

Das kleine Dante-Kompendium - Das digitale Audionetzwerk verstehen und anwenden

Bachelorarbeit

im Studiengang
Audiovisuelle Medien

vorgelegt von
Raimund Förnzler
Matrikelnummer.: 32107

am 25. Februar 2020
an der Hochschule der Medien
Stuttgart

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
Zweitprüfer: Prof. Frank Melchior

I. Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Raimund Förnzer, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Das kleine Dante-Kompendium - Das digitale Audionetzwerk verstehen und anwenden“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, den 25.02.2020

Raimund Förnzer, Matrikelnummer 32107

II. Kurzfassung

Diese Arbeit dient als Kompendium für eine fachgerechte Nutzung von Dante zur digitalen Audioübertragung. Zum funktionalen Grundverständnis von paketbasierter Audioübertragung über Ethernet tragen die behandelten Netzwerkgrundlagen bei. Die Funktionsweise von Dante wird anhand der Anforderungen an den Audio-Übertragungsweg im Rahmen von Live-Veranstaltungen erläutert und die benutzten Netzwerk-Technologien im Detail behandelt. Im Folgenden wird Audio over IP-Technologie vertieft. Es wird auf die Dante-spezifische Anwendung der behandelten Grundlagen eingegangen und der fachgerechte Umgang mit Hard- und Software erklärt. Nachfolgend wird die Interoperabilität von Dante betrachtet. Im abschließenden Praxisbeispiel wird eine im Aufbau befindliche Dante-Installation am Schauspiel Stuttgart mit unterschiedlichen Anwendungsszenarien betrachtet und die diesbezüglichen Vor- und Nachteile diskutiert.

III. Abstract

This work serves as a compendium for the professional use of Dante for digital audio transmission. The treated network basics contribute to the basic understanding of packet-based audio transmission via Ethernet. The functionality of Dante is explained based on the requirements for the audio transmission path in the context of live events and the network technologies used are dealt with in detail. In the following, Audio over IP technology is deepened. The Dante-specific application of the covered basics is explained and the proper use of hardware and software is explained. Dante's interoperability is considered below. In the final practical example, a Dante installation under construction at Schauspiel Stuttgart is considered with different application scenarios and the advantages and disadvantages in this regard are discussed.

IV. Inhaltsverzeichnis

I.	EIDESSTAATLICHE ERKLÄRUNG	II
II.	KURZFASSUNG	III
III.	ABSTRACT	III
IV.	INHALTSVERZEICHNIS	IV
1	EINLEITUNG	1
2	KOMPENDIUM.....	3
2.1	ANFORDERUNGEN AN DIE DIGITALE AUDIOÜBERTRAGUNG	3
2.2	NETZWERKGRUNDLAGEN	5
2.2.1	OSI – REFERENZMODELL	5
2.2.1.1	Layer 1 – Bitübertragungsschicht.....	6
2.2.1.2	Layer 2 – Sicherungsschicht	7
2.2.1.3	Layer 3 – Vermittlungsschicht	7
2.2.1.4	Layer 4 – Transportschicht.....	8
2.2.1.5	Layer 5 – Kommunikations-/Sitzungsschicht.....	9
2.2.1.6	Layer 6 – Darstellungsschicht	9
2.2.1.7	Layer 7 – Anwendungsschicht	9
2.2.2	ETHERNET.....	9
2.2.3	FÜR DANTE GENUTZTE NETZWERKPROTOKOLLE	12
2.2.3.1	Internet Protocol	12
2.2.3.2	User Datagram Protocol.....	15
2.2.3.3	Real-Time Transport Protocol	16
2.2.3.4	Precision Time Protocol	17
2.2.3.5	Dynamic Host Configuration Protocol	18
2.2.3.6	DiffServ.....	19
2.2.3.7	Dynamic Name System.....	20
2.2.4	KOMMUNIKATIONSFORMEN	20
2.2.4.1	Unicast	20
2.2.4.2	Multicast	21
2.2.4.3	Broadcast	21
2.2.5	NETZWERKBAUSTEINE.....	22
2.2.5.1	Switch.....	22
2.2.5.2	Router.....	25
2.2.5.3	Übertragungsmedien.....	26
2.3	AUDIO OVER IP	29
2.3.1	UNTERSCHIED ZU TDM-BASIERTER AUDIOÜBERTRAGUNG	30
2.4	DANTE - TECHNOLOGIEN.....	32
2.4.1	NETZSPEZIFIKATIONEN	33

2.4.2	VERBINDUNGSMANAGEMENT.....	33
2.4.3	SYNCHRONISATION	34
2.4.4	ÜBERTRAGUNG.....	35
2.4.5	DANTE - FLOWS	36
2.4.5.1	Latenz.....	38
2.4.5.2	Quality of Service	39
2.5	DANTE – ANWENDUNG.....	40
2.5.1	NETZAUFBAU	40
2.5.2	SOFTWARE.....	44
2.5.2.1	Dante Controller	44
2.5.2.2	Dante Virtual Soundcard	67
2.6	INTEROPERABILITÄT.....	69
3	PRAXISBEISPIEL: DANTE IM SCHAUSPIELHAUS STUTTGART	70
3.1	TECHNISCHE ANBINDUNG VON DANTE	71
3.2	MÖGLICHE DANTE-NETZTOPOLOGIE IM SCHAUSPIELHAUS	72
3.3	MÖGLICHE WEITERE ANWENDUNGSGEBIETE	74
3.4	VOR- UND NACHTEILE.....	76
4	FAZIT.....	77
5	DANKSAGUNG.....	79
6	LITERATURVERZEICHNIS	80
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	83
8	TABELLENVERZEICHNIS	84
9	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	85

1 Einleitung

Wo man bis vor einigen Jahren noch mehrere, vorzugsweise in der Ausbildung befindliche, Veranstaltungstechniker sehen konnte, die unter großer Anstrengung dicke, schwere Multicore-Kabel quer durch den Veranstaltungsort von der Bühne bis zum Mischplatz des Tontechnikers verlegt haben, findet man heutzutage nur noch ein bis zwei Netzwirkabel. Gerade im Bereich der fliegenden Installationen (Konzerte, Industrieveranstaltungen, etc.) ist die digitale Audioübertragung im Ton-Gewerk der Veranstaltungstechnik mittlerweile zum Standard geworden. Wo früher das Multicore mit der Größe der Veranstaltung immer dicker und schwerer geworden ist, schickt man heute eine hohe Zahl Audio-Kanäle bidirektional über eine handelsübliche Netzwerkleitung. Diese Entwicklung hat auch im Bereich der Festinstallationen Einzug gehalten. Viele Studios, Theater, und die meisten Funkhäuser nutzen digitale Übertragungsmethoden für Audiosignale. Dass diese Entwicklung zu einer gewissen Arbeitserleichterung und zu höherer Flexibilität geführt hat, liegt auf der Hand. Der oft angeführte Punkt der Vereinfachung bleibt in letzter Konsequenz zu diskutieren, da sich bei der digitalen Audioübertragung Probleme oftmals nur in andere Bereiche verschoben haben und andere technische Kenntnisse und Erfahrung notwendig sind, als bei analogen Audioübertragungen.

In den letzten Jahren ist eine eindeutige Entwicklung von herkömmlichen, immer noch benutzten, digitalen Audioübertragungswegen (zum Beispiel MADI über Koaxialkabel oder Lichtwellenleiter) hin zu IP-basierten Lösungen zur Übertragung von Audio (zum Beispiel Dante, AVB oder RAVENNA über Ethernet-Leitungen) festzustellen. Diese ermöglichen es, viele Audiokanäle zu übertragen, bidirektional zu kommunizieren und dezidiert Teilnehmer zu adressieren.¹ Das Übertragungsprotokoll Dante der australischen Firma Audinate hat sich in weiten Teilen der Branche als Standard für digitale Audioübertragung etabliert. Neben einem grundsätzlichen Verständnis für die Funktionsweise eines Netzwerks sind die Kenntnis und fachgerechte Nutzung von Dante inzwischen Voraussetzung für das professionelle Arbeiten im Ton-Gewerk der Veranstaltungsbranche. Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit, dem Leser die nötigen Grundlagen der Funktionsweise eines Netzwerks nahezubringen, das Wissen zur fachgerechten Nutzung von Dante zu vermitteln und die Vor- und Nachteile des Systems zu diskutieren.

¹ Vgl. Stefan WEINZIERL und Karl M. SLAVIK, *Handbuch der Audiotechnik* (Berlin: Springer-Verlag, 2008). S. 1014

Inhaltliche Abgrenzung der Arbeit

Da diese Arbeit ein Kompendium zur Nutzung von Dante sein soll, welches IP-basiert ist, werden die Grundlagen von Netzwerken besprochen, nicht die Grundlagen der digitalen Audioübertragung. Auch eine klare Abgrenzung zu rein Ethernet-basierten Audioübertragungsmöglichkeiten wird gezogen. Die Eigenschaften dieser Netzwerke sind in Kapitel 2.3.1 dargelegt.

Mittlerweile hat sich der Funktionsumfang der Produkte des Herstellers Audinate stark erweitert. Mit Dante AV wird die Übertragung von Bilddaten im Dante-Netzwerk möglich. Da dies ein Kompendium für Tonschaffende sein soll, werden die erweiterten Möglichkeiten von Dante nicht behandelt. Genauso verhält es sich mit der Software Dante Domain Manager, welche zur Übertragung von Daten über die Grenzen des lokalen Netzwerks hinaus genutzt wird. Diese Funktionalität ist für den alltäglichen Gebrauch von Dante bei Live-Veranstaltungen nur selten notwendig und wird deshalb nicht behandelt.

Diese Arbeit konzentriert sich auf den Bereich der Audioinstallationen bei Live-Veranstaltungen wie beispielsweise Konzerte, oder Podien und wird deren Anforderungen als Diskussionsgrundlage nutzen.

Struktur der Arbeit

Im ersten Teil des Kompendiums (siehe 2.1) werden die Anforderungen an digitale Audioübertragungen erläutert.

Der zweite Teil (siehe 2.2) verschafft einen Überblick über die nötigen Grundlagen von Netzwerken allgemein. Auf dieser Grundlage werden im dritten Teil (siehe 2.4 und 2.5) der Aufbau und die Funktionen von Dante behandelt.

Im abschließenden Praxisbeispiel (siehe 3) wird die technische Implementierung von Dante in eine bestehende Audioperipherie aufgezeigt und die technischen und nicht-technischen Vor- und Nachteile der Nutzung diskutiert.

2 Kompendium

2.1 Anforderungen an die digitale Audioübertragung

Da das Anwendungsszenario dieser Arbeit Live-Veranstaltungen sind, gibt es drei wesentliche Anforderungen an die digitale Audioübertragung:

Latenz, Ausfallsicherheit und Qualität.

Was Live-Veranstaltungen im Vergleich zum Broadcast oder Studio-Bereich wesentlich unterscheidet, ist die Unmittelbarkeit. Zeitliche Verzögerungen im Übertragungsweg dürfen nicht zu hoch sein. Das gilt im Besonderen im Hinblick auf die Akteure. Gerade Musiker können bei zu hohen System-Latenzen sehr sensibel reagieren. Auch der Rezipient ist unmittelbar vor Ort und es gibt nahezu keinen zeitlichen Puffer, um etwaige Ausfälle zu beheben oder zu kaschieren.

Die dritte Anforderung ist auf dem Weg der Übertragung die Qualität des Audiosignals bestmöglich zu erhalten.

Latenz

Latenz beschreibt den zeitlichen Versatz zwischen Quelle und Senke eines Systems. Damit ist die Zeit gemeint, welche nach dem Eintritt eines Audiosignals in den Übertragungsweg vergeht, bis es am Ausgang desselben verfügbar ist.² In analogen Audio-Übertragungswegen ist Latenz kein Faktor.³ Dies ist bei der digitalen Audioübertragung, aufgrund der Analog-Digital-Wandlung, der Bearbeitung und Übertragung und der Digital-Analog-Wandlung des Signals, anders.

Neben der durch die diversen Signalwandlungen entstehenden Latenzen kommt es auch auf dem digitalen Übertragungsweg zu Verzögerungen, weshalb ein latenzarmer Übertragungsweg wichtig ist.

Bei Monitoring für Musiker ist beispielweise eine geringe Latenz absolut notwendig. Wenn die Latenzen hierbei zu hoch sind, führt das unweigerlich zu Irritationen in Timing und Spielgefühl. Die Grenzwerte variieren hierbei je nach Wahrnehmung stark. Eine Studie der AES, in der die Auswirkung von Latenz im Monitoring auf das Spielgefühl untersucht wurde, spricht von System-Latenzen im einstelligen Millisekunden-Bereich, ab denen eine spürbare Störung beim Musiker auftritt.⁴

² Vgl. Volker SMYREK, *Tontechnik für Veranstaltungstechniker*, 3. Aufl. (Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2009). S. 460

³ Vgl. WEINZIERL und SLAVIK. S. 967

⁴ Vgl. Michael LESTER und Jon BOLEY, „The effects of latency on live sound monitoring“, 2 (2007). S. 17

Es ist wichtig, dass die gemessenen Latenzen im System deterministisch sind. Gerade bei komplexen Beschallungssystemen kommt dies zum Tragen, da verlässliche Messungen nicht nur im Frequenzgang eines Signals, sondern auch bezüglich der Verzögerung unabdinglich für eine korrekte Einstellung des Systems sind. Dies gilt im Besonderen für Line-Array-Systeme, bei denen die, für einzelne Signalwege im Array unterschiedlich eingestellten, Verzögerungen maßgeblich für die Richtwirkung und das Abstrahlverhalten des gesamten Arrays sind. Gleiches gilt bei der Einrichtung von Delay-Lines oder Monitoring-Systemen, bei denen die einzelnen Lautsprechersysteme mittels Verzögerungen aufeinander abgestimmt werden, um Phasing-Effekte zu minimieren und die Verortung von Schallquellen zu verbessern.

Ausfallsicherheit

Eine möglichst hohe Ausfallsicherheit ist als Anforderung im Anwendungsszenario dieser Arbeit sehr wichtig. Während einer Veranstaltung kann ein Ausfall den reibungslosen Ablauf gefährden. Das bedeutet für jegliche benutzte technische Einrichtung, dass sie im Havariefall weiterlaufen muss. Für die digitale Audioübertragung im Besonderen bedeutet dies die Schaffung eines redundanten Signalweges, um dies zu gewährleisten. Dieser zweite Signalweg sollte bei einer Havarie möglichst ohne Unterbrechung des Signalfusses den Hauptsignalweg vollumfänglich ersetzen, so dass kein hörbarer Übergang oder Unterschied entsteht.

Qualität

Um dem Rezipienten bzw. dem Zuhörer ein möglichst gutes Klangergebnis zu ermöglichen, ist eine hohe Signalqualität unabdinglich. Idealerweise gewährleistet eine professionelle digitale Audioübertragung eine verlustfreie und unkomprimierte Ausgabe des eingegebenen Signals. Bei der analogen Übertragung kann die Güte des Übertragungsmediums die Qualität des Signals maßgeblich beeinflussen, ohne dass die Übertragung an sich zusammenbricht. In der digitalen Welt muss man hier klar zwischen den Begriffen Audiostreaming und Audio over IP (kurz AoIP) unterscheiden. Das wird in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

2.2 Netzwerkgrundlagen

Um verstehen zu können, wie ein IP-basiertes Übertragungsprotokoll wie Dante funktioniert, ist es wichtig, über Grundkenntnisse über die Funktionsweise von Netzwerken zu verfügen. Da eine umfassende Beschreibung eines Netzwerks mit all seinen Protokollen und Anwendungsmöglichkeiten den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde, werden hier nur die für die professionelle digitale Audioübertragung in Netzwerken relevanten Bereiche behandelt. Das Adjektiv „professionell“ in diesem Zusammenhang soll zur fachlichen Abgrenzung von Audiostreams dienen. Mehr dazu in Kapitel 2.3.

Netzwerke werden weltumspannend zur Übermittlung und Speicherung von Information benutzt. In den meisten Unternehmungsbereichen, ob politisch, privat oder kommerziell, bilden Netzwerke die Kommunikationsbasis. Ob auf lokaler Ebene oder im Weitverkehrsbereich: Der Ausbau der Vernetzung wird immer schneller größer. Der Ausbau des Internets, sowie die sich rapide erweiternden Anwendungsgebiete abseits des Internets, stellen hohe Anforderungen an Netzwerkssysteme. Diese sind niedrige Kosten und einfache Handhabung bei größtmöglicher Effizienz, Stabilität und Bandbreite des Systems.⁵ Die meisten Anwendungen nutzen hardware-, software- und protokollseitig standardisierte Technologien. Auch bei zeitkritischen Anwendungen wie der verlustfreien Audioübertragung kann auf ebendiese zurückgegriffen werden.

Unterschieden werden Netzwerkinfrastrukturen anhand ihrer räumlichen Ausdehnung. Für diese Arbeit maßgeblich relevant sind Local Area Networks (LAN), welche ein Netzwerk innerhalb einer geographisch eingeschränkten Fläche, beispielsweise einem Gebäude, beschreiben.⁶

2.2.1 OSI – Referenzmodell

Das OSI-Referenzmodell (Open Systems Interconnection) ist ein logisches Modell zur Veranschaulichung von Kommunikationsvorgängen zwischen den Mitgliedern eines Netzwerks. Es wurde in den 1970er Jahren entwickelt und wird seit 1983 von der internationalen Organisation für Normung (ISO) herausgegeben.⁷ Es definiert sieben aufeinander aufbauende Schichten. Die Schichten 1 bis 4 beziehen sich auf netzorientierte Vorgänge, während die Schichten 5 bis 7 anwendungsbezogen sind. Mithilfe dieser Schichten kann die Kommunikation innerhalb eines Netzwerks strukturiert werden (siehe Abbildung 1).

⁵ Vgl. Wolfgang RIGGERT, *Rechnernetze*, 5. Aufl. (München: Carl Hanser Verlag, 2012). S.13

⁶ Vgl. Christian BAUN, *Computernetze kompakt*, 2. Aufl. (Berlin: Springer-Verlag, 2012). S. 18

⁷ Vgl. BAUN. S. 40

Diese Struktur dient als Leitlinie, nicht als Pflicht. Netzwerkprotokolle und Dienste, welche den Kommunikationsablauf regeln und Services bereitstellen, können in die Schichten eingeordnet werden. Das erleichtert die Orientierung und definiert klare Fachtermini.⁸

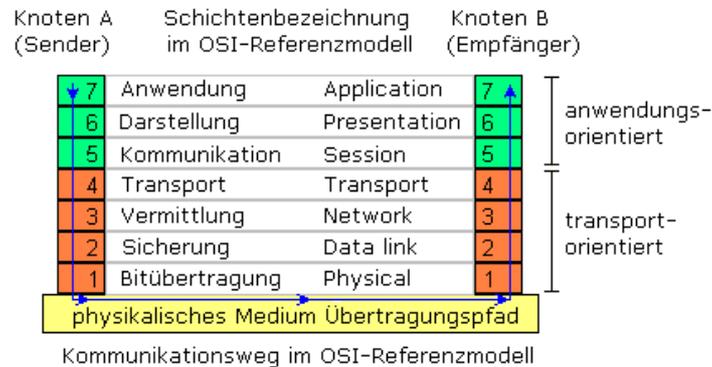


Abbildung 1: OSI - Referenzmodell⁹

In den folgenden Kapiteln sollen die für die digitale Audioübertragung wichtigen Schichten 1 bis 4 erläutert werden. Die irrelevanten Schichten 5 bis 7 werden kurz beschrieben.

2.2.1.1 Layer 1 – Bitübertragungsschicht

In der Bitübertragungsschicht, auch Physical Layer genannt, sind die elektrischen, funktionellen und mechanischen Parameter der Netzwerkkommunikation festgelegt. Funktion der Schicht ist es, die Basis der Übertragung zu bilden. Dies ist die physikalische Verbindung zwischen zwei Punkten im Netzwerk und die Sicherstellung der Funktionalität der Übertragung. Die Parameter sind in drei verschiedene Bereiche aufgeteilt:

- Der Nahbereich (LAN – Local Area Network)
- Der Bereich der mittleren Entfernungen (MAN – Metropolitan Area Network)
- Der Fernverbundbereich (WAN – Wide Area Network)¹⁰

Diese Bereiche haben hinsichtlich Übertragungsgeschwindigkeit und Bandbreite unterschiedliche Anforderungen. Deshalb sind jeweils unterschiedliche Parameter festgelegt. Diese sind Signalfrequenz, Richtung der Übertragung, Kabellänge, Kabelart und Stecker.¹¹

⁸ Vgl. RIGGERT. S. 26

⁹ https://www.elektroniktutor.de/internet/net_pict/osi.png [Stand 01.01.20]

¹⁰ Vgl. Rüdiger SCHREINER, *Computernetzwerke*, 5. Aufl. (München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014). S. 4

¹¹ Vgl. BAUN. S. 36

Es werden hauptsächlich drei Medien genutzt.

- Kupfer: Signalisierung durch elektrische Impulse (siehe 2.2.5.3)
- Glasfaser: Signalisierung durch optische Signale (siehe 2.2.5.3)
- Wireless: Signalisierung durch Radiowellen¹²

In jedem Medium werden Bitfolgen übertragen. Um zu gewährleisten, dass die Bitfolgen immer richtig interpretiert werden, sind Codierungsschemata notwendig. Somit werden Bits zu logischen Einheiten zusammengefasst und Informationen können verlässlich abgebildet werden.

2.2.1.2 Layer 2 – Sicherungsschicht

Die Sicherungsschicht, oder auch Data Link Layer genannt, hat die Aufgabe den übertragenen Bitstrom in logische Einheiten zusammenzufassen. Je nach Übertragungsmedium (siehe 2.2.1.1) entstehen unterschiedliche Frames. Diese Rohdaten bekommen eine Prüfsumme, damit Abweichungen vom Original, die möglicherweise auf dem Übertragungsweg entstehen, erkannt werden können. Ob eine Fehlerkorrektur eingeleitet wird, hängt davon ab ob es sich um einen gesicherten oder ungesicherten Dienst handelt.¹³ Die Aufgaben der Sicherungsschicht werden in zwei Bereiche getrennt:

- Media Access Control (MAC) regelt den Zugriff auf das Medium bzw. die Adressierung einzelner Knoten und Geräte mittels sogenannter MAC-Adressen¹⁴. Zur Regelung gibt es zwei unterschiedliche Methoden:
 - o Kontrolliert: Jedes Gerät erhält ein Übertragungs-Zeitintervall
 - o Wettkampfbasiert: Alle Geräte konkurrieren um das Medium
- Logical Link Control (LLC) betreibt Flusskontrolle und macht Fehleranalyse.

Wie ein Netzwerk funktioniert ist stark von dieser Schicht abhängig, da sie die grundsätzliche Kommunikationsweise definiert.

2.2.1.3 Layer 3 – Vermittlungsschicht

Im sogenannten Network-Layer ist die Aufgabe die Vermittlung von Datenpaketen über Abschnittsgrenzen hinweg. Dafür werden logische Adressen (IP-Adressen) definiert. Die Vermittlungsschicht verpackt die Daten der darüber liegenden Vermittlungsschicht in Pakete (siehe 2.2.3.1).¹⁵ Diese werden dann an der Senke wieder von der Vermittlungsschicht im Frame der Sicherungsschicht erkannt und entpackt. Eine weitere Aufgabe ist das Routing. Ein Paket muss auf dem Weg zum Ziel diverse Netzknoten durchqueren. Da es in den meisten

¹² Vgl. RIGGERT. S. 32

¹³ Vgl. RIGGERT. S. 33

¹⁴ MAC-Adresse = 48 Bit (6 Byte) langer, eindeutiger Identifikator eines Netzwerkgeräts

¹⁵ Vgl. BAUN. S. 37

Fällen viele mögliche Wege gibt, wird in sogenannten Routing-Tabellen, welche von Routing-Protokollen geschrieben werden, der günstigste Weg zum jeweiligen Ziel beschrieben.¹⁶ Mögliche Kriterien dafür sind Sicherheit, Kosten, Datendurchsatz und Datenlastverteilung. Es entsteht ein logisches Netzwerk, das im Gegensatz zum physikalischen Netzwerk der unteren Schichten keine physischen Verbindungen wie Kabel kennt.¹⁷ Dante baut maßgeblich auf den Protokollen und Diensten der Schichten 3 und 4 auf (siehe 2.2.3).

2.2.1.4 Layer 4 – Transportschicht

Die Transportschicht stellt durch Sicherungsprotokolle einen zuverlässigen Datentransport sicher. Um zu ermöglichen, dass mehrere Anwendungen gleichzeitig eine Verbindung nutzen können, überwacht die vierte Schicht des OSI-Referenzmodells mittels Flusskontrolle die Pakete der Netzwerkschicht und regelt das Multiplexing der Daten. Unter Multiplexing versteht man Verfahren, die Daten verschachteln, um sie gemeinsam auf einem Übertragungsweg zu übertragen.¹⁸ In den Schichten 2 und 3 erfolgt eine physische und logische Adressierung der Netzwerkgeräte. Die vierte Schicht adressiert mittels Portnummern direkt laufende Prozesse. Dies sorgt dafür, dass die Daten der Vermittlungsschicht auch bei den richtigen Anwendungen landen. Es existieren dafür verbindungsorientierte und verbindungslose Dienste. Die verbindungslosen Dienste funktionieren analog zum Prinzip des Briefkastens. Es wird keine Verbindung von Sender zu Empfänger aufgebaut, sondern einfach das Paket zugestellt. Eine Überprüfung des Erhalts oder der Vollständigkeit und eine Aufzeichnung des Weges findet nicht statt. Vorteil dieser Art der Kommunikation ist ein hoher Datendurchsatz.¹⁹ Ein Beispiel für ein verbindungsloses Transportprotokoll ist das UDP – User Datagram Protocol. Bei verbindungsorientierten Diensten (Beispiel: Telefonverbindung) kontrollieren Sender und Empfänger ihre Verbindung. Die Daten werden vor Versand kontrolliert und nach Erhalt auf Fehler überprüft und eventuell neu angefordert. Die Verbindung ist solange offen, bis die Teilnehmer diese wieder kontrolliert abbauen. Das ermöglicht eine sehr sichere Übertragung von Information.²⁰ Ein Beispiel für ein verbindungsorientiertes Transportprotokoll ist das TCP – Transport Control Protocol.

¹⁶ Vgl. <<https://www.kunbus.de/internet-grundlagen-vermittlungsschicht-transportkontrolle.html>> [zugegriffen 28. Dezember 2019].

¹⁷ Vgl. RIGGERT, S. 33

¹⁸ Vgl. RIGGERT, S. 38

¹⁹ Vgl. BAUN, S. 38

²⁰ Vgl. SCHREINER, S. 5

2.2.1.5 Layer 5 – Kommunikations-/Sitzungsschicht

Die Kommunikationsschicht definiert Regeln für die bidirektionale Kommunikation zwischen Anwendungen in unterschiedlichen Endgeräten. Anhand der Protokollangebote der Schicht 4 werden Verbindungen organisiert.²¹ Die Schicht stellt Protokolle und Dienste für den korrekten Ablauf zwischen 2 Kommunikationsteilnehmern zur Verfügung.

2.2.1.6 Layer 6 – Darstellungsschicht

Die Daten-Darstellungsformate von Prozessoren können sich unterscheiden. Somit wird in einem Netzwerk zwingend eine Formatanpassungsebene notwendig. Durch in dieser Schicht befindliche Protokolle und Dienste für diverse Konvertierungs- und Kompressionsverfahren können Fehlinterpretationen durch Formatkonvertierung vermieden werden.

2.2.1.7 Layer 7 – Anwendungsschicht

Die Anwendungsschicht steht im direkten Dialog mit der Software, welche auf das Netzwerk zugreift. Mit den Diensten und Protokollen dieser Schicht kann der Anwender auf das Netzwerk zugreifen. Ein sehr bekanntes Protokoll ist E-Mail.²²

2.2.2 Ethernet

Schon seit circa 30 Jahren ist Ethernet, welches sich auf den OSI-Modellschichten 1 und 2 bewegt, der am meisten verbreitetste Netzwerkstandard weltweit. Ursprünglich auf der Insel Hawaii entstanden, nutzt es das Basisbandverfahren, um die volle Bandbreite des Mediums nutzen zu können, ohne dabei die Übertragungsfrequenz modulieren zu lassen. Hierbei funktioniert die Übertragung mittels eines Halbduplexverfahrens, was die Übertragung in beide Richtungen, aber nicht zeitgleich, zulässt.²³ Teilnehmer in einem Ethernet-Netzwerk werden mittels eines global einzigartigen 48-Bit-Schlüssels, der sogenannten MAC-Adresse (siehe 2.2.1.2), identifiziert und hängen in einer Bustopologie²⁴ (Daisy Chain, siehe 2.5.1) zusammen. Durch den stetig wachsenden Bedarf an Bandbreite wurde das Ethernet immer weiterentwickelt. Am Anfang standen noch Übertragungsraten von 10 Mbit/s im Raum, während mittlerweile Geschwindigkeiten im Gigabit-Bereich normal sind. Heutzutage existieren zahlreiche Weiterentwicklungen und Varianten des Ethernet-Standards. Beispielsweise sind aktuelle Ethernet-Netze in einer Stern-Topologie aufgebaut. Das bedeutet, dass alle Teilnehmer an einem zentralen Verteiler (siehe 2.2.5.1) angeschlossen

²¹ Vgl. SCHREINER. S. 6

²² Vgl. RIGGERT. S. 34

²³ Vgl. „Netzwerk Betriebsarten“ <http://www.suicidal.de/doc/lexikon/netzwerk_betriebsarten.htm> [zugegriffen 3 Januar 2020].

²⁴ Bustopologie = Alle Stationen sind an ein gemeinsames passives Übertragungsmedium angeschlossen

sind. Die praktischen Varianten sind in der IEEE 802.3-Spezifikation niedergeschrieben. Hier sind maximale Leitungslängen, Bandbreiten und Kabeltypen spezifiziert.²⁵ Für Dante sind die Entwicklungen ab dem 1995 entwickelten Standard 802.3u mit 100 Mbit/s, welcher als 100Base-TX bezeichnet wird, aufwärts interessant.²⁶ Ethernet mit 100 Mbit/s Datenrate wird Fast Ethernet genannt, während Ethernet mit 1000Mbit/s Gigabit Ethernet heißt. Die Bezeichnungskonvention enthält 3 Parameter: Die maximale Übertragungsrate, den verwendeten Kabeltyp und die größtmögliche Leitungslänge (siehe Tabelle 5). Weitere Informationen zu den für AoIP nötigen Netzwerk-Geschwindigkeiten sind in Kapitel 2.4 zu finden.

CSMA/CD-Algorithmus

Um zu verstehen, warum es nicht schon viel früher AoIP-Lösungen gab, muss man die Ethernet-Technologie im Hinblick auf die Anforderung der Ausfallsicherheit und der geringen Latenz überprüfen. Ursprünglich entspricht das Ethernet einer Bus-Topologie mittels sogenannten Hubs.²⁷ Idee dessen ist es, dass jeder Teilnehmer ständig zuhört, was auf der Leitung passiert, aber nur dann selbst sprechen darf, wenn es ihm zugeteilt wird. Der auf der zweiten Schicht des OSI-Referenzmodells angesiedelte CSMA/CD²⁸-Algorithmus ist ein Zugriffsverfahren von Ethernet, welches genau diese Aufgabe erfüllt. Während sich die Protokolle und die Hardware von Ethernet immer weiter verändert hat, blieb dieses Verfahren weitestgehend gleich. Dieser Algorithmus gewährleistet, dass alle Stationen in einem Ethernet-Netzwerk jederzeit gleichberechtigten Zugriff auf das Übertragungsmedium haben. Damit ist das Übertragungsnetz, welches zumeist auf mehreren Komponenten basiert, für die Teilnehmer eine Gesamtheit. Zudem steuert CSMA/CD das Senden und Empfangen jeder Station und verhindert durch die Überwachung des Datenstroms Sendekonflikte.²⁹ In der Realität kommt es mit steigender Größe der Netzwerkknoten und beteiligter Nutzer und damit steigenden Signallaufzeiten jedoch relativ oft zu Kollisionen. Diese führen unweigerlich zu einer Verringerung der Übertragungskapazität des Mediums. Praktisch liegt die Kapazität bei guten Bedingungen bei maximal 70% der möglichen Bandbreite.³⁰ Man sieht also schnell, dass ein Hub-basiertes Netzwerk, welches mit dem Halb-Duplex-Basisbandverfahren läuft, in puncto Ausfallsicherheit und Latenz nicht gut abschneidet. Deshalb empfiehlt es sich bei echtzeit-sensitiven Audioanwendungen wie AoIP (z.B.: Dante), anstatt Hubs Switches (siehe

²⁵ Vgl. <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1406171.htm>> [zugegriffen 3 Januar 2020].

²⁶ Vgl. <<https://www.audinate.com/faq/what-difference-between-100mbps-1000mbps-and-10000mbps-switch-and-how-does-affect-dante>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

²⁷ Vgl. „CSMA/CD und Kollisionen (Ethernet)“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1406181.htm>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

²⁸ CSMA/CD = Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

²⁹ Vgl. RIGGERT. S. 76

³⁰ Vgl. „CSMA/CD und Kollisionen (Ethernet)“.

2.2.5.1) zu verwenden. Im Gegensatz zu Hubs kommunizieren Switches mittels Vollduplex. Das bedeutet, dass zeitgleich in beide Richtungen gesendet werden kann.³¹ Die sogenannte Kollisionsdomäne verkleinert sich dabei auf ein Gerät. Eine Kollisionsdomäne beschreibt alle Netzwerkgeräte, welche um ein Übertragungsmedium konkurrieren.³² Deshalb sind Switches nicht auf den CSMA/CD-Algorithmus angewiesen und die dadurch entstehende Latenz und die durch Kollisionen erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit sinkt.

Der Ethernet-Frame

Alle OSI-Schichten transportieren Daten. Allerdings interessieren Sie sich nicht für diese. Sie verpacken sie und versenden sie. In der ersten Schicht ist dies die Konvertierung der Daten in die entsprechenden Signalisierungsform des Mediums. In der zweiten Schicht sind die MAC-Adressen relevant. Ein Datenpaket auf Schicht 2 des OSI-Referenzmodells nennt man Frame. Die nacheinander folgenden Teile des Frames sind:

Bestandteil	Funktion	Größe in Byte
Präambel	Bitmuster zur Synchronisation	7
SFD	Starting Frame Delimiter, zeigt Beginn des Frames	1
DMAC	Senke-MAC-Adresse	6
SMAC	Quell-MAC-Adresse	6
Type	Typ des Schicht 3-Protokolls, welches transportiert wird	2
Data	Nutzdaten höherer Schichten ineinander verschachtelt	46-1500
Padding	„Füll“-Bits, falls das Gesamt-Frame kleiner als 64 Byte ist	
FCS	Frame Check Sequence, Prüfsumme zur Fehlererkennung	4

Tabelle 1: Bestandteile eines Ethernet-Frame

³¹ Vgl. RIGGERT. S. 188

³² Vgl. RIGGERT. S. 76

2.2.3 Für Dante genutzte Netzwerkprotokolle

Dante nutzt teils offene, teils proprietäre Protokolle zur Realisierung eines professionellen Audiostreams. Die verwendeten Protokolle sind alle IP-basiert.³³ Da die proprietären Protokolle von Audinate unter Verschluss gehalten werden, gibt es hier nur sehr lückenhafte Information. Die offenen Protokolle werden hier besprochen.

2.2.3.1 Internet Protocol

Das Internet Protocol ist das am weitesten verbreitetste Verbindungsprotokoll und ist in der dritten Schicht des OSI-Referenzmodells zu finden. Es ist verbindungslos. Das bedeutet, dass jedes IP-Daten-Paket an sein Ziel gebracht wird, ohne dass der Weg dorthin aufgezeichnet wird. (siehe 2.2.1.4) Eine solitäre Adressierung der Geräte via MAC-Adressen ist wegen des globalen Ausmaßes der Netzwerke nicht sinnvoll. Deshalb gibt es neben der physischen MAC-Adresse für jedes Netzwerkgerät eine logische IP-Adresse. Eine IP-Adresse kann einem einzelnen oder einer Gruppe von Empfängern zugeordnet sein.³⁴ Hier wird die IP-Version 4 behandelt, da sie für Dante relevant ist. Die erweiterte Version 6 befindet sich noch im Aufbau und wird in Dante Netzwerken noch nicht eingesetzt.

Die IP-Adresse

Eine IP-Adresse besteht aus vier durch einen Punkt getrennte Bytes, welche jeweils acht Bit enthalten. Somit erstreckt sich der Adressbereich einer IPv4-Adresse von 0.0.0.0 bis 255.255.255.255. Das bedeutet, dass maximal 4.294.967.296 Adressen vergeben werden können.³⁵ Zur besseren Übersicht wurde eine Aufteilung der verfügbaren Adressen in Klassen erstellt.³⁶ Eine IP-Adresse ist in zwei Teile aufgeteilt. Die Netzwerkadresse und die Hostadresse. Zwei Geräte eines Netzwerks haben also die gleiche Netzwerkadresse, aber eine unterschiedliche Hostadresse. Das erste Byte ist der Indikator, in dem in der IP-Adresse Netzwerkadresse und Hostadresse unterschieden werden. Die Verwaltung und Koordination dieser logischen Adressen wird global von der Internet Assigned Numbers Authority (IANA) übernommen.³⁷ Sie vergibt Adressbereich an Provider, Konzerne, Universitäten, etc. In der folgenden Tabelle sind die festgelegten Adressklassen und die Aufteilung der beiden Adressteile (Netzwerkadresse und Hostadresse) aufgeführt.

³³ Vgl. „Dante Overview | Audinate“ <<https://audinate.com/solutions/dante-overview>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

³⁴ Vgl. BAUN. S.117, S. 120

³⁵ Vgl. BAUN. S. 145

³⁶ Vgl. SCHREINER. S. 66, S. 82

³⁷ Vgl. Anatol BADACH und Erwin HOFFMANN, *IP-NETZE*, 4. Aufl. (München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019). S. 46

Klasse	Zweck	Adressbereich	Adressaufteilung
A	Großkonzerne, Militär, Universitäten, Provider	0.0.0.0 – 127.255.255.255	8 Bit – 24 Bit
B	Mittlere Unternehmen, Universitäten, Provider	128.0.0.0 – 191.255.255.255	16 Bit – 16 Bit
C	Kleine Unternehmen, Provider	192.0.0.0 – 223.255.255.255	24 Bit – 8 Bit
D	Multicast-Adressen (siehe Kapitel 2.2.4.2)	224.0.0.0 – 239.255.255.255	4 Bit – 28 Bit
E	Entwicklungs- und Testzwecke	240.0.0.0 – 255.255.255.255	4 Bit – 28 Bit

Tabelle 2: IP-Adressklassen, global

Man kann erkennen, dass es bei diesem Konzept recht schnell zu einer Knappheit an Adressen kommt. Für private Netze, wie zum Beispiel ein lokales AoIP-Netz, kommt hier die RFC 1918³⁸, eine Spezifikation der IETF (Internet Engineering Taskforce) ins Spiel. Sie definiert folgenden Adressbereich für den privaten Gebrauch:

- 10.0.0.0 – 10.255.255.255
- 172.16.0.0 – 172.31.255.255
- 192.168.0.0 – 192.168.255.255
- 169.254.0.0 – 169.254.255.255 (genannt Link Local, ein Adressbereich, der der Selbstzuweisung einer IP eines Gerätes dient, bei dem die automatische Adresskonfiguration durch einen DHCP-Server (siehe 2.2.3.5) nicht erfolgt ist.³⁹)

Die Gefahr besteht nun darin, dass diese Adressen vielfach verwendet werden und es im World Wide Web zu Konflikten kommt. Die Lösung dafür ist das Network Address Translation (NAT) – Verfahren. Hierbei wird für den Verkehr vom internen Netz zum Internet und zurück die Ursprungsadresse des internen Netzwerkgeräts durch die IP-Adresse des Routers (siehe 2.2.5.2) ersetzt.⁴⁰ Dieses Verfahren erzeugt Latenz und ist deshalb für AoIP mit Vorsicht zu betrachten.⁴¹ Allerdings ist NAT für die meisten Anwendungen bei AoIP insofern wenig relevant, als dass sich die betreffenden Netzwerkteilnehmer in einem LAN befinden.

Um den Adressraum noch besser zu unterteilen werden sogenannte Subnetze verwendet. Der Netzwerkadministrator kann die verfügbaren Hostadressen mittels einer Netzmaske in Subnetze aufteilen. Die Subnetzmaske legt fest, welcher Bereich der IP-Adresse zum Netzwerkteil gehört. Beispielhaft besitzt Adressbereich 192.168.1.0 mit einer Subnetzmaske 255.255.255.0 256 Hostadressen. Dazu kommt aber, dass man von den 256 Adressen zwei abziehen muss, da per Konvention noch die niedrigste Adresse (192.168.1.0) als

³⁸ Vgl. Geert Jan de GROOT u. a., „Address Allocation for Private Internets“ <<https://tools.ietf.org/html/rfc1918>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

³⁹ Vgl. „IPv4-Adressen“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/2011211.htm>> [zugegriffen 14 Januar 2020].

⁴⁰ Vgl. P. FRANCIS und K. EGEVANG, „The IP Network Address Translator (NAT)“ <<https://tools.ietf.org/html/rfc1631>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

⁴¹ Vgl. RIGGERT. S. 146

Netzdeskriptor (Adresse für das Netz selbst), und die höchste Adresse (192.168.1.255) als Broadcast-Adresse (siehe 2.2.4.3) genutzt wird.⁴² Somit sind 254 Adresse zur Vergabe in diesem Subnetz frei.

Das IP-Paket

Das IP-Paket ist im Datenteil des Ethernet-Frames (Schicht 2) untergebracht. Ein IP-Paket besteht aus einem Kopfteil und einem Datenteil, in dem die Nutzdaten höherer Schichten gelagert sind. Nachfolgend sind die Bestandteile mit ihren Funktionen und Größen aufgeführt:

Bestandteil	Funktion	Größe in Bit
Version	Version des IP-Protokolls	4
IHL	Internet Header Length, Länge des Kopfes	4
TOS	Type of Service, Eigenschaften und Priorität des Pakets	8
Length	Gesamtlänge des Pakets (maximal $2^{16} = 65535$ Byte)	16
Ident	Paketnummerierung, in einem Datenstrom fortlaufend	16
Flags	Kennzeichen zur Fragmentierung, siehe unten	3
Offset	Fragment-Offset, siehe unten	13
TTL	Time to Live, siehe unten	8
Protocol	Hinweis auf die Beschaffenheit des enthaltenen Schicht-4-Datenpaket	8
Header-CS	Prüfsumme des Headers	16
Sender-IP	IP-Adresse des Senders	32
Destination-IP	IP-Adresse des Empfängers	32
Padding	Daten zu Routing, Statistik, Diagnose oder zum Auffüllen	2
Data	Nutzdaten	-

Tabelle 3: Bestandteile eines IP-Pakets⁴³

Es gibt im Header eines IP-Pakets zwei sehr wichtige Bestandteile.

Kann die IP-Adresse des Empfängers im Netz nicht gefunden werden, würde ein IP-Paket möglicherweise für immer im Netz seine Kreise drehen. Dafür hat es ein Verfallsdatum. Jedes Mal, wenn ein Paket einen Hop durchführt (einen Router überquert und damit das Subnetz/Netz wechselt), wird der Time to Live-Wert um eins vermindert. Wenn der Wert bei null angekommen ist, wird der nächste Router das Paket nicht mehr weiterleiten. Normalerweise ist der Anfangswert 255.⁴⁴

Jedes Netzwerk hat eine sogenannte MTU, Maximum Transport Unit. Hier wird die maximale Größe eines IP-Pakets festgelegt. Durchschnittlich liegt dieser Wert bei 1500 Byte Nutzdaten. Ist das zu versendende Paket größer, muss es zerteilt werden. Das wird Fragmentierung

⁴² Vgl. BAUN. S. 124

⁴³ Vgl. „IPv4-Header“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/2011241.htm>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

⁴⁴ Vgl. RIGGERT. S. 117

genannt. Das Feld Flags gibt an, ob ein Paket Teil eines großen, fragmentierten Pakets ist. Wenn dem so ist gibt Offset an, um welches Paket der Fragmentierung es sich handelt. Damit können die Pakete am Bestimmungsort wieder in der richtigen Reihenfolge assembliert werden.⁴⁵ Durch die Verbindungslosigkeit des Internet Protocol und die daraus resultierende hohe Transportgeschwindigkeit bietet es sich also für AoIP an. Aus Sicht der vierten Schicht des OSI-Referenzmodells führt dies aber zu diversen Unwägbarkeiten. Die Pakete gehen häufig verloren oder erreichen ihre Zieladresse in verkehrter Reihenfolge. Die Gründe dafür sind, dass Netze selten statisch sind und die Infrastruktur sich oft ändert. Um diese Unwägbarkeiten auszugleichen, werden sogenannte Transportprotokolle genutzt.⁴⁶ Das für AoIP wichtigste dieser Protokolle ist das User Datagram Protocol (UDP), welches im nächsten Kapitel behandelt wird.

2.2.3.2 User Datagram Protocol

Das UDP agiert auf der Transportschicht. Also auf Schicht 4. Hier findet die Kommunikation zwischen Ports statt. Ein Port definiert, welcher Dienst auf einem Gerät angesprochen wird, bzw. an welchen Dienst die Pakete, die in dieser Schicht Segmente genannt werden, ausgeliefert werden. Bei UDP gibt es 65535 mögliche Ports.⁴⁷ Diese sind in drei Gruppen aufgeteilt:

- Port 0 – 1023: Well Known Ports, Fest zugeordnete Anwendungen
- Port 1024 – 49151: Registered Ports, von Entwicklern registrierte Ports
- Port 49152 – 65535: Private Ports: frei verwendbare, nicht registrierte Ports.

Die nicht privaten Ports werden, wie auch die globalen, nicht privaten IP-Klassen von der IANA vergeben.

UDP ist, im Vergleich zum auf gleicher Ebene gelagerten TCP, verbindungslos. Das bedeutet, dass keine Sicherung der Übertragung und Speicherung des Übertragungsweges stattfindet. Dafür überträgt UDP die Segmente schnellstmöglich. Während es bei TCP im Falle eines verloren Pakets zu einem Aussetzer wegen der erneuten Anforderung desselben käme, gibt es diesen Aussetzer bei UDP nicht. Das führt zu dreimal so hoher Übertragungsgeschwindigkeit gegenüber TCP.⁴⁸ Die Bestandteile eines UDP-Segments sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

⁴⁵ Vgl. SCHREINER. S. 85

⁴⁶ Vgl. BAUN. S. 147-148

⁴⁷ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S 177

⁴⁸ Vgl. RIGGERT. S. 161

Bestandteil	Funktion
Quell- und Zielporntnummer	Portnummern von Quelle und Senke
Länge	Größe des Segments in Byte inkl. Header
Prüfsumme	zur Fehlererkennung

Tabelle 4: Bestandteile eines UDP-Segments

Ob UDP für echtzeit-kritische Anwendungen wie AoIP verwendet werden kann, hängt in hohem Maße davon ab, ob die Anwendung, welche auf UDP basiert, in der Lage ist, die durch die Verwendung entstehenden Probleme zu bewältigen. Diese sind vorrangig der Verlust von Segmenten und die falsche Reihenfolge derselben. Allerdings kommen in geschlossenen Netzwerken Paketverluste eher selten vor, weshalb diese in Kauf genommen werden.

2.2.3.3 Real-Time Transport Protocol

Da das verbindungslose UDP keine Funktion zur Feststellung von Paketverlusten beim Empfänger hat, wird bei Dante, auf UDP aufbauend, das Real-Time Transport Protocol (RTP) verwendet.⁴⁹ Es beruht auf dem Best-Effort-Prinzip⁵⁰ und verhindert dadurch hohe Laufzeitverzögerungen. Außerdem stellt RTP zwei für den korrekten Empfang von Mediendaten wichtige Funktionen bereit. Es versieht den Datenpaket-Strom mit einem Zeitstempel, mit dessen Hilfe der Empfänger die Wiedergabe steuern kann und gibt den Paketen aufsteigende Nummern, damit der Empfänger Paketverlust oder falsche Reihenfolge der Pakete erkennen kann.⁵¹ Das Real-Time Transport Protocol garantiert also nicht den rechtzeitigen Empfang eines Pakets, sondern bietet dem Empfänger die Möglichkeit mit den empfangenen Daten besser umzugehen.

Das Real-Time Transport Control Protocol (RTCP), welches für das Erkennen von Paketverlusten in einem Unicast- oder Multicast-Stream (siehe Kapitel 2.2.4) zuständig ist, wird als Ergänzung zu RTP eingesetzt. Damit kann der Empfänger seinen Jitter-Puffer (siehe 2.2.3.4) flexibel an das Aufkommen von Paketverlusten anpassen.⁵² Die Informationen von RTP und RTCP werden bei der Übertragung in UDP verkapselt.⁵³ In puncto der Anforderung der geringen Latenz in AoIP-Systemen, bietet sich also die Nutzung von den Protokollen UDP und RTP zur Datenübertragung an. Dante nutzt beide davon.

⁴⁹ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 175

⁵⁰ Das Best-Effort-Prinzip besagt, dass Datenpakete je nach zur Verfügung stehenden Ressourcen schnellstmöglich übertragen werden.

⁵¹ Vgl. Chris LECROY und Gregory VAUGHAN, *United States Patent US 6,996,624 B1*, 2006.

⁵² Vgl. „Was ist RTP (Real-Time Transport Protocol)?“ <<https://www.computerweekly.com/de/definition/RTP-Real-Time-Transport-Protocol>> [zugegriffen 6 Januar 2020].

⁵³ Vgl. RFC 3550' <<https://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>> [accessed 6 January 2020].

2.2.3.4 Precision Time Protocol

Bei der digitalen Audioübertragung wird das analoge Audiosignal in Samples digitalisiert. Übliche Raten reichen von 44100 – 192000 Samples pro Sekunde. Um eine adäquate Wiederherstellung des Audiomaterials sicherstellen zu können, bedarf es also einer Instanz, welche die Geschwindigkeit der Wiedergabe der Samples steuert und möglichst konstant hält. Das ist der Takt. AoIP-Netze zeichnen sich durch einen sehr präzisen Takt aus. Dafür wird das Precision Time Protocol verwendet.⁵⁴ Das Protokoll kommt eigentlich aus der industriellen Messtechnik und kann mit bis zu sub-nanosekundengenauer Präzision arbeiten. PTP operiert nach dem Master/Slave-Prinzip. Es wird also ein Gerät ausgewählt, welches die Rollen des Taktgebers übernimmt, während alle anderen dann auf dieses Gerät synchronisiert werden. Eine Synchronisation funktioniert in zwei parallelen Operationen. Der Slavetakt wird an den Mastertakt angepasst, während gleichzeitig die Differenz, oder Offset, gemessen wird. Es wird also ständig angeglichen.⁵⁵ Es gibt zwei Versionen von PTP. Die ältere Version, IEEE 1588-2002, ist nicht mit der neuen Version, IEEE 1588-2008, kompatibel. Für Dante wird die neue Version des Protokolls benutzt, da, neben anderen Neuerungen, nicht nur an Multicast-, sondern auch an Unicast-Adressen (siehe 2.2.4) gesendet werden kann.

Ein eklatanter Vorteil von PTP ist, dass es in Verbindung mit RTP die für IP-Netzwerke typischen Jitter-Effekte verhindert. Dies sind Schwankungseffekte bei asynchroner Übertragung. Je größer der zeitliche Abstand einer dezierten Paket-Latenz zum Mittelwert aller Paket-Latenzen ist, desto höher ist die Gefahr, dass im Signal Artefakte auftreten, die vom Rezipienten wahrnehmbar sind. In allen Empfängergeräten ist ein Zeitpuffer eingebaut, welcher Pakete bis zum Zeitpunkt der Wiedergabe speichert. Wenn die Wartezeit höher wird, läuft der Puffer voll und Datenpakete werden vor ihrer eigentlichen Zeit ausgespielt. Die Folgen sind Datenverluste und hörbare Artefakte. Ist der Puffer zu groß, können zwar keine Jitter-Artefakte (siehe 2.2.3.4) auftreten, aber das System weist hohe Latenzen auf, was laut den zu Beginn der Arbeit formulierten Anforderungen (siehe 2.1) nicht möglich ist. Protokolle wie IEEE 1588-2008, PTP stellen jedoch eine präzise Taktung und Synchronisation der Netzwerkteilnehmer sicher. Deshalb wird PTPv2 bei Dante zur Zeitsynchronisation verwendet.

⁵⁴ Vgl. „Clock Synchronization | Audinate“ <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/webhelp/content/clock_synchronization.htm> [zugegriffen 6 Januar 2020].

⁵⁵ Vgl. Hans WEIBEL und Sven MEIER, *The Second Edition of the High Precision Clock Synchronization Protocol*. S. 1

2.2.3.5 Dynamic Host Configuration Protocol

So wie alle, mittels des Internet Protocol kommunizierende, Netzwerkgeräte, haben auch Dante-Geräte eine IP-Adresse. Diese bekommt ein Dante-Adapter standardmäßig mittels des Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) zugewiesen. Auch die manuelle Zuweisung von IP-Adressen funktioniert, aber der Hersteller empfiehlt die Nutzung eines DHCP-Servers.⁵⁶ Gerade zur Erhaltung größtmöglicher Flexibilität in einem LAN ist das sinnvoll. In der Praxis kommt es durchaus vor, dass spontan Netzwerkgeräte hinzugefügt werden. DHCP weist Netzwerkkonfigurationsdaten wie IP-Adresse und Subnetz zu. Wie auch RTP und PTP nutzt auch DHCP das User Datagram Protocol zur Kommunikation. Die Arbeitsweise des DHCP soll kurz dargelegt werden.

Ein DHCP-Server hat einen festgelegten IP-Adressbereich, den er vergeben kann. Damit ein Client einen DHCP-Server nutzen kann, muss er sich im selben physischen Netz befinden. Das liegt daran, dass die Kommunikation mit einem DHCP-Server mittels Broadcast-Nachrichten funktioniert und diese von Routern nicht weitergeleitet werden (siehe 2.2.4.3 und 2.2.5.2).

- Der Client schickt via Broadcast eine Anfrage an alle DHCP-Server im Netz. („DHCP-Discover“)
- Jeder erreichbare DHCP-Server antwortet (via Broadcast) mit einem Angebot („DHCP-Offer“) für eine Adresse
- Der Client nimmt das Angebot an, indem er eine Broadcast-Nachricht mit der ID des gewünschten Servers sendet („DHCP-Request“) (Absage für andere Server)
- Der Server mit der ID antwortet („DHCP-Ack“) und markiert die Adresse in seinem Pool als vergeben und trägt bei ihr einen Lease, eine temporäre Zuweisung einer IP-Adresse, ein
- Ist ein Server voll, lehnt er eintreffende Anfragen mit einem „DHCP-Nak“ ab⁵⁷

Jede vergebene Adresse hat ein Verfallsdatum (Lease Time). Wenn die Zeit zur Hälfte abgelaufen ist, erneuert ein aktiver Client seinen Lease mit einem erneuten „DHCP-Request“. Antwortet der Server nicht, versucht der Client nach 87,5% der Lease Time eine Verlängerung von einem möglichen anderen Server im Netz zu bekommen. Läuft eine Adresse ab, kann sie neu vergeben werden. Ein „DHCP-Release“ gibt eine Adresse vor Ablauf der Lease Time zurück.⁵⁸ Im AoIP-Netz Dante wird DHCP zum Verbindungsaufbau und -management genutzt. Die Nutzung des Dienstes stellt (bei ordnungsgemäßer Anwendung) die Verhinderung von Adresskonflikten sicher und führt somit zu erhöhter Ausfallsicherheit.

⁵⁶ Vgl. „How is a network of Dante devices configured for communication?“ <<https://www.audinate.com/faq/how-network-dante-devices-configured-communication>> [zugegriffen 6 Januar 2020].

⁵⁷ Vgl. BAUN. S. 211-213

⁵⁸ Vgl. BAUN. S. 172-175

2.2.3.6 DiffServ

Zur weiteren Erhöhung der Ausfallsicherheit in AoIP-Netzen zählt die Priorisierung der zugehörigen Datenpakete vor anderem Datenverkehr. Anders als bei Ethernet-basierten Übertragungsverfahren wie zum Beispiel Cirrus COBRANET oder Waves DIGIGRID ist bei AoIP-Anwendungen die parallele Nutzung des Übertragungsmediums von anderen Diensten möglich. Das wird mit sogenannten Quality of Service (QoS)-Protokollen realisiert. Im IP-Standard geschieht dies mittels des TOS-Feldes (Vgl. Tabelle 3). In Dante wird allerdings das Differentiated Service, kurz DiffServ, -Verfahren verwendet.⁵⁹ Hierbei wird das oben genannte TOS-Feld im IP-Header, bzw. das gleiche Byte, benutzt. TOS benutzt die ersten drei Bit zur Kennzeichnung der Priorität (Precedence) (0-7) und vier weitere zur Flussoptimierung. Das ist im Vergleich zu DiffServ relativ unflexibel. Dieses nutzt sechs Bit zur Kennzeichnung von unterschiedlichen Serviceklassen. Das ermöglicht eine feine Unterteilung der Dienstgüte verschiedener IP-Pakete.⁶⁰ Diese Bits heißen DSCP-Bits. Eine Serviceklasse enthält Spezifikationen bezüglich benötigter minimaler Latenz, dem höchsten zulässigen Paketverlust und den Jitter-Charakteristika (siehe 2.2.3.4) des Netzes.⁶¹ Dementsprechend können Dienste in diese Klassen eingeteilt werden. Zur Kennzeichnung der Klassen werden Kürzel verwendet:

- Class Service-Klassen bilden die TOS-Precedence Abstufungen ab. Es gibt CS0 bis CS7. Dabei werden CS0-Pakete mittels des Best-Effort-Prinzip versandt.
- Assured Forwarding-Klassen kommen bei der gesicherten Übertragung von Daten zum Einsatz. Diese Klassen funktionieren mit zwei Kennziffern (z.B.: AF41). Die erste Ziffer steht für die Priorität der Übertragung (1-4), während die zweite Ziffer die Wahrscheinlichkeit von Paketverlust (1-3) anzeigt. Die AF-Pakete werden keinesfalls verworfen.
- Die Klasse Expedited Forwarding (EF) kennzeichnet Pakete, die vor allen anderen Klassen übertragen werden.⁶²

⁵⁹ Vgl. „How does Dante manage QoS? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/how-does-dante-manage-qos>> [zugegriffen 7 Januar 2020].

⁶⁰ Vgl. Kathleen NICHOLS u. a., „RFC 2474“ <<https://tools.ietf.org/html/rfc2474>> [zugegriffen 7 Januar 2020]. S. 7

⁶¹ Vgl. Kwok Ho CHAN, Jozef BABIARZ, und Fred BAKER, „RFC 4594“ <<https://tools.ietf.org/html/rfc4594>> [zugegriffen 7 Januar 2020]. S. 4

⁶² Vgl. „Was ist DiffServ?“ <<https://www.lancom-systems.de/docs/LCOS/referenzhandbuch/topics/aa1204235.html>> [zugegriffen 7 Januar 2020].

2.2.3.7 Dynamic Name System

Das Dynamic Name System, kurz DNS, kann man sich wie ein Telefonbuch vorstellen. Hier sind zu IP-Adressen entsprechende Namen hinterlegt. Es gibt allerdings keine solitäre Datenbank auf der global alle Namen, sogenannte Host-Namen, gespeichert sind, sondern viele DNS-Server. Der DNS-Server eines (Sub-)Netzes ist normalerweise der Router, welcher beispielsweise das LAN mit dem zugehörigen WAN verbindet (siehe 2.2.5.2). Hat der befragte DNS-Server keinen Eintrag für den angefragten Hostnamen, werden solange andere DNS-Server befragt, bis einer die zugehörige IP-Adresse zurückmeldet. Wenn kein Eintrag gefunden wird und die IP-Adresse unbekannt ist, kann keine Verbindung zum gesuchten Host aufgebaut werden. Die DNS-Server sind global hierarchisch angeordnet und tauschen Informationen untereinander aus, ähnlich den dynamischen Tabellen bei Routern (siehe 2.2.5.2).⁶³ Dante benutzt die Sonderform mDNS, welche auf Port 5353 übertragen wird und in UDP-Paketen mitgeliefert werden kann.⁶⁴ Damit können Dante-Geräte im Netzwerk gefunden, identifiziert und nummeriert werden.⁶⁵

2.2.4 Kommunikationsformen

Es gibt drei verschiedene Kommunikationsformen in Netzwerken. Diese sind:

- Unicast: Senden an eine Adresse
- Multicast: Senden an eine Gruppe von Adressen
- Broadcast: Senden an alle Adresse in einer Broadcast-Domäne

2.2.4.1 Unicast

Bei Unicast handelt es sich um eine einfache, einstrangige Verbindung zwischen Sender und Empfänger. Dabei werden Zustellprotokolle wie TCP oder UDP verwendet. Bei Dante werden Verbindungen zwischen zwei Punkten standardmässig mit einer Unicast-Verbindung realisiert (siehe 2.4.4).

⁶³ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 231-233

⁶⁴ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 297

⁶⁵ Vgl. „So you're adding Dante to your Network?“ <<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/adding-dante-to-your-network-audinate.pdf>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

2.2.4.2 Multicast

Multicast definiert die Übertragung von Paketen an eine Gruppe von Empfängern. Dies wird auf der Vermittlungsschicht mittels Multicast-Adressen gehandhabt. Diese Adressen haben kein dezidiert zugeordnetes Gerät. Grundsätzlich entspricht dies dem Broadcast-Prinzip. Multicast wurde in den letzten Jahren immer wichtiger, da es für Dienste wie Videostreaming elementar wichtig ist. Ein Netzwerk wäre sehr schnell überlastet, wenn ein Sender ein und dieselbe Information zeitgleich mehrere Male an verschiedene Sender verschickt. Die Sendung an eine Multicast-Adresse schafft hier Abhilfe. Jeder Empfänger, der diese Information empfangen möchte, liest die Information an dieser Adresse ab. Die Teilnehmer, welche den Stream nicht nutzen wollen, sehen anhand der Multicast-Adresse, dass sie diese Informationen nicht lesen müssen. Somit nimmt deren Traffic, genau wie der des Senders, nicht zu. Gerade bei Multimediasstreaming, worunter auch AoIP fällt, ist dieses Verfahren zur besseren Nutzung von Transportkapazitäten der Übertragungsmedien relevant. Für die Knotenpunkte in einem Netzwerk (Switches) nimmt der Datenverkehr natürlich zu. Das Multicast-Verfahren setzt eine Multicast-fähige Infrastruktur voraus. Es muss in den benutzten Switches und Routern freigeschaltet werden, da sich potentielle Empfänger von Multicast-Streams bei diesen für den Empfang „anmelden“ müssen und weil die an Multicast-Adressen gesendete Pakete sonst das gesamte Netzwerk überschwemmen würden.⁶⁶ Für diesen Vorgang wird das Internet Group Management Protocol, kurz IGMP, benutzt. Router und Switches, welche Multicast unterstützen, können mittels des sogenannten IGMP Snooping dynamisch lernen, an welchen ihrer Ports Geräte angeschlossen sind, die bestimmte Multicast-Adressen „abonniert“ haben. Somit werden Multicast-Pakete nur noch an die nötigen Ports weitergeleitet und der Datenverkehr beim Sender, sowie an Switches ohne angeschlossene Abonnenten des dezidierten Multicasts, so gering wie möglich gehalten.^{67 68}

2.2.4.3 Broadcast

Broadcast beschreibt eine Sendung an alle Empfänger via einer Broadcast-Adresse. Diese ist immer die höchstmögliche Adresse eines (Sub-)Netzes. In Schicht 2 des OSI-Referenzmodells wäre das die größte Mac-Adresse ff:ff:ff:ff:ff:ff (siehe 2.2.1.2). Bezogen auf Schicht 3 ist es demnach die größte IP-Adresse, je nach Größe und Nummer des Subnetzes. Beispielhaft im Netz 192.168.1.0 mit der Netzmaske 255.255.255.0 wäre es die 192.168.1.255. Die Reichweite einer Broadcastnachricht wird durch die Größe der Broadcastdomäne bestimmt. Schicht-2-Geräte wie zum Beispiel Hubs unterbrechen die

⁶⁶ Vgl. SCHREINER, S. 99-103

⁶⁷ Vgl. „IGMP“ <<https://www.lancom-systems.de/docs/LCOS/referenzhandbuch/topics/aa1457493.html>> [zugegriffen 9 Januar 2020].

⁶⁸ Vgl. W. FENNER, „RFC 2236“, 1997 <<https://tools.ietf.org/html/rfc2236>> [zugegriffen 9 Januar 2020].

Domäne nicht, während Schicht-3-Geräte wie zum Beispiel Router (siehe 2.2.5.2) wie eine Grenze wirken, also Broadcast-Nachrichten nicht weiterleiten.⁶⁹

2.2.5 Netzwerkbausteine

Zur Verbindung von einzelnen Netzwerkteilnehmern wird eine Reihe von Netzwerkkomponenten benötigt. Die Komponenten werden in zwei Gruppen kategorisiert. Man spricht auch von der aktiven und passiven Gruppe. Die passive Gruppe beschreibt die Verbindungsinfrastruktur. Diese beinhaltet zum Großteil die verwendeten Kabelverbindungen. Zur aktiven Gruppe zählen Komponenten die eingebaute logische Funktionen haben. Für AoIP sind das Switches und Router. An dieser Stelle soll auch auf virtuelle lokale Netzwerke, sogenannte VLANs eingegangen werden.

2.2.5.1 Switch

Wo früher in Netzen Hubs und Bridges eingesetzt wurden, findet man heute Switches. Sie dienen als Vermittler in Schicht 2 des OSI-Referenzmodells und verteilen Datenpakete. Dies passiert anhand von Quell- und Ziel-MAC-Adressen. Ihre Logik tragen Switches auf integrierten Schaltungen, sogenannten ASICs. Der Vorteil von Switches gegenüber Hubs ist die Möglichkeit, Datenpakete simultan mittels Vollduplex zu übertragen. Das erhöht die Leistungsfähigkeit eines Netzes enorm. Außerdem bietet der Einsatz von Switches eine paketkollisions-freie Umgebung, da jedes Netzwerkgerät einen eigenen Port am Switch hat. Das verkleinert die Größe der Kollisionsdomäne nicht nur auf 1, sondern sorgt auch für eine dezidierte Bandbreite für jedes angeschlossene Gerät.

Die Adresstabelle

Das Weiterleiten von Paketen funktioniert in Switches einer Adresstabelle.⁷⁰ Dabei werden folgende Schritte unterschieden:

- Entscheidung ob ein Paket weitergeleitet wird. Falls ein Paket unzulässig oder unvollständig ist, wird es verworfen.
- Abgleich der Quell-MAC-Adresse mit der Adresstabelle.
 - o Wenn vorhanden, wird der sogenannte Aging-Timer aktualisiert. Wenn dieser Timer ausläuft, wird die Adresse aus der Tabelle gelöscht.
 - o Wenn nicht vorhanden, wird die Adresse zusammen mit dem übermittelnden Port in die Liste eingetragen.

⁶⁹ Vgl. BAUN. S. 188

⁷⁰ Vgl. RIGGERT. S. 188

- Überprüfung der Ziel-MAC-Adresse auf Adressart (Uni-, Multi- oder Broadcast). Nur Unicast-Adressen werden in der Tabelle gespeichert.
 - o Bei Kenntnis der Adresse erfolgt die direkte Weiterleitung an den entsprechenden Port.
 - o Bei Unkenntnis der Adresse wird diese an jeden Port außer den Quellport weitergeleitet. Das nennt man Flooding.⁷¹

Schicht-3-Switches

Als Sonderform der Switches gibt es Schicht-3-Switches. Diese Switches operieren mit IP-Adressen und haben, genau wie Router (siehe 2.2.5.2), die Möglichkeit Routingtabellen anzulegen und so Entscheidungen bezüglich der Paketweiterleitung zu treffen.⁷² Die Funktionen beinhalten neben den Schicht-2-Switch-Funktionen auf MAC-Adress-Ebene auch die Berücksichtigung von Quality of Service-Klassen, die Protokolle und Dienste bezüglich IP-Multicast (siehe 2.2.4.2) und die Bildung von virtuellen LANs.

Durch das erweiterte Routing mit IP-Adressen auf logischer Ebene kann die Systemlatenz weiter verringert werden. Die Möglichkeit, die Klassen von Quality of Service-Protokollen, wie DiffServ, zu interpretieren, ist vor allem für zeitkritische Anwendungen elementar wichtig. Das bedeutet, dass Schicht-3-Switches bezüglich der Anforderung einer niedrigen Latenz von AoIP empfehlenswert sind. So haben in LAN-Strukturen mit zeitkritischen Medienanwendungen Schicht-3-Switches viele Aufgaben von Routern übernommen.

VLAN

Virtuelle LANs (VLAN) trennen Broadcast-Domänen in kleinere Teile. Je größer ein Netzwerk wird, desto öfter treten Sicherheits- oder Stauprobleme auf. Mit einem VLAN wird eine Partition des Netzes erstellt. Die Teilnehmer eines VLANs werden nicht nach physischer Position im Netz, sondern nach logischer Position gruppiert. Der Datenverkehr eines VLANs teilt sich zwar mit dem Rest-Netz die gleiche Infrastruktur, wird aber von dessen Datenverkehr mittels VLAN-Tags isoliert. Das erhöht die Sicherheit für die so getrennten Anwendungen enorm.⁷³ Durch diese erhöhte Sicherheit ist eine Trennung des anwendungsspezifischen Datenverkehrs nicht nur durch QoS-Parameter, sondern auch durch VLANs für AoIP interessant.

⁷¹ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 769-770

⁷² Vgl. RIGGERT. S. 194

⁷³ Vgl. BAUN. S. 187

Switchingverfahren

Switches können grundsätzlich nach verschiedenen Ansätzen operieren. Diese Arbeitsansätze differieren in:

- Weiterleitmethode
- Portgeschwindigkeit
- Paket-Zwischenspeicherung

Beim Fast Forward-Verfahren werden die eintreffenden Ethernet-Frames schon während des Eingehens analysiert. Sobald die MAC-Adresse des Empfängers eingelesen ist, wird das Paket an den entsprechenden Ausgangsport geschaltet. Dies geschieht unabhängig von der Paket-Länge in sehr niedrigen Durchgangszeiten. Ein elementarer Nachteil des Verfahrens ist der Verzicht auf die Überprüfung der restlichen Steuerfelder im Header des Frames. So können Fehler passieren. Außerdem kann eine solche Kommunikation nur zwischen Port derselben Geschwindigkeit stattfinden. Auf einem 1000 MBit/s-Port können prinzipiell größere Pakete transportiert werden als auf einem 100 Mbit/s-Port. Ein 1000 Mbit/s-Paket würde auf einem langsameren Port einfach abgeschnitten und beim nächsten Netzwerkknoten wegen Unvollständigkeit verworfen werden.

Das Store and Forward-Verfahren liest dagegen die Pakete komplett ein, bevor damit weiterverarbeitet wird. Dadurch vergrößert sich der benötigte Speicher im Puffer des Switches und die Durchgangszeit ist abhängig von der Paketgröße. Jedes Byte bewirkt 8 μ s Verzögerung. Das größtmögliche Ethernet-Paket mit 1518 Byte bewirkt eine Verzögerung von 1200 μ s, was bei mehr als 3 Hops⁷⁴ schon im Bereich des beschriebenen Grenzbereichs der möglichen Latenz für AoIP liegt (siehe 2.1). Durch die Nutzung der Puffer im Switch wird aber auch eine Anpassung von unterschiedlichen Portgeschwindigkeiten möglich.⁷⁵ Die Vorteile dieses Verfahrens sind die vollständige Nutzung der Analysetechniken zur Filterung von fehlerhaften Paketen, was die allgemeine Netzauslastung verringert. Der Nachteil ist eine sehr hohe Latenzzeit verglichen mit dem Fast Forward-Verfahren.

Wenn Switches die zwei vorangegangenen Verfahren unterstützen, können sie die Fragment Free-Methode verwenden. Hier handelt es sich um einen Kompromiss zwischen beiden Verfahren. Der Switch behandelt Pakete nach dem Store and Forward-Verfahren. Wenn mehrere fehlerfreie Pakete weitergeleitet wurden, schaltet der Switch auf das Fast Forward-Verfahren um. Er prüft jeweils die ersten 64 Byte eines Paketes, um den Erhalt und die Weiterleitung von Kollisionsergebnissen auszuschließen.

Der Latenzzeitunterschied zwischen den beiden Verfahren kommt nur bei leerer Warteschlange am Ausgangsport zum Tragen. Im Falle eines Datenstaus müssen die

⁷⁴ Hop = Schritt eines Datenpakets von einem Netzsegment zum nächsten

⁷⁵ Vgl. RIGGERT, S. 192

eingelassenen Pakete im Puffer zwischengespeichert werden und die Latenz des Verfahrens hat keine Auswirkung mehr auf die Durchgangsgeschwindigkeit.⁷⁶

2.2.5.2 Router

Router dienen zur Kommunikation zwischen zwei oder mehreren logischen Netzen.⁷⁷ Sie werden auch Gateways genannt und arbeiten auf Schicht 3 des OSI-Referenzmodells. Die Übertragungsmechanismen unterliegen, wie auch bei Switches, bestimmten Verfahren, den Routing-Protokollen. Diese Protokolle bestimmen die Übertragungswege zwischen den IP-Netzen - die Routen. Die Router speichern die dazugehörigen Informationen und tauschen sich mit anderen Routern darüber aus. Die Auswahl eines Routings erfolgt nach Kriterien wie Auslastung, Datendurchsatz, Übertragungszeit und Gebühren.⁷⁸

Die Adressierung zwischen zwei Netzwerken funktioniert zweistufig. Im ersten Schritt auf dem Weg vom Sender in LAN 1 zum Empfänger in LAN 2 unterscheidet der Quellrechner, ob der Zielrechner im eigenen Netz oder in einem fremden Netz angesiedelt ist. Dabei vergleicht er die Subnetz-IDs der Quell- und Ziel-IP-Adresse miteinander. Sind sie gleich, wird das IP-Paket ins eigene Subnetz geschickt und die MAC-Adresse des Zielrechners in den Frame eingetragen. Sind die Subnetz-IDs ungleich, wird stattdessen die MAC-Adresse des Routers in den Frame eingetragen. Der Router leitet dann im nächsten Schritt das Paket direkt an das Subnetz mit der übereinstimmenden ID weiter. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt diesen Prozess.⁷⁹

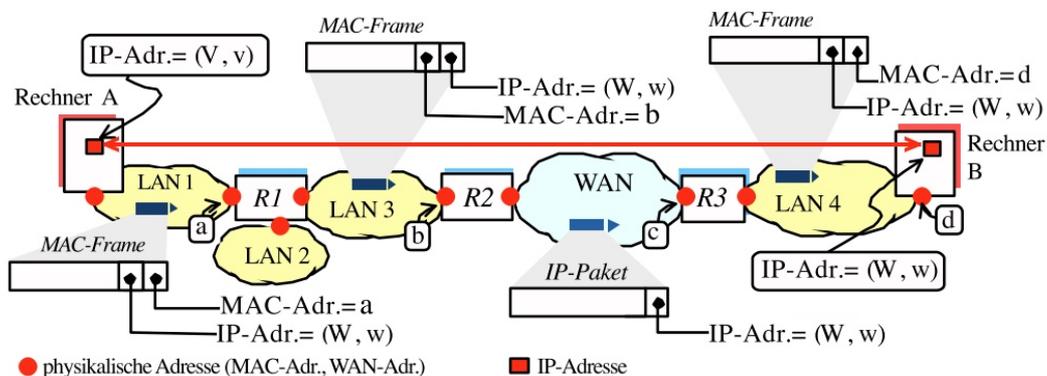


Abbildung 2: Paketweiterleitung bei Kopplung diverser LANs mittels Router⁸⁰

Bezüglich der verschiedenen Arten des Routings muss man zwischen dynamischem und statischem Routing unterscheiden.

⁷⁶ Vgl. RIGGERT. S. 193

⁷⁷ Vgl. BAUN. S. 21

⁷⁸ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 573-574

⁷⁹ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 578ff.

⁸⁰ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 578

Wenn die Routing-Tabelle eines Routers, wie oben beschrieben, im Austausch mit anderen Routern gepflegt wird, spricht man von dynamischem oder adaptivem Routing. Router adaptieren ihre Routen an die aktuelle Lage im Netz. Die populärsten Algorithmen zur Ermittlung der besten Route zum Ziel sind der Distance-Vector-Algorithmus und der Link-Status-Algorithmus.

Der Distance-Vector-Algorithmus betrachtet die Länge der Route anhand der Anzahl der nötigen Hops zum Ziel. Man spricht von einer zustandsunabhängigen Routing-Metrik. Es wird das Routing-Protokoll RIP (Routing Information Protocol) benutzt, welches die bestmöglichen Routen speichert.

Der Link-Status-Algorithmus wertet dagegen den aktuellen Netzzustand mit aus. Die verwendeten Routing-Metriken sind also zustandsabhängig. Änderungen des Netzzustands werden via Multicast (siehe 2.2.4.2) ausgetauscht.

Statisches Routing beschreibt die dauerhafte Festlegung von Routen. Es wird eine Standard-Route festgelegt (Default Route). Diese Routen müssen aber manuell eingetragen werden. Dies erhöht prinzipiell die Sicherheit hinsichtlich Paketverlust und Paket-Fehlleitung in einem Netzwerk, da die Pakete immer den gleichen Weg nehmen. Das ist vor allem in kleinen, übersichtlichen Netzen sinnvoll.⁸¹

Router erfüllen hinsichtlich AoIP im WAN-Bereich eine elementare Funktion. Jedoch erzielen sie durch die erweiterten Funktionen bezüglich der Nivellierung von Netzunterschieden größere Latenzen als Switches und sind dadurch für zeitkritische Anwendungen eher ungeeignet.

2.2.5.3 Übertragungsmedien

Die richtige Auswahl des Übertragungsmediums spielt im AoIP-Bereich eine große Rolle, da gerade bei Kabeln äußere Einflüsse große Auswirkung auf die Übertragung haben können.

In der Praxis werden hauptsächlich Twisted-Pair-Kupferkabel und Glasfaserkabel verwendet. Kabellose Übertragungen wie zum Beispiel WLAN nach der IEEE 802.11-Spezifikation bringen aktuell noch hinsichtlich Ausfallssicherheit und Latenz zu viele Defizite mit sich und würden die Anforderungen an digitale Audioübertragungen (siehe 2.1) nicht erfüllen. Von einer Verwendung dieser Technologie für AoIP rät Audinate ab und unterstützt diese auch nur zur Systemkonfiguration und nicht zur Audio- oder Taktübertragung.⁸² Im Folgenden werden deshalb die Medien Kupfer (Twisted-Pair-Kabel) und Glasfaser beschrieben. Grundsätzlich wird die Übertragung in diesem Kapitel analog zur Bitübertragungsschicht (siehe 2.2.1.1) des OSI-Referenzmodells betrachtet.

⁸¹ Vgl. BADACH und HOFFMANN. S. 584

⁸² „Can Dante operate over a Wi-Fi network? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/can-dante-operate-over-wi-fi-network>> [zugegriffen 10 Januar 2020].

Glasfaser-Kabel

Die Signalisierung funktioniert bei Glasfaser mittels optischer Signale (siehe 2.2.1.1). Das Medium zeichnet sich hauptsächlich durch seine hohe Reichweite aus. Je nach Sende- und Empfängertyp können bis zu 1000 km ohne Verstärker überbrückt werden. Auch bezüglich der Übertragungsraten sind Glasfaserkabel sehr leistungsfähig. In Testumgebungen werden bis zu 1 Petabit/s erreicht. Das entspricht über einer Milliarde Mbit/s. In AoIP-Netzwerken sind im Vergleich dazu Übertragungsraten von 1000 Mbit/s üblich. Glasfasern sind zudem abhörsicher und galvanisch getrennt. Das heißt, sie sind vor elektrischen Einflüssen auf dem Übertragungsweg geschützt. Die Nachteile von Glasfaser im Vergleich zu Kupfer sind die geringe mechanische Belastbarkeit und die verhältnismäßig hohen Kosten.⁸³

Das Medium Glasfaser besteht aus Quarzglasfasern und Signale werden mittels monochromatischem Licht übertragen. Das bedeutet, dass das übertragene Licht nur eine Frequenz hat.

Man unterscheidet zwischen 3 Profilen:

- Die Monomodefaser mit einem Kerndurchmesser von 9 µm zeigt die geringsten qualitätsmindernden Effekte wie Modendispersion⁸⁴. Deshalb wird es vorrangig im WAN-Bereich (Weitverkehrsbereich z.B. zwischen Städten) eingesetzt.
- Die Multimode-Stufenfaser ist wesentlich dicker als die Monomodefaser (50 µm). Gleichzeitig ist die Modendispersion wesentlich höher, was die möglichen Lichtimpulse pro Zeiteinheit beschränkt und dadurch auch die Bandbreite begrenzt. Dieser Kabeltyp wird vornehmlich im Nahverkehrsbereich eingesetzt.
- Die Multimode-Gradientenfaser besitzt im Gegensatz zur Stufenfaser einen von der Kernfaser nach außen hin parabelförmig abnehmenden Brechungsindex, was das Licht sinusförmig im Kern bewegen lässt. Dieses Prinzip verringert die Modendispersion und damit auch die Laufzeitdifferenz zwischen Signalein- und Austritt. Dieser Fasertyp hat sich zum Standard im Nahverkehrsbereich entwickelt.⁸⁵

Twisted-Pair-Kabel

Twisted-Pair-Kabel sind die gängigsten und am meisten eingesetzten Kabel im LAN-Bereich. Sie besitzen gute technische Eigenschaften (robust) und sind günstig in der Anschaffung. Ein Twisted-Pair-Kabel besteht zumeist aus vier zu zwei Paaren verdrehten Kupferkabeln. Die Verdrehung vermindert auf dem Übertragungsweg auftretende Störeinflüsse. Die

⁸³ Vgl. SCHREINER, S. 21

⁸⁴ Modendispersion = Erhöhung der Laufzeit im Medium durch „Zick-Zack-Lauf“ des Lichts

⁸⁵ Vgl. RIGGERT, S. 53-54

elektromagnetischen Felder der einzelnen Adern werden neutralisiert. Man unterscheidet die Kabeltypen anhand ihrer Schirmung:

- UTP: keine Schirmung vorhanden
- S-UTP: Eine Schirmung für alle Adern
- STP: einzelne Abschirmung der Adern
- S-STP: Kombination aus gemeinsamer und einzelner Abschirmung

Die Benutzung von möglichst gut geschirmten Kabeln ist wichtig, da der Haupt-Nachteil von Twisted-Pair-Kabeln die begrenzte Übertragungslänge ist, die durch Störeinflüsse noch weiter verringert wird.⁸⁶

Die folgende Tabelle zeigt eine Sammlung aus den diversen IEEE 802.3-Spezifikationen bezüglich der für AoIP relevantesten Medienklassifikation von Kupfer und Glasfaser. Die Kenntnis dieser Spezifikationen und Namensgebungen ist wichtig für den Aufbau und den Umgang mit AoIP-Netzen.

Bezeichnung nach Ethernet-Standards	Kabelnorm nach ISO/IEC 11801	Kabeltyp	Geschwindigkeit	Max. Leitungslänge
10Base-T	Cat. 3	Twisted-Pair	10 Mbit/s	100 m
100Base-TX	Cat. 5	Twisted-Pair	100 Mbit/s	100 m
100Base-FX/SX		Glasfaser	100 Mbit/s	300 m
1000Base-T	Cat. 5e	Twisted-Pair	1 GBit/s	100 m
1000Base-SX/LX		Glasfaser	1 GBit/s	550 m / 5 km
10GBase-T	Cat. 6A / Cat. 7	Twisted-Pair	10 GBit/s	100 m
10GBase-SR/LR		Glasfaser	10 GBit/s	300m / 10 km

Tabelle 5: AoIP-relevante IEEE-Kabel-Spezifikationen^{87 88}

Für Dante-Anwendungen relevante Kabelnormen sind momentan Cat.5e oder schneller. Dies ist abhängig von den Geschwindigkeiten der verwendeten Switch- oder Router Ports. Hierbei ist auch noch die maximale Leitungslänge zu beachten, welche bei Twisted-Pair-Kabeln bei 100 Meter liegt. Bei der Verbindung zweier Teil-Leitungen mit einem passiven Verbinder (Spookie) verringert sich die maximale Länge einer Verbindung um jeweils 20 Prozent.⁸⁹

⁸⁶ Vgl. SCHREINER. S. 33

⁸⁷ Vgl. „Twisted-Pair-Kabel (UTP / FTP / STP)“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0603191.htm>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

⁸⁸ Vgl. <<https://www.schrack-technik.de/know-how/netzwerktechnik/normen-und-grundlagen/grundlagen-lwl-verkabelung/>> [zugegriffen 3 Februar 2020].

⁸⁹ Vortrag „d&b Networkshop“ der Firma d&b-Audiotechnik am 06.09.2019

2.3 Audio over IP

Auf Basis der allgegenwärtigen Informationstechnologie und des daraus resultierenden, flächendeckenden Ausbaus von Netzwerktechnologie hat sich das IP-Protokoll nicht nur als Schrittmacher des Internets, sondern auch als gängiger Standard in lokalen Netzen entwickelt. Seit der Entwicklung und Herausgabe von COBRANET des Herstellers Cirrus Logic in den 1990er Jahren stellte sich immer mehr heraus, dass Ethernet, aufgrund der weitreichenden Verfügbarkeit und der geringen Kosten, die geeignetste Methode zur professionellen Übertragung von Audio in Netzwerken ist.⁹⁰ Gemäß der Anforderungen an die digitale Audioübertragung (siehe 2.1) kann Ethernet diese Kriterien weitestgehend erfüllen.

Das Internet Protocol zur professionellen digitalen Audioübertragung zu nutzen war bis Ende der 90er Jahre aufgrund unzureichender Bandbreite der Netzwerke unvorstellbar, was sich bei genauerer Betrachtung der sonstigen IP-basierten Kommunikationsformen, wie Audiostreaming und Voice over IP, zeigt. Das Protokoll arbeitet nach dem Best-Effort-Prinzip, was dazu führt, dass Datenpakete verloren gehen können oder vertauscht werden. Diese Effekte sind im öffentlichen, nicht verwalteten Internet stark. Im Verhältnis dazu sind diese Effekte in lokalen, verwalteten Netzwerken relativ gering. Um eine hochwertige, sichere Übertragung der Pakete sicherzustellen, braucht man zusätzliche Protokolle. Im Internet funktioniert die Absicherung des verbindungslosen IP-Protokolls mittels des TCP-Protokoll. Dieses Protokoll ermöglicht eine sichere und geordnete Zustellung von Datenpaketen. Allerdings führen diese Mechanismen zu einer Verlangsamung des Datenflusses und dadurch zu hohen Latenzen. Es werden also andere Protokolle, wie UDP (siehe 2.2.3.2) benötigt. Seit es diese Protokolle gibt, ist AoIP realisierbar geworden.

Wie man speziell bei den von Dante benutzten offen zugänglichen Protokollen (siehe 2.2.3) sehen kann, ist die Auswahl vor allem hinsichtlich einer möglichst geringen System-Latenz getroffen.

Audiostreaming und VoIP⁹¹

In dieser Arbeit wird die IP-basierte digitale Audioübertragung in einer professionellen Umgebung behandelt. Das bedeutet sehr hohe Ansprüche an die Qualität der Übertragung, die System-Latenz und die Sicherheit hinsichtlich einer Redundanz. Es ist sinnvoll, das Szenario von anderen digitalen Audio-Kommunikationsmitteln abzugrenzen, denn hier kommt

⁹⁰ Vgl. Lectrosonics und Audinate, „White Paper Evolving networks to AVB“, 2011
<https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate_avb_white_paper_v1_2.pdf> [zugegriffen 10 Januar 2020]. S. 4

⁹¹ VoIP = Voice over IP

es in der Praxis oft zu Verwechslungen in Namensgebung und Verständnis. Exemplarisch sollen hier Audiostreaming und VoIP als Beispiel dienen.

Audiostreaming wird vorrangig im Internet zur Übertragung von Audiodaten verwendet. Die Übertragungstechnologie zeichnet sich durch starke Komprimierung des Signals aus. Die Daten werden auf der zweiten Schicht des OSI-Referenzmodells übertragen. Hierzu wird meist ATM benutzt. Das ist ein Netzwerkprotokoll, welches der Übertragung von Video, Sprache und Daten dient. Durch die Komprimierung der Daten kommt es zu verminderter Übertragungsqualität, was den Anforderungen an digitale Audioübertragungen für professionelle Anwendungen (siehe 2.1) nicht entspricht.⁹² Für Anwendungen, in denen Audiostreaming verwendet wird, reicht die Übertragungsqualität zumeist allerdings aus. Ein Beispiel dafür ist das Videostreaming von Youtube.

VoIP zeichnet sich durch eine klare Priorisierung der Echtzeitübertragung gegenüber der Übertragungsqualität aus. Hier werden, wie auch beim Audiostreaming, Codecs verwendet, um das Audiosignal zu komprimieren, damit eine schnellere Übertragung gewährleistet werden kann. Im Gegensatz zum Audiostreaming erfolgt die Übertragung bei Voice over IP aber auf Schicht 3 und ist paketbasiert. Dennoch ist auch hier der Verlust der Signalqualität im Rahmen der Anwendung ausreichend.⁹³ Ein Beispiel für Voice over IP ist die normale Internettelefonie.

2.3.1 Unterschied zu TDM-basierter Audioübertragung

Bevor der professionelle Audiomarkt von AoIP-Lösungen dominiert wurde, waren Ethernet-basierte Lösungen an der Tagesordnung. Diese Netzwerke werden auch TDM-Netzwerke genannt. Sie arbeiten, wie der Name schon sagt, auf Schicht 2 des OSI-Referenzmodells (siehe 2.2.1.2). Ein populäres Beispiel für solch eine Übertragungstechnik ist MADI. Bei dem von MADI genutzten Time Division Multiplexing-Verfahren (TDM) werden die einzelnen Tonkanäle sequenziell innerhalb eines Frames übertragen. Mittels dieser festgelegten Abfolge an Slots auf dem Übertragungskanal kann auch die Wordclock⁹⁴ zur Synchronisation übertragen werden. Sie wird aus dem Zeitversatz des Eintreffens der Frames errechnet.⁹⁵ Alternativ können die Sender und Empfänger auch beide von einem externen Wordclocksignal versorgt werden.⁹⁶ Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht das TDM-Prinzip.

⁹² Vgl. „Was ist ATM (Asynchronous Transfer Mode)?“ <<https://www.ip-insider.de/was-ist-atm-asynchronous-transfer-mode-a-726581/>> [zugegriffen 3 Februar 2020].

⁹³ Vgl. „VoIP - Voice over IP“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0503131.htm>> [zugegriffen 13 Januar 2020].

⁹⁴ Wordclock = Taktsignal zur Synchronisation in der digitalen Audiotechnik

⁹⁵ Vgl. „Dante Advanced Configuration“, 2015 <<http://www.audinate.com/resources>> [zugegriffen 4 Januar 2020]. S. 3

⁹⁶ Vgl. SMYREK. S. 253

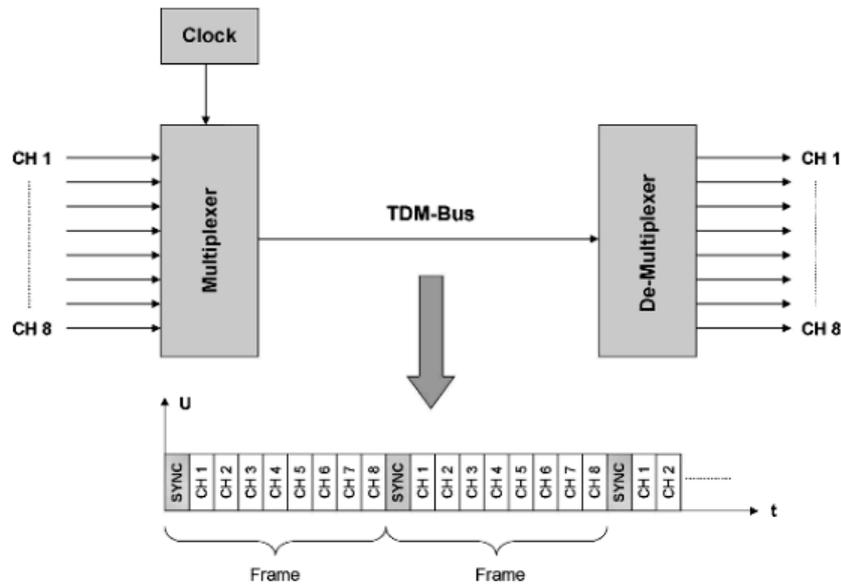


Abbildung 3: Das TDM-Prinzip⁹⁷

Das bedeutet auch, dass ein solches System eine feste Bandbreite auf dem Übertragungsmedium benötigt und in vielen Fällen eine hohe Zahl an leeren Daten überträgt, um die Struktur des Datenstroms aufrecht zu erhalten. Man spricht hier von „boring bits“. Ein Vergleich zur Übertragungseffizienz zwischen Ethernet-basiertem MADI und IP-basiertem Dante ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

Number of Channels 24bit	“Boring” bits Dante unicast	“Boring” bits 64 channel MADI	Bandwidth % on 100mbps link MADI	Bandwidth % on 100mbps link Dante
1	104	1512	100%	6%
2	80	1488	100%	6%
4	32	1440	100%	6%
64	128	0	100%	88%
65	104	1512*	200%	94%

Abbildung 4: Vergleich der Netzauslastung⁹⁸

Digitale Audionetzwerke der ersten Generation nutzen im Gegensatz zu Dante keine standardisierten Ethernet-Datenpakete, was dazu führt, dass der Datenverkehr dieser Netzwerke von Verkehr anderer Netzwerke getrennt werden muss. Die Trennung geschieht

⁹⁷ Vgl. WEINZIERL und SLAVIK. S. 952

⁹⁸ Vgl. Audinate, „Dante Certification Program Level 3“, 2019 <<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/level-three-dante-certification-program-advanced-networking-concepts-troubleshooting-domain-manager-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 4 Januar 2020].

zumeist auf Schicht 1 des OSI-Referenzmodells auf physischer Ebene in einem eigenen LAN oder bei ausreichender Bandbreite auch mittels eines VLAN (siehe 2.2.5.1). Dies erhöht im Vergleich zu IP-basierten Netzwerken, welche Standard-Ethernet-Pakete nutzen, die Komplexität in der Einrichtung sowie die Material- und Nutzungskosten.⁹⁹ Die Trennung des Datenverkehrs gilt natürlich auch für Daten, die der Steuerung des Audionetzwerks dienen.

2.4 Dante - Technologien

Dante wird seit 2003 von der australischen Firma Audinate entwickelt und ist seit 2006 auf dem Markt. Audinate ist Teil der AVnu Alliance, die, mit dem Ziel einer größeren Interoperabilität im AV-Bereich, die IEEE 802.1 Audio Video Bridging-Standards entwickelt. Das IP-basierte Audionetzwerk basiert zum großen Teil auf offenen Protokollen der IP-Familie (siehe 2.2.3). Das ermöglicht eine Audioübertragung, welche unabhängig von den ersten beiden Schichten des OSI-Referenzmodells funktioniert. Dies ist momentan der Standard für zeitkritische, hochwertige Übertragung von Audiodaten.

Die offenen Technologien, welche Dante nutzt, sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Aufgabe	Protokoll
Audioübertragung	User Datagram Protocol (UDP) Real-Time Transport Protocol (RTP) AppleTalk Transaction Protocol (ATP)(proprietär)
Synchronisation	Precision Time Protocol Version 2 (IEEE 1588-2008)
Geräteadressierung	Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)
Geräteerkennung	Multicast Dynamic Name System (mDNS)
Multicast Management	Internet Group Management Protocol (IGMPv3/v2)
Quality of Service	Differentiated Services (DiffServ)

Tabelle 6: von Dante benutzte Protokolle¹⁰⁰¹⁰¹

Die proprietären Technologien werden von Audinate unter Verschluss gehalten und es gibt wenig bis keine verwertbare Information dazu. Das AppleTalk Transaction Protocol, welches in Zusammenarbeit mit UDP für die Audioübertragung bei Dante fungiert, ist zwar von der IETF beschrieben, wird jedoch von Dante proprietär genutzt. Das bedeutet, es ist nicht abzuschätzen, inwieweit das Protokoll von Audinate individualisiert wurde. Deshalb werden

⁹⁹ Vgl. Lectrosonics und Audinate, „White Paper Digital Audio Networking Just Got Easy“, 2010 <[https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate white paper on dante_justgoteasy.pdf](https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate%20white%20paper%20on%20dante_justgoteasy.pdf)> [zugegriffen 10 Januar 2020]. S. 5

¹⁰⁰ Vgl. „So you’re adding Dante to your Network?“

¹⁰¹ Vgl. „Which network ports does Dante use? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/which-network-ports-does-dante-use>> [zugegriffen 13 Januar 2020].

die proprietären Protokolle in dieser Arbeit nicht behandelt. Die in Kapitel 2.2 behandelten Grundlagen sollen in diesem Kapitel zum Teil noch durch Dante-spezifische Informationen erweitert werden.

2.4.1 Netzspezifikationen

Die Übertragung kann in 100Mbit/s-Fast Ethernet-Netzen, in 1000Mbit/s Gigabit Ethernet-Netzen, sowie in Mischformen stattfinden. Im Falle einer Mischform ist immer der niedrigere Datendurchsatz entscheidend für den maximal möglichen Datendurchsatz zwischen zwei Teilnehmern.¹⁰² Der Hersteller gibt an, dass bei geringen Kanalanzahlen (bis 32 Kanäle) ein 100 Mbit/s-Netzwerk ausreicht, wenn Quality of Service in Form von DiffServ (siehe 2.2.3.6 und 2.4.5.2) bereitsteht. Darüber hinaus empfiehlt Audinate die Verwendung von Gigabit Ethernet.

Da Dante auf dem Internet Protocol (IP) basiert, muss der entstehende Datenverkehr nicht von anderem Datenverkehr getrennt werden, wie es bei Ethernet-basierter Übertragung auf den Schichten 1 und 2 des OSI-Referenzmodells der Fall ist (siehe 2.3.1). Die Pakete werden mittels DiffServ getaggt und haben somit Vorrang vor Datenpaketen anderer Anwendungen im Netz.

Als Netztopologie kann bei Dante theoretisch jede Verkabelungsart (Daisy Chain, Ring, Star) (siehe 2.5.1) verwendet werden. Es können Switches und/oder Router eingesetzt werden. Allerdings ist die Anzahl der Hops ausschlaggebend für die minimale Latenz (siehe 2.4.5.1).

2.4.2 Verbindungsmanagement

Dieses Kapitel widmet sich der Verbindung eines Dante-Geräts mit einem Dante-Netzwerk. Dazu sind zwei Schritte nötig. Im ersten Schritt wird das Gerät auf der dritten Schicht des OSI-Referenzmodells (siehe 2.2.1.3) eingebunden. Im zweiten Schritt geschieht die Konfiguration der erforderlichen Dienste. Beide Schritte laufen vollautomatisch ab.

Sobald ein Dante-Gerät physisch an ein Netzwerk angeschlossen wird, benutzt es das DHCP-Protokoll (siehe 2.2.3.5), um eine IP-Adresse zugewiesen zu bekommen. Ist kein DHCP-Server im Netzwerk vorhanden, was in kleinen Netzwerken durchaus vorkommen kann, gibt das Gerät sich selbst eine IP-Adresse im Link Local-Bereich (siehe 2.2.3.1). Man kann Dante-Geräten alternativ auch eine statische IP-Adresse zuweisen. Darüber hinaus hören Dante-Geräte auch nach der Zuweisung einer IP-Adresse nicht auf, sich „umzusehen“ im Sinne von

¹⁰² Vgl. „What is the difference between a 100Mbps, 1000Mbps and 10000Mbps switch, and how does this affect Dante? | Audinate“.

DHCP.¹⁰³ Im zweiten Schritt, Automatic Discovery genannt, gibt das Dante-Gerät Informationen über sich selbst frei. Diese Informationen enthalten:

- Name des Geräts
- Namen der Audiokanäle
- Zahl der Audiokanäle
- Einstellbare Abtastraten
- Einstellbare Bittiefen

Die Veröffentlichung dieser Informationen im Netzwerk, sowie die Identifikation der Geräte mit ihren Namen, erfolgt durch das Audinate-eigene Protokoll Zen (Zero Education needed). Nähere Informationen zu diesem Protokoll werden von Audinate nicht veröffentlicht.¹⁰⁴ Es ist nur bekannt, dass die verwendete Technologie, um Dante-Geräte zu finden, auf der mDNS-Technologie (siehe 2.2.3.7) basiert.

Die veröffentlichten Informationen und Einstellungen können vom Benutzer in der Software Dante Controller (siehe 2.5.2.1) ausgelesen und modifiziert werden.¹⁰⁵ Die oben genannten Informationen, sowie die Routings von und zu dem jeweiligen Gerät, werden intern gespeichert.

2.4.3 Synchronisation

Für ein echtzeitkritisches Audionetz wie Dante ist eine exakte Synchronisierung notwendig. Dante arbeitet mittels der Precision Time Protocol Version 2 (IEEE 1588-2008) (siehe 2.2.3.4). Hierfür wird ein Gerät als Haupttaktgeber definiert, ein sogenannter „Preferred Master“. Wenn mit der Dante Controller Software kein „Preferred Master“ festgelegt wird (siehe 2.5.2.1), funktioniert die hierarchische Auswahl eines Masters wie folgt:

- Geräte mit stabilerem Takt über Geräte mit weniger stabilem Takt
- Geräte mit Takt-Eingang (z.B.: Wordclock) bevorzugt über Geräten ohne denselben
- Geräte mit Gigabit-Ethernet-Anschluss über Geräte mit Fast-Ethernet-Anschluss
- Bei gleichen Eigenschaften gewinnt das Gerät mit der niedrigsten MAC-Adresse

Es gibt drei unterschiedliche Takttypen. Ein Gerät kann seinen Takt via PTP (siehe 2.2.3.4) von der eigenen Takt-Schaltung nehmen, extern von einer Wordclock getaktet werden oder, wie im Fall der Dante Virtual Soundcard (siehe 2.5.2.2), den Takt von dem Endgerät auf dem sie läuft adaptieren. Wurde ein Master gewählt, verbreitet er wie in Kapitel 2.2.3.4 beschrieben seinen Takt im Netzwerk. Im Falle eines Taktverlustes übernimmt automatisch der

¹⁰³ Vgl. Chris WARE, „Networking 101 Basics for Audio“, 2015 <<http://www.audinate.com/resources/>> [zugegriffen 16 Januar 2020].

¹⁰⁴ Vgl. www.prosoundnewseurope.com, „Zen protocol“, 2009.

¹⁰⁵ Vgl. „Discovery and auto-configuration“ <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/webhelp/content/discovery_and_auto-configuration.htm> [zugegriffen 14 Januar 2020].

nächstbeste Taktgeber die Funktion des Masters. Da bei Dante der Takt unabhängig von den Audiodaten übertragen wird (siehe 2.4.5.2), hat ein Ausfall keinerlei hörbare Auswirkungen auf die Audiosignale. Bis ein neuer Master gewählt ist, benutzen die Geräte ihren eigenen Takt. In redundanten Dante-Netzen arbeitet PTP netzübergreifend. Das bedeutet, dass jedes der beiden Netze einen eigenen Takt-Master hat, welcher aber in den meisten Fällen das gleiche Gerät ist. Wenn die Master-Geräte differieren, wird die Takt-Information vom Master im Hauptnetz zum Master im redundanten Netz übertragen. Bei weitreichenden Netzen, die auch aus verschiedenen Subnetzen bestehen können, gibt es sogenannte Clock Domains. Hier werden die Geräte, je nach Subnetz, auf unterschiedliche Master-Takte verteilt, welche wiederum ihren Takt von sogenannten „Boundary Clocks“ (Grenz-Takten) bekommen. Diese Mechanismen kommen auch bei einer Ausweitung von Dante-Netzen über WANs zum Einsatz.¹⁰⁶ Kommt es bei Dante-Geräten zu einem instabilen Takt, kann das folgende Gründe haben:

- Ein Switch im Netzwerk nutzt IEEE-Technologie (siehe 2.4.3)
- Ein 100 Mbit/s Port ist ausgelastet
- Eine instabile externe Wordclock wird als Master-Takt benutzt.¹⁰⁷

2.4.4 Übertragung

Der Pakettransport in Dante funktioniert via UDP (siehe 2.2.3.2). Dieses Protokoll ist wegen seiner hohen Übertragungsgeschwindigkeit für AoIP-Anwendungen gut geeignet. Dessen Nachteile, vorrangig die fehlende Fehlererkennung und -behandlung, nimmt man zugunsten einer möglichst hohen Übertragungsgeschwindigkeit in Kauf. Durch mangelnde Fehlererkennung kommt es zu fehlenden Datenpaketen, was zu einer Verschlechterung der Audioqualität führt. In geschlossenen Netzwerken mit ausreichend Bandbreite kommt der Paketverlust jedoch so selten vor, so dass dieser Effekt zu vernachlässigen ist.¹⁰⁸

Bei Dante wird das AppleTalk Transaction Protocol, kurz ATP (siehe 2.4), verwendet, um eine Übertragung der Pakete in der richtigen Reihenfolge sicherzustellen. Dieses Protokoll ist in der vierten Schicht des OSI-Referenzmodells angesiedelt und baut auf UDP auf. Um die Kompatibilität mit dem AES67-Standard (siehe 2.6) zu gewährleisten, wird zu ATP noch RTP (siehe 2.2.3.3) benutzt. Wird in den Einstellungen eines Dante-Geräts der AES67-Modus aktiviert, arbeitet dieses Gerät konform mit den Spezifikationen dieses Standards und bietet so die Möglichkeit, mit AES67-konformen Geräten anderer Hersteller in Austausch zu treten. Ein AES67-Flow enthält, genau wie ein Multicast-Flow acht Kanäle (siehe unten). Dante-

¹⁰⁶ Vgl. „Clock Synchronization | Audinate“.

¹⁰⁷ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“, 2019. S. 52

¹⁰⁸ Vgl. WARE.

Geräte können keine Subscription (ein „Empfangs-Abonnement eines Dante-Sendekanals“) zu einem AES67-Flow eines anderen Dante-Geräts aufbauen.

2.4.5 Dante - Flows

Um die Bandbreite des Netzwerks optimal auszunutzen, organisiert Dante Audiokanäle in sogenannten „Flows“. Diese werden mittels der enthaltenen Kanalanzahl in Unicast- und Multicast-Flows unterschieden. Ein Unicast-Flow kann bis zu 4 Audiokanäle enthalten und hat eine Bandbreite von 6 Mbits/s, während ein Multicast-Flow 8 - 64 Kanäle, je nach Gerät enthalten kann und eine minimale Bandbreite von 12 Mbit/s hat. Außerdem ist ein Unicast-Flow dezidiert an einen Empfänger gerichtet, während ein Multicast-Flow an alle Geräte innerhalb des Netzwerks gerichtet ist. Neu hinzukommende Verbindungen von Gerät A zu Gerät B werden, falls möglich, in einen noch nicht voll ausgelasteten Unicast-Flow eingegliedert. Die in einen Multicast-Flow eingebundenen Verbindungen können nach dem Erstellen des Flows (siehe 2.5.2.1) nicht mehr verändert werden.¹⁰⁹

Ein Dante-Gerät besitzt immer eine maximal mögliche Anzahl an Flows. Das sind 32 Stück. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass bei 9 zu übertragenden Kanälen standardmäßig drei Unicast-Flows in Richtung des Empfängers geöffnet werden. Wenn diese 9 Kanäle auch an einen anderen Empfänger gesendet werden sollen (ein sogenannter Split), entsteht eine „Fanout“-Konfiguration, bei der 6 Unicast-Flows genutzt werden (siehe Abbildung 6). Man kann hier schnell erkennen, dass bei einem Gigabit-Ethernet Netzwerk eher die maximale Flow-Anzahl, als die Bandbreite des Übertragungsmediums der begrenzende Faktor ist (siehe 2.2.5.3). Für diese Anwendung dienen dann die in Abbildung 7 dargestellten Multicast-Flows. Das spart dem Sender Flows, während gleichzeitig der Datenverkehr gering gehalten wird.

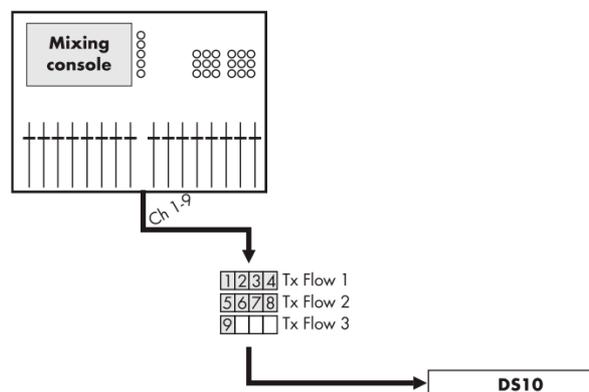


Abbildung 5: Unicast-Flow

¹⁰⁹ Vgl. Audinate, „Dante Certification Program Level 3“. S. 114

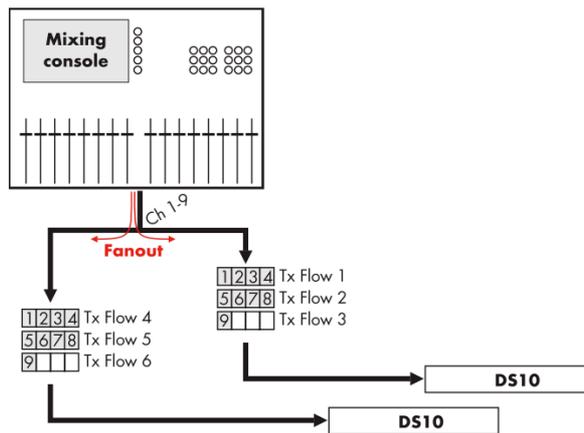


Abbildung 6: Unicast-Flows Fanout-Konfiguration

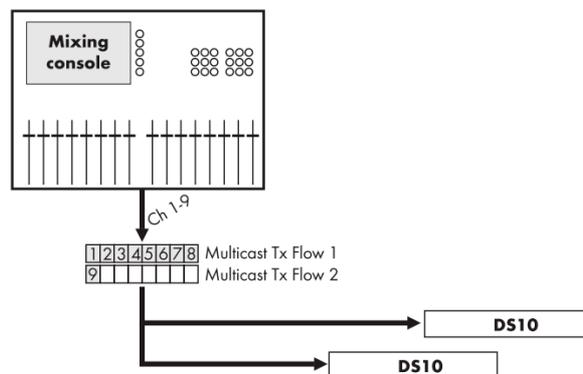


Abbildung 7: Multicast-Flow^{110 111}

Generell ist darauf zu achten, dass Unicast-Flows eher den Datenverkehr im Gesamtnetzwerk geringhalten, da die Pakete nur dezidiert an die Empfänger gesendet werden, während die Auslastung des Übertragungsmediums direkt am Sender steigt. Multicast-Flows halten den Datenverkehr und die Flow-Nutzung am Sender gering, während der Datenverkehr im Gesamtnetz steigt.¹¹² Deshalb empfiehlt Audinate auch die Nutzung von IGMP Snooping (siehe 2.2.4.2). Hiermit wird die Überflutung des Netzwerks mit Multicast-Verkehr von den Switches restringiert und nur an Ports mit angemeldeten Geräten weitergeleitet.

¹¹⁰ 3 Abbildungen: d&b-Audiotechnik, „TI 317 Dante audio networking 1.1 en“, 2019
 <<https://www.dbaudio.com/assets/products/downloads/ti/dbaudio-technical-information-ti317-1.1-en.pdf>> [zugegriffen 16 Januar 2020]. S. 4

¹¹¹ DS10 = DANTE-fähiger Verstärker der Firma d&b-Audiotechnik

¹¹² Vgl. d&b-Audiotechnik. S. 4

2.4.5.1 Latenz

Um der im Rahmen des Szenarios dieser Arbeit gestellten Anforderung der geringen System-Latenz gerecht werden zu können, muss hier der Vergleich zum in den Anforderungen aufgestellten Grenzwert (siehe 2.1) gezogen werden. Latenzen sind bei Dante deterministisch. Das bedeutet, dass sie unabhängig von äußeren Umständen immer bekannt ist und vor allem konsistent. So ist die minimal erreichbare Latenzzeit abhängig von der Komplexität und Topologie des Netzwerks (siehe 2.5.1) und kann in der Zahl der nötigen Switch Hops vom Sender zum Empfänger angegeben werden. Je mehr Latenz am Gerät gewählt ist, desto mehr Kanäle stehen zur Übertragung bereit.¹¹³

Anzahl Hops in einem Gigabit Ethernet-Netz	Minimal mögliche Latenz
1 Hop	0,15 ms
3 Hops	0,25 ms
5 Hops	0,5 ms
10 Hops	1 ms
< 10 Hops	5 ms

Tabelle 7: minimal erreichbare Latenzzeit je Netzwerkgröße

Das bedeutet in der Praxis, dass man gleichzeitig verschiedene Latenzen im System haben kann oder sogar will. Beispielhaft kann hier das Anwendungsszenario dieser Arbeit (siehe 1) zur Veranschaulichung dienen:

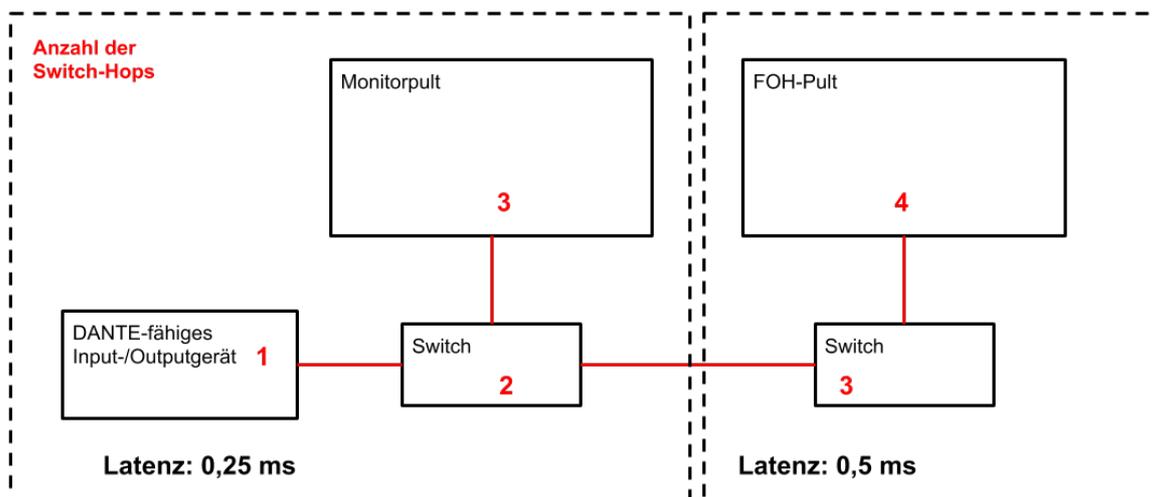


Abbildung 8: Latenz-Domänen in Dante-Netzen

¹¹³ Vgl. „How is latency adjusted in a Dante system? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/how-latency-adjusted-dante-system>> [zugegriffen 16 Januar 2020].

In diesem Aufbau kann für das Monitoring der Band auf der Bühne, deren Signale über ein Dante-fähiges Input-/Outputgerät an Vorverstärkern anliegen, die kleinstmögliche Latenz für ein Netz mit 3 Switch-Hops gewählt werden, während die Verbindung zum FOH mit 4 Switch-Hops eine höhere Latenz aufweist. Hinsichtlich der in den Anforderungen des Anwendungsszenarios in Kapitel 2.1 geforderten geringen System-Latenz, kann Dante also den Musikern oder anderen Akteuren gerecht werden. Im zuvor aufgezeichneten Beispiel läge die Roundtrip-Latenz (Gesamtlatenz des Hin- und Rückweges über das System) des Übertragungsweges bei 0,5ms. Das liegt laut der in Kapitel 2.1 angeführten Untersuchung im gut akzeptablen Bereich.¹¹⁴

Hierbei gilt zu beachten, dass bei unterschiedlichen Einstellungen des sendenden und des empfangenden Geräts einer Dante-Kanalverbindung, einer sogenannten Subscription (siehe 2.5.2.1), die höhere Latenz verwendet wird. Ebenso haben Multicast-Streams bei Dante standardmäßig eine Latenz von 1 ms. Genauso besitzen Dante-Geräte, welche mittels eines 100 Mbit/s-Ethernet-Port verbunden sind, eine minimale Latenz von 1 ms.¹¹⁵

2.4.5.2 Quality of Service

Dante übermittelt seine Pakete dreigeteilt. Audiodaten werden getrennt von Taktdaten übertragen, welche ihrerseits wiederum getrennt von Steuerdaten übertragen werden. Dies wird mittels des Quality of Service-Dienstes DiffServ (siehe 2.2.3.6) realisiert. Es werden allerdings nur die Daten von Dante Hardwareprodukten mit DiffServ-Tags versehen. Daten aus Dante Software wie der Dante Virtual Soundcard oder Dante Via bekommen keine Tags, da Computer ihre Pakete manchmal als „Bursts“¹¹⁶ versenden. Bei einem Burst von Paketen, die hochpriorisiert sind, kann dies zu einer Überlastung des Übertragungsmediums führen, was wiederum andere Anwendungen beeinträchtigen kann.¹¹⁷

Priorität	Nutzdaten	DiffServ Label
Hoch	Zeitkritische PTP Pakete	CS7
Mittel	Audio, PTP	EF
Niedrig	Dante Steuerdaten	CS1
keine	Anderer Datenverkehr	Best Effort

Tabelle 8: von Dante verwendete DiffServ-Tags¹¹⁸

¹¹⁴ Vgl. LESTER und BOLEY. S. 17

¹¹⁵ Vgl. „Dante Advanced Configuration“. S. 18 - 26

¹¹⁶ Burst = bandbreitenintensive Sendung von vielen Datenpaketen innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne

¹¹⁷ Vgl. „How does Dante use DSCP / Diffserv priority values when configuring QoS? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/how-does-dante-use-dscp-diffserv-priority-values-when-configuring-qos>> [zugegriffen 16 Januar 2020].

¹¹⁸ Vgl. „Dante Advanced Configuration“. S. 50

2.5 Dante – Anwendung

Die Anwendung der Dante-Technologie spielt sich auf zwei Ebenen ab. Auf der Hardware-Ebene ermöglicht eine durchdachte Bauweise des Netzwerks eine große Ausfallsicherheit. Die diversen Kriterien dazu werden im folgenden Kapitel behandelt. Im Kapitel 2.5.2 wird auf die software-basierten Lösungen zur Steuerung des Netzwerks und zur Einbindung von Computern und nicht-Dante-fähigen Geräten eingegangen.

2.5.1 Netzaufbau

Der physikalische Aufbau eines Dante-Netzwerks erfordert in erster Linie kompatible Hardware. Audinate empfiehlt Gigabit-Ethernet als Standard-Geschwindigkeit für das Netzwerk. Das bedeutet, laut Tabelle 5, dass Cat. 5E bzw. Cat. 6 Netzkabel nötig sind. Dazuhin müssen die benutzten Switchports die gleiche Kapazität aufweisen. Bei der Nutzung einer 100 Mbit/s Netzinfrastruktur und der damit verbundenen Dante-seitigen Limitation (siehe Kapitel 2.4.1) reichen Cat. 5 – Kabel aus.¹¹⁹ Audinate setzt die Deaktivierung bzw. Nicht-Nutzung der EEE-Funktion in Switches zur ordnungsgemäßen Nutzung von Dante voraus. Die auch als „Green Ethernet“ bekannte „Energy Efficient Ethernet“-Technologie reduziert den Stromverbrauch von Switches im Falle einer niedrigen Auslastung hinsichtlich des Datendurchsatzes. Da Dante nicht automatisch die verfügbare Bandbreite des Übertragungsmediums ausnutzt, kann es zu Missinterpretationen seitens EEE kommen und daraus resultierend zu schlechter Synchronisationsleistung und Signalverlust.¹²⁰

Die meisten Dante-Geräte haben zwei Dante-Netzwerkanschlüsse, welche mit „Primary“ und „Secondary“ gekennzeichnet sind. Je nach Einstellung sind diese Anschlüsse im „Redundant Mode“ zur Erstellung einer Kabel-Redundanz gedacht, während sie im „Switch Mode“ wie ein 2-Port-Switch agieren. Hinsichtlich der Ausfallsicherheit einer Netzwerkinstallation muss die Netztopologie betrachtet werden. Für den Aufbau eines AoIP-Netzes sind hauptsächlich 3 Topologien relevant:

- Daisy Chain: direkte Verbindung von zwei oder mehreren Endgeräten in Reihe
- Loop: kreisförmige Verbindung der Endgeräte
- Star: sternförmige Verbindung der Endgeräte mit einem zentralen Netzknoten

Diese Topologien haben Vor- und Nachteile. Daisy Chains sind leicht aufzubauen und die Fehlersuche ist sehr einfach. Es können nur Dante-Geräte mit schaltbarer

¹¹⁹ Vgl. Audinate, „Dante Certification Program Level 1“, 2019 <<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/level-one-dante-certification-program-plasa-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 17 Januar 2020]. S. 20

¹²⁰ Vgl. „Can I use EEE (Energy Efficient Ethernet or 'Green Ethernet') in my Dante network? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/can-i-use-eee-energy-efficient-ethernet-or-green-ethernet-my-dante-network>> [zugegriffen 19 Januar 2020].

Netzwerkfunktionalität (eingebauter 2-Port-Switch) in einer Daisy Chain-Topologie verbaut werden. Bei mehr als 2 Geräten müssen diese im Switch Mode sein. Das macht die Herstellung einer Redundanz bei mehr als zwei Geräten allerdings unmöglich. Die Looptopologie gewährleistet gute Redundanz für Netzwerke mit wenigen Geräten. Allerdings müssen die verwendeten Switches dafür konfiguriert werden. Es besteht die Gefahr der Spaltung des Systems in zwei Teile bei zwei gleichzeitig auftretenden Problemen. Auch hier müssen die Geräte mindestens eingebaute 2-Port-Switches besitzen. Die Sterntopologie bietet bei steigender Teilnehmerzahl die am besten realisierbare Redundanz und die geringste Anzahl an Switch-Hops im Vergleich zu anderen Topologien. Deshalb ist sie auch die von Audinate empfohlene Topologie für Dante.¹²¹ Diese kommt auch automatisch zustande, wenn zwei Teilnetze miteinander verbunden werden. Man spricht dann von einem hierarchischen Stern. Der Nachteil von der Sterntopologie ist, dass bei einem Ausfall des zentralen Knotens das ganze Netzwerk zusammenbricht.¹²² In der Praxis findet man bei sehr kleinen Netzwerken (2 Geräte) meistens eine Daisy Chain-Topologie. Bei mittleren bis großen Netzwerken (<4 Geräte) wird meistens eine hierarchische Sterntopologie oder eine Mischform aus Loop- und hierarchischer Sterntopologie aufgebaut. Diese Mischform nennt man Maschentopologie. Sie bietet hohe Fehlertoleranz und verbindet die Vorteile von Loop- und Sterntopologie. Allerdings steigt dadurch die benötigte Anzahl an Switchports und notwendiger Switchadministration erheblich.¹²³

Die Redundanz kommt in einem Dante-Netzwerk durch die physische oder logische Trennung zweier paralleler Netzwerke zustande. Ein einzufügendes Dante-Gerät im Redundant Mode sendet und empfängt auf dem Primary-Port die Gleichen Pakete wie auf dem Secondary-Port. Sollte nun eines der beiden Netze zusammenbrechen, wird automatisch das jeweils andere weiterlaufen.¹²⁴ Wird ein redundantes Netz mittels zweier VLANs erstellt, spricht man von einer „nicht-echten Redundanz“, da im Falle eines Ausfalls auf dem Übertragungsweg beide Netze versagen. Eine echte Redundanz kann also nur gegeben sein, wenn das Havarie-Netz physisch vom Hauptnetz getrennt ist.¹²⁵ Für eine Ausfallsicherheit bei Live-Veranstaltungen wäre demnach immer eine echte Redundanz einer nicht-echten Redundanz vorzuziehen. In der folgenden Abbildung 9 ist eine echte Redundanz eines einfachen Dante-Netzes sehen.

¹²¹ Vgl. „Dante FAQs | Audinate“ <<https://audinate.com/resources/faqs>> [zugegriffen 17 Januar 2020].

¹²² Vgl. BAUN. S. 24-25

¹²³ Vgl. Liam HALPIN, „Deploying Dante Networks In Live Events“, 2016

<<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/deploying-dante-networks-in-live-events-plasa-liam-halpin-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 14 Januar 2020]. S. 11-22

¹²⁴ Vgl. d&b-Audiotechnik. S. 5

¹²⁵ Vgl. Audinate, „Dante Certification Program Level 2“, 2019 <<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/dante-certification-program-level-two-intermediate-concepts-clocking-unicast-multicast-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 17 Januar 2020].

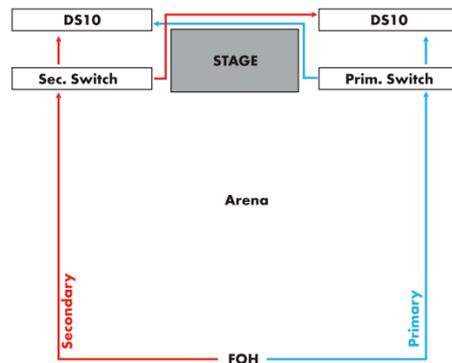


Abbildung 9: "echte" Dante Redundanz¹²⁶

Zusätzlich zur Redundanz des Netzes besteht bei Dante die Möglichkeit, einen Gerätetausch bei einem Havariefall vorzunehmen. Als Beispiel soll an dieser Stelle ein Dante Avio 2-Kanal Analog Input Adapter dienen. Ein solcher Adapter ermöglicht das Einspeisen zweier Mikrofonsignale in das Netzwerk. Fällt dieser Adapter aus, kann er durch ein identisches Gerät ersetzt werden. Wenn dieser den gleichen Gerätenamen trägt (wird in Dante Controller konfiguriert (siehe Kapitel 2.5.2.1)), wird das Ersatzgerät automatisch die Subscriptions des havarierten Geräts übernehmen. Somit muss im Havariefall nur ein Gerät getauscht werden, aber keine weitere softwareseitige Konfiguration vorgenommen werden. Diese Funktion erhöht zwar nicht die Ausfallsicherheit, kann jedoch zur Verbesserung des Workflows im Havariefall genutzt werden. Werden zwei Geräte mit dem gleichen Gerätenamen an ein Netzwerk angeschlossen, kommt es zu einem Namenskonflikt und eines der beiden Geräte wird automatisch umbenannt. Dante sieht vor, dass Gerätenamen im Netzwerk einzigartig sind und dass Kanalnamen pro Gerät einzigartig sind.¹²⁷

Audinate stellt für verschiedene Anwendungen unterschiedliche Chipsätze bereit, welche von Herstellern in ihre Produkte verbaut werden können. Einige Beispiele für Dante-Geräte sind:

- Audioverstärker
- Lautsprechermanagement-Systeme
- Aktive Lautsprecher
- Mischpult-Systeme mit eingebauter oder durch Einschubkarten nachrüstbarer Dante-Anbindung
- Digitale Stageboxen
- Funkstrecken
- Intercomsysteme
- Audiorekorder
- Audio-Interfaces

¹²⁶ Vgl. d&b-Audiotechnik. S. 5

¹²⁷ Vgl. „Device Names and Channel Labels“ <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/webhelp/content/device_names_and_channel_labels.htm> [zugegriffen 17 Januar 2020].

Die maximal mögliche Kanalanzahl ist abhängig von der im jeweiligen Produkt verbauten proprietären Dante-Hardware und der Bandbreite des verwendeten Netzwerks. Audinate verbaut aktuell Chipsätze ab 2*2 Kanälen in verschiedenen Formfaktoren. Die potenteste Dante HC-Hardware unterstützt momentan 512*512, also 1024 bidirektionale Kanäle bei einer Abtastrate von 48 kHz.¹²⁸

Das Verhältnis zwischen der Abtastrate und den maximal möglichen Kanälen ist bei Dante immer gleich. Bei einer festgelegten Bittiefe und einer Halbierung der Kanalanzahl kann die Abtastrate verdoppelt werden. Die nötige Bandbreite im Netzwerk ist in Kapitel 2.2.5.3 beschrieben.

Dante unterstützt alle relevanten Audioformate für den professionellen Audiomarkt. Auch hier ist der maximal mögliche Wert des jeweiligen Parameters abhängig von der verbauten Hardware. Die Abtastrate kann, je nach Gerät, bis zu 192 KHz betragen. Hierbei können Geräte mit unterschiedlicher Abtastrate im gleichen Netz sein, jedoch ohne Audio untereinander austauschen zu können. Dafür brauchen sie die gleiche Abtastrate. Dante bietet die Möglichkeit eines Abtastraten-Pull-up/downs. Diese Funktion kann relevant werden, wenn Dante-Audio synchron zu Videomaterial laufen soll, welches einer Abtastratenwandlung unterworfen wurde. Wenn zum Beispiel von 24 auf 25 Bilder pro Sekunde gewandelt wurde, kann +4,1667% gewählt werden. Das muss aber auf allen Geräten geschehen, welche das entsprechende Audiosignal erhalten oder senden. Diese Geräte befinden sich dann auf einer eigenen sogenannten „Clock Domain“ und können nur Audio an Geräte in der gleichen „Clock Domain“ versenden oder empfangen. Die maximale Bittiefe ist 32 Bit. Die 2 wählbaren Bittiefen 16, 24 und 32 Bit können in einem Netzwerk koexistieren. Die funktioniert mit dem Hinzufügen von „leeren“ Bits bei der Übertragung an ein Gerät mit höherer Bitrate beziehungsweise dem Löschen der jeweils überschüssigen Bits bei der Übertragung an ein Gerät mit niedrigerer Bitrate.¹²⁹ Dante codiert die Audiosignale mittels Pulse-Code-Modulation (PCM). PCM ist die am häufigsten genutzte Methode zur Analog-Digital-Wandlung von Audio-Signalen und bietet eine Übertragung ohne Qualitätsverlust.^{130 131} Die Anforderung einer größtmöglichen Übertragungsqualität des Anwendungsszenarios kann also erfüllt werden.

¹²⁸ Vgl. „Dante HC | Audinate“ <<https://www.audinate.com/products/manufactureur-products/dante-hc>> [zugesgriffen 14 Januar 2020].

¹²⁹ Vgl. „Dante Advanced Configuration“.

¹³⁰ Vgl. SMYREK. S. 290

¹³¹ Vgl. „Settings Available in Dante Controller“

<https://dev.audinate.com/GA/dvs/userguide/webhelp/content/settings_available_in_dante_controller.htm> [zugesgriffen 14 Januar 2020].

2.5.2 Software

Die hier behandelte Software kann in 2 Kategorien eingeteilt werden:

- Steuersoftware: Dante Controller
- Input-/Output-Software: Dante Virtual Soundcard

Da das Anwendungsszenario dieser Arbeit Live-Veranstaltungen ist, werden in diesem Kapitel die für die Anwendung in lokalen Netzen relevante Software im Detail behandelt. Die hauptsächlich genutzten Softwares sind Dante Controller zur Steuerung des Netzes und Dante Virtual Soundcard. Andere Software von Audinate, wie Dante Domain Manager und Dante Via wird aus den in der Einleitung genannten Gründen nicht behandelt.

2.5.2.1 Dante Controller

Dante Controller bildet das Schaltzentrum für jedes Dante-Netzwerk. Die Software ist kostenlos auf der Audinate-Website als Download erhältlich für Mac OS und Windows. Um mit der Software ein Dante-Netz administrieren zu können, braucht das zu benutzende Endgerät lediglich einen 100 Mbit/s oder 1 Gbit/s-Netzwerkanschluss oder einen WLAN-Adapter. Die System-Administration ist der einzige Bereich, in dem Audinate WLAN zulässt. Dazu muss an einem Netzknoten ein WLAN-Adapter angeschlossen werden.¹³² Dante Controller ermöglicht das Routen von Audiokanälen und die Konfiguration und Überwachung des Netzwerks und der Netzwerkgeräte. Dieses Kapitel geht auf die diversen Funktionen des Programms ein und orientiert sich am Aufbau der Software selbst. Es ist empfehlenswert, die verschiedenen Teile der Software bei der Lektüre der nächsten Seiten mit einer eigenen Instanz von Dante Controller nachzuvollziehen.

Grundkonfiguration

Damit der Dante Controller ordnungsgemäß funktionieren kann, muss die richtige Netzwerk-Schnittstelle ausgewählt werden. Es handelt sich hierbei um diejenige Schnittstelle, mit der der Rechner mit dem Dante-Netz verbunden ist. Im Network-View, welches das Hauptfenster nach dem Starten der Software ist, kann unter dem  - Button („6“ in Abbildung 12) die Schnittstelle gewählt werden.

¹³² Vgl. „Can Dante operate over a Wi-Fi network? | Audinate“.

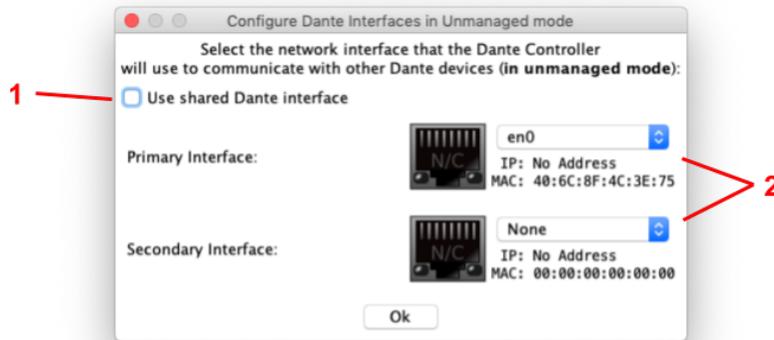


Abbildung 10: Dante Controller, Netzwerkkonfiguration

- 1- „Use shared Dante interface“: Ist diese Option gewählt, nutzen automatisch alle anderen auf diesem Rechner befindlichen Dante-Programme (z.B.: Dante Virtual Soundcard oder Dante Via) das gewählte Netzwerkinterface. In diesem Fall können keine drahtlosen Interfaces mehr gewählt werden.
- 2- „Primary- /Secondary-Interface“: Hier kann das zu benutzende Netzwerkinterface zur Steuerung des Dante-Netzwerks gewählt werden. Besitzt der Computer, wie in den meisten Fällen, nur ein Netzwerkinterface, wird dieses bei „Primary Interface“ gewählt. Wird ein redundantes, also doppeltes Netzwerk administriert, muss der Computer, um das Secondary-Netzwerk zu kontrollieren, mit einem Switch des Secondary-Netzwerks verbunden werden. Wenn der Rechner zwei Netzwerkinterfaces besitzt, kann eines mit dem Primary-, und eines mit dem Secondary-Netz verbunden werden. Die Anschluss-Symbole zeigen den Status der jeweiligen Verbindung an.

Symbol	Bedeutung
	Kein Netzwerkinterface gewählt, Netzwerkgerät nicht verbunden oder aktiviert
	Funktionsfähiges 100 Mbit/s Netzwerk
	Funktionsfähiges 1 Gbit/s Netzwerk
	WLAN-Interface gewählt, keine Verbindung
	Funktionsfähiges WLAN-Interface

Tabelle 9: Netzwerk-Interface-Symbole

Ist die richtige Netzwerk-Schnittstelle gewählt, erscheinen die angeschlossenen Dante-Geräte in der Routing-Matrix von Dante Controller.

Network View

Der Network View ist das Hauptfenster von Dante Controller. Alle relevanten Informationen können hier abgerufen werden. Die Funktionen werden schematisch nach den Nummern in der nachfolgenden Abbildung erklärt.

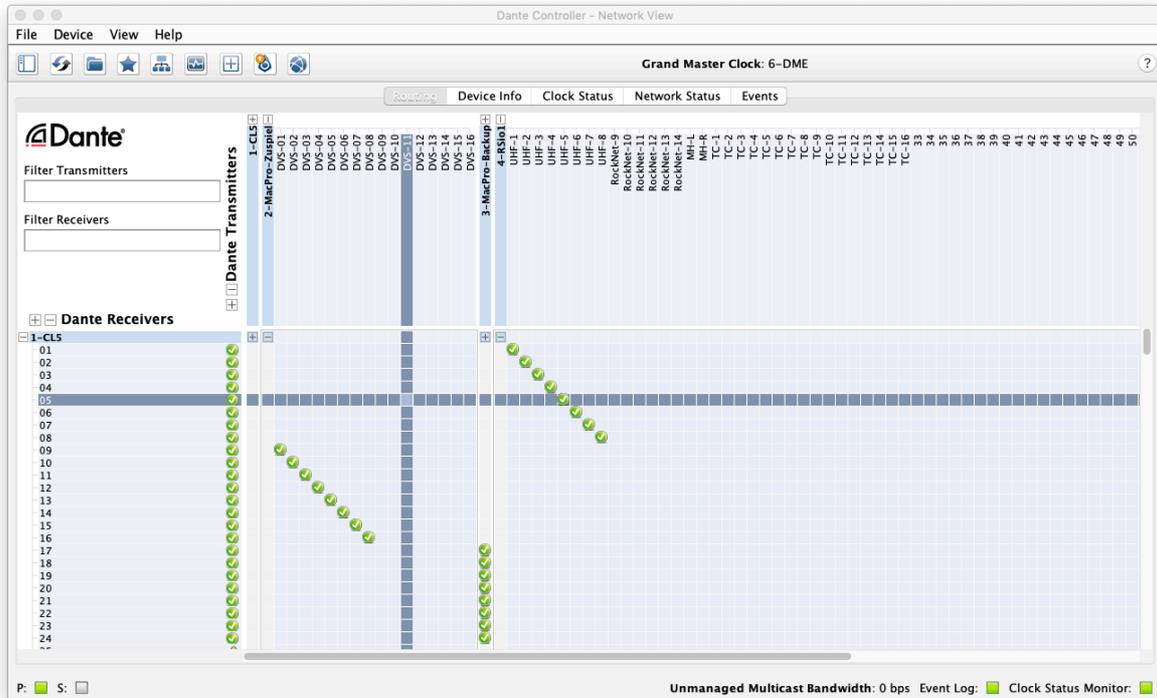


Abbildung 11: Dante Controller - Network View

Main Toolbar



Abbildung 12: Dante Controller Main Toolbar

Mittig in der oberen Hauptwerkzeuggestreife des Network View wird der Name des Geräts, welches das Master-Takt liefert, angezeigt („1“ in Abbildung 12, siehe 2.4.3).

Mit einem Klick auf den  - Button („2“ in Abbildung 12) in den oberen Aktionsleiste öffnet man das Filterpanel, welches links neben der Routingmatrix erscheint. Im oberen Eingabebereich kann man nach Geräten und Kanälen filtern. Der „Clear All“-Button löst alle Filterungen auf. Die gewählten Filter sind additiv. Das bedeutet, dass die angezeigten Geräte alle gefilterten

Spezifikationen erfüllen.¹³³ Die einzelnen Filteroptionen sind in der untenstehenden Abbildung zu sehen und anschließend erklärt.



Abbildung 13: Filterpanel von Dante Controller

- 1- Device Lock: Filtert Geräte nach ihrem Sperrstatus und ob das Gerät diese Einstellung unterstützt. Ein gesperrtes Gerät kann hinsichtlich seiner Subscriptions und Einstellungen nicht modifiziert werden.
- 2- Sample Rate: Filtert Geräte nach deren eingestellter Abtastrate.
- 3- Sync to External: Filtert Geräte nach ihrer Einstellung, ob sie ihren Takt von einer externen Clock bekommen und ob das Gerät diese Einstellung unterstützt.
- 4- Latency: Filtern Geräte nach deren eingestellter Latenz.
- 5- Subscriptions: Filtert Geräte nach hergestellten oder fehlerhaften Subscriptions.
- 6- Tx Multicast Flows: Filtert Geräte nach aktiven Multicast-Flows.
- 7- AES67: Filtert Geräte nach eingestellter AES67-Funktion und ob das Gerät diese Einstellung unterstützt.
- 8- Sample Rate Pull-Up: Filtert Geräte nach eingestelltem Taktraten Pull-up

Mittels des  - Buttons („3“ in Abbildung 12) lädt Dante Controller die aktuellen Geräte-Informationen aus dem Netzwerk herunter. Das kann sinnvoll sein, wenn eine Änderung im Netzwerk noch nicht von dem Dante Controller erkannt wurde. Dante-Geräte werden von Dante Controller hinsichtlich ihres Takt-Synchronisations-Status überwacht. Es gibt passives und aktives Monitoring. Die Modi werden mit dem  - Button („7“ in Abbildung 12) umgeschaltet. Erscheint der Button in blau, wird passiv überwacht, in grün, aktiv. Im passiven Modus wird lediglich Verlust oder Wiederauffinden von Takt-Synchronisation angezeigt. Im aktiven Modus hingegen werden auch Zeichen von Instabilität angezeigt. Das ist wichtig, denn

¹³³ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 45

wenn ein Takt instabil ist besteht die Möglichkeit von Synchronitätsverlust, was zur Stummschaltung des Geräts führt. Gründe für einen instabilen Takt sind in Kapitel 2.4.3 zu finden. Der  - Button („8“ in Abbildung 12) fasst Kanäle von Geräten in der Routing-Ansicht des Network View in Gruppen von 16 Kanälen zusammen. Das soll die Übersicht erleichtern. Mit dem  - Button („9“ in Abbildung 12) öffnet sich die Software Dante Updater, mit der Die Firmware von Dante-Geräten aktualisiert werden kann. Wenn eine Aktualisierung verfügbar ist, wird dies mit einem kleinen orangenen Pfeil am  - Button kenntlich gemacht. Der  - Button („10“ in Abbildung 12) ermöglicht die Verbindung mit einer Dante-Domain. Die Konfiguration und Nutzung dessen wird in dieser Arbeit nicht thematisiert.

Presets

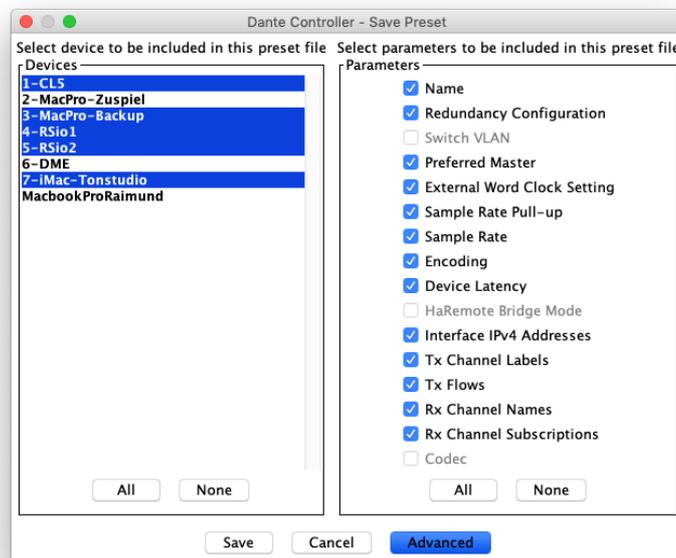


Abbildung 14: Dante Controller - Save Preset Dialog

Der  - Button („4“ in Abbildung 12) zum Speichern von Presets, sowie der  - Button („5“ in Abbildung 12) zum Laden von Presets ermöglicht das Sichern von Routing- und Geräteeinstellungen. Das ermöglicht außer einer Backupoption und einer erweiterten Filtermöglichkeit, welche Parameter der ausgewählten Geräte gespeichert werden sollen, auch die Benutzung sogenannter „Device Roles“. Eine Rolle wird in einem Preset für jedes angewählte, zu speichernde Gerät erstellt (siehe Abbildung 14) und kann beim Laden in einem ähnlichen Netzwerk benutzt werden, um die Einstellungen auf gleiche oder ähnliche Geräte zu übertragen.¹³⁴ Eine Übertragung auf ein identisches Gerät wird sehr gut funktionieren,

¹³⁴ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 98

während zum Beispiel eine Übertragung einer 64-Kanal-Mischkonsole mit 192 kHz Abtastrate und allen ein- und ausgehenden Kanälen mit Subscription auf einen Dante AVIO 2-Kanal Analog Input Adapter aller Voraussicht nach nicht sehr gut funktionieren wird.

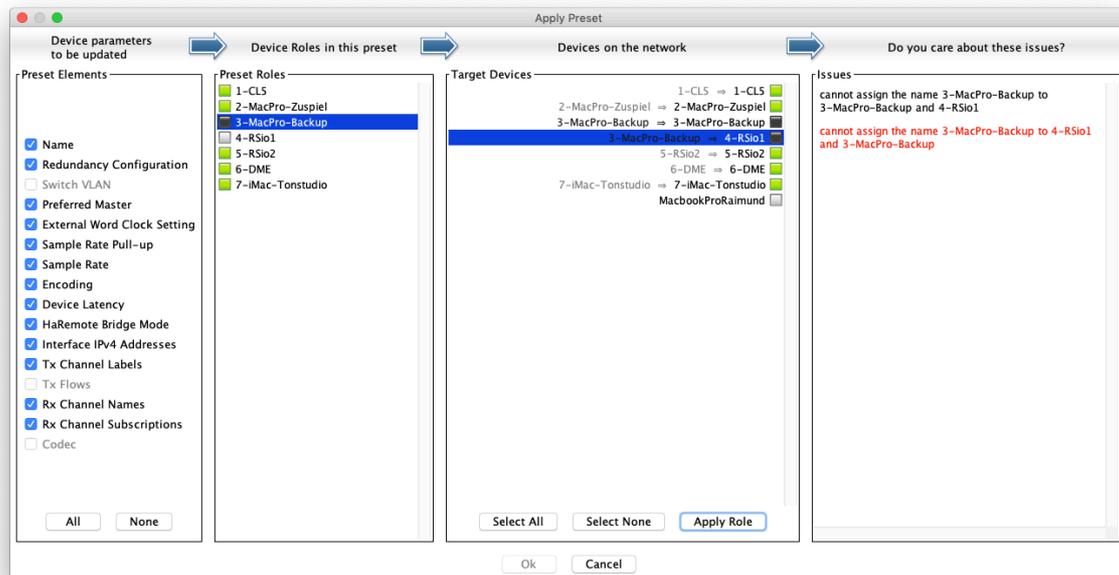


Abbildung 15: Dante Controller - Load Preset Dialog

Beim Laden eines Presets werden die im Preset gespeicherten Rollen unter „Preset Roles“ angezeigt und automatisch den im Netzwerk befindlichen Geräten unter „Target Devices“ zugeordnet. Die automatische Zuordnung geschieht nach folgenden Regeln¹³⁵:

- Perfekte Übereinstimmung: Das gleiche physische Gerät, von dem die Rolle erstellt wurde, wird im zu bespielenden Netzwerk gefunden.
- Übereinstimmung des Gerätenamens
- Keine Übereinstimmung: Die Rolle wird einem Gerät mit gleicher Modellart und gleichem Hersteller zugewiesen

Eine Zuordnung kann mit der Entfernen-Taste gelöscht werden. Eine manuelle Zuordnung erfolgt mittels Selektion gewünschter Rolle und Zielgerät und einem Klick auf „Apply“.

Die farbigen Indikatoren bei „Preset Roles“ und „Target Devices“ haben folgende Bedeutungen.

¹³⁵ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 102

Indikator	Bedeutung
	Rolle nicht zugewiesen
	Rolle ist erfolgreich einem oder mehreren Geräten zugewiesen
	Warnung vor teilweiser Inkompatibilität einer Zuweisung
	Warnung vor Inkompatibilität einer Zuweisung
	Warnung vor funktionskritischem Effekt auf das Netzwerk durch die Zuweisung

Tabelle 10: Preset-Rollen-Indikatoren

Unter „Issues“ können nähere Informationen zu den Inkompatibilitäten der Zuweisungen ausgelesen werden.

Eine weitere Nutzungsform von Presets bei Dante Controller ist das Umsetzen von globalen Einstellungen. Möchte man zum Beispiel alle Geräte in einem Netzwerk auf die gleiche Latenz einstellen, wählt man in der „Save Preset“-Form unter „Advanced“ (siehe Abbildung 14) „Device Latency“ an, wählt ein Gerät aus, welches die gewünschte Latenzeinstellung hat und speichert das Preset. Danach lädt man das Preset, wählt unter „Preset Roles“ das gewünschte Gerät aus, klickt unter „Target Devices“ auf „Select All“, bestätigt die Zuordnung mit einem Klick auf „Apply Role“ und lädt das Preset mit „OK“.

Reiter 1 – Routing

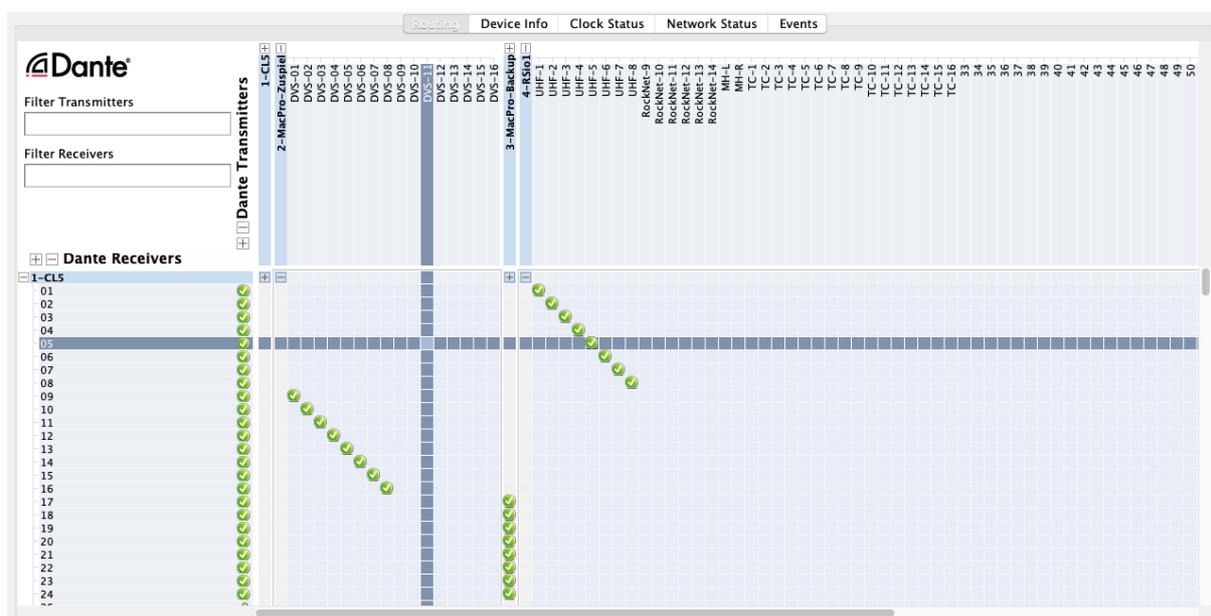


Abbildung 16: Dante Controller - Routing Matrix

Das Herzstück des Network View ist die Routing-Ansicht, welche über den „Routing“-Reiter zu erreichen ist. Im oberen Bereich werden die Eingangskanäle aller angeschlossenen Geräte von links nach rechts angezeigt. Im linken Bereich findet man von oben nach unten die Ausgangskanäle der Geräte. Die Kanäle sind nach Geräten sortiert und werden über den Gerätenamen identifiziert.

Über die Filter-Eingabezeilen kann man dezidiert nach angeschlossenen Geräten und Kanälen suchen. Durch einen Doppelklick auf den Gerätenamen öffnet sich der Device View des jeweiligen Geräts. Mit den Plus- und Minussymbolen können die Kanäle auf- und zugeklappt werden. Sind die Kanäle aufgeklappt, wird eine klassische Routing-Matrix sichtbar. Um einen Eingangskanal auf einen Ausgangskanal zu routen muss der zu dieser Verbindung passende Kreuzungspunkt (blau hinterlegt) in der Matrix angeklickt werden. Um eine Verbindung zu lösen, muss man wieder auf den jeweiligen Kreuzungspunkt klicken. Eine Verbindung zweier Punkte in einem Dante-Netzwerk nennt man Subscription. Mit der Tastenkombination Ctrl (bei Mac-Computer) bzw. Strg (bei Windows-Computer) + Klick auf das Minus-Symbol in der oberen, linken Ecke des Kreuzungsfeldes zweier Geräte, stellt man ein 1:1-Routing her. Das heißt, Eingang 1 des sendenden Geräts wird mit Ausgang 1 des empfangenden Geräts verbunden. Eingang 2 wird mit Ausgang 2 verbunden und so weiter. Verschiedene Symbole geben Auskunft über den Status der „Subscription“.

Symbol	Bedeutung
	Funktionsfähige Subscription
	Subscription wird hergestellt
	Subscription ist nicht aufgebaut (Gerät nicht im Netzwerk)
	Fehler
	Subscription ausstehend, erscheint bei vielen parallelen Verbindungsvorgängen

Tabelle 11: Subscription – Status

Wenn man die Maus über ein solches Symbol bewegt, erscheint eine erweiterte Information zum Subscription Status im Tooltip. Diese Information gibt bei einer erfolgreichen Subscription Auskunft über die Richtung der Verbindung (z.B.: Kanal 1@Mischpult-FOH ← Eingang 1@Stagebox1) und die Art der Verbindung (Unicast/Multicast). Dante stellt standardmäßig Unicast-Verbindungen her.¹³⁶ Bei einer fehlerhaften Subscription kann man im Tooltip ablesen, welche Art von Problem vorliegt.

¹³⁶ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 24

Reiter 2 – Device Info

Routing Device Info Clock Status Network Status Events									
Device Name	Model Name	Product Version	Dante Version	Device Lock	Primary Address	Primary Link Speed	Secondary Address	Secondary Link Speed	
1-CL5	CL5	V5.01	4.0.8.2	<input type="checkbox"/>	169.254.86.185	1Gbps	172.31.86.186	1Gbps	
2-MacPro-Zuspiel	Dante Virtual Soundcard	4.0.4.3	4.0.4.3	<input type="checkbox"/>	169.254.180.111	1Gbps	N/A	N/A	
3-MacPro-Backup	Dante Virtual Soundcard	4.0.4.3	4.0.4.3	<input type="checkbox"/>	169.254.46.50	1Gbps	N/A	N/A	
4-RSio1	RSio64-D	V4.50	4.0.8.2	<input type="checkbox"/>	169.254.179.253	1Gbps	172.31.179.254	1Gbps	
5-RSio2	RSio64-D	V4.50	4.0.8.2	<input type="checkbox"/>	169.254.179.241	1Gbps	172.31.179.242	1Gbps	
6-DME	MY16	3.10.1	3.10.1.2	<input type="checkbox"/>	169.254.200.173	1Gbps	172.31.200.174	1Gbps	
7-iMac-Tonstudio	Dante Virtual Soundcard	4.0.4.3	4.0.4.3	<input type="checkbox"/>	169.254.26.27	1Gbps	N/A	N/A	
MacbookProRaimund	Dante Virtual Soundcard	4.1.0.8	4.1.0.8	<input type="checkbox"/>	169.254.210.23	1Gbps	N/A	N/A	

Abbildung 17: Dante Controller - Network View - Device Info

Der Reiter „Device Info“ zeigt Informationen zur Netzwerkkonfiguration über alle im Netzwerk befindlichen Dante-Geräte an. Die angezeigten Informationen sind:

- Device Name: der momentan eingestellte Name des Geräts.
- Model Name: Modellname des Geräts.
- Product Version: Produktversion des Herstellers.
- Dante Version: Firmware-Version der Geräte oder Dante-Software-Version.
- Device Lock: Sperrstatus des Geräts. Ein Klick öffnet den Geräte-Sperr-Dialog. Es kann eine 4-stellige PIN gewählt werden, das Gerät gesperrt und mittels der PIN wieder entsperrt werden. Die Subscriptions und Einstellungen eines gesperrten Geräts können ausgelesen, aber nicht verändert werden.
- Primary Address: IP-Adresse des Primary-Anschlusses des Geräts.
- Primary Link Speed: Portgeschwindigkeit des Anschlusses.
- Secondary Address: IP-Adresse des Secondary-Anschlusses des Geräts.
- Secondary Link Speed: Portgeschwindigkeit des Anschlusses.

Reiter 3 – Clock Status

Routing Device Info Clock Status Network Status Events											
Device Name	Sync	Mute	Clock Source	Domain Status	Primary v1 Multicast	Primary v2 Multicast	Secondary v1 Multicast	Secondary v2 Multicast	Preferred Master	Enable Sync To External	
1-CL5	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	Passive	N/A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2-MacPro-Zuspiel	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	N/A	N/A	Slave Only	N/A	
3-MacPro-Backup	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	N/A	N/A	Slave Only	N/A	
4-RSio1	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	Passive	N/A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5-RSio2	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	Passive	N/A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6-DME	<input checked="" type="checkbox"/>		External Clock	N/A	Master	N/A	Master	N/A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7-iMac-Tonstudio	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	N/A	N/A	Slave Only	N/A	
MacbookProRaimund	<input checked="" type="checkbox"/>		Dante	N/A	Slave	N/A	N/A	N/A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Abbildung 18: Dante Controller - Network View - Clock Status

Der Reiter „Clock Status“ enthält Informationen und Einstellungen über den Takt-Status der im Netzwerk befindlichen Dante-Geräte:

- Device Name: der momentan eingestellte Name des Geräts.
- Sync: Takt-Status des Geräts. Ein grüner Indikator zeigt eine korrekte Synchronisation des Geräts zum Netzwerktakt an. Ein roter Indikator zeigt einen Synchronisationsfehler an.

- Mute: Ein rotes Mute-Symbol zeigt an, dass das Gerät kein Audio ein- oder ausgibt. Das ist zumeist eine Folge von Synchronisierungsproblemen.
- Clock Source: Zeigt die Quelle des Taktes an (Dante oder Extern).
- Domain Status: zeigt die Rolle des Taktes in der Dante Domain an (nicht Teil dieser Arbeit (siehe 1)).
- Primary- / Secondary Status: Zeigt die Synchronisations-Rolle des Geräts an.
 - o Master: Dieses Gerät wurde zum Master-Taktgeber gewählt.
 - o Slave: Dieses Gerät erhält den Takt des Masters.
 - o Passive: Dieses Gerät erhält keine Taktsynchronisation über den Primary- / Secondary Port.
 - o Link Down: Das Gerät ist nicht mit dem Netzwerk verbunden.
 - o N/A: Das Gerät unterstützt die Übermittlung des Synchronisation-Status nicht.
- AES67 Status: Zeigt die Synchronisations-Rolle des Geräts mit anderen AES67-konformen Geräten an. Die Indikatoren sind identisch mit denen des Primary- /Secondary Status. Wird nur bei aktivierter AES67-Funktion angezeigt.
- Preferred Master: Ist dieser Haken gesetzt, erhöht das die Priorisierung des Geräts bei der Wahl zum Master-Takt (siehe 2.4.3). Wenn der Haken nur bei einem Gerät gesetzt ist, ist die Wahl sicher. Wird „Slave Only“ angezeigt, kann dieses Gerät nicht zum Master gewählt werden.
- Enable to Sync External: Wenn diese Option aktiviert ist, empfängt das Gerät seinen Synchronisierungstakt von einem externen Gerät und nicht über das Dante-Netzwerk. Dieses Gerät wird automatisch zum Takt-Master gewählt, außer ein anderes Gerät hat den Haken bei „Preferred Master“ gesetzt. Ist das Feld ausgegraut, muss die Einstellung außerhalb von Dante Controller, z.B. in am Gerät selbst, getätigt werden.

Reiter 4 – Network Status

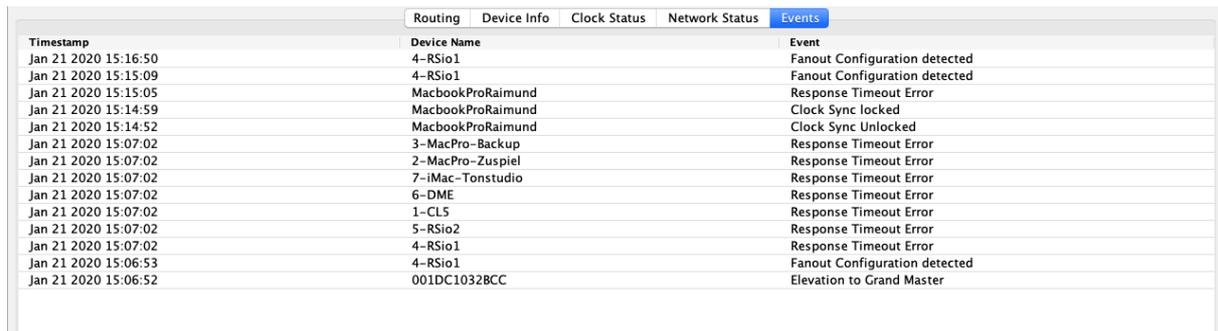
Routing Device Info Clock Status Network Status Events										
Device Name	Subscription Status	Primary Status	Secondary Status	Primary Tx B/W	Secondary Tx B/W	Primary Rx B/W	Secondary Rx B/W	Latency Setting	Latency Status	Packet Errors
1-CL5	⚠️	1Gbps	1Gbps	27 Mbps	11 Mbps	55 Mbps	29 Mbps	1 msec	🟢	🟢
2-MacPro-Zuspiel	✅	1Gbps	N/A	25 Mbps		20 Mbps		4 msec	🟢	🟢
3-MacPro-Backup	⚠️	1Gbps	N/A	10 Mbps		25 Mbps		6 msec	🟢	🟢
4-RSio1	✅	1Gbps	1Gbps	61 Mbps	35 Mbps	11 Mbps	11 Mbps	1 msec	🟢	🟢
5-RSio2		1Gbps	1Gbps	< 1 Mbps	< 1 Mbps	< 1 Mbps	< 1 Mbps	1 msec	🟡	🟢
6-DME	✅	1Gbps	1Gbps	5 Mbps	< 1 Mbps	5 Mbps	5 Mbps	1 msec	🟢	🟢
7-iMac-Tonstudio	✅	1Gbps	N/A	< 1 Mbps		10 Mbps		10 msec	🟢	🟢
MacbookProRaimund		1Gbps	N/A	< 1 Mbps		< 1 Mbps		4 msec	🟡	🟢

Abbildung 19: Dante Controller - Network View - Network Status

Der Reiter „Network Status“ zeigt Netzwerk-relevante Informationen über die im Netzwerk befindlichen Dante-Geräte an. Hier können Unregelmäßigkeiten bezüglich Bandbreitennutzung etc. schnell gefunden werden:

- Device Name: der momentan eingestellte Name des Geräts.
- Subscription Status: Zeigt eine Zusammenfassung der Subscriptions dieses Geräts an. Wenn eine Verbindung nicht ordnungsgemäß hergestellt werden kann, wird das dazugehörige Icon angezeigt (siehe Tabelle 11).
- Primary- /Secondary Status: Zeigt die Netzwerkgeschwindigkeit des jeweiligen Anschlusses des Geräts an.
- Bandbreiten-Anzeigen: Es werden Näherungen des ein- und ausgehenden Datenverkehrs angezeigt. Tx steht für Transmitter, also gesendeter Datenstrom. Rx steht für Receiver, also empfangener Datenstrom.
- Latency Setting: eingestellte Latenz des Geräts.
- Latency Status: zeigt die Leistung des Geräts hinsichtlich der Latenz an. Grün bedeutet, dass es keine Latenzprobleme gibt. Orange bedeutet, dass sich die Latenzwerte von Audiopaketen von einem oder mehreren Kanälen des Geräts dem eingestellten Latenzwert annähern. Rot bedeutet, dass dieser Latenzwert überschritten wurde. Grau bedeutet, dass dieses Gerät keine Subscriptions besitzt.
- Packet Errors: zeigt Paketverluste zwischen dem nächsten Switch und dem Gerät an. Das deutet zumeist auf ein fehlerhaftes Netzkabel hin.

Reiter 5 - Events



Timestamp	Device Name	Event
Jan 21 2020 15:16:50	4-RSio1	Fanout Configuration detected
Jan 21 2020 15:15:09	4-RSio1	Fanout Configuration detected
Jan 21 2020 15:15:05	MacbookProRaimund	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:14:59	MacbookProRaimund	Clock Sync locked
Jan 21 2020 15:14:52	MacbookProRaimund	Clock Sync Unlocked
Jan 21 2020 15:07:02	3-MacPro-Backup	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:07:02	2-MacPro-Zuspiel	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:07:02	7-iMac-Tonstudio	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:07:02	6-DME	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:07:02	1-CL5	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:07:02	5-RSio2	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:07:02	4-RSio1	Response Timeout Error
Jan 21 2020 15:06:53	4-RSio1	Fanout Configuration detected
Jan 21 2020 15:06:52	001DC1032BCC	Elevation to Grand Master

Abbildung 20: Dante Controller - Network View - Events

Der Reiter „Events“ zeigt Informationen über Änderungen oder Fehler im Netzwerk an. Die Ansicht ermöglicht das schnelle Auffinden und Nachvollziehen von Problemen und Änderungen im Dante-Netz (siehe Abbildung 20). Das Ereignisprotokoll kann gespeichert und geleert werden.

Status Bar

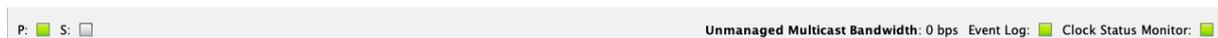


Abbildung 21: Dante Controller - Status Bar

Die Status Bar zeigt folgende Informationen an:

- P: Status des Primary-Netzwerks. Grün bedeutet, dass alles korrekt verbunden ist. Rot zeigt einen Fehler in der Verbindung auf.
- S: Status des Secondary-Netzwerks. Grün bedeutet, dass alles korrekt verbunden ist. Rot zeigt einen Fehler in der Verbindung auf. Wird nur angezeigt, wenn ein Secondary-Netzwerk verbunden ist.
- Unmanaged Multicast Bandwidth: zeigt die Gesamt-Bandbreite der genutzten Multicast-Flows an.
- Event Log: Indikator für neue Ereignisse im Event Log.
- Clock Status Monitor: Indikator für neue Ereignisse im Clock Status Monitor. Mit einem Klick öffnet sich der Clock Status Monitor.

Clock Status Monitor

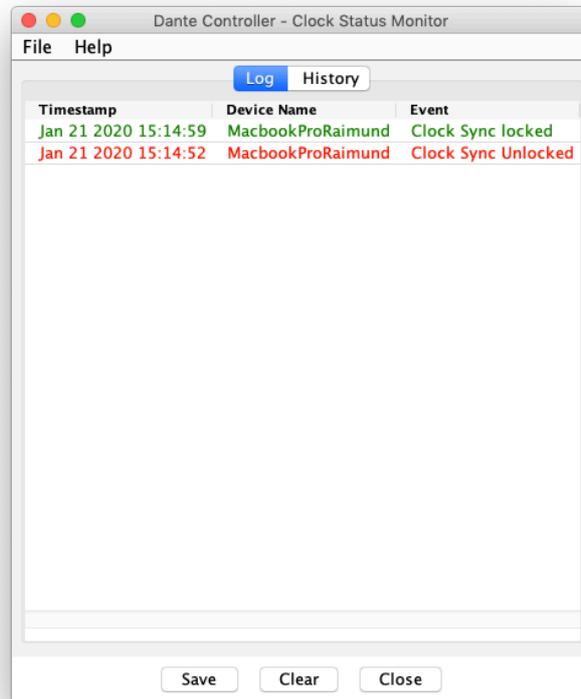


Abbildung 22: Dante Controller - Clock Status Monitor - Log

Der Clock Status Monitor ist eine gefilterte Ansicht des Event Logs und zeigt im „Log“-Reiter mit Zeitstempel und Gerätenamen versehene Statusereignisse an. Die möglichen Ereignisse sind:

- Clock Sync Warning: Warnung bei instabilem Takt
- Clock Sync Unlocked: Verlust der Synchronität mit dem Master-Takt
- Clock Sync Locked: Synchronität mit dem Master-Takt hergestellt.

Mit einem Klick auf „Clear“ können die Ereignisse gelöscht werden. Das löscht aber auch die Ereignisse im „Event Log“.

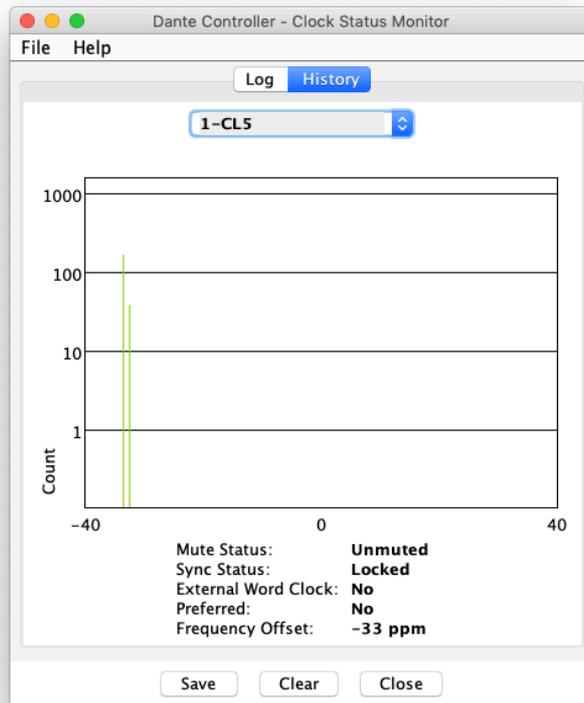


Abbildung 23: Dante Controller - Clock Status Monitor - History

Der Reiter „History“ zeigt neben dem Mute- und Sync-Status, der Nutzung einer externen Wordclock und dem Status des Geräts als Preferred Master ein Histogramm des Taktversatzes des ausgewählten Geräts. Das Histogramm zeigt auf der x-Achse die Messungen der Abweichung des Taktes gegenüber der nominalen Taktfrequenz. Die y-Achse zeigt die Anzahl der Messungen mit einer bestimmten Abweichung an.

Device View

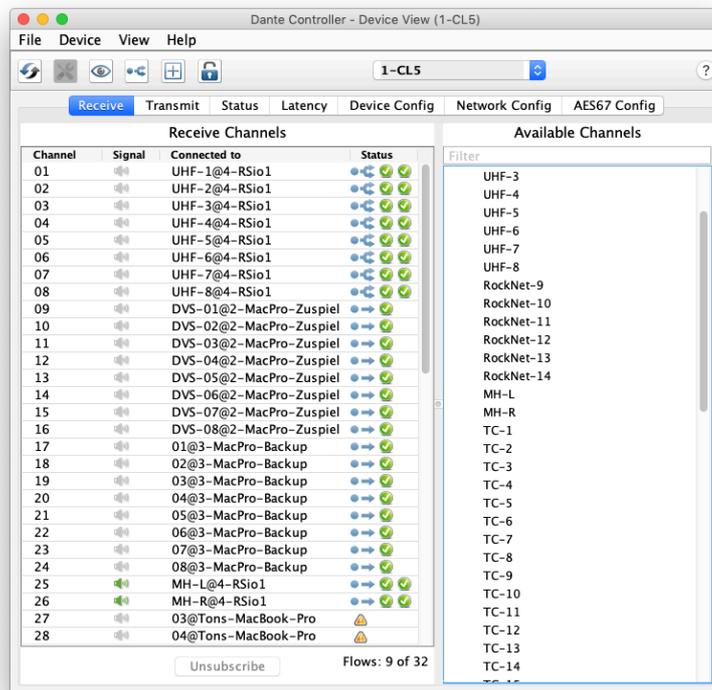


Abbildung 24: Dante Controller - Device View

Im "Device View" werden gerätespezifische Informationen angezeigt und Einstellungen vorgenommen. Diese Ansicht öffnet sich mit einem Doppelklick auf den Gerätenamen in jedem Reiter des „Network View“, außer im Reiter „Events“. Es können mehrere Instanzen des Fensters geöffnet sein.

Device View Toolbar



Abbildung 25: Dante Controller - Device View - Toolbar

Mittig in der oberen Werkzeugleiste des Device View kann via Dropdown-Menü das zu konfigurierende Dante-Gerät ausgewählt werden.

Mittels des  - Buttons lassen sich die Einstellungen und das Routing eines Geräts aktualisieren. Der Dante Controller lädt in diesem Fall die gespeicherten Informationen erneut vom Gerät herunter. Der  - Button ist bei den meisten Dante-Geräten ausgegraut. Er ermöglicht eine Konfiguration des Geräts über eine Web-Oberfläche. Der  - Button ermöglicht eine Hardware-Identifikation mittels z.B. einer blinkenden LED am Gerät. Nicht alle Geräte unterstützen diese Funktion. In diesem Falle ist dieser Button ausgegraut. Der  -

Button ermöglicht, genau wie im Network View das Gruppieren von jeweils 16 Eingangskanälen zur besseren Übersicht. Diese Funktion ist programmübergreifend. Mittels des  - Buttons kann das ausgewählte Gerät mit einem 4-stelligen PIN gesperrt werden. Im Falle eines PIN-Verlusts kann die Sperrung mit der folgenden Vorgehensweise aufgehoben werden:

- Das Gerät vom Rest des Netzwerks isolieren (z.B.: alle anderen Dante-Geräte trennen, den Controller-Rechner direkt verbinden, ein VLAN nutzen).
- Die Verbindung des Geräts trennen und wiederherstellen.
- Mindestens 2 Minuten warten.
- Die „Forgot PIN“-Option im Device Lock-Fenster nutzen.¹³⁷

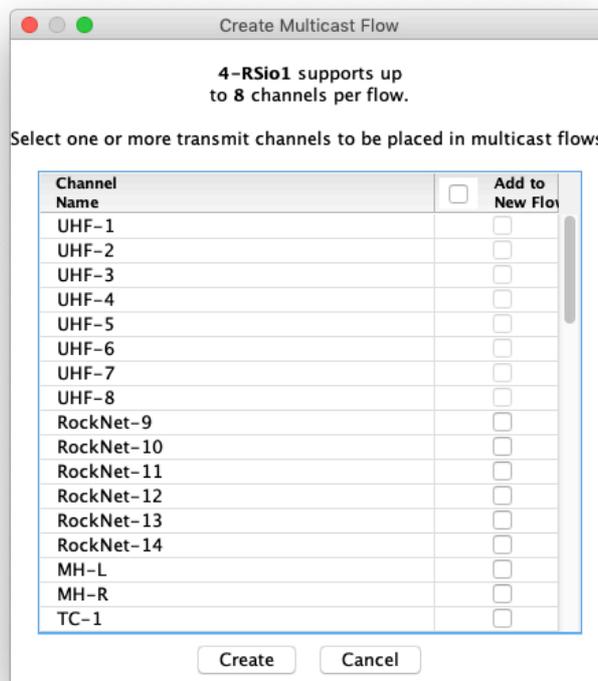


Abbildung 26: Dante Controller - Multicast Dialog

Mit einem Klick auf den  - Button erscheint das Fenster zum Erstellen von Multicast-Flows (siehe 2.4.4). Bei AES67-konformen Geräten kann man zwischen dem Erstellen eines Dante-Multicast-Flows und eines AES67-Multicast Flows auswählen. Je nach Gerät kann man hier auch die Kanalanzahl des Multicast-Flows einstellen. Die zum Flow hinzuzufügenden Kanäle werden mit einem Haken versehen und mit einem Klick auf „Create“ erstellt. Der Flow erscheint dann im „Transmit“-Reiter des Device View. Nach dem Erstellen eines Multicast-Flows können

¹³⁷ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 28

keine Kanäle mehr hinzugefügt oder gelöscht werden. Empfangende Geräte verbinden sich automatisch mit dem Multicast-Flow, wenn er einen Kanal enthält, für den sie eine Subscription haben.¹³⁸

Reiter 1 – Receive

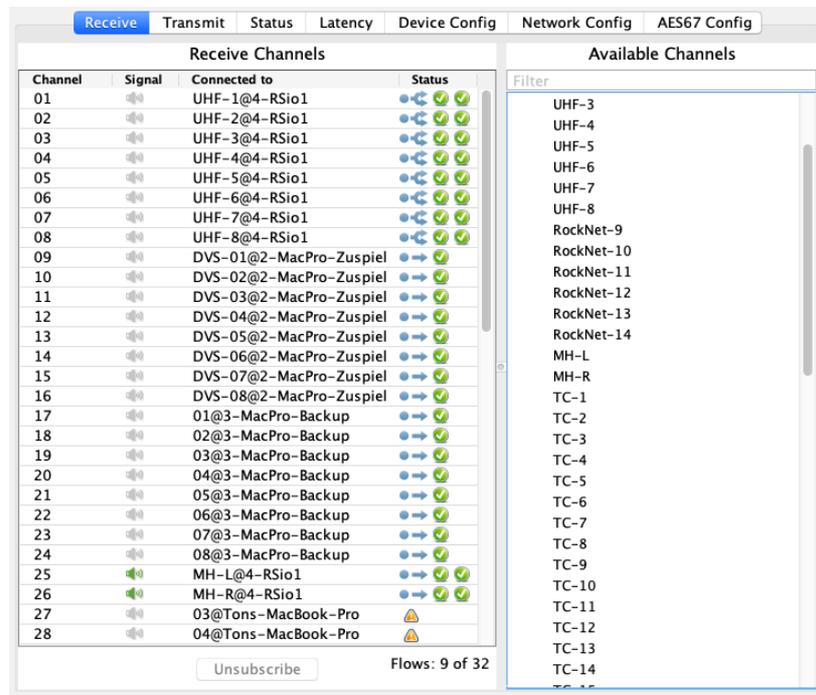


Abbildung 27: Dante Controller - Device View - Receive

Der „Receive“-Reiter zeigt alle Empfangskanäle des ausgewählten Geräts an. Er stellt die zweite Möglichkeit neben der Routing-Ansicht des Network View dar, um Subscriptions zu erstellen. Unter „Receive Channels“ gibt es 4 Spalten:

- Channel: Zeigt die verfügbaren Empfangskanäle an. Mit Doppelklick kann man die Namen der Kanäle editieren.
- Signal: Hier wird der auf dem Kanal anliegende Audiosignalpegel angezeigt. Ein graues Symbol bezeichnet einen Signalpegel von weniger als -61 dBFS. Ist das Symbol grün, liegt ein Pegel zwischen -61 dBFS und 0 dBFS an. Wenn es rot ist, ist der Kanal übersteuert.¹³⁹
- Connected To: Zeigt den Kanal an, welcher auf den gewählten Kanal geroutet ist.
- Status: Zeigt den Status der Subscription mit den folgenden Symbolen an.

¹³⁸ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 24

¹³⁹ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 66-67

Symbol	Bedeutung
•→	Subscription mit einem Unicast-Flow
•↔	Subscription mit einem Multicast-Flow
•→✔	Erfolgreiche Subscription via Unicast
•→✔✔	Redundante Subscription auf dem Primary- und dem Secondary-Netzwerk via Unicast
•↔✔✔	Redundante Subscription auf dem Primary- und dem Secondary-Netzwerk via Multicast
•→✔✘	Redundante Subscription via Unicast. Secondary Interface ist nicht verbunden.

Tabelle 12: Receive Reiter, Subscription Statusmeldungen

Unter der „Receive Channels“-Tabelle kann man ausgewählte Kanalsubscriptions löschen. Hier wird auch die Anzahl der verwendeten Flows angezeigt. Dante-Geräte unterstützen eine geräteabhängige Anzahl an Empfangs-Flows. Diese Empfangs-Flows können bis zu 4 Kanälen enthalten. Die „Available Channels“-Seite des „Receive“-Reiters zeigt die für eine Subscription im Netzwerk zur Verfügung stehenden Sendekanäle anderer Geräte an. Ausgegraute Kanäle können nicht verbunden werden. Grund dafür kann beispielsweise eine unterschiedliche Abtastrate sein.

Reiter 2 - Transmit

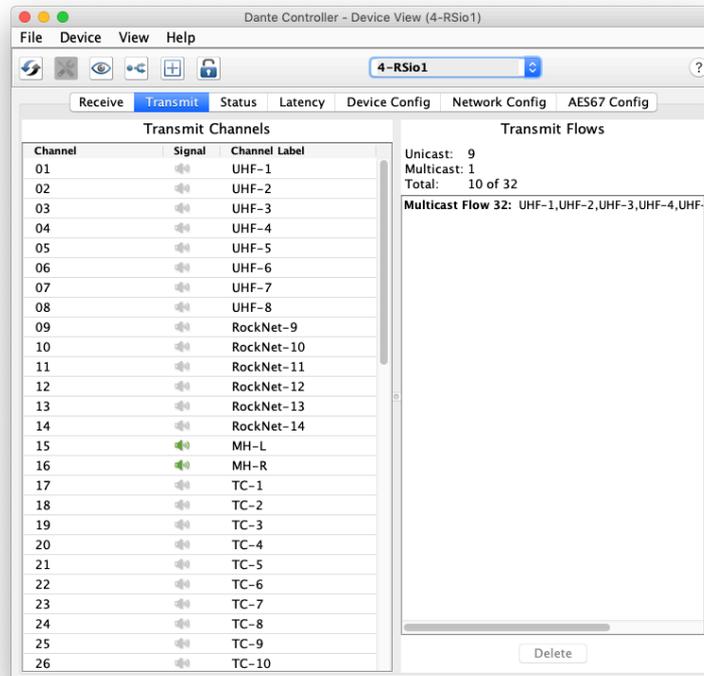


Abbildung 28: Dante Controller - Device View - Transmit

Der „Transmit“-Reiter zeigt Informationen über die Sendekanäle des gewählten Geräts an. Links werden die Sendekanäle mit zugehörigem, mit Doppelklick editierbaren Kanalnamen und den in Kapitel 2.5.2.1 - „Device View Toolbar“ beschriebenen Signal-Symbolen angezeigt. Rechts wird, neben der möglichen Gesamtanzahl an Sende-Flows, die Anzahl an benutzten Unicast- und Multicast-Flows angezeigt. Darunter werden die möglichen Multicast-Flows mit den beinhalteten Kanälen aufgelistet.

Reiter 3 - Status

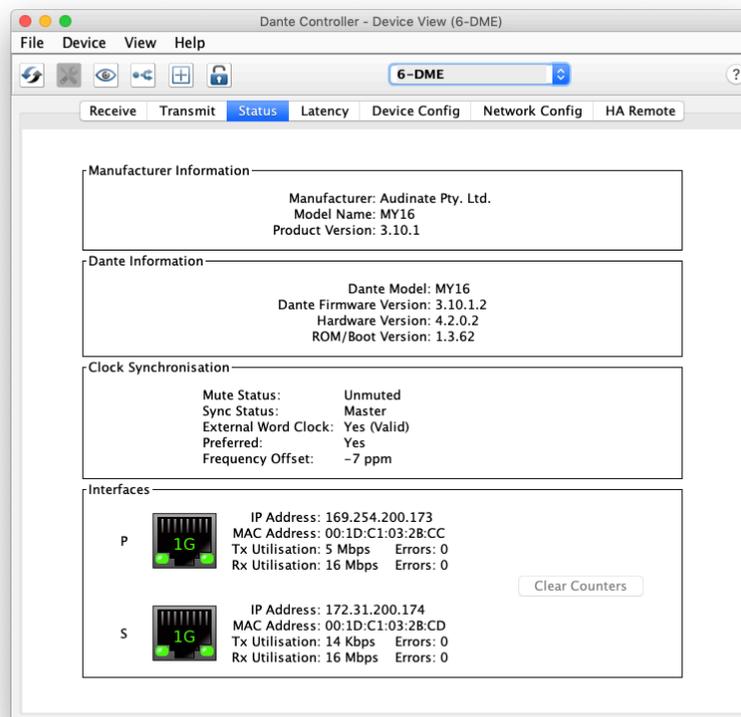


Abbildung 29: Dante Controller - Device View - Status

Im „Status“-Reiter sind Informationen über das Gerät und über den Synchron-Status aufgeführt. Die Informationen unter „Clock Synchronisation“ können aufschlussreich für das Auffinden von Problemen im Netzwerk sein.

- Mute Status: „Muted“ zeigt an, dass kein Audio ein- oder ausgegeben wird.
- Sync Status: „Locked“ zeigt an, dass das Gerät mit dem PTP-Takt des Netzwerks synchronisiert ist.
- External Word Clock: „Yes“ zeigt an, dass das Gerät auf eine externe Taktung synchronisiert wird.
- Preferred: „Yes“ zeigt an, dass das Gerät bei der Master-Takt-Wahl bevorzugt behandelt wird.

- Frequency Offset: Zeigt den maximalen Taktversatz zum Netz-Takt an (siehe Abbildung 23)

Im Rahmen „Interfaces“ werden die Geschwindigkeit, die IP- und MAC-Adresse, und der Sende- und Empfangsdurchsatz der benutzten Netzwerk-Schnittstellen angezeigt. „P“ steht für das Primary-Netzwerk, „S“ steht für das Secondary-Netzwerk.

Reiter 4 - Latency

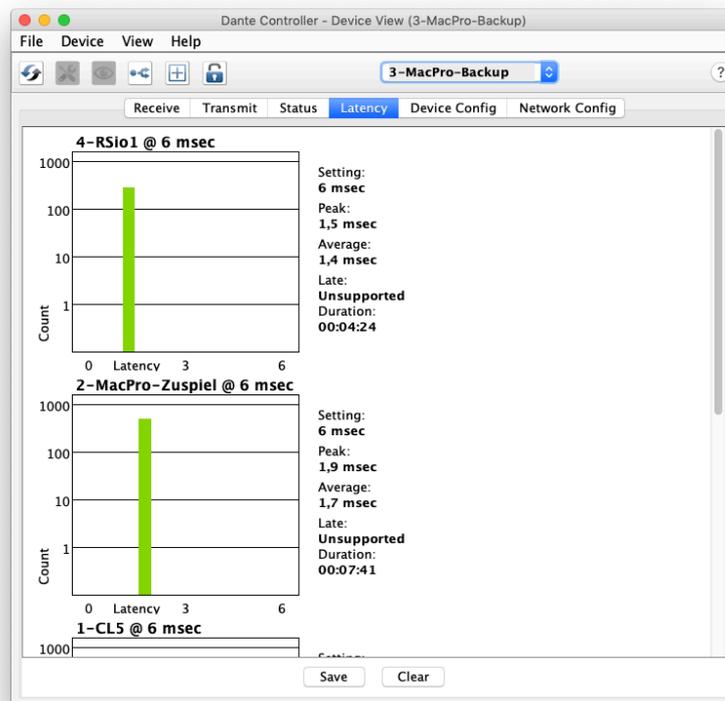


Abbildung 30: Dante Controller - Device View - Latency

Im „Latency“-Reiter werden, wie im „History“-Reiter des Clock Status Monitor (siehe 2.5.2.1 - „Clock Status Monitor“), die Latenz-Histogramme für alle sendenden Geräte angezeigt, für deren Kanäle das gewählte Gerät Subscriptions besitzt. Wenn Subscriptions von Multicast-Flows und Unicast-Flows des gleichen sendenden Geräts vorliegen, wird dafür jeweils ein Histogramm angezeigt. Die Histogramme zeigen die Zahl der Messungen über der jeweiligen Latenz an.

Reiter 5 – Device Config

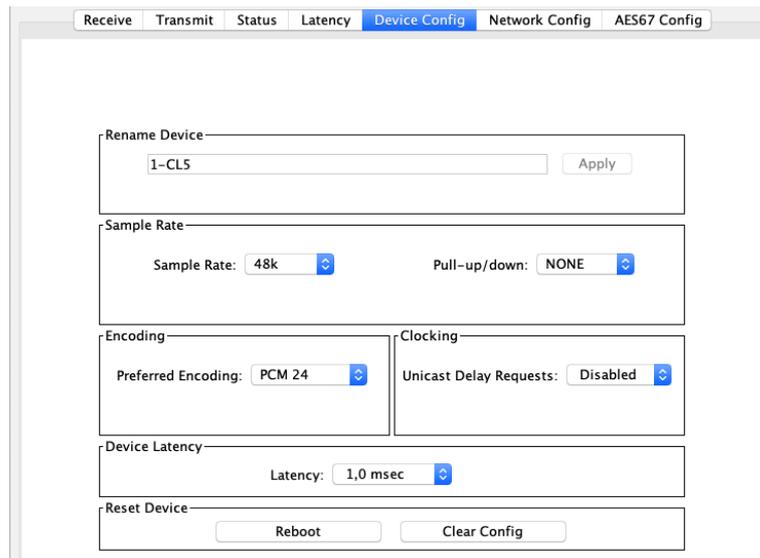


Abbildung 31: Dante Controller - Device View - Device Config

Im „Device Config“-Reiter können gerätespezifische Einstellungen modifiziert werden. Je nach Gerät werden hier unterschiedliche Einstellmöglichkeiten angezeigt:

- Rename Device: Hier kann der Gerätenamen geändert werden.
- Sample Rate: zeigt die momentan eingestellte Abtastrate des Geräts an. Im Drop-Down-Menü werden alle von dem Gerät unterstützten Abtastraten angeboten. Außerdem kann die Pull-up/down-Einstellung verändert werden (siehe 2.4.1).
- Preferred Encoding: zeigt die bevorzugte Abtastrate des Geräts.
- Unicast Delay Requests: Normalerweise fragen Takt-Slaves die zur Datenübertragung im Netzwerk benötigte Zeit beim Takt-Master via Multicast-Nachricht ab. Diese Einstellung kann den Multicast-Datenverkehr in großen Dante-Netzen reduzieren.¹⁴⁰
- Device Latency: Hier kann die Gerätelatenz eingestellt werden.
- Reset Device: hier kann das Gerät neugestartet werden. Außerdem ist es möglich, das Gerät in den Auslieferungszustand zurückzusetzen. Hierbei werden folgende Einstellungen zurückgesetzt:
 - Geräte- und Kanal-Namen
 - Takteinstellungen
 - Statische IP-Adresse
 - Redundanzeinstellungen
 - Abtastrate inkl. Pull-up/down
 - Latenz
 - Routing

¹⁴⁰ Vgl. Audinate, „Dante Controller User Guide“. S. 77

Reiter 6 – Network Config

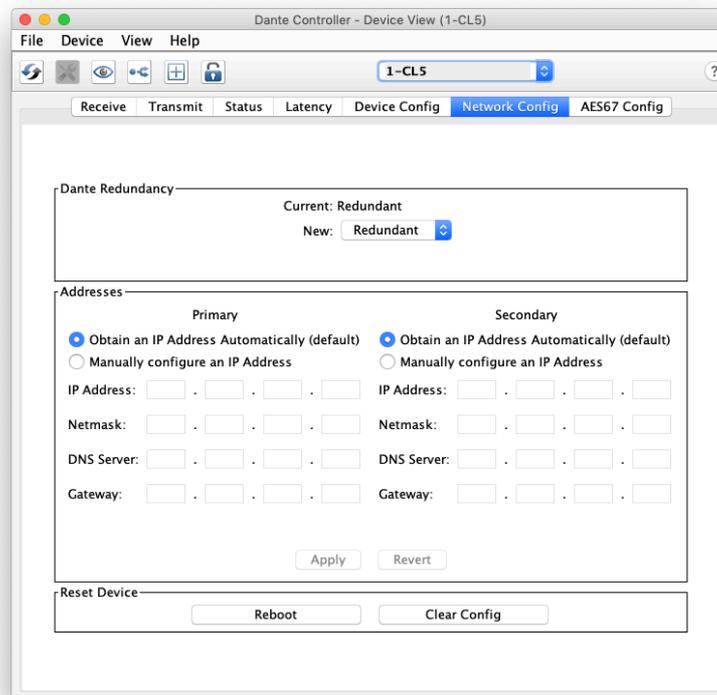


Abbildung 32: Dante Controller - Device View - Network Config

Der „Network Config“-Reiter ermöglicht die Einstellung des Redundanz-Modus, sowie die IP-Einstellungen für die benutzten Ethernet-Ports.

- Dante Redundancy: Ist ein Gerät auf „Redundant“ eingestellt dupliziert es den Datenverkehr auf beide zu nutzenden Ethernet-Ports. Diese Option wird nur bei Geräten angezeigt, die Redundanz unterstützen. Im „Switched“-Modus verhält sich der zweite Ethernet-Port des Geräts wie ein normaler Switch-Port. So wird Daisy-Chaining möglich (siehe 2.5.1). Hat ein Gerät nur einen Ethernet-Port ist diese Option nicht verfügbar.
- Addresses: Standardmäßig ist hier eingestellt, dass das Gerät automatisch via DHCP eine IP-Adresse zugewiesen bekommt. In den meisten Fällen muss dies nicht verändert werden. Falls doch, kann hier eine statische IP mit der zugehörigen Netzmaske gesetzt werden.

Reiter 7 – AES67 Config

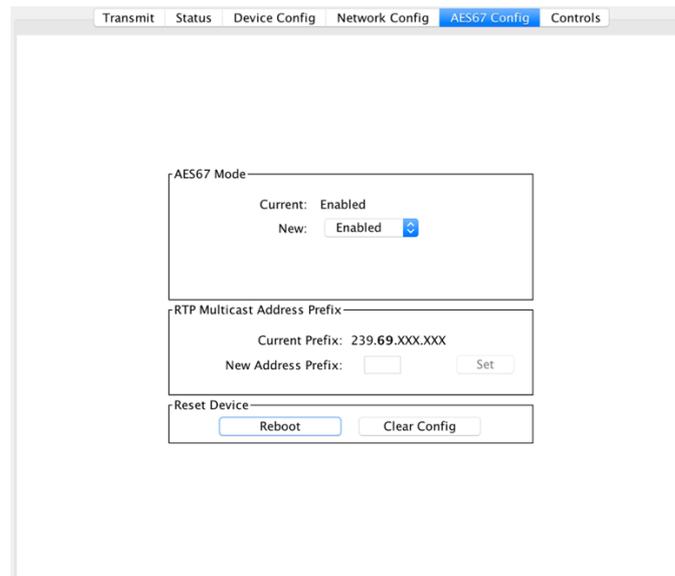


Abbildung 33: Dante Controller - Device View - AES67 Config

Der Reiter „AES67 Config“ ermöglicht die Freischaltung der Möglichkeit eines Geräts AES67-konforme Flows zu senden und zu empfangen (siehe 2.4.4). Dieser Reiter ist nur sichtbar, wenn das Gerät die Funktion zur AES67-konformen Kommunikation besitzt. Unter „RTP Multicast Address Prefix“ kann das Subnetz gewählt werden, in welches und aus welchem die AES67-konformen Flows gesendet und empfangen werden.

Reiter 8 - Controls

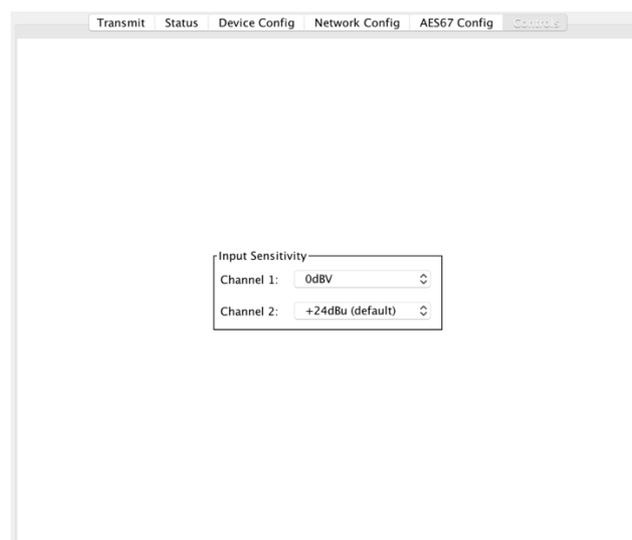


Abbildung 34: Dante Controller - Device View - Controls

Der Reiter „Controls“ beinhaltet Audiopegel-Einstellungen für das ausgewählte Gerät. Weitere Reiter sind „Avid Config Tab“, „HA Remote“. Hier können spezifische Einstellungen für bestimmte Geräte der Hersteller AVID und YAMAHA getroffen werden. Diese sind hier nicht näher erläutert.

2.5.2.2 Dante Virtual Soundcard

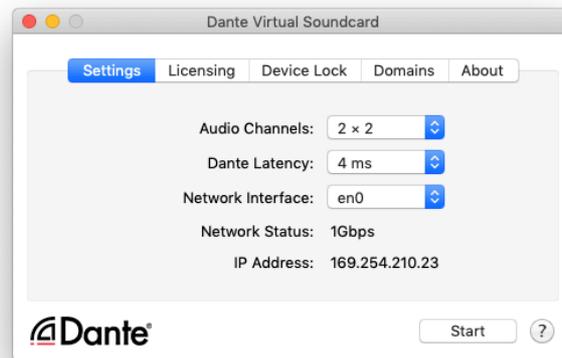


Abbildung 35: Dante Virtual Soundcard

Die Dante Virtual Soundcard, kurz DVS, ist eine kostenpflichtige Anwendung für Windows- und Mac-Computer, welche es ermöglicht einen Computer in ein Dantenetz zu integrieren und Audiokanäle von oder zu anderen Dante-Geräten zu übertragen. Sie wird benutzt, um Mehrspurmitschnitte direkt in die DAW aufzunehmen oder Audio zuzuspielen. Ferner kann sie benutzt werden, um Kanäle zu effektieren, ähnlich eines Insert-Weges. Mit der Dante Virtual Soundcard besitzt der Computer über seinen Netzwerkanschluss alle Funktionen, für die normalerweise der Anschluss eines zusätzlichen Hardware Audio-Interfaces notwendig wäre. Zur Nutzung der DVS wird jedoch mindestens ein anderes Dante-Hardwaregerät im Netzwerk benötigt, da die DVS keinen eigenen Takt generieren kann. Somit ist ein Dante Netzwerk, das nur aus verschiedenen DVS besteht nicht möglich. Die Lizenz für die Software kann auf der Website von Audinate erworben werden und wird in der Software unter dem Reiter „Licensing“ im Control Panel der Software eingetragen. Die virtuelle Soundkarte unterstützt je nach Geschwindigkeit des Netzwerkanschlusses und eingestellter Abtastrate bis zu 64 Eingangskanäle und 64 Ausgangskanäle.

Netzwerkgeschwindigkeit	Max. Kanäle bei 48 kHz / 24 Bit	Bei 96 kHz / 24 Bit	Bei 192 kHz / 24 Bit
100 Mbit /s	32 x 32	16 x 16	8 x 8
1 GBit /s	64 x 64	32 x 32	8 x 8

Tabelle 13: mögliche Kanalanzahl der Dante Virtual Soundcard¹⁴¹

Die Anzahl der bereitgestellten Kanäle sind, zusammen mit der Latenz (4 ms, 8 ms, 10 ms) und der für den Audio-Transport zu nutzenden Ethernet-Schnittstelle, im Reiter „Settings“ einstellbar. Es ist nicht möglich drahtlose Netzwerkadapter auszuwählen (siehe 2.2.5.3). Audinate empfiehlt die Nutzung von 4ms Latenz auf Rechnern mit hoher Leistung, während 10 ms auf Rechnern mit niedriger Leistung empfohlen ist. Die sehr niedrigen Latenzwerte, wie beispielsweise 0,5 ms auf Dante Hardwaregeräten sind bei der DVS nicht verfügbar, da die Latenz benutzt wird, um durch den Rechner ausgelösten, relativ hohen Takt-Jitter (siehe 2.2.3.4) zu kompensieren. DVS unterstützt Abtastraten von 44100 Hz bis zu 192 kHz.¹⁴² Die Windows-Version der Software nutzt ASIO¹⁴³ als Audiotreiber und hat deshalb noch weitere Einstellmöglichkeiten. Diese sind Buffergröße (32, 64, 128, 256, 512, 1024, oder 2048 Samples), Bittiefe (16, 24 oder 32 Bit) und ASIO Latenz (1, 2, 3, 5, 10 und 20ms).¹⁴⁴ Auf diese Größen wird hier nicht näher eingegangen, da sie für die Übertragung mit Dante keine Relevanz haben. Die Mac-Version der Software nutzt CoreAudio und hat keine zusätzlichen Einstellmöglichkeiten. Mittels des Buttons „Start“ bzw. „Stop“ im „Settings“-Reiter des Control Panels wird das virtuelle Audiogerät gestartet. Hier kann man nach dem Start auch die zugewiesene IP-Adresse des Geräts, sowie die Port-Geschwindigkeit ablesen. Wichtig zu wissen ist, dass auch wenn das Control Panel beendet wird, das Audiogerät weiterläuft. Dies gilt auch nach einem Neustart des Computers.¹⁴⁵ Die DVS ist solange aktiv, bis sie im Control Panel mit einem Klick auf „Stop“ beendet wird. Im Reiter „Device Lock“ des Control Panels besteht die Möglichkeit die Soundkarte mittels eines 4-stelligen Codes vor Zugriff zu sperren. Im Reiter Domain kann die DVS in eine Dante-Domain eingefügt werden. Dies ist hier nicht näher beschrieben, da es außerhalb des inhaltlichen Rahmens dieser Arbeit liegt.

¹⁴¹ Vgl. Audinate, *Dante Virtual Soundcard Manual*, 2019. S. 24

¹⁴² Vgl. Audinate, *Dante Virtual Soundcard Manual*. S. 16

¹⁴³ ASIO = Audio Stream Input/Output – mehrkanalfähiges Audiotransfer-Protokoll (meist von Windows-Geräten genutzt)

¹⁴⁴ Vgl. Audinate, *Dante Virtual Soundcard Manual*. S. 19-20

¹⁴⁵ Vgl. Audinate, *Dante Virtual Soundcard Manual*. S. 18

2.6 Interoperabilität

Das Problem der Interoperabilität zwischen verschiedenen Möglichkeiten der Übertragung beschäftigt die Branche nachhaltig. Audinate verfolgt als Firma kommerzielle Interessen. Daraus resultiert die Lizenzierungspolitik. Dante-Chipsätze werden in einem Lizenzmodell an Hersteller verkauft. Dadurch entsteht mitunter auch der hohe Preis von Dante-Geräten. Als Mitglied der AVnu Allianz beteiligt sich Audinate an der Entwicklung eines weitflächigen Standards für AoIP. Die Implementierung von RTP in Addition zu ATP (siehe 2.2.3.3) als Übertragungsprotokoll bringt die Interoperabilität mit AES67, einem im Jahr 2013 veröffentlichten, offenen, lizenzfreien Standard der AES, der eine Basis für einen technologieübergreifenden Austausch von Audio- und Taktdaten bietet. Insofern ist die Interoperabilität von Dante mit anderen AES67-konformen Systemen wie zum Beispiel Ravenna gegeben. Da Dante der Branchenstandard ist, gibt es entsprechend viele Hersteller, die Dante lizenziert haben und die Zahl der kompatiblen Geräte steigt ständig.¹⁴⁶ Insofern gibt es auch für die meisten etablierten Formen der Audioübertragung, innerhalb und abseits von AoIP, Geräte, die die Implementierung in Dante-Netze ermöglichen.

¹⁴⁶ Vgl. „Audinate Products for Manufacturers | Audinate“ <<https://www.audinate.com/products/manufacturer-products>> [zugegriffen 17 Januar 2020].

3 Praxisbeispiel: Dante im Schauspielhaus Stuttgart

Das Schauspielhaus Stuttgart ist eine von drei Sparten der Staatstheater Stuttgart. Die beiden anderen Sparten sind die Oper Stuttgart und das Stuttgarter Ballett. Das Staatstheater Stuttgart ist das größte Drei-Sparten-Haus in Europa und hat über 1.400 Mitarbeiter in unterschiedlichen Abteilungen. Die Hauptspielstätten befinden sich im Schlossgarten Stuttgart mit:

- dem Opernhaus mit 1404 Sitzplätzen,
- dem Schauspielhaus mit 679 Sitzplätzen und
- dem Kammertheater mit 420.

Eine weitere Spielstätte, "Nord" genannt, befindet sich im Probenzentrum der Staatstheater am Löwentorbogen in Stuttgart und ist eine Studiobühne mit 150 Sitzplätzen.^{147 148}

Der Rahmen für dieses Praxisbeispiel ist der Proben- und Vorstellungsbetrieb auf der Bühne des Schauspielhauses.

Die meisten Produktionen im Schauspielhaus beschäftigen einen eigenen Musiker oder Komponisten. Dieser ist in der Probenphase dabei und übergibt sein Werk zusammen mit dem Rest der Produktion zum Zeitpunkt der Premiere an das Haus. Während der Probenzeit wird das Stück eingerichtet. Der Umfang der Einrichtung differiert je nach Produktion stark. Es gibt Stücke, in denen einige aufgenommene Musiken oder Klänge (sogenannte Einspieler) zugespielt werden, und Stücke, in denen ein komplettes Orchester auf der Bühne ist, alle Spieler mikrofoniert sind und noch viele Einspieler dazukommen. Das Audio-System im Schauspielhaus ist so konzipiert, dass es diesen sehr unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden kann. Das bedeutet, dass ein Stück solange abrufbar sein muss, bis es abgespielt ist. Dies erfordert systemseitig eine große Flexibilität, welche mit überall im Bühnenbereich verteilten Versatzkästen realisiert wird. Die Kästen sind mit XLR-Anschlüssen für Mikrofonsignale, Speakon-Anschlüssen für Lautsprechersignale, BNC-Anschlüssen für Takt- und Videosignale, Lichtwellenleiter-Anschlüssen, Stromanschlüssen und CAT-Netzwerkanschlüssen versehen. Die Leitungen laufen alle in verschiedenen Technikräumen zusammen, die mit Querverbindungen zueinander ausgestattet sind. In diesen sind neben Patchfeldern für unterschiedliche Signaltypen, Ein- und Ausgängen des Studer-Mischsystems, Audioverstärkern und Funkperipherie auch Schicht-3-Switches und Netzwerk-Patchfelder untergebracht. Auf den Switches im Haus wird der Datenverkehr der diversen technischen Gewerke und dem restlichen szenischen Netzwerk, wie zum Beispiel Inspiziententechnik,

¹⁴⁷ Vgl. „Arbeiten bei uns | Die Staatstheater Stuttgart“ <<https://www.staatstheater-stuttgart.de/karriere/>> [zugegriffen 22 Januar 2020].

¹⁴⁸ Vgl. „Spielstätten | Schauspiel Stuttgart“ <<https://www.schauspiel-stuttgart.de/haus/spielstaetten/>> [zugegriffen 22 Januar 2020].

mittels VLANs getrennt. Sobald sich der Probenbetrieb von der Probenbühne auf die Hauptbühne verlagert, sitzt der Musiker im Regelfall zusammen mit dem Rest des Regieteams mit im Saal. Während der Proben und in speziellen Ton-Zeiten werden die einzuspielenden Töne und Musiken komponiert, angepasst und für den späteren Vorstellungsbetrieb so automatisiert, dass sichergestellt ist, dass der zuständige Tonmeister das Stück im Sinne der Regie reproduzieren kann. Das geschieht meistens auf einem Laptop mit den Audio-Zuspielprogrammen Ableton Live oder QLab. Anfänglich wurde in der Probensituation, wenn von einem Rechner oder Laptop im Zuschauerraum zugespielt wurde, ein RME Fireface-Audiointerface mit aufgebaut, dessen Ein- und Ausgänge analog ins Mischsystem gepatcht wurden. Diese Situation erfuhr eine Erleichterung, als nur noch ein RME Madiface-Audiointerface benutzt wurde, dessen Signale mittels Lichtwellenleiterkabel in eine MADI-Karte geleitet wurde. Zur Portierung der Zuspielprojekte auf 2 redundante MacPro-Zuspielrechner müssen alle Zuspielinputs mischsystemseitig umgepatcht werden. Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit ist dieses Dante-Netzwerk noch im Aufbau und wird momentan hauptsächlich für zwei Anwendungen benutzt. Das Haupteinsatzgebiet ist der Probenbetrieb (siehe 3.3). Daneben wird Dante bei Live-Übertragungen verwendet. Weitere mögliche Einsatzgebiete werden im Anschluss vorgestellt.

3.1 Technische Anbindung von Dante

Begonnen hat der Aufbau des Dante-Netzes mit dem Einbau einer Dante D21m-Karte in das Studer-Vista 9-Mischsystem. Diese Karte besitzt einen „Brooklyn II“-Chipsatz von Audinate und unterstützt somit 64*64 Kanäle mit jeweils 32 Eingangs- und Ausgangsflows.¹⁴⁹ Die Ein- und Ausgangskanäle der Dante-Karte sind im Mischsystem wie reguläre Kanäle patchbar. Bis dato gab es keinen Fall, in dem man mehr als zwei Dante-Geräte einbinden musste, deshalb wurde bisher immer ohne Switch, also in einer Daisy-Chain-Topologie verbunden. Somit beziehen die Geräte ihre jeweiligen IP-Adressen auch aus dem Link Local-Adressraum, da kein DHCP-Server vorhanden ist. Grundsätzlich ist das Studer Vista 9 als Preferred Master gesetzt und empfängt eine externe Word-Clock, da auch alle anderen Audio- und Videogeräte von einem Haustakt synchronisiert werden. Dieser läuft auf 48000 Hz. (siehe 2.4.3)

Im Foyer des Schauspielhauses befindet sich ein zusätzliches Mischsystem (Yamaha QL-1) mit einer eigenen Beschallungsanlage. Dieses Mischsystem ist mittels der integrierten Dante Karte des QL-1 in das Dante-Netz eingebunden. Momentan wird das mit einer direkten

¹⁴⁹ Vgl. „Studer - D21m Dante I/O card | Audinate“ <<https://www.audinate.com/dante-enabled/studer-d21m-dante-io-card>> [zugegriffen 22 Januar 2020].

Netzwerkverbindung von der Dante-Karte des Studio-Mischsystems zur Dante-Karte im Yamaha-Mischsystem realisiert.

Um den Aufbau in der Probensituation zu optimieren, wird seit Beginn der Spielzeit 2019/2020 ein Dante-Netzwerk in die bestehende Audioperipherie integriert. Es wird eine Ethernet-Verbindung zum passenden Versatzkasten im Zuschauerraum aufgebaut und dort ein Laptop mit einer Dante Virtual Soundcard bereitgestellt. Dies ersetzt die seither benutzten Peripherien. Für Live-Übertragungen ins Foyer, zum Beispiel bei der öffentlichen Probe des Balletts, wird mehrkanaliges Audio vom Studer-Mischsystem via Dante auf die Yamaha QL-1 geschickt, um für die Ton-Anlage im Foyer eine eigene Live-Mischung zu machen.

3.2 Mögliche Dante-Netztopologie im Schauspielhaus

Im Folgenden soll eine mögliche Netz-Topologie vorgestellt werden, welche den Anforderungen im Schauspielhaus gerecht wird. Diese könnte sich im Laufe der Zeit weiterentwickeln.

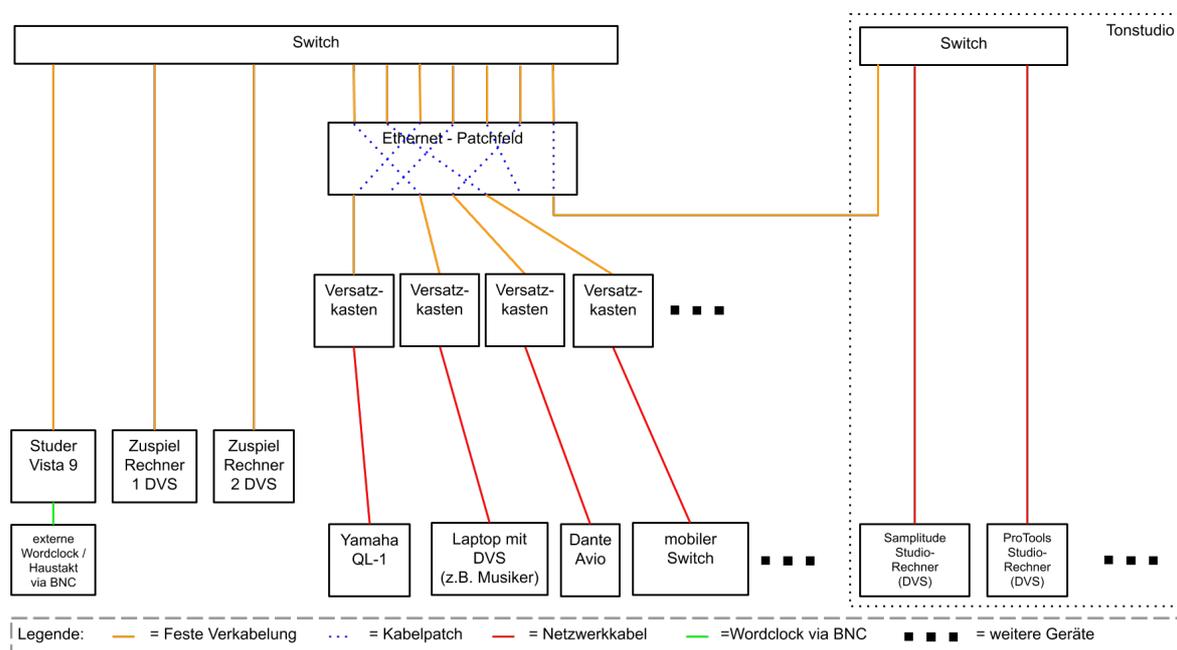


Abbildung 36: mögliche Dante-Peripherie im Schauspiel Stuttgart

Mit dieser hierarchischen Stern-Topologie (siehe Kapitel 2.5.1) könnten die beiden oben genannten, bis dato realisierten Dante-Anwendungen, abgedeckt werden. Der Unterschied zum Status Quo ist, dass es keine Daisy-Chain-Verbindungen mehr gibt. Dieses Netzwerk sollte komplett über Switches realisiert werden. Die Studer Vista 9, als Herzstück der

gesamten Installation, bleibt als extern synchronisierter Takt-Master erhalten. Die beiden Mac-Pro-Zuspielrechner (Haupt- und Havarierechner) sowie das Mischsystem sind direkt an den Haupt-Switch (links oben in Abbildung 36) angebunden, während alle anderen Geräte über das Ethernet-Patchfeld flexibel gepatcht werden können. Vorhandene Geräte für eine Anbindung sind das Mischpult im Foyer, der Musiker-/ Komponisten-Zuspiellaptop, Dante Avio Analog In- oder Outputmodule, der Computer im Tonstudio für Mitschnitte, Übertragungswägen von Rundfunkanstalten, weitere Switches und andere Geräte. Der Haupt-Switch fungiert als DHCP-Server. Alle anderen Switches (Tonstudio, mobil, Übertragungswagen etc.) funktionieren mit deaktiviertem DHCP. Das verbessert die Reaktionsmöglichkeiten auf unterschiedliche Anforderungen enorm, da der Adressierung der Geräte keine Aufmerksamkeit mehr geschenkt werden muss. Neben der Möglichkeit, Switchports auf diverse Versatzkästen zu patchen, gibt es die Möglichkeit einer Patch-Verbindung in das hauseigene Tonstudio. Dies muss, aufgrund der hohen Leitungslänge, mit einer Glasfaser-Verbindung realisiert werden. Querverbindungen (Multimode Glasfaser) sind im Haus vorhanden und können genutzt werden. Es empfiehlt sich, Signalroutings, die oft gebraucht werden, in einem Standard-Preset für Dante Controller festzuhalten. Dieses könnte beispielhaft folgende Routings enthalten:

- Multicast-Flows für Mithörmikrofonie, Microport-Gruppe und Zuspielder-Gruppe für Mitschnitte und Live-Übertragungen
- Zuspielder-Ausgänge (Haupt- und Havarierechner) auf das Mischpult.

Eine Benutzung der schon vorhandenen Switch-Peripherie empfiehlt sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nicht, da das Netzwerk von vielen verschiedenen Abteilungen genutzt wird und innerhalb der Spielzeit ein großer Eingriff zu gefährlich für einen reibungslosen Spielbetrieb ist.

Perspektivisch wäre eine Anbindung an das Hausnetz jedoch empfehlenswert, da dies die Flexibilität bei Routing noch weiter erhöhen würde.

3.3 Mögliche weitere Anwendungsgebiete

Weitere Anwendungsszenarien für die Dante-Installation im Schauspiel Stuttgart lassen sich an den immer wiederkehrenden Anforderungen im regulären Theaterbetrieb, sowie speziellen Anforderungen und perspektivisch für die Zukunft möglichen Verbesserungen bestehender Workflows festmachen.

- Proben- und Premierenmitschnitte: Jede Premiere wird audio- sowie videoseitig mitgeschnitten und für ein Archiv und die Öffentlichkeitsarbeit des Theaters aufbereitet. Bisher wurden Mitschnitte mit einem Tascam HS-8 - 8-Kanal-Aufnahmegerät auf Compact-Flash-Speicherkarten realisiert. Die Daten wurden dann im Tonstudio aufgespielt und bearbeitet. Mit der Dante-Verbindung ins Tonstudio wäre es möglich, mit einer Dante Virtual Soundcard bis zu 64 Kanäle direkt in die DAW (Magix Samplitude oder Avid ProTools) aufzunehmen und alle Signale dezidiert verfügbar zu haben, anstatt auf 4 Stereospuren summiert.
- Probenphase: In der Probenphase wird aufgrund des Repertoirebetriebs des Hauses oftmals die Einrichtung der Bühne von Probe auf Vorstellung und wieder zurück umgebaut. Das Ganze geschieht nicht selten in einem recht engen Zeitfenster. Mit der DVS auf dem Einrichtungs-Zuspiellaptop des Musikers / des Komponisten müssen keine Audiointerfaces oder MADI-Wandler mehr am Musikerplatz im Zuschauerraum aufgebaut werden, sondern es reicht eine Netzwerkleitung und ein entsprechender Patch am Ethernet-Patchfeld. Hier kann ein Dante Controller-Preset zum Einsatz kommen, um die Zuspielkanäle im Studer Vista 9 entsprechend zu beschicken. Auch Feeds von Mikrofonen für Live-Effekte oder ähnliches sind einfach und schnell zu realisieren. Entsprechende Split-Outs könnten standardmäßig im Mischpult angelegt werden und einfach mit Dante Controller geroutet werden.
- Externe Teams: Von Zeit zu Zeit werden Beiträge für den Rundfunk zu gewissen Stücken gedreht. Die externen Teams brauchen eigentlich immer Signale zum Mitschneiden. Diese werden bis dato meistens zu deren zugewiesenen Plätzen im Zuschauerraum via XLR gepatcht und in mobilen Fieldrekordern aufgenommen oder vom Theater an die Produktionsfirmen nachgesendet. Mit einem Multicast-Flow, beispielsweise der Mithörmikrofon-Kanäle, könnte zukünftig jeder mitgebrachte Laptop dazu benutzt werden, um diese Signale abzugreifen und hochqualitativ mitzuschneiden. Die Gefahr eines zu sensibel eingestellten Vorverstärkers im Fieldrekorder fällt hier auch weg. Sollte doch ein Fieldrekorder zum Einsatz kommen, kann einfach ein Dante AVIO 2-Kanal Analog Output Modul eingesetzt werden.

Gleiches gilt im größeren Rahmen für Übertragungswägen. Hier kann ein kompletter Split aller Kanäle flexibel geroutet werden.

- Signalverteilung im Haus: Bei Erstellung eines entsprechendem VLAN mit fest zugeteilter und für Dante ausreichender Bandbreite (siehe 2.4.1) kann das Dante-Netz auch in andere Bereiche des Hauses, zum Beispiel zur Probebühne, via Ethernet über Kupfer und Glasfaser weiterverteilt werden. Die notwendige Peripherie ist schon vorhanden. Zudem könnte via Dante Domain Manager auch ein Signal-Austausch mit anderen Spielstätten oder beispielsweise dem Bandprobenraum in den Spielstätte Nord stattfinden. Diese Erweiterungen erfordern allerdings ein schweres Eingreifen in die vorhandenen Switch-Struktur und VLAN-Architektur. Deshalb ist diese Möglichkeit nur perspektivisch für die Zukunft vorzusehen.
- Einbindung eines Yamaha RSIO64-D: Mithilfe dieses Gerätes in das Dante-Netzwerk wäre es möglich z.B. die Funkstrecken für Mitschnitte permanent im Dante-Netz zu haben, um sie für Mitschnitte etc. flexibel routen zu können. Genauso könnten auch Effektgeräte wie das vorhandene TC System 6000 Multieffektgerät oder der Lexicon PCM96 dauerhaft von AES in das Dante-Netz gewandelt werden und so auch von anderen Orten, wie z.B. dem Tonstudio oder der Probenbühne, aus über Dante zur Verfügung stehen.
- Signale von anderen Gewerken: Bei vielen Stücken werden Tonquellen von anderen Gewerken, meistens von der Videoabteilung, eingebunden. Hier kann mithilfe der DVS umfangreicher Mehrkanal-Videoton übertragen werden, ohne dass ein extra Wandler nötig ist.
- Optimierung für zukünftige Mehrkanalbeschallung: Im Hinblick auf kommende Verbesserungen und Erweiterungen im Bereich Surround-/ 3D-Audio-Beschallung und den damit zusammenhängenden Peripherie-Anforderungen optimiert die Implementierung von Dante das vorhandene System. DSP-Plattformen für die Matrizierung und Klangbearbeitung solcher Systeme, wie zum Beispiel die d&b Audioteknik DS100 ist komplett Dante-fähig und könnte somit verhältnismäßig einfach in das bestehende System eingebunden werden.

3.4 Vor- und Nachteile

Die vielfältigen Anforderungen an das Audio-System im Rahmen eines Theaterhauses mit seinen Schauspielstücken, Ballettaufführungen, Vorträgen, etc. machen die technische Planung des Systems schwierig. In höchstem Maße sind Flexibilität und Skalierbarkeit zu beachten. Dante muss audio- sowie netzwerkseitig in ein schon bestehendes System integriert werden. Die Implementierung in das bestehende Daten-Netzwerk gestaltet sich schwieriger, da Bandbreite garantiert werden muss, ohne Datenströme anderer über das Hausnetz laufender Anwendungen verschiedener Gewerke einzuschränken.

Wie sich zeigt, werden die Anforderungen der Produktionen eher komplexer als simpler. Ein System wie Dante kann hier mit seiner einfachen Skalierbarkeit punkten. Durch die Nutzung von schon bestehender, erprobter Netzwerkinfrastruktur, einem sehr genauen Takt-System und einer einfachen Handhabung sorgt Dante für die nötige Stabilität. Ist ein neues Dante-Gerät einmal eingerichtet, kann es beim nächsten Mal ohne weitere Konfiguration angeschlossen und bespielt werden. Ein weiterer Vorteil ist die weitreichende Kompatibilität. Gerade bei Gastspielen, also der Portierung einer Produktion in ein anderes Haus ist die Nutzbarkeit von einfacher, überall verfügbarer Netzwerkinfrastruktur ein großer Vorteil. Oberste Prämisse bei der Arbeit in einem Theaterbetrieb muss sein, die Anforderungen der künstlerischen Teams möglichst gut zu erfüllen. Im Vergleich zu bisher benutzten Audioübertragungssystemen (analog, MADI) wartet Dante mit dem großen Vorteil auf, dass im Prinzip jeder mitgebrachte Computer eines Musikers oder Komponisten mit der Installation und Lizenzierung einer DVS zu einem vollwertigen Audiointerface wird. Weiterhin kommt es zu einer großen Kostenersparnis, wenn man hinsichtlich der Wartung der Leitungswege Dante mit anderen Systemen vergleicht, die via Lichtwellenleiter oder analog funktionieren. Gleiches gilt auch für die Realisierung von Mitschnitten und Zuspelungen. Beispielhaft kostet ein RME Madiface Pro-Audiointerface zur Wandlung von bis zu 64 Kanälen von MADI via USB in die DAW 1199 Euro, während eine Dante Virtual Soundcard 29 USD kostet. Für das Studer Mischsystem kostet ein 8-kanaliges Analog Line-In-Modul zwischen 3000 und 4000 Euro, während die D21m Dante-Karte 1200 Euro kostet.¹⁵⁰

Im Theaterbetrieb steht, neben einer hohen Qualität, die Ausfallsicherheit an erster Stelle. Dante, im redundanten Betrieb, stellt eine große Ausfallsicherheit her. Allerdings muss diese in Frage gestellt werden. Im Theaterbetrieb spielen Zuspel-Computer eine sehr große Rolle. Diese sollten sich sowohl im primären als auch sekundären Dante Netzwerk befinden. Die Dante Virtual Soundcard unterstützt allerdings ausschließlich den nicht-redundanten Betrieb

¹⁵⁰ Interview mit Frank Bürger, Leiter Ton/Video Schauspiel Stuttgart am 05.02.2020

im Primary-Netzwerk. Möchte man also, neben dem redundanten Aufbau zweier Netzwerke (Primary und Secondary) auch die Zuspieldreher selbst redundant haben, bräuhete man nicht zwei, sondern vier Rechner (P1, P2, S1 und S2), damit bei einem doppeltem Ausfall (z.B. Primary-Netzwerk und Rechner S1 fällt aus) immer noch der Rechner S2 über das Secondary-Netzwerk weiterspielt.

4 Fazit

Nach dem technischen Rundumschlag bezüglich Dante und der verwendeten Technologien gilt es die Frage zu klären, ob Dante den in der Einleitung gestellten Anforderungen für Live-Veranstaltungen gerecht werden kann und inwieweit Dante im täglichen Gebrauch zu einer Verbesserung und Vereinfachung des Workflows führt.

In puncto Latenz erfüllt Dante aufgrund der Möglichkeit der deterministischen Einstellung der Latenz die Voraussetzung sehr gut. Bei extrem zeitkritischen Anwendungen wie in Kapitel 2.1 vorgestellten Live-Monitoring ist darauf zu achten, dass die Anzahl der Hops, welche das Signal auf dem Übertragungsweg überwinden muss, gering bleibt.

Eine hohe Ausfallsicherheit im Vergleich zu anderen Übertragungssystemen, wie zum Beispiel MADI, ist bei Dante möglich. Durch die Einrichtung eines Secondary-Netzwerks zu einem bestehenden Primary-Netzwerk verringert sich die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls. Dies gilt aber nur in vollem Maße, wenn die Netze komplett physisch voneinander getrennt sind. Die Leitung von Primary- und Secondary-Netzwerk über einen durch VLANs getrennten Netzwerk-Backbone verringert die Ausfallsicherheit wieder, da beide Netzwerke zusammenbrechen, wenn die Verbindung des Backbones abbricht. Ist der Aufbau allerdings komplett redundant, so ist die Umschaltung im Havariefall nicht akustisch wahrnehmbar, was die Anforderungen hinsichtlich der Ausfallsicherheit bei Live-Veranstaltungen erfüllt.

Der akustische Qualitätsanspruch bei Live-Veranstaltungen ist sehr hoch. Dante nutzt verlustfreie PCM-Kodierung zur Übertragung von Audiodaten. Dieses Verfahren stellt sicher, dass sich die Audioqualität auf dem Übertragungsweg nicht verschlechtert. Es ist allerdings anzumerken, dass, durch die starke Fokussierung auf möglichst schnellen Punkt-zu-Punkt-Pakettransport innerhalb eines Dante-Netzwerks, die Sicherung der Übertragung mit verringerter Priorität behandelt wird.

Zusammenfassend lässt sich klar sagen, dass Dante die Anforderungen an Audioübertragungen im Live Bereich vollständig erfüllen kann.

Die Implementierung und Nutzung von Dante als Übertragungsmedium führt im Vergleich zu analogen oder nicht-IP-basierten Übertragungsmöglichkeiten im Hinblick auf die benötigte

Infrastruktur, die Flexibilität des Routings, die Skalierung des Systems und die Kosten definitiv zu einer Verbesserung und Vereinfachung der Audioübertragung.

Technologien wie AoIP setzen Kenntnisse voraus, die mehr bei einem IT-Fachmann verortet sind, als bei einem Ton-Ingenieur. Lässt man sich jedoch auf diese Verschiebung und Erweiterung der für ein professionelles Arbeiten notwendigen Expertise ein, so führt Dante in vielerlei Hinsicht zu einer Erleichterung im Workflow. Bei korrekter Vor-Konfiguration der zu benutzenden Switches kommt Dante durchaus in den Bereich von „Plug-and-Play“. Schlussendlich ist Dante nicht ohne Grund momentan der Branchenstandard für die professionelle, digitale Audioübertragung.

5 Danksagung

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit möchte ich mich ganz herzlich bei allen beteiligten Personen bedanken, insbesondere bei:

Meiner Partnerin Motte Hager für die ausdauernde, große Unterstützung.

Florian Kontny für die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Der Klangstatt Stuttgart für den Kaffee.

Florian Kontny und Thea Kühner für das Korrekturlesen.

Prof. Oliver Curdt und Prof. Frank Melchior für die fachliche Betreuung der Arbeit.

Frank Bürger und das ganze Ton-Team des Schauspielhauses Stuttgart für die Unterstützung und die Möglichkeit so viel ausprobieren zu können.

Florian Kontny und Dominik Schempp vom Ton-Team der Jungen Oper im Nord, Stuttgart für die Bereitstellung ihres Dante-Netzes für Test-Zwecke.

Markus Götze und Jonathan Eichhorn für die fachliche Unterstützung.

Marvin Brand für das Heranführen an Quellenrecherche und für seine Tochter Luna.

6 Literaturverzeichnis

- „Arbeiten bei uns | Die Staatstheater Stuttgart“ <<https://www.staatstheater-stuttgart.de/karriere/>>
[zugegriffen 22 Januar 2020]
- Audinate, „Dante Certification Program Level 1“, 2019
<<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/level-one-dante-certification-program-plasa-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 17 Januar 2020]
- , „Dante Certification Program Level 2“, 2019
<<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/dante-certification-program-level-two-intermediate-concepts-clocking-unicast-multicast-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 17 Januar 2020]
- , „Dante Certification Program Level 3“, 2019
<<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/level-three-dante-certification-program-advanced-networking-concepts-troubleshooting-domain-manager-audinate-pres.pdf>>
[zugegriffen 4 Januar 2020]
- , „Dante Controller User Guide“, 2019
- , *Dante Virtual Soundcard Manual*, 2019
- „Audinate Products for Manufacturers | Audinate“ <<https://www.audinate.com/products/manufacturers-products>> [zugegriffen 17 Januar 2020]
- BADACH, Anatol, und Erwin HOFFMANN, *IP-NETZE*, 4. Aufl. (München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019)
- BAUN, Christian, *Computernetze kompakt*, 2. Aufl. (Berlin: Springer-Verlag, 2012)
- „Can Dante operate over a Wi-Fi network? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/can-dante-operate-over-wi-fi-network>> [zugegriffen 10 Januar 2020]
- „Can I use EEE (Energy Efficient Ethernet or 'Green Ethernet') in my Dante network? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/can-i-use-eee-energy-efficient-ethernet-or-green-ethernet-my-dante-network>> [zugegriffen 19 Januar 2020]
- CHAN, Kwok Ho, Jozef BABIARZ, und Fred BAKER, „RFC 4594“ <<https://tools.ietf.org/html/rfc4594>>
[zugegriffen 7 Januar 2020]
- „Clock Synchronization | Audinate“ <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/webhelp/content/clock_synchronization.htm> [zugegriffen 6 Januar 2020]
- „CSMA/CD und Kollisionen (Ethernet)“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1406181.htm>> [zugegriffen 4 Januar 2020]
- d&b-Audiotechnik, „TI 317 Dante audio networking 1.1 en“, 2019
<<https://www.dbaudio.com/assets/products/downloads/ti/dbaudio-technical-information-ti317-1.1-en.pdf>> [zugegriffen 16 Januar 2020]
- „Dante Advanced Configuration“, 2015 <<http://www.audinate.com/resources>> [zugegriffen 4 Januar 2020]
- „Dante FAQs | Audinate“ <<https://audinate.com/resources/faqs>> [zugegriffen 17 Januar 2020]

„Dante HC | Audinate“ <<https://www.audinate.com/products/manufacture-products/dante-hc>>
[zugegriffen 14 Januar 2020]

„Dante Overview | Audinate“ <<https://audinate.com/solutions/dante-overview>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

„Device Names and Channel Labels“ <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/webhelp/content/device_names_and_channel_labels.htm> [zugegriffen 17 Januar 2020]

„Discovery and auto-configuration“ <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/webhelp/content/discovery_and_auto-configuration.htm> [zugegriffen 14 Januar 2020]

„Ethernet-Standards von IEEE 802.3“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1406171.htm>>
[zugegriffen 3 Januar 2020]

FENNER, W., „RFC 2236“, 1997 <<https://tools.ietf.org/html/rfc2236>> [zugegriffen 9 Januar 2020]

FRANCIS, P., und K. EGEVANG, „The IP Network Address Translator (NAT)“
<<https://tools.ietf.org/html/rfc1631>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

GROOT, Geert Jan de, Yakov REKHTER, Daniel KARREBERG, und Eliot LEAR, „Address Allocation for Private Internets“ <<https://tools.ietf.org/html/rfc1918>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

„Grundlagen LWL-Verkabelung - Schrack Technik“ <<https://www.schrack-technik.de/know-how/netzwerktechnik/normen-und-grundlagen/grundlagen-lwl-verkabelung/>> [zugegriffen 3 Februar 2020]

HALPIN, Liam, „Deploying Dante Networks In Live Events“, 2016
<<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/deploying-dante-networks-in-live-events-plasa-liam-halpin-audinate-pres.pdf>> [zugegriffen 14 Januar 2020]

„How does Dante manage QoS? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/how-does-dante-manage-qos>> [zugegriffen 7 Januar 2020]

„How does Dante use DSCP / Diffserv priority values when configuring QoS? | Audinate“
<<https://www.audinate.com/faq/how-does-dante-use-dscp-diffserv-priority-values-when-configuring-qos>> [zugegriffen 16 Januar 2020]

„How is a network of Dante devices configured for communication?“
<<https://www.audinate.com/faq/how-network-dante-devices-configured-communication>>
[zugegriffen 6 Januar 2020]

„How is latency adjusted in a Dante system? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/how-latency-adjusted-dante-system>> [zugegriffen 16 Januar 2020]

„IGMP“ <<https://www.lancom-systems.de/docs/LCOS/referenzhandbuch/topics/aa1457493.html>>
[zugegriffen 9 Januar 2020]

„Internet Grundlagen-Vermittlungsschicht-Transportkontrolle - KUNBUS GMBH“
<<https://www.kunbus.de/internet-grundlagen-vermittlungsschicht-transportkontrolle.html>>
[zugegriffen 28 Dezember 2019]

„IPv4-Adressen“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/2011211.htm>> [zugegriffen 14 Januar 2020]

„IPv4-Header“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/2011241.htm>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

LECROY, Chris, und Gregory VAUGHAN, *United States Patent US 6,996,624 B1*, 2006

Lectrosonics, und Audinate, „White Paper Digital Audio Networking Just Got Easy“, 2010
<[https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate white paper on dante_justgoteasy.pdf](https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate%20white%20paper%20on%20dante_justgoteasy.pdf)> [zugegriffen 10 Januar 2020]

———, „White Paper Evolving networks to AVB“, 2011
<[https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate avb white paper v1 2.pdf](https://www.lectrosonics.com/Support/phocadownload/audinate%20avb%20white%20paper%20v1%202.pdf)> [zugegriffen 10 Januar 2020]

LESTER, Michael, und Jon BOLEY, „The effects of latency on live sound monitoring“, 2 (2007)

„Netzwerk Betriebsarten“ <http://www.suicidal.de/doc/lexikon/netzwerk_betriebsarten.htm> [zugegriffen 3 Januar 2020]

NICHOLS, Kathleen, David L. BLACK, Steven BLAKE, und Fred BAKER, „RFC 2474“
<<https://tools.ietf.org/html/rfc2474>> [zugegriffen 7 Januar 2020]

„RFC 3550“ <<https://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>> [zugegriffen 6 Januar 2020]

RIGGERT, Wolfgang, *Rechnernetze*, 5. Aufl. (München: Carl Hanser Verlag, 2012)

SCHREINER, Rüdiger, *Computernetzwerke*, 5. Aufl. (München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014)

„Settings Available in Dante Controller“
<https://dev.audinate.com/GA/dvs/userguide/webhelp/content/settings_available_in_dante_controller.htm> [zugegriffen 14 Januar 2020]

SMYREK, Volker, *Tontechnik für Veranstaltungstechniker*, 3. Aufl. (Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 2009)

„So you're adding Dante to your Network?“ <<https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/adding-dante-to-your-network-audinate.pdf>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

„Spielstätten | Schauspiel Stuttgart“ <<https://www.schauspiel-stuttgart.de/haus/spielstaetten/>> [zugegriffen 22 Januar 2020]

„Studer - D21m Dante I/O card | Audinate“ <<https://www.audinate.com/dante-enabled/studer-d21m-dante-io-card>> [zugegriffen 22 Januar 2020]

„Twisted-Pair-Kabel (UTP / FTP / STP)“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0603191.htm>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

„VoIP - Voice over IP“ <<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0503131.htm>> [zugegriffen 13 Januar 2020]

WARE, Chris, „Networking 101 Basics for Audio“, 2015 <<http://www.audinate.com/resources/>> [zugegriffen 16 Januar 2020]

„Was ist ATM (Asynchronous Transfer Mode)?“ <<https://www.ip-insider.de/was-ist-atm-asynchronous-transfer-mode-a-726581/>> [zugegriffen 3 Februar 2020]

„Was ist DiffServ?“ <<https://www.lancom-systems.de/docs/LCOS/referenzhandbuch/topics/aa1204235.html>> [zugegriffen 7 Januar 2020]

„Was ist RTP (Real-Time Transport Protocol)?“ <<https://www.computerweekly.com/de/definition/RTP-Real-Time-Transport-Protocol>> [zugegriffen 6 Januar 2020]

WEIBEL, Hans, und Sven MEIER, *The Second Edition of the High Precision Clock Synchronization Protocol*

WEINZIERS, Stefan, und Karl M. SLAVIK, *Handbuch der Audiotechnik* (Berlin: Springer-Verlag, 2008)

„What is the difference between a 100Mbps, 1000Mbps and 10000Mbps switch, and how does this affect Dante? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/what-difference-between-100mbps-1000mbps-and-10000mbps-switch-and-how-does-affect-dante>> [zugegriffen 4 Januar 2020]

„Which network ports does Dante use? | Audinate“ <<https://www.audinate.com/faq/which-network-ports-does-dante-use>> [zugegriffen 13 Januar 2020]

www.prosoundnewseurope.com, „Zen protocol“, 2009

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: OSI - Referenzmodell.....	6
Abbildung 2: Paketweiterleitung bei Kopplung diverser LANs mittels Router	25
Abbildung 3: Das TDM-Prinzip	31
Abbildung 4: Vergleich der Netzauslastung	31
Abbildung 5: Unicast-Flow	36
Abbildung 6: Unicast-Flows Fanout-Konfiguration	37
Abbildung 7: Multicast-Flow	37
Abbildung 8: Latenz-Domänen in Dante-Netzen.....	38
Abbildung 9: "echte" Dante Redundanz.....	42
Abbildung 10: Dante Controller, Netzwerkkonfiguration	45
Abbildung 11: Dante Controller - Network View	46
Abbildung 12: Dante Controller Main Toolbar	46
Abbildung 13: Filterpanel von Dante Controller	47
Abbildung 14: Dante Controller - Save Preset Dialog	48
Abbildung 15: Dante Controller - Load Preset Dialog	49
Abbildung 16: Dante Controller - Routing Matrix.....	50
Abbildung 17: Dante Controller - Network View - Device Info.....	52
Abbildung 18: Dante Controller - Network View - Clock Status	52
Abbildung 19: Dante Controller - Network View - Network Status	54
Abbildung 20: Dante Controller - Network View - Events.....	55
Abbildung 21: Dante Controller - Status Bar	55
Abbildung 22: Dante Controller - Clock Status Monitor - Log	56
Abbildung 23: Dante Controller - Clock Status Monitor - History	57
Abbildung 24: Dante Controller - Device View	58

Abbildung 25: Dante Controller - Device View - Toolbar.....	58
Abbildung 26: Dante Controller - Multicast Dialog	59
Abbildung 27: Dante Controller - Device View - Receive	60
Abbildung 28: Dante Controller - Device View - Transmit.....	61
Abbildung 29: Dante Controller - Device View - Status.....	62
Abbildung 30: Dante Controller - Device View - Latency	63
Abbildung 31: Dante Controller - Device View - Device Config	64
Abbildung 32: Dante Controller - Device View - Network Config	65
Abbildung 33: Dante Controller - Device View - AES67 Config	66
Abbildung 34: Dante Controller - Device View - Controls	66
Abbildung 35: Dante Virtual Soundcard	67
Abbildung 36: mögliche Dante-Peripherie im Schauspiel Stuttgart.....	72

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestandteile eines Ethernet-Frame	11
Tabelle 2: IP-Adressklassen, global.....	13
Tabelle 3: Bestandteile eines IP-Pakets	14
Tabelle 4: Bestandteile eines UDP-Segments	16
Tabelle 5: AoIP-relevante IEEE-Kabel-Spezifikationen	28
Tabelle 6: von Dante benutzte Protokolle	32
Tabelle 7: minimal erreichbare Latenzzeit je Netzwerkgröße	38
Tabelle 8: von Dante verwendete DiffServ-Tags	39
Tabelle 9: Netzwerk-Interface-Symbole	45
Tabelle 10: Preset-Rollen-Indikatoren.....	50
Tabelle 11: Subscription – Status	51
Tabelle 12: Receive Reiter, Subscription Statusmeldungen	61
Tabelle 13: mögliche Kanalanzahl der Dante Virtual Soundcard.....	68

9 Abkürzungsverzeichnis

AES	Audio Engineering Society, Inc.
AoIP	Audio over IP
ASIC	application-specific integrated circuit
ASIO	Audio Stream Input/Output
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATP	AppleTalk Transaction Protocol
AVB	Audio Video Bridging
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DAW	Digital Audio Workstation
DMAC	Destination MAC Address
DNS	Dynamic Name System
DSCP	Differentiated Service Control Protocol
DVS	Dante Virtual Soundcard
FCS	Frame Check Sequence
FOH	Front of House
IETF	Internet Engineering Taskforce
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internet Protocol
IPv4	IP-Adresse Version 4
Km	Kilometer
LAN	Local Area Network
MAC	Media Access Control
MADI	Multichannel Audio Digital Interface
MAN	Metropolitan Area Network
Mbit/s	Megabit pro Sekunde
mDNS	Multicast Domain Name System
ms	Millisekunde
µs	Mikrosekunde
NAT	Network Address Translation
PCM	Pulse Code Modulation
PIN	Personal Identification Number
QoS	Quality of Service
RIP	Routing Information Protocol
RTP	Real-Time Transport Protocol

Rx	Receiver
SFD	Starting Frame Delimiter
SMAC	Source MAC Adress
TCP	Transport Control Protocol
TDM	Time Division Multiplex
Tx	Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
USD	US Dollar
VLAN	Virtual Local Area Network
VoIP	Voice over IP
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network