datenverkehr werden zwei einfache Linux-Rechner mit Linux openSUSE Leap 15.0 als Betriebssystem benutzt. Um Traffic zu generieren kommt die freie Software »iperf« zum Einsatz.

Für die virtuellen Soundkarten werden zwei Hochleistungsrechner mit 32 GB Arbeitsspeicher und einem Intel Core i7 3,70 GHz Prozessor, sowie ein normaler Rechner mit 3 GB Arbeitsspeicher und einem AMD Athlon 54 X2 6000+ Prozessor mit Windows 10, zum Einsatz kommen. Mit den Rechnern werden alle Mindestanforderungen der virtuellen Soundkarten erfüllt.

In einer DAW (Digital Audio Workstation) werden Audiosignale am Rechner empfangen, versendet und können ggf. bearbeitet werden. Als DAW wird sich für die Software »Ableton Live« entschieden. Andere DAWs wie Steinbergs Cubase und PreSonus StudioOne weisen bei der Messung kleinere Werte auf, so dass hier in den Standardeinstellungen eine Latenzkompensation seitens der Software gegeben war. Diese Kompensation ist für die Messung nicht geeignet.

Tab. 7 zeigt die verwendeten Rechner mit ihrer Systemkonfiguration.

Typ	PC 220	PC 190	PC 254	PC 203	PC 107
OS	Windows 10 Pro	Windows 10 Pro	Windows 10 Pro	Linux openSUSE Leap 15.0	Linux openSUSE Leap 15.0
Prozessor	Intel Core i7-8700K COU 3,70 GHz	Intel Core i7-8700K COU 3,70 GHz	AMD Athlon 64 X2 6000+ 1 GHz	AMD Athlon 64 X2 6000+ 1 GHz	AMD Athlon 64 X2 6000+ 1 GHz
RAM	32 GB	32 GB	3 GB	3 GB	3 GB
Systemtyp	64 Bit	64 Bit	64 Bit	64 Bit	64 Bit
IP Adresse	192.168.200.20	192.168.100.90	192.168.200.54	192.168.200.3	192.168.100.7
MAC	00-13-3B-12-50-63	00-13-3B-0F-C7-C4	6C-F0-49-D0-D0-E6	6C-F0-49-13-48-F3	6C-F0-49-D0-CC-A7
ETH:	DeLOCK 89358 PCIe	DeLOCK 89358 PCIe	Realtek RTL84111	Realtek RTL84111	D-LINK DGE-528T

Tab. 7: Übersicht der verwendeten Systeme mit ihrer Konfiguration

Aus der Vielzahl der Hersteller für virtuelle Soundkarten wird sich bei der Abschlussarbeit auf zwei virtuelle Soundkarten konzentriert. R3LAY VPB von Firma LAWO sowie VAD von Firma MERGING.

R3LAY ist ein kostenpflichtiges Soundkarten-Package für Windows Betriebssysteme. Darin enthalten ist eine reine virtuelle Soundkarte R3LAY VSC (Virtual Soundcard) sowie R3LAY VPB (Virtual Patchbay). R3LAY VPB ermöglicht es, über eine virtuelles Patchbay die Verbindungen zu managen. Das Package unterstützt sowohl WDM als auch ASIO als Audiotreiber. Der Fokus von R3LAY liegt auf dem Broadcastbereich. Es können maximal 64 Kanäle bidirektional verarbeitet werden. Mit der Benutzeroberfläche ist es möglich, jeden Audioplayer über WDM und DAWs über ASIO mit AES67 zu versorgen. Die Synchronität wird über PTP ermöglicht.

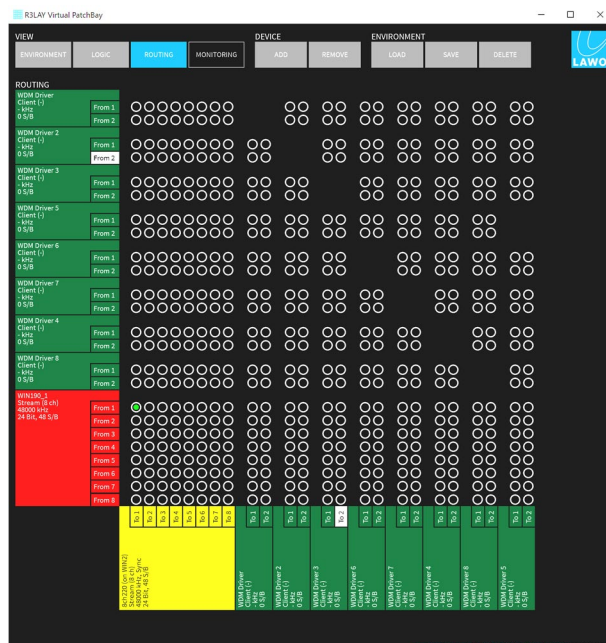


Abb. 15: Oberfläche der Virtual PatchBay mit ASIO- und WDM-Patchfeldern von R3LAY

Für die Messung und Evaluation des LAWO Produktes kommt die Software »Virtual PatchBay« zum Einsatz (Abb. 15). Hierbei ist es möglich, das AES67-Signal wieder direkt als AES67 Stream ohne Einsatz zusätzlicher Software zurückzuschicken. Da es ohne Zusatz nicht möglich ist zu erfahren, ob die Streams den gewünschten Audiopegel übertragen, bietet die R3LAY Virtual PatchBay ein zusätzliches Pegelmonitoring an. In der Programmkonfiguration kann, neben dem Netzwerkadapter, die Abtastrate, die Kanalzahl sowie die ASIO-Buffergröße für DAWs justiert werden. Zusätzlich kann über »Thread Priority«, also Wichtigkeit des Audio-Processings, eine weitere Bufferung vorgenommen werden.

Die zweite Software »Virtual Audio Device« stammt von Firma MERGING. Sie ist für Windows und macOS konzipiert und kann bei einer Abtastrate von 48 kHz bis zu 128 Kanäle bidirektional verarbeiten (Abb. 16). Um die AES67- Software auf Windows über ASIO nutzen zu können, muss zwingend auch das HAPI oder HORUS Interface der Firma MERGING eingesetzt werden.⁸⁶

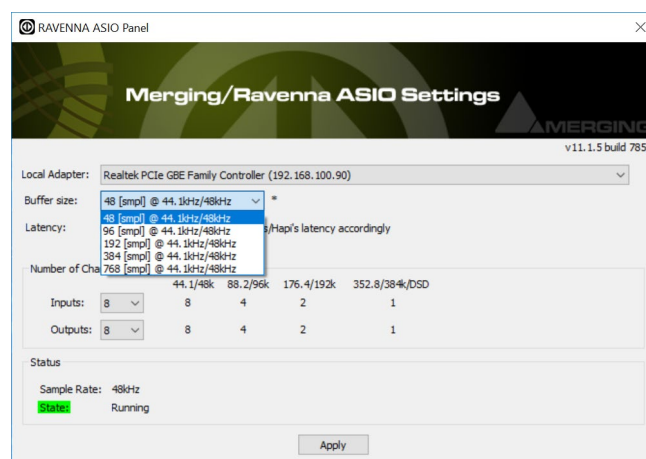


Abb. 16: ASIO-Panel der virtuellen Soundkarte von MERGING

Bei den Windows-Systemen sendet das HAPI- oder HORUS-Interface eine ASIO Clock und synchronisiert die virtuellen Soundkarten ohne PTP auf Seite des Hosts. Die Geräte agieren im Slave-Modus vom PTP-Grandmaster und geben die PTP-Informationen wiederrum als Master an die MERGING Soundkarten weiter. Bei macOS ist dies nicht erforderlich, da hier die Synchronität direkt über PTP sichergestellt wird.

In der Anwendungsoberfläche bietet die Soundkarte verschiedene Einstellungsfenster. Die grundlegenden Einstellungen, welche Netzwerkkarte benutzt werden soll und wieviel Channels der Soundkarte zur Verfügung stehen sollen, werden im »Ravenna Asio Panel« vorgenommen.

⁸⁶ vgl. <https://confluence.merging.com/display/PUBLICDOC/RAVENNA+ASIO+Troubleshooting#RAVENNAASIO+Troubleshooting-Theaudioinputsandoutputsaredistorted>.

Dort kann außerdem aus 5 verschiedenen Buffergrößen für den ASIO Treiber ausgewählt werden. Die Vorgehensweise der ASIO Buffer wurde bereits im Kapitel 3.2 beleuchtet. Die Buffergrößen richten sich nach der voreingestellten Latenz des Analog-Digital-Umsetzers HAPI und werden auf der Basis 2 mit den Potenzen 0 bis 4 multipliziert.

Die Konfiguration rund um das Senden und Empfangen von Channels kann entweder über eine Browseroberfläche oder über ein weiteres Add-On (RavennaEasyConnect) realisiert werden (Abb. 17).

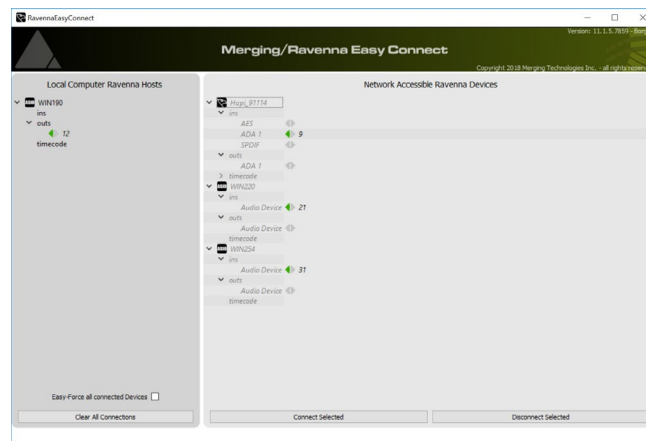


Abb. 17: Oberfläche von RavennaEasyConnect von MERGING

Verfügbare Streams können über das Zusatzprogramm »RavennaEasyConnect« mit einem Klick in die Soundkarte übernommen werden. Es können auch eigene Streams an Geräte geroutet werden ohne jegliche Einstellungen vornehmen zu müssen. Für speziellere AES67-Konfigurationen bietet die Browser-Variante mehr Möglichkeiten. Darin können Quellen und Senken von Streams automatisch über Drop-Down-Menüs oder manuell über SDP-Dateien ausgewählt werden. Im Quellen-Reiter kann die Multicast-Adresse sowie die genaue Anzahl der Channels vergeben werden. Zusätzlich kann der Payload-Type, der Codec und der Dienstgüte-Parameter des RTP-Paketes angepasst werden. Im Senken-Reiter kann die Streaming-Information der Quelle manuell als SDP-Aufbau eingepflegt werden.

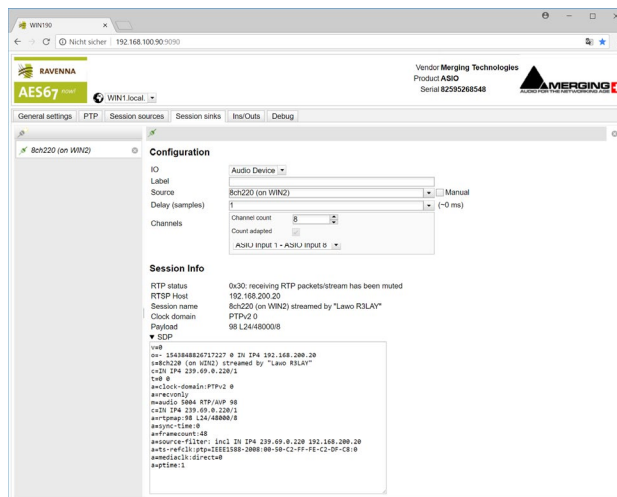


Abb. 18: Browser-Oberfläche der AES67-Soundkarte

Jedes MERGING-Gerät und Software welches AES67 unterstützt, bietet diese Routing-Browser-Oberfläche und hat immer den gleichen Aufbau (Abb. 18).

4.4 Konfiguration des Systems

Die Evaluation der virtuellen Soundkarten mit AES67 findet bei der Prüfung des Durchsatzes in heterogenen Netzwerken statt. Diese Netzwerke besitzen meist mehrere Subnetze und VLANs und weisen hinsichtlich ihrer Struktur Transparenz auf. So lassen sich neue Geräte und Technologien in das Netzwerk implementieren, ohne sich auf bestimmte Hersteller oder einer Topologie festzulegen. Deshalb wurde das System mit zwei VLANs und Subnetzen konfiguriert.

Mittelpunkt des Netzwerkaufbaus bilden die beiden Netzwerkknoten. Ein Knoten agiert als Router, dort laufen alle Netzwerkverbindungen zusammen, der zweite als Switch. Die Konfiguration des Systems wird anhand einer Sterntopologie erstellt, um eine einfache Netzwerkstruktur widerzuspiegeln. Auf eine Leaf-Spin-Architektur oder auf eine redundanten Netzwerkarchitektur wird verzichtet, da diese in kleinen bis mittelgroßen Netzwerken nicht angewendet werden.

Jeder Knoten besitzt ein eigenes VLAN und Subnetz (VLAN 100 und VLAN 200). Damit ist es im Router möglich, dass gewisse Ports mit anderen kommunizieren können oder diese Kommunikation zu untersagen.

Beide NETGEAR Geräte sind mit zwei verschiedenen Bandbreiten (100 Mbit, 10 Gbit) miteinander verbunden, wobei nur jeweils eine Leitung aktiv ist. So ist es für die Messung möglich, die gewählte Bandbreite auszuwählen und die andere zu deaktivieren. Da beide Netgear M4300 über eine Minicom-Schnittstelle ansprechbar sind, wurde die Konfiguration über das Terminal

unter Linux vorgenommen. Die gesamte Router-Konfiguration ist am Anhang zu finden (Abb. 36). Beide VLANs besitzen PCs mit virtuellen Soundkarten sowie Linux-Rechner für die TCP-Paketgenerierung. Das VLAN200 beinhaltet 1 Linux-Rechner sowie 3 virtuelle Soundkarten, das VLAN100 dagegen besitzt beides nur einmal.

Im VLAN100 ist der Analog-Digital-Umsetzer und das AES67-fähige MERGING HAPI Interface integriert, auf der Gegenseite im VLAN200 der PTP-Grandmaster LANTIME M600 von Meinberg.

Die IP-Adressvergabe wird manuell und ohne weitere Gründe getätigt. Alle Netzwerkgeräte mit Funktion sind in Tab. 8 aufgelistet. In den folgenden Kapiteln werden für die Soundkarten und Fremddtraffic-Rechner einheitliche Bezeichnungen benutzt, um die Geräte einheitlich zu definieren.

Gerät	Bezeichnung	VLAN	IP-Adresse	Funktion
Netgear M4300 I		100	192.168.100.1	Switch für das VLAN 100
PC 1 Windows	PC190	100	192.168.100.90	Host mit virtueller AES67 Soundkarte
PC 5 Linux	PC107	100	192.168.100.7	System für TCP-Paketgenerierung
HAPI A/D-D/A		100	192.168.100.50	Digital-Analog Umsetzer und AES67 fähiges Gerät
Netgear M4300 II		100	192.168.100.254	Zugang zum Router für das VLAN 100
Netgear M4300 II		200	192.168.200.1	Router und Switch für das VLAN 200
PC 2 Windows	PC220	200	192.168.200.20	Host mit virtueller AES67 Soundkarte
PC 3 Windows	PC254	200	192.168.200.54	Host mit virtueller AES67 Soundkarte
PC 4 Linux	PC203	200	192.168.200.3	System für TCP-Paketgenerierung
Laptop Linux		200	192.168.200.4	System für Terminal-Konfigurationen
Meinberg M600		200	192.168.200.200	PTP-Grandmaster (PTP-GM) für das Netzwerk
Meinberg M600		200	192.168.200.8	Konfigurationsschnittstelle für den PTP-GM

Tab. 8: Übersicht über die verwendeten Systeme mit VLAN Kennung, IP-Adresse und Funktion

Damit das Netzwerk für die AES67-Multicast-Ströme vorbereitet und es nicht mit UDP-Traffic überlastet wird, sobald AES67-Streames im Netzwerk anliegen, werden in beiden Netzwerkknoten neben das Anfrage-Antwort-Protokoll IGMP (siehe Kapitel 2.2) auch die vorgeschriebenen differenzierten Dienste für AES67-Dienstgüteparametern eingerichtet (Abb. 37).

Die verwendete Multicast-Adresse des jeweiligen Hosts wird anhand ihrer eigenen IP-Adresse übernommen. So ist es möglich, schnell die jeweilige IGMP-Multicastgruppe ihrer Quelle zuzuweisen. Damit hat der Rechner PC2 Windows mit der IP-Adresse 192.168.200.20 die Multicast-Adresse 239.2.200.20.

Neben der tabellarischen Übersicht (Tab. 8), ist im Anhang der schematische Aufbau der Netzwerkgeräte zu finden (Abb. 35).

In dieser Arbeit werden folgende AES67-Werte in den virtuellen Soundkarten festgelegt:

- Bittiefe: 24 Bit
- Abtastrate: 48 kHz
- Paketzeit: 1 Millisekunde
- Maximale Kanäle: 8 Kanäle
- Pufferung: 48 Samples

5 Messtechnische Untersuchung

In diesem Kapitel folgt zuerst ein Einblick in den Messaufbau, gefolgt von der messtechnischen Überprüfung der Soundkarten. Eine Bewertung der Messergebnisse erfolgt im Kapitel 6.

5.1 Messaufbau

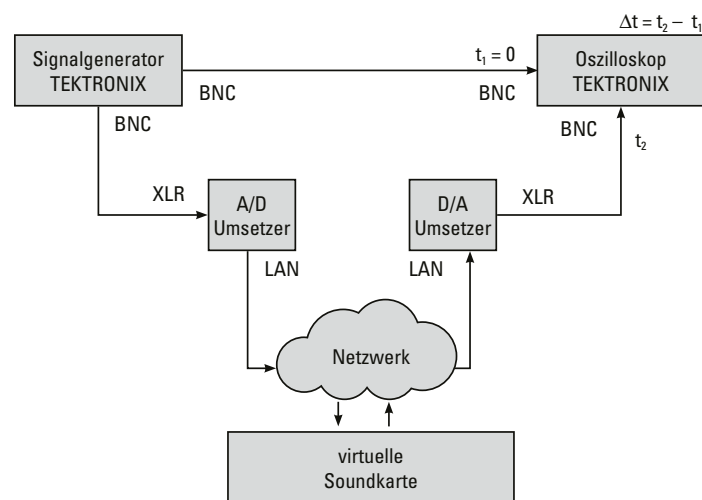


Abb. 19: Messaufbau zur Messung der Latenz mit einem AES67-Interface

Es gibt zwei Methoden für die Messung der Signallaufzeit. Eine Methode mit einem Signalgenerator, die andere zwischen zwei DAWs. Es wurde, wie bereits erwähnt, ein Signalgenerator und ein Oszilloskop eingesetzt. Das ausgehende analoge Burstsinal vom Signalgenerator wird am Generator gesplittet, jeweils zum Oszilloskop, und zum Analog-Digital-Umsetzer (Abb. 19). Aufgrund der Verwendung einer 50-Ohm-Koaxialverbindung mit BNC-Steckverbindung und einer Signalgeschwindigkeit nahe Lichtgeschwindigkeit vom Generator zum Oszilloskop wird angenommen, dass auf dieser Strecke keine Zeitverzögerung vorliegt.



Abb. 20: Messaufbau zur Messung der Latenz zwischen zwei virtuellen Soundkarten

Das zweite, gesplittete Signal führte zur digitalen Netzwerkverbreitung in den Analog-Digital-Umsetzer. Dieses wird dann wieder digital-analog umgesetzt und zum Oszilloskop geführt. Diese Art der Messung durch einen Burst und Analyse durch ein Oszilloskop ermöglichte eine genaue Messung einzelner Komponenten, indem man aus den Signalen ein Delta bzw. die Differenz beider Signale erhält.

Die andere Messmethode verlief rein digital in einer Digital-Audio-Workstation (DAW). Eine DAW ist eine PC-Software für Tonaufnahmen und Musikproduktion. In dieser Software wurde ein Testsignal generiert und an andere Soundkarten geschickt und wieder zurückempfungen (Abb. 20). Diese Differenz wurde ebenfalls gemessen.

5.2 Messtechnische Überprüfung

Das messtechnische Vorgehen wird pro Soundkarte vonstattengehen. Untersucht wird neben der Signallaufzeit auch die Vollständigkeit der Pakete, die die virtuelle Soundkarte ins Netzwerk schickt. Ferner wird für die MERGING Soundkarte der Durchsatz untersucht. Es wird Fremdtraffic ins Netzwerk eingestreut und der Audiostream hinsichtlich Fehlern und Dropouts analysiert.

5.2.1 Hardware-Messung

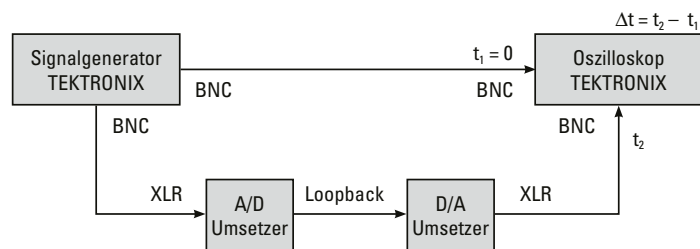


Abb. 21: Messaufbau zur Messung der Latenz des A/D-Umsetzers

Um aussagekräftige Messwerte der Soundkarten zu bekommen und Messfehler so gering wie möglich zu halten, wird zu Beginn die reine Latenz des Analog-Digital-Umsetzers gemessen. So lässt sich die Latenzzeit, die der Umsetzer für Wandlung und Paketierung benötigt, aus der späteren Soundkarten-Messung abziehen. Die Messung am Oszilloskop ergab eine Latenz von 0,544 ms (Abb. 22).

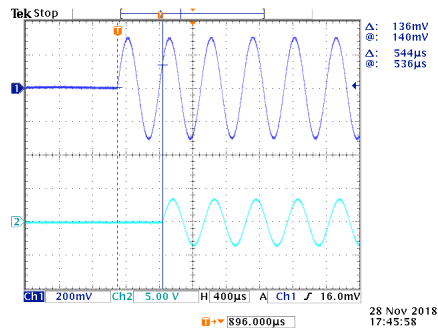


Abb. 22: Ergebnis der Burst-Messung der Umsetzzeit des HAPI-Interfaces vom Oszilloskop

Dieser Wert wird in den späteren Messtabellen der einzelnen Soundkarten herausgerechnet, um den reinen Zeitverlust durch Paketweiterleitung und Routing in IPv4-Netzwerken zu erhalten (network forwarding time).

5.2.2 LAW0 R3LAY Soundkarte

Paketüberprüfung

Zu Beginn der Messung wird das Verhalten der virtuellen Soundkarte überprüft. Eine wichtige Bedeutung hat hier eine dauerhafte Synchronität mit einem PTP-Master. Da keine weitere Boundary-Clock im Netzwerk vorhanden ist, agiert der PTP-Grandmaster gleichzeitig auch als PTP-Master. Dieser sollte von der Software automatisch erkannt und in Zeitintervallen abgeglichen werden. Ferner muss bei der Stream-Ankündigung im SDP-Protokoll der PTP-Master in den Attributen auftauchen, um der Senke mitzuteilen, welcher PTP-Master als Clock verwendet wird. Sowohl in den Einstellungen der R3LAY-Software als auch bei der SDP-Datei wird der PTP-Master festgestellt. (Siehe Abb. 23 und Abb. 24 (b))

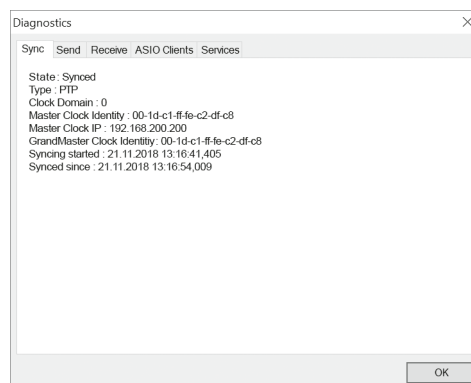


Abb. 23: PTP-Diagnose der R3LAY-Software

Für die Überprüfung der Vollständigkeit der Pakete wird ein zweikanaliger Stream unter Verwendung der oben genannten AES67-Werten erzeugt. Der daraus entstehende Payload muss laut mathematischer Herleitung 288 Bytes betragen.

$$p = 2 \text{ Kanäle} \cdot 24 \text{ Bit} \cdot 48 \text{ kHz} \cdot \frac{48 \text{ Samples}}{48 \text{ kHz}} = 2304 \text{ Bit} \cong 288 \text{ Byte}$$

Dieser Wert wird von Wireshark bestätigt. Ebenfalls werden alle vorgenommenen AES67-Parameter im SDP-Protokoll aufgeführt. Auch eine IGMP-Anmeldung wird seitens der Soundkarte durchgeführt (Abb. 24).

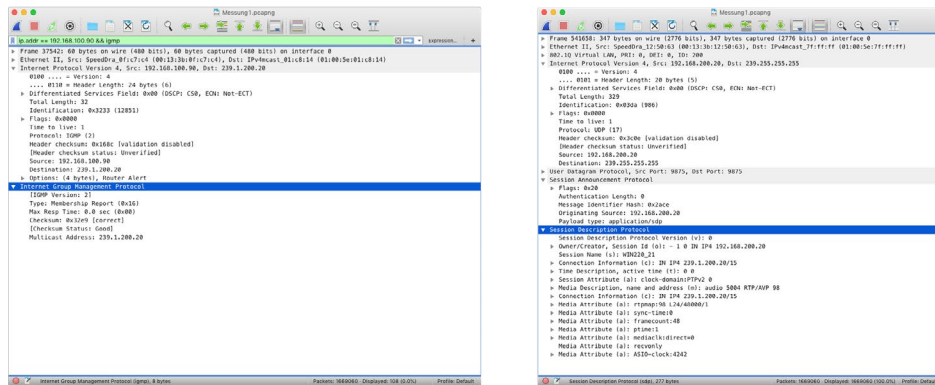


Abb. 24: (a) Analyse der IGMP-Daten. (b) Auffistung der SDP-Daten durch Wireshark von MERGING

Latenzmessung

Für die Messung der Latenz werden alle sieben Einstellungsmöglichkeiten hinsichtlich der Pufferung überprüft. In der Software »Virtual PatchBay« unter der Rubrik »Audio Processing« gibt es hierfür folgende Möglichkeiten: Time Critical, Highest, Above normal, Normal, Below normal, Lowest und Idle. Da die Software rein Windows basiert ist, wird die Messung auf den Rechnern PC190, PC220 und PC254 durchgeführt. Alle Werte eines Parameters je Rechner wurden aus vier Messungen gemittelt. Die vollständigen Messwerte sind im Anhang hinterlegt (Tab. 15). Folgende Werte wurden bei den drei Rechnern eruiert:

System	Time Critical [ms]	Highest [ms]	Above normal [ms]	Normal [ms]	Below normal [ms]	Lowest [ms]	Idle [ms]
190	32,6	34,4	33,7	34,0	36,1	35,9	35,9
220	34,7	34,5	36,7	38,0	37,1	35,9	38,4
254	35,1	36,2	36,6	36,9	37,2	36,6	37,0
Mittelwert	34,1	35,0	35,7	36,3	36,8	36,1	37,1
Standardabweichung	1,08	0,80	1,39	1,69	0,47	0,32	1,04

Tab. 9: Gemessene Latenz zwischen dem Signalgenerator und der R3LAY VPB

Nachdem die Messung keine konstanten Werte ergeben hat, wird auf die Messung des Durchsatzes verzichtet. Eine wissenschaftliche Analyse ist durch die großen Schwankungen der einzelnen Bufferzahlen nicht möglich. In Kapitel wird 6 näher auf die Problematik eingegangen.

5.2.3 MERGING VAD Soundkarte

Paketüberprüfung

Wie bei der Soundkarte von LAWO, wird zuerst die PTP-Synchronität überprüft. Da die windowsbasierten virtuellen Soundkarten von MERGING keine PTP-Pakete verarbeiten können, muss weitere Hardware im Netzwerk implementiert werden, die PTP-Pakete für die Soundkarten empfangen können. Dies ist mit dem Interface HAPI von MERGING gegeben. In den Einstellungen des Interfaces ist sichtbar, dass das Gerät den PTP-Master akzeptiert und PTP-Pakete empfängt (Abb. 25).

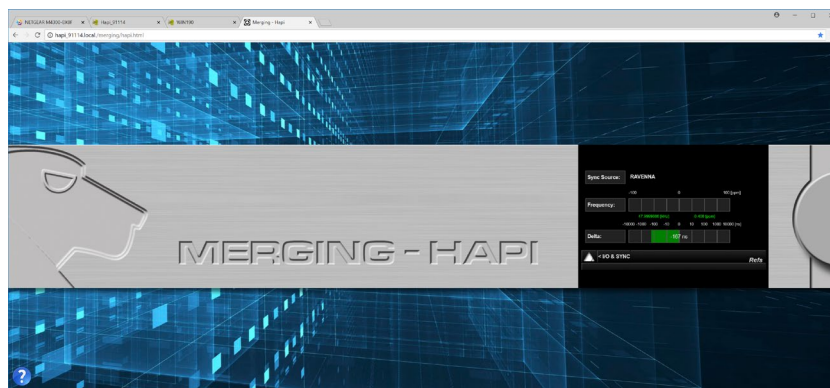


Abb. 25: PTP-Status des Interface HAPI von MERGING

Die AES67 Soundkarte von MERGING wird in den drei Rechnern PC190, PC220 und PC254 implementiert. Wie bei der LAWO virtuellen Soundkarte werden vor der Messung die ausgegebenen Pakete der MERGING Soundkarte überprüft. Zur Payload-Überprüfung wird ein einkanaliger Stream mit den bereits bekannten AES67-Werten erstellt. Die Größe des Payloads muss mit den Daten 144 Bytes betragen, dies wird von Wireshark nachgewiesen (Abb. 26).

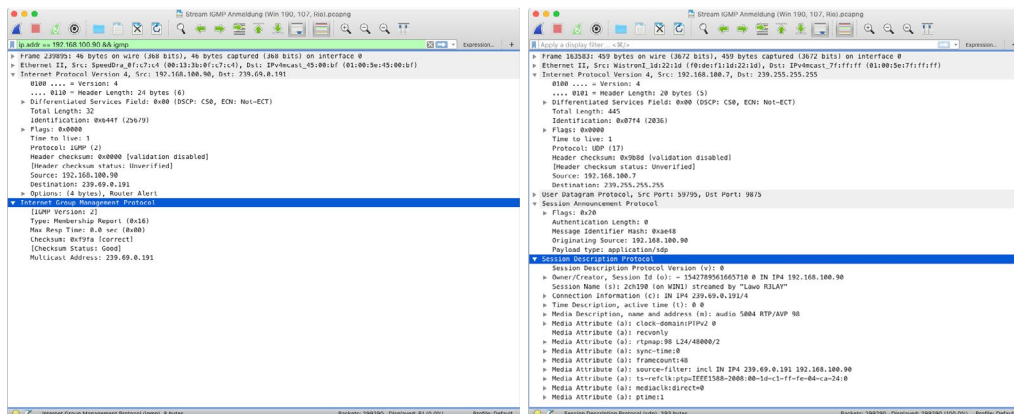


Abb. 26: (a) Analyse der IGMP-Daten. (b) Auflistung der SDP-Daten durch Wireshark von LAWO R3LAY

Latenzmessung

Der eben genannte einkanalige Stream wird auch für die Messung herangezogen. In der Soundkarte ist es möglich, einzelne Buffergrößen für ASIO auszuwählen, die einzeln anhand ihrer Latenzgröße untersucht werden können (Abb. 16). Bei der Auswahl der Größen wird bei der Durchschleifung des Signals in der DAW die Samplegröße der Eingangs- und Ausgangsbuffer von ASIO vorgegeben.

Folgende Latenzzeiten wurden in der DAW bei der Verwendung von ASIO angezeigt:

Buffer	Eingangslatenz	Ausgangslatenz
48	2	3
96	4	4,67
192	8	8
384	16	16
768	32	32

Tab. 10: Angezeigte ASIO-Latenzen in der DAW Ableton Live 10

Die Messung der Soundkarten ergab folgende Latenzen:

System	Puffer-Einstellungen				
	48 [ms]	96 [ms]	192 [ms]	384 [ms]	768 [ms]
190	5,75	9,45	16,7	32,85	64,85
220	5,65	9,3	16,66	32,66	64,66
254	5,86	9,46	16,76	32,86	64,76
Mittelwert	5,75	9,40	16,71	32,79	64,76
Standardabweichung	0,09	0,07	0,04	0,09	0,08

Tab. 11: Gemessene Latenz zwischen dem Signalgenerator und der LAWO VAD

Nachdem beide Soundkarten einzeln untersucht wurden, wird die LAWO und MERGING Soundkarte jeweils einen Stream des anderen Herstellers empfangen. Es wird geprüft, ob die geforderte Interoperabilität durch AES67 sichergestellt wird und welche Latenzzeiten zwischen den Herstellern liegen. Folgende Latenz hat die Messung ergeben:

Signalverlauf	MERGING-> LAWO	LAWO -> MERGING
Latenz	36 ms	37 ms

Tab. 12: Gemessene Latenz zwischen den virtuellen Soundkarten von MERGING und LAWO

Ermittlung des Durchsatzes

Bei der Messung des Durchsatzes im heterogenen Netzwerk wird sich entschieden, die Soundkarten der Firma MERGING einzusetzen, da diese konstantere und nachvollziehbarere Latenzzeiten als die LAWO-Karten aufweisen. Der Schwerpunkt dieser Durchführung liegt darin, den Anteil vom Fremdtraffic herauszufinden, ab dem Fehler und Aussetzer (auch Dropouts genannt) in den Streams auftauchen. Deshalb wird in diesem Versuch, neben den Audiostreams, Fremdtraffic eingestreut. Dieser Fremdtraffic wird von Linux-Rechner erzeugt und besitzt keinerlei Priorisierung hinsichtlich der Dienstgütparameter. Zum Einsatz kommen einfache TCP-Pakete mit BestEffort-Parametern. Es wird versucht, einen normaler Datenaustausch zu simulieren, welcher in normalen Netzwerkumgebungen vorkommen kann. Zugleich wird im Versuch ein Flaschenhals simuliert, das heißt, die Verbindung zwischen den beiden Netzwerkknoten über Kupfer wird auf 100 MBit/s reduziert (Abb. 39).

Für den Fremdtraffic werden zwei Rechner (PC203 und PC107) eingesetzt. Die Rechner werden Duplex belastet, sodass Daten gleichzeitig verschickt und angenommen werden können. Jeder Linux-Client schickt mit dem Programm iperf TCP-Datenpakete an zwei andere Linux-Rechner und empfängt die Pakete derer. Es werden insgesamt sechs einkanäle Audiostreams mit drei Rechnern (PC190, PC220 und PC254) erzeugt.

Bei der Messung wurde jeweils ein einkanaliger Stream mit einem Payload von 144 Byte erzeugt. Für die Übertragung, bei einer 24 Bit Abtasttiefe und einer Abtastrate von 48 kHz, liegt die Brutto-Bitrate bei 1,55 MBit/s. Bei 6 Streams bei etwa 9,28 MBit/s. Als Quelle und Senke der Messung dient der Rechner PC190. Dort laufen zudem alle Audiostreams ein, die im Netzwerk verfügbar sind. So erhält die DAW neben dem Quellensignal weitere vier Audiostreams. Die Rechner PC220 und PC254 empfangen das Signal und senden es ohne weitere Bearbeitung und Aufzeichnung weiter. Zuerst wird die Latenz der vier ankommenden Streams ohne Einfluss von Fremdtraffic gemessen. Jeder der vier gemessenen Latenzen wurde am Quellen-Rechner PC190 entnommen. Ein Schema über die Streamreihenfolge (Abb. 38), ein Ablaufschema (Abb. 39) sowie eine UDP-Stream-Auflistung (Tab. 16) sind im Anhang zu finden.

Nr.	Typ	Samples	[ms]	[ms]
	Quelle	0	0,00	
1	Stream	PC190 -> PC220 -> PC190	288	6,00
2	Stream	PC254 -> PC190	440	9,17
3	Stream	PC190 -> PC254 -> PC190	736	15,33
4	Stream	PC220 -> PC190	880	18,33

Tab. 13: Gemessene Latenzen der vier Streams am PC190

Anschließend wurde die Verbindung von Glasfaser mit 10 GBit/s auf Kupfer mit 100 MBit/s reduziert. Ferner werden die Dienstgüte-Vorgaben mit DSCP im Router und Switch deaktiviert und der Anteil von Fremdtraffic im Netzwerk erhöht und angepasst, bis Fehler in den Audiostreams auftauchen.

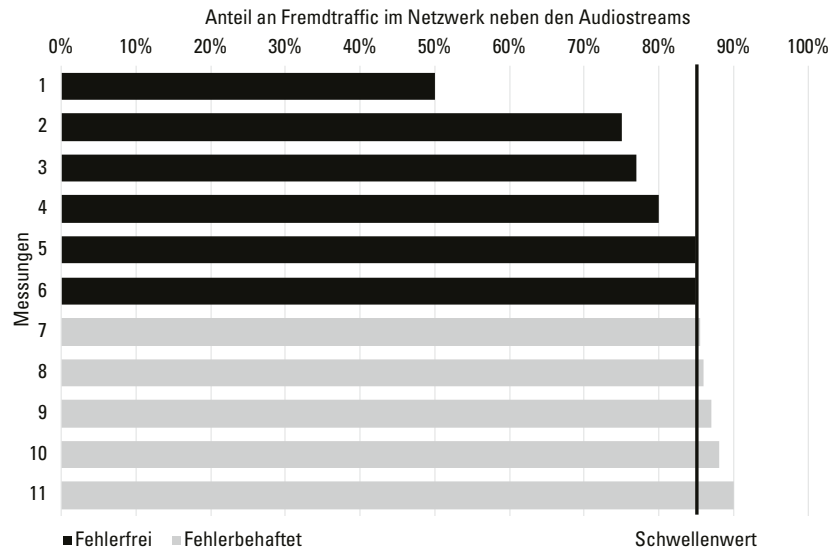


Abb. 27: Gemessener Schwellenwert zwischen fehlerfreien und fehlerbehafteten Audiostreams durch die prozentuale Zugabe von Fremdtraffic von PC107 Richtung PC203

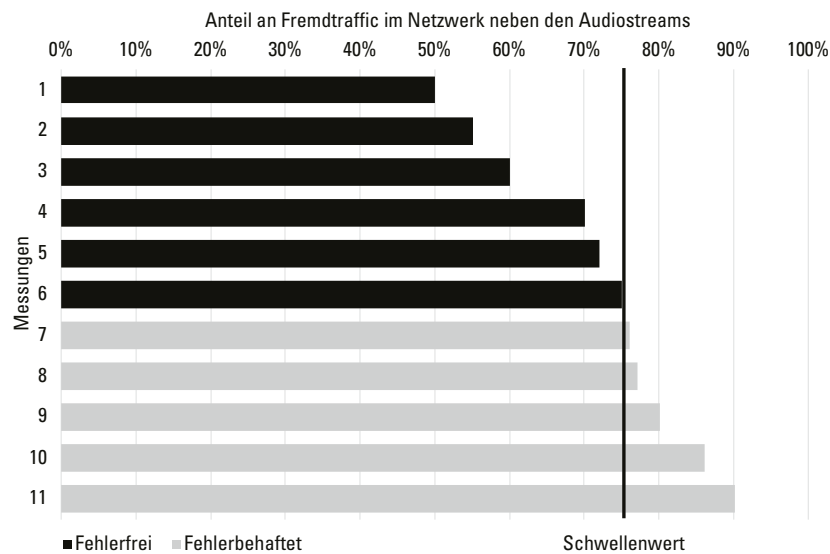


Abb. 28: Gemessener Schwellenwert zwischen fehlerfreien und fehlerbehafteten Audiostreams durch die prozentuale Zugabe von Fremdtraffic von PC203 Richtung PC107

6 Bewertung

Nachdem alle vorher definierten Parameter gemessen wurden, folgt in diesem Kapitel die Auswertung der Messergebnisse anhand der Beurteilungsgrundlage aus Kapitel 4.1.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme eines heterogenen Netzwerks hat problemlos geklappt. Durch eine vorher geplante Realisierung der manuellen IP-Adressvergabe und Routerkonfiguration, konnte das Netzwerk aufgesetzt werden. Nach den festgelegten AES67-Standards konnten die Netzwerkknoten und PTP-Grandmaster, zwecks Multicast-Betrieb, IGMP und DSCP, konfiguriert werden. Auch die Übertragung eines AES67-Streams anhand von virtuellen Soundkarten hat fehlerfrei funktioniert. Die Installation war benutzerfreundlich und hat sich eigenständig in das Windows-System integriert. Jeder Stream konnte komfortabel über die AES67-Browser-Oberfläche ausgewählt werden und mit dem ASIO-Treiber verknüpft werden. Die Überprüfung der virtuellen Soundkarten wird in diesem Kapitel bewertet.

6.1 Technische Dienstgüte

6.1.1 Signallaufzeit

Werden beide Soundkarten hinsichtlich der Latenzzeiten miteinander verglichen, so zeigt sich, dass beide Soundkarten unterschiedliche Zeiten aufweisen.

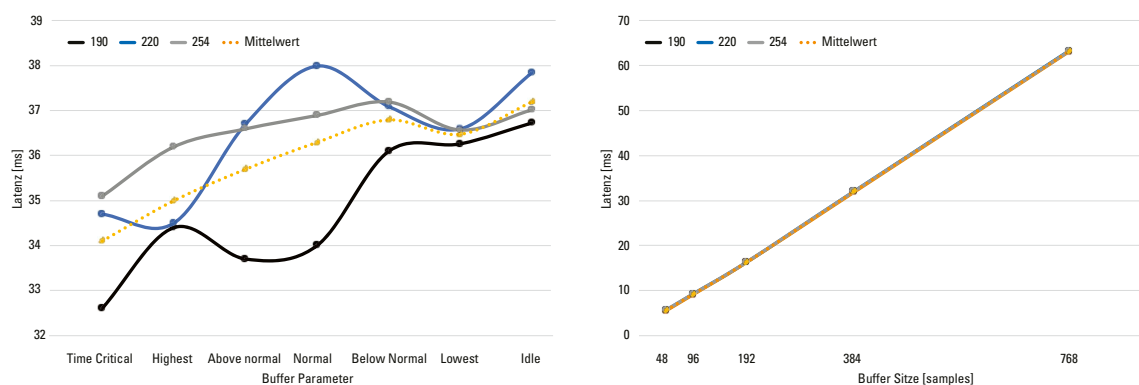


Abb. 29: (a) Gemessene Latenzzeiten der R3LAY VPB. (b) Gemessene Latenzzeiten der MERGING VAD

MERGING VSC

Die Messwerte der einzelnen Buffergrößen der MERGING Karten weisen nachvollziehbare Größen auf. Besonders geringe Standardabweichungen der Messungen belegen, dass virtuelle Soundkarten trotz unterschiedlicher Rechnerperformance und verschiedenen Subnetzen fast identische Latenzen besitzen. Es liegt ein konstanter Link-Offset vor. Ferner verhalten sich die Latenzzeiten und die Buffergrößen von ASIO äquivalent zueinander. Das heißt, dass alle Soundkarten den ASIO-Buffer vollständig und konstant ausfüllen.

Nach Subtraktion der Paketzeit im Umsetzer und der ASIO-Bufferzeit der Soundkarten, bleibt bei allen Messungen ein Zeitbetrag von $700 \mu\text{s}$ ($\pm 100 \mu\text{s}$) über.

Dieser Betrag kann dem System »Netzwerk« zugerechnet werden, da beiden anderen Systemen, Sender und Empfänger, bereits aus der Gesamtzeit abgezogen wurden. Es gibt für das Netzwerk mehrere Parameter, die für diese restliche Verzögerungen stehen können. Die Parameter »Routing/Switching« und »Versenden« sind in diesem Messaufbau sehr gering. Laut dem Datenblatt der Netzwerkknoten, weisen beide Geräte eine Latenz von $0,87 \mu\text{s}$ auf. Ferner liegt die Versendungszeit innerhalb des Netzwerks bei maximal 6 Ethernet-Strecken bei etwa $49 \mu\text{s}$. Somit ist immer noch eine Latenz von etwa $650 \mu\text{s}$ gegeben. Es wird vermutet, dass dies mit dem PTP-Protokoll zusammenhängt.

In diesem Netzwerk werden Netzwerkknoten ohne PTP-Unterstützung eingesetzt, d.h. zwischen PTP-Master und den PTP-Slaves liegen keine weitere »Boundary Clock«-Switche, die eventuelle Übertragungs-Jitter, also Variation der Durchlaufzeit, kompensieren können. Die Synchronisation findet, wie in Kapitel 2.3.3 erörtert, in zwei Stufen statt. In der zweiten Stufe wird die Latenzzeit zwischen dem Master und dem Slave bestimmt. Dies wird mit der Nachricht »DelayRequest« erledigt, welche in einem festgelegten Intervall zwischen den Systemen ausgetauscht wird. Bei AES67 liegt dieses Intervall bei zwei Sekunden (Abb. 30). Zwischen diesem Intervall kann es zu Ungenauigkeiten und einer weiteren Latenz zwischen Master und Slave kommen, welches bis zum nächsten Intervall nicht kompensiert werden kann. In diesem Fall liegt eine unsymmetrische Latenz zwischen Master und Slave vor.⁸⁷

⁸⁷ vgl. Gramann / Mohl, Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis, S. 91

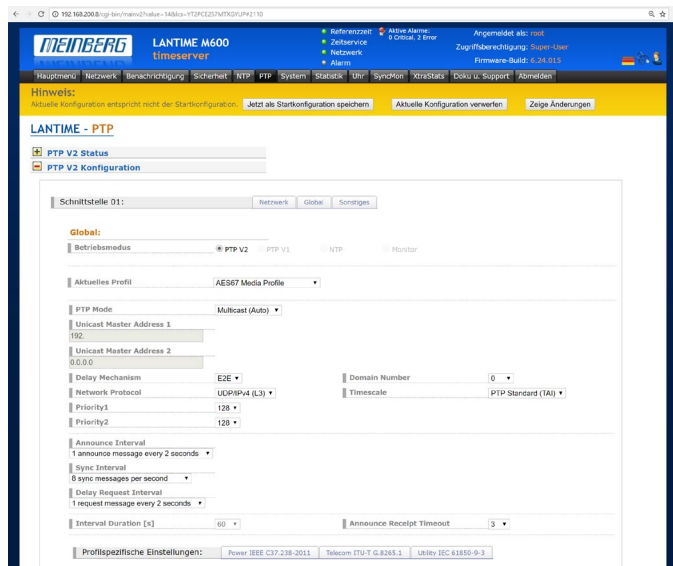


Abb. 30: Eingestellte Parameter des LANTIME M600 PTP-Grandmasters

Ein weiterer Ansatzpunkt für die restliche Latenz, wäre eventuell eine geringere Verarbeitungszeit der Netzwerkkarten der Rechner. Denn die virtuellen Soundkarten haben auf der Netzwerkkarte, beim Empfang eines Streams, abgekoppelt vom ASIO Buffer, eigene Bufferzeiten. Da jedoch bei der Messung das Delay-Feld unangetastet blieb und somit auf dem Modus »auto« stand, ist es möglich, dass die Soundkarte pro Rechner eine weitere Verzögerung einberechnet hat. (Abb. 31) Dies würde auch begründen, warum der Rechner PC220 von allen gemessenen Werten die geringsten Zeiten besitzt.

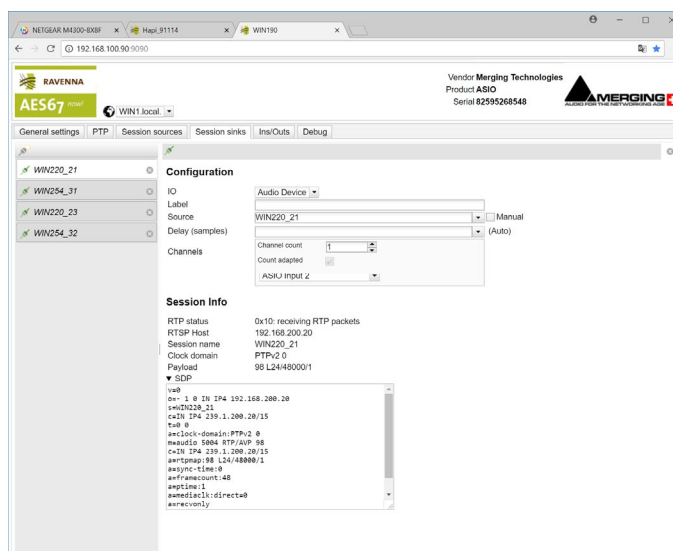


Abb. 31: Konfiguration des Streams vom PC220 an die Senke PC190

LAWO R3LAY VPB

Die Latenz-Messergebnisse von LAWO zeigen ein unruhiges Bild (Abb. 29 (a)). In Kapitel 5.2.2 wurde dargelegt, dass die Buffergröße innerhalb der LAWO Soundkarte »Virtual PatchBay« mit verschiedenen Bezeichnungen unter »Audio Processing: Thread priority« regulierbar ist. Konkrete Werte sind nicht gegeben. So ist es nicht möglich, beide Soundkarten hinsichtlich der Latenz zu vergleichen. Denn in der Gegenüberstellung beider Hersteller, erscheinen die Werte der LAWO-Karten mit dem fünffachen Faktor unwahrscheinlich hoch. Auch die Steigerung der Zeiten durch unterschiedliche Einstellungen bewegen sich nur in minimalem Rahmen von wenigen Millisekunden.

Durch Nachfrage beim Hersteller bewiesen sich die gemessenen Zeiten jedoch als haltbar und stimmen mit den internen Zeiten bei der Firma LAWO überein.⁸⁸

Der hohe Wert kommt durch eine großzügige Reserve innerhalb der Windows-Kerne zustande, denn laut LAWO liegt die maximale »Default Latency« von Windows 10 bei 1 920 Samples. Die Soundkarte nimmt von diesen Samples die Hälfte, zusammen mit einer Abtastrate von 48 kHz wird so eine Latenz von 20 ms erzeugt. Dazu werden 5 ms als Reserve der CCU, 5 ms als Buffer für das nächste Paket sowie nochmals 3 ms als Paketreserve addiert. Dieser Wertebereich um 33 ms wurde in der Messung bestätigt. Weil das Signal wieder direkt von der Soundkarte zurückgeschickt und ohne einer zusätzlichen Audiosoftware durchgeschliffen wurde, ist festzustellen, dass in dieser Messreihe der latenzarme Audiotreiber ASIO nicht berücksichtigt wurde. Somit sind die Werte schon als kleinstmögliche Latenz anzuerkennen.

Dass die Werte im Vergleich zu MERGING deutlich höher sind, liegt laut Informationen des Herstellers an der Verarbeitung der Soundkarte. Der Fokus dieser Soundkarte liegt auf dem Broadcastbereich. Im mobilen Einsatz sollen mit dieser Software Audiostreams geroutet und reguliert werden. Ein Einsatz in Echtzeitkommunikation von wenigen Millisekunden ist mit dieser Karte nicht vorgesehen, so Angaben des Hersteller. Leider weisen die gemessenen Werte bei LAWO auch eine hohe Fehlertoleranz auf. Durch die hohe Standardabweichung ist ersichtlich, dass hier keine aussagekräftige Begründung dieser Werte möglich ist.

Bei der Interoperabilitätsprüfung haben die Streams der verschiedenen Soundkarten-Hersteller keine Fehler enthalten. Die gemessenen Werte liegen im Bereich der gemessenen Latenzzeiten. Die großen Schwankungen der Latenzzeiten der LAWO-Karte spiegeln auch die unterschiedlichen Zeiten beider Streams wider, wobei eine Differenz von 1 ms vertretbar ist. Die Sichtbarkeit des Streams der jeweils anderen Soundkarte in der Software durch die Discovery hat problemlos

88 Schlegel, LAWO R3LAY Latenz-Zusammensetzung.

geklappt. Ebenfalls hat das manuelle Hinzufügen des Streams durch Eingabe der SDP-Informationen problemlos funktioniert (Abb. 18). Eine Interoperabilität zwischen den Soundkarten ist somit gegeben.

6.1.2 Durchsatz

Zu Beginn, noch bevor Fremdtraffic ins Netzwerk eingeschleust wurde, wurde die reine Laufzeit der Streams gemessen Tab. 13. Diese Zeiten stimmen mit den Werten der vorherigen einzelnen Überprüfungen überein. Dass die Differenz zwischen dem ersten und zweiten Stream keiner Verdopplung, sondern einer Halbierung entspricht, liegt am Abgreifen aller Streams an dem Quellen- und Messrechner PC190.

Die Latenz eines Hin- und Rückweges bei den Soundkarten PC190 und PC220 liegt bei 6 ms.

Für diesen Verlauf werden zwei Streams erzeugt. Der erste stammt vom PC190 und wird vom PC 220 abgegriffen (1). Der vom PC220 abgenommene Stream wird als zweiten Stream im Netzwerk weitergeschickt. Dieser wiederum wird vom PC190 abonniert und mit 6 ms Latenz gemessen (2a). Der zweite Stream jedoch wird auch vom PC254 empfangen, so dass die Eingangszeit des zweiten Streams bei beiden Rechnern (PC190 und PC254) nahezu identisch ist (2b). Nun greift PC190 den Ausgangsstream von PC254 ab und es folgt eine Latenz von 9,17 ms, anstatt von 12 ms (3).

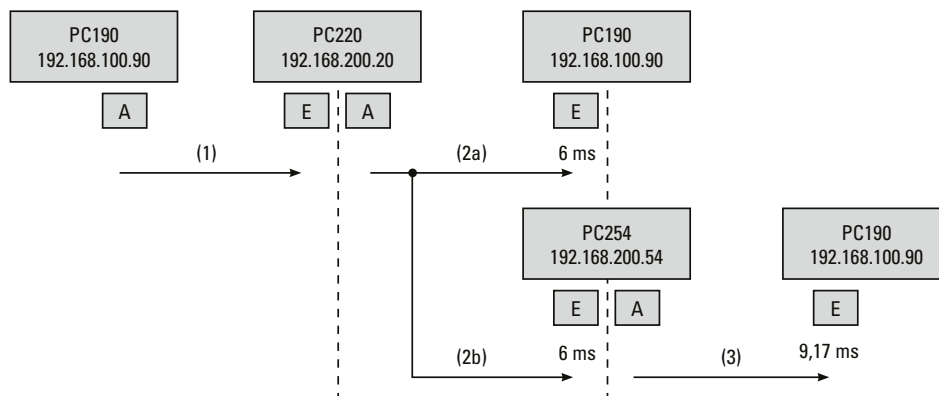


Abb. 32: Verteilung der Latenzzeiten zwischen drei virtuellen Soundkarten

Es wird nur noch der Weg vom PC254 Ausgang zum Eingang des PC190 dazu addiert und nicht mehr der gesamte Stream von PC220 über PC254 zum PC190. Zwischen dem 2. und 3. Stream liegt wiederum eine Latenz von 6,15 ms an, da nur die Verbindung zwischen zwei Rechnern abgenommen wird (PC190 und PC254). Der vierte Stream verhält sich analog zum zweiten Stream.

Bei der Durchsatzmessung wurde der Anteil an Fremdtraffic pro Messung immer weiter gesteigert, um so den Schwellenwert zu erfassen, bei dem Audiostreams Aussetzer aufweisen. Bei Aktivierung der Dienstgüteparameter über DSCP in den Netzwerkknoten wurden keine Aussetzer im Stream nachgewiesen, sowohl bei der Glasfaser- mit 10 GBit/s als auch bei einer Kupfer-Verbindung mit 100 MBit/s. Es gelang, den Netzwerkknoten die UDP-Datenpakete mit AF41-DSCP-Tag den TCP-Datenpaketen ohne Priorisierung vorzuziehen. Dies belegt auch die geringere Durchsatzgeschwindigkeit der Fremddatenpakete durch das Netzwerk.

Dass bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 10 GBit/s und deaktivierter Dienstgüte keine Fehler festgestellt worden sind, liegt an der geringen Ausnutzung der Bandbreite. Um den Bereich der gemessenen Schwellenwerte hier zu erreichen, benötigt es eine Vielzahl an Rechnern für weitere Audiostreams und generierten Fremdtraffic.

Bei Deaktivierung der Parameter und einer 100 Mbit/s Bandbreite weist der Stream ab einer bestimmten Prozentzahl von Fremdtraffic, Fehler auf. Der Schwellenwert ohne DiffServ im Netzwerk beträgt in Richtung VLAN 100 zum VLAN 200 85 % und vom VLAN 200 zum VLAN 200 75 % Anteil Fremdtraffic. Steigt der Fremdtraffic-Anteil über diesen Schwellenwert, produzieren die Audiostreams Fehler und Aussetzer.

Als Testsignal diente ein 8 kHz Sinus. Um kleinste Fehler zu erkennen und auszuwerten, wurde jeder Stream über ein FFT-Spektrum analysiert. Bei einem konstanten Sinus ergibt das Spektrum einen gleichmäßigen Verlauf mit ansteigender Spitze bei 8 kHz. Sobald kleinste Aussetzer auftreten, zeichnet das Spektrum einem Kammfilter ähnliches Bild. Unterhalb des Schwellenwertes treten keine Fehler hervor, der Stream weist keine Fehler oder Aussetzer auf. Das entsprechende Frequenzspektrum zeichnet einen flüssigen Verlauf mit einer Spitze bei 8 kHz (Abb. 34). Oberhalb des Schwellenwertes sind Fehler sowohl im Audiofile als auch im Spektrum sichtbar. (Abb. 33 und Abb. 34).

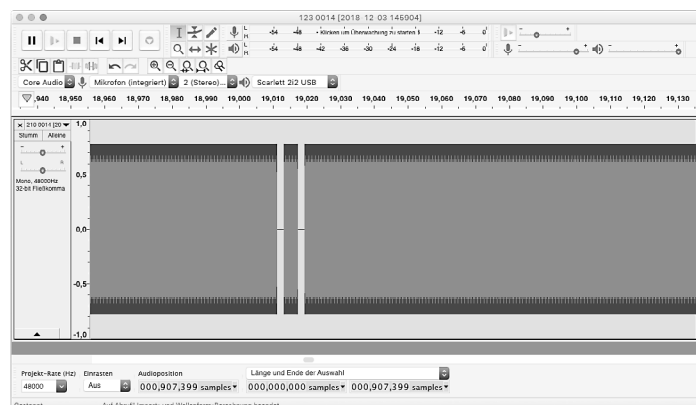


Abb. 33: Sample-/Waveformspektrum eines fehlerbehafteten Streams

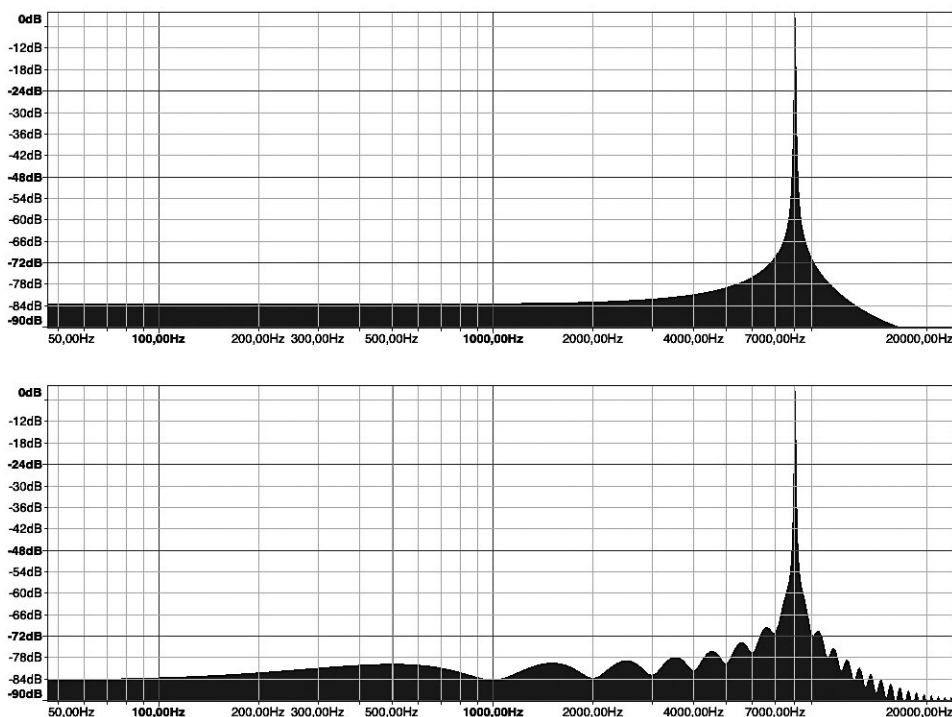


Abb. 34: (a) Frequenzspektrum eines fehlerfreien Streams. (b) Frequenzspektrum eines fehlerbehafteten Streams

Obwohl der Audiostream-Anteil rund 10 % im Flaschenhals ausmacht, werden bei 85 % Fehler und Aussetzer produziert. Dies ist damit zu begründen, dass weitere Protokolle durch das Netzwerk verschickt werden, z. B. das wichtige PTP-Protokoll. Andererseits tritt die o.g. PTP-Problematik, bei der Latenz-Bewertung, wieder auf. Wenn Switche und Router auf Vollast laufen, besitzen diese einen nicht unerheblichen Verzögerungs-Jitter, was wiederum auf Verzögerungen zwischen der PTP-Taktgenerierung und den Soundkarten-Buffer hinauslaufen kann.⁸⁹ Es kommt zu Paketausfällen.

⁸⁹ vgl. Gramann / Mohl, Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis, S. 91.

7 Fazit

Mit dieser Arbeit wurden AES67-Audiostreams in heterogenen Netzwerken anhand von virtuellen Soundkarten evaluiert. Hierfür wurden zwei Soundkarten von verschiedenen Herstellern ausgewählt und ein Netzwerk realisiert. Es folgte eine Messung anhand vorher festgelegter Kriterien.

Die Resultate zeigen, dass beide virtuellen Soundkarten sich in ihrem Verwendungszweck und ihren Latenzzeiten unterscheiden. Der Einsatz beider Karten ist in einem heterogenen Netzwerk ohne Probleme möglich, vorausgesetzt es gibt genug Bandbreite im Netzwerk.

Die R3LAY-Soundkarte ist für Wiedergabe- und Produktionsanwendungen im Broadcastbereich anzusiedeln. Ihre relativ hohen Latenzzeiten von 30 - 40 ms zeigen, dass von der Software aus sichergestellt wird, Audiosignale fehlerfrei und mit großem Buffer weiterzuverarbeiten. Dies unterstreicht den Fokus der Karte, der auf dem korrekten Ausspielen von Audiofiles liegt und somit als Ergänzung in Broadcast-Systemen eingesetzt werden kann. Aufgrund dieser Anwendungszwecke ist es möglich, neben den normalen Stream-Einstellungen noch das Audiosignal ohne Audiotbearbeitungssoftware zu routen und mit externen Plug-Ins zu bearbeiten sowie die Lautstärke zu regulieren.

Die MERGING-Soundkarte zeigt Latenzzeiten im Bereich von 6 ms bei kleinen Pufferwerten bis 64 ms bei 16-facher Puffergröße. Diese Ergebnisse werden als stichhaltig angesehen und konnten durch Aufschlüsselung der einzelnen Latenz-Bereiche im Netzwerk bewiesen werden. Leider ist ein Betrieb der virtuellen Soundkarten von MERGING nur mit einem externen Interface des Herstellers möglich, so dass ein Einsatz, trotz eines PTP-Masters, ohne zusätzlicher Hardware in heterogenen Netzwerken nicht gegeben ist.

Die Überprüfung des Durchsatzes im heterogenen Netzwerk hat ergeben, dass ab einem Anteil von 75 % bis 85 % Fremddata in einem Netzwerk ohne Dienstgüteparameter, Fehler in Audiostreams auftreten können. Diese Werte gelten jedoch nur bei einer regulierten Schnittstelle mit 100 Mbit/s. Bei Aktivierung der Dienstgüteparameter sind keine Probleme aufgetreten. Aus diesem Grund ist eine Anwendung in heterogenen Netzwerken bei aktivem QoS, auch mit geringer Bandbreite, möglich.

Der Grund für die Differenz von 85 % zu 75 % zwischen den beiden Messungen bleibt jedoch weiter offen und lässt sich mit den gegebenen Messwerkzeugen und der Zielsetzung der Arbeit nicht beantworten. Hier müssten weitergehende Untersuchungen folgen, um Erklärungsansätze für diese Differenz zu finden.

Es hat sich auch gezeigt, dass ein Vergleich der beiden Soundkarten aufgrund der unterschiedlichen Konfigurationsmöglichkeiten herausfordernd ist. Beispielsweise hätte es einen tieferen Einblick in die Softwareumgebung der R3LAY-Produkte gebraucht, um die nicht konstanten Latenzwerte der R3LAY-Soundkarte erklären zu können.

Als Ansatzpunkt für zukünftige Forschungen fände ich es interessant zu erfahren, wie groß der Latenzunterschied zwischen virtuellen Soundkarten und festeingebauten AES67-Netzwerkkarten ist. Die aktuelle Marktsituation zeigt, dass virtuelle Soundkarten und AES67-PCIe-Netzwerkkarten neben Embedded-AES67-Geräte mehr an Stellenwert gewinnen.

Insbesondere durch ein halbjähriges Praktikum konnte ich meinen Einblick in die Planung von medientechnischen Anlagen vertiefen. Es ist deutlich zu beobachten, dass die Nachfrage der Firmen nach Audionetzwerken, die über ein normales Netzwerk von einem Verwaltungsrechner aus steuerbar sind und auch als Zuspüler dienen sollen, steigt.

Hier wäre es zukünftig wichtig zu wissen, bei welchem Einsatzgebiet sich virtuelle Soundkarten lohnen und wann AES67-PCIe-Netzwerkkarten von Vorteil sind.

8 Literaturverzeichnis

AUDIO ENGINEERING SOCIETY, INC. (2018): AES67-2018. AES standard for audio applications of networks - High-performance streaming audio-over-IP interoperability.

BAUN, CHRISTIAN (2015): Computernetze kompakt, 3. Auflage. Berlin - Heidelberg: Springer Vieweg.

BLESS, ROLAND (2005): Sichere Netzwerkkommunikation. Grundlagen, Protokolle und Architekturen, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

BORMAN, D. (2014): User Datagram Protocol. RFC 7323, <https://tools.ietf.org/html/rfc7323> (abgerufen am: 31.01.2019).

COMER, DOUGLAS (2011): TCP-IP. Konzepte, Protokolle, Architekturen, Heidelberg - München Landsberg [u.a.]: mitp.

DETKEN, KAI-OLIVER (2002): Echtzeitplattformen für das Internet. Grundlagen, Lösungsansätze der sicheren Kommunikation mit QoS und VoIP, München - Boston [u.a.]: Addison-Wesley.

FENNER, W. (1997): Internet Group Management Protocol. Version 2, RFC 2236, <https://tools.ietf.org/html/rfc2236> (abgerufen am: 31.01.2019).

GRAMANN, TIMO / MOHL, DIRK (2003): »Precision Time Protocol IEEE 1588 in der Praxis«, in: Elektronik 24/2003. WEKA Fachmedien GmbH.

HILDEBRAND, ANDREAS (2013): RAVENNA WDM Virtual Sound Card (RVSC). Specification, ALC NetworX GmbH, https://www.ravenna-network.com/app/download/13854570623/RAVENNA_WDM_Virtual_Sound_Card_-_Specification.pdf?t=1505293966 (abgerufen am: 31.01.2019).

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. (2008): IEEE Std 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4579760> (abgerufen am: 31.01.2019).

ITWISSEN.INFO (2014): Heterogenes Netzwerk, <https://www.itwissen.info/Heterogenes-Netzwerk-heterogeneous-network.html> (abgerufen am: 31.01.2019).

KADERALI, FIROZ (2007): Digitale Kommunikationstechnik, <http://www.kaderali.de/fileadmin/vorlesungsskripte/Buch%20KT%20%28A4%29.pdf> (abgerufen am: 31.01.2019).

LAJMI, LILIA (2003): Paketsubstitution in Audiosignalen bei paketorientierter Audioübertragung, Technischen Universität Berlin, https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/997/1/Dokument_7.pdf (abgerufen am: 31.01.2019).

LAWO AG (2018): R3LAY Latenz-Zusammensetzung. Persönliche Kommunikation mit Schlegel, Andreas am 11. Dezember 2018.

MEINEL, CHRISTOPH, / SACK, HARALD (2012): Internetworking. technische Grundlagen und Anwendungen, Berlin - Heidelberg: Springer.

MERGING TECHNOLOGIES (2018): RAVENNA ASIO Troubleshooting. <https://confluence.merging.com/display/PUBLICDOC/RAVENNA+ASIO+Troubleshooting#RAVENNAASIOTroubleshooting-Theaudioinputsandoutputsaredistorted> (abgerufen am: 31.01.2019).

POSTEL, J. (1980): User Datagram Protocol. RFC 768, <https://tools.ietf.org/html/rfc768> (abgerufen am: 31.01.2019).

SCHERFF, JÜRGEN (2010): Grundkurs Computernetzwerke. Eine kompakte Einführung in Netzwerk- und Internet-Technologien, 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

SCHREIBER, WERNER / ZÜRL, KONRAD / ZIMMERMANN, KONRAD (2017): Web-basierte Anwendungen virtueller Techniken. Das ARVIDA-Projekt - Dienste-basierte Software-Architektur und Anwendungsszenarien für die Industrie, Berlin: Springer Vieweg.

SEITZ, JOCHEN (2017): Kommunikationsnetze. Vorlesungsskript WS2017, Universität Ilmenau, http://midas1.e-technik.tu-ilmenau.de/~webkn/Webdaten/Lehre/WS2017/Kommunikationsnetze/V02-Kommunikationsdienst_und_protokoll.pdf (abgerufen am: 31.01.2019).

STOERMER, ULF (2018): ASIO 2.3. Audio Streaming Input Output Development Kit, Steinberg Media Technologies GmbH, http://www.steinberg.net/sdk_downloads/ASIOSDK2.3.2.zip (abgerufen am: 31.01.2019).

TANENBAUM, ANDREW S. / WETHERALL, DAVID (2012): Computernetzwerke. 5. Auflage, München - Harlow [u.a.]: Pearson.

TRICK, ULRICH / WEBER, FRANK (2014): SIP und Telekommunikationsnetze. Next generation networks und Multimedia over IP - konkret, 5. Auflage, Berlin - Boston, De Gruyter Oldenbourg.

WEINZIERL, STEFAN (2008): Handbuch der Audiotechnik. Berlin - Heidelberg: Springer.

WENDZEL, STEFFEN (2012): Tunnel und verdeckte Kanäle im Netz. Grundlagen, Protokolle, Sicherheit und Methoden, Wiesbaden: Springer Vieweg.

WISMÜLLER, ROLAND (2018): Rechnernetze I. Vorlesungsskript SoSe 2018, Universität Siegen https://www.bs.informatik.uni-siegen.de/web/wismueller/vl/ss18/rn1/v_2.pdf (abgerufen am: 31.01.2019).

9 Anhang

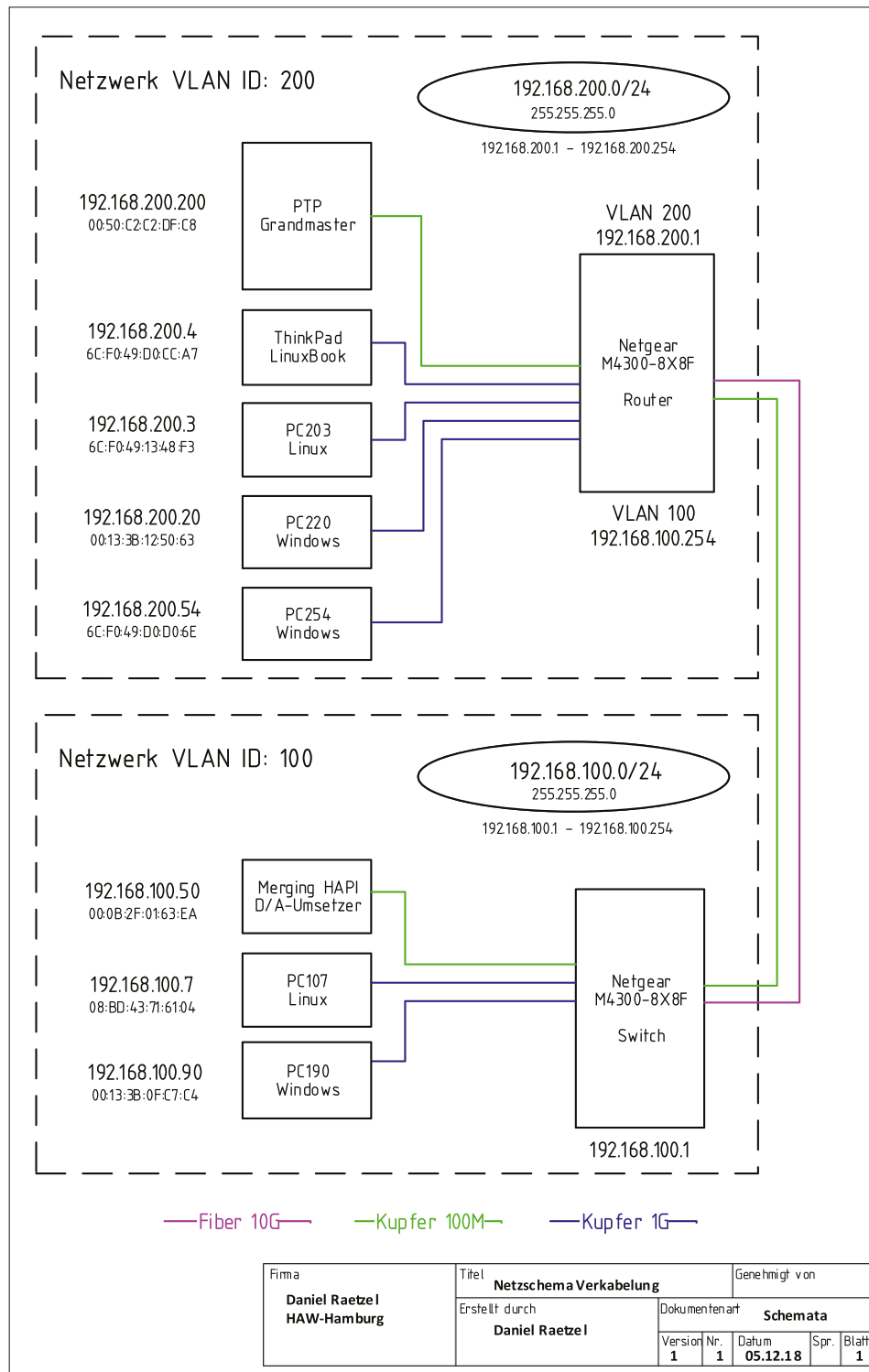


Abb. 35: Netzschema und Verkabelung des Netzwerkes


```

enable
vlan database
vlan 200
set igmp 200
set igmp querier 200
no set igmp fast-leave 200
set mld 200
exit

configure
interface 1/0/9-1/0/15
vlan participation auto 1
vlan participation include 200
vlan pvid 200
exit

vlan database
vlan 100
set igmp 100
set igmp querier 100
no set igmp fast-leave 100
set mld 100
exit

configure
interface 1/0/7,1/0/16
vlan participation auto 1
vlan participation include 100
vlan pvid 100
ip routing
exit

vlan database
vlan routing 100
vlan routing 200
exit

bonjour run

config
interface vlan 100
ip address 192.168.100.254 /24
exit
interface vlan 200
ip address 192.168.200.1 /24
exit
set igmp querier address 192.168.200.254
set igmp querier query-interval 30
ip igmp
ip igmp version 2
ip multicast
classofservice trust ip-dscp
classofservice ip-dscp-mapping 0 0
classofservice ip-dscp-mapping 34 5
classofservice ip-dscp-mapping 46 6

##Aktivierung der altern. Verbindung über Kupfer mit 100 Mbit/s
config
interface 1/0/16
speed auto 100 full-duplex
exit

```

Abb. 36: Terminal-Befehle zur Router-Konfiguration NETGEAR M4300-8X8F

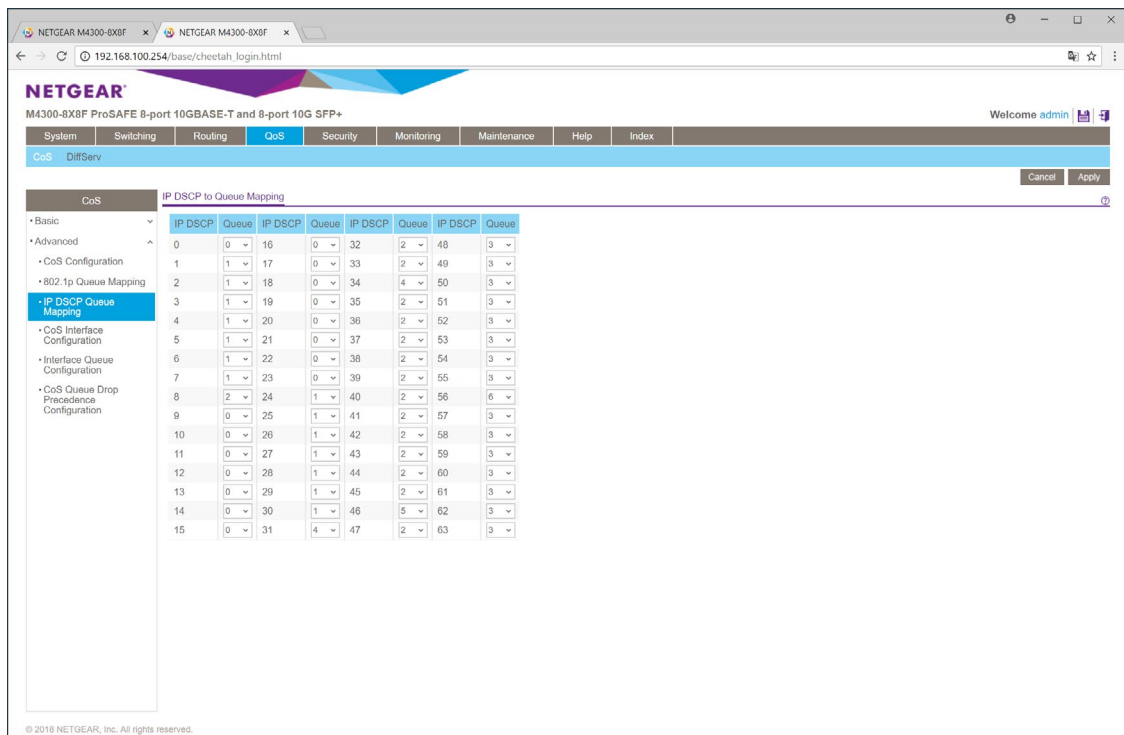


Abb. 37: Einstellung der DSCP-Dienstgüteparameter in den Netzwerkknoten

MAC-Adresse	VLAN	Typ	Betreffende Ports	Quelle IP-Adresse	Senke IP-Adresse
01:00:5e:7f:ff:fa	100	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.2	239.255.255.250
01:00:5e:7f:ff:ff	100	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.100.90	239.255.255.255
01:00:5e:00:01:81	200	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.200	224.0.1.129
01:00:5e:28:c8:04	200	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.2	239.168.200.4
01:00:5e:40:00:01	200	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.2	239.192.0.1
01:00:5e:40:ff:03	200	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.2	239.192.255.3
01:00:5e:40:ff:04	200	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.2	239.192.255.4
01:00:5e:7f:ff:fa	200	IGMP	1/0/7, 1/0/9, 1/0/14	192.168.200.2	239.255.255.250

Tab. 14: Aufgezeichnete IGMP-Multicast-Gruppen im Router

PC190	Time Critical [ms]	Highest [ms]	Above normal [ms]	Normal [ms]	Below normal [ms]	Lowest [ms]	Idle [ms]
	32,3	34,4	33,7	33,5	36,6	35,7	38,1
	32,9	33,9	33,9	35,4	37,1	36,7	36,2
	33,0	33,4	35,6	34,8	34,6	36,4	35,9
Mittelwert	32,7	33,9	34,4	34,6	36,1	36,3	36,7
Standardabweichung	0,3	0,4	0,9	0,8	1,1	0,4	1,0

PC220	Time Critical [ms]	Highest [ms]	Above normal [ms]	Normal [ms]	Below normal [ms]	Lowest [ms]	Idle [ms]
	32,6	36,6	38,5	35,6	36,8	37,5	38,2
	33,6	33,9	35,2	37,6	37,1	36,3	39,2
	33,0	34,0	36,2	37,8	36,2	37,6	36,9
	36,5	33,4	33,7	36,0	38,1	35,0	37,1
Mittelwert	33,9	34,8	35,9	36,8	37,1	36,6	37,9
Standardabweichung	1,5	1,2	1,7	1,0	0,7	1,1	0,9

PC254	Time Critical [ms]	Highest [ms]	Above normal [ms]	Normal [ms]	Below normal [ms]	Lowest [ms]	Idle [ms]
	34,8	35,1	39,9	38,4	33,0	35,4	36,6
	34,5	35,2	35,2	36,8	38,0	38,4	37,4
	36,4	35,6	34,9	35,4	38,4	35,5	36,3
	34,8	38,8	36,3	37,1	39,2	37,0	37,8
Mittelwert	35,1	36,2	36,6	36,9	37,2	36,6	37,0
Standardabweichung	1,0	2,0	0,7	0,9	0,6	1,5	0,8

Tab. 15: Aufgezeichnete Messwerte der LAWO R3LAY VPB

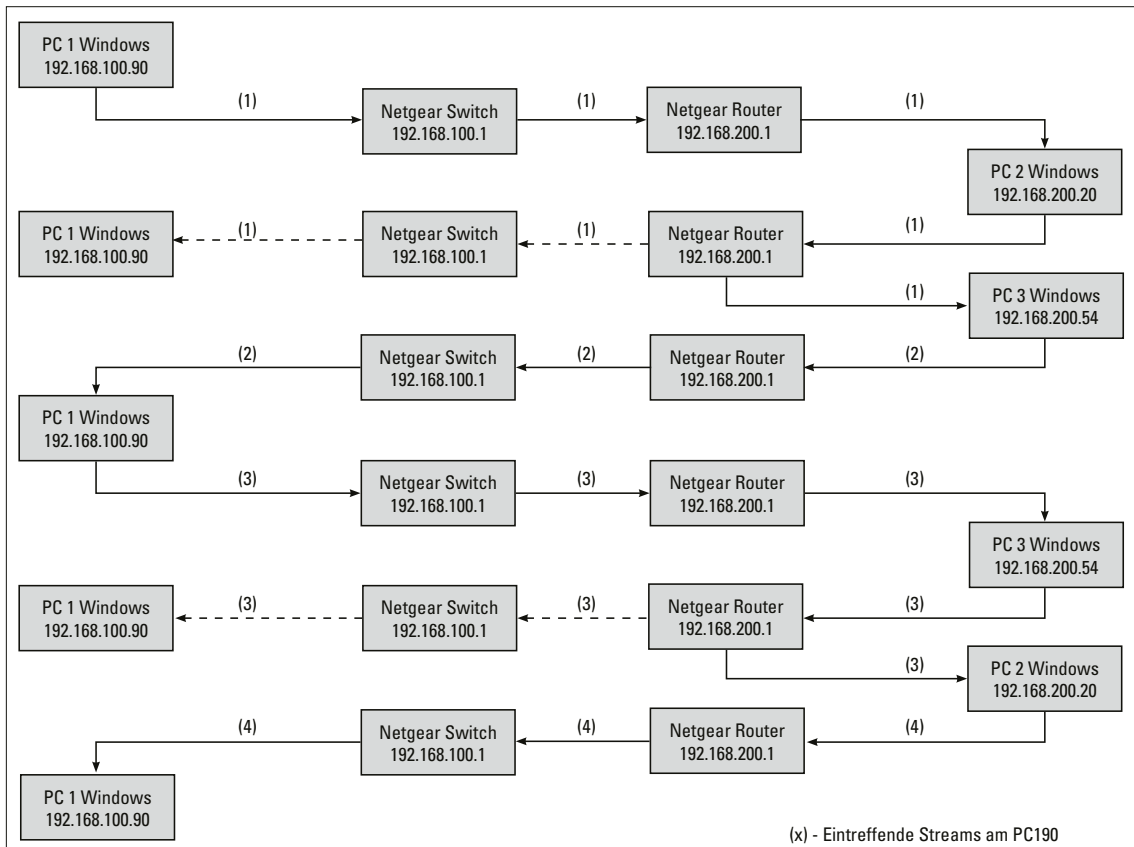


Abb. 38: Reihenfolge-Schema der Streams bei der Durchsatz-Messung

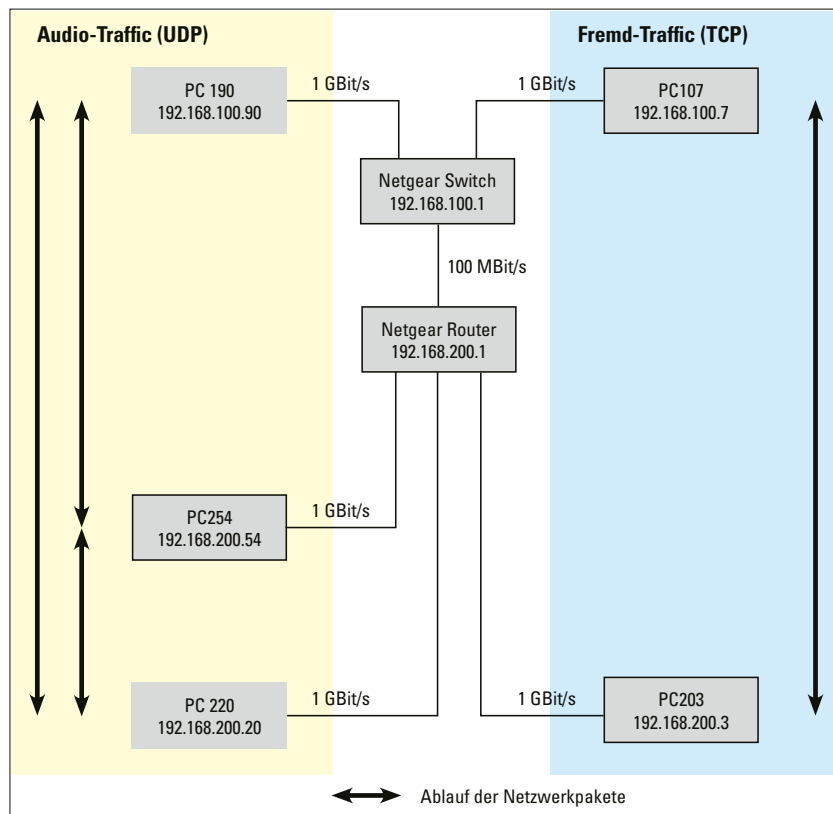


Abb. 39: Ablauf-Schema der Streams bei der Durchsatz-Messung

Quelle IP-Address	Quelle Port	Senke IP-Address	Senke Port	Durchschn. Bandbreite [Byte/s]	Max. Buffers	Beschreibung
192.168.200.54	9875	239.255.255.255	9875	306,67	855	PC254 SAP (Discovery)
192.168.200.54	5004	239.2.200.54	5004	3198877,35	465	PC254 RTP (Audio)
192.168.200.20	9875	239.255.255.255	9875	276,00	1007	PC220 SAP (Discovery)
192.168.200.20	5004	239.2.200.20	5004	3198910,19	339	PC220 RTP (Audio)
192.168.100.90	5004	239.1.100.90	5004	1615444,11	202	PC190 SAP (Discovery)
192.168.100.90	9875	239.255.255.255	9875	138,80	347	PC190 RTP (Audio)

Tab. 16: Aufgezeichnete UDP-Streams einer Durchsatzmessung durch Wireshark

10 Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis mit dem Titel:

**Evaluation von AES67-Audiostreams im
heterogenen Netzwerk anhand virtueller Soundkarten**

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

Ort, Datum

Daniel Raetzel