



Hochschule für Musik Detmold
Erich-Thienhaus-Institut

AVB Audionetzwerke in der Praxis: Betriebssicherheit und deren automatisierte Überprüfung

Diplomarbeit
im Studiengang Musikübertragung

vorgelegt von
Marc Schettke

Erstprüfer: Prof. Thomas Görne

Zweitprüfer: Prof. Dr. Aristotelis Hadjakos

Abgabe am 10. Juli 2014

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Netzwerktechnologie in der professionellen Audiotechnik	9
2.1 Notwendigkeit von Audionetzwerken	9
2.1.1 Beispielszenarien	10
2.1.2 Aufwand und Kosten verschiedener Lösungen	11
2.2 Anforderungen aus Sicht der Musikproduktion	14
2.2.1 Verlustfreie Übertragung von Musik	14
2.2.2 Betriebssicherheit	17
2.3 Übertragung auf technische Daten	21
3 Technische Grundlagen von AVB	25
3.1 Ethernet, OSI-Modell und Protokollschichten	25
3.2 Synchronisation	26
3.3 Priorisierung und Warteschlangen	30
3.4 Bandbreitenreservierung und AVB Wolken	32
3.5 Virtuelle Netzwerke	35
3.6 Audio- und Videodaten	35
3.7 Entdeckung, Konfiguration und Steuerung	39
3.8 Redundanz	41
4 Verwandte Arbeiten und Stand der Technik	44
4.1 Betriebssicherheit von AVB	44
4.2 Integrierte Überwachung in Systemen am Markt	46
4.3 Netzwerkanalyse und Monitoring	47
4.4 Abgrenzung	48
5 Entwicklung einer AVB Testumgebung	50
5.1 Fehlerszenarien und Ursachen	51
5.1.1 Inbetriebnahme	51
5.1.2 Zuverlässige Übertragung	52
5.1.3 Fehlerbehandlung	54
5.2 Fehlerinjektion	55

Inhaltsverzeichnis

5.3	Testverfahren und exemplarische Messungen	57
5.3.1	Gemeinsame Zeitreferenz	58
5.3.2	Media Clock Synchronisation	64
5.3.3	Streamreservierung	68
5.3.4	Übertragung von Audio	73
5.3.5	Konfiguration und Kontrolldaten	76
5.3.6	Erkennung von Legacy Switches über passives Monitoring	78
5.3.7	Entdeckung von Topologie und Diensten	79
6	Praxiseinsatz – der „AVB Doctor“	82
6.1	Zusammenfassende Systemanalyse	82
6.1.1	Ereignisse	84
6.1.2	Burn In-Test	86
6.2	Substitution von Labor-Apparatur und Automatisierung	87
6.3	Miniaturisierung	88
6.4	Abgleich von Zielen und Lösungen	90
7	Fazit und Ausblick	92
A	Anhang	94
A.1	Apparatur	94
A.2	Entwicklung der Software	95
A.2.1	Überblick über entwickelte Tools	95
A.2.2	Benutzte Libraries	95
A.2.3	Entwicklungsumgebung	96
A.3	Gerätespezifische Hinweise und Kommandoreferenzen	96
A.3.1	DSP4YOU AVB-SW	96
A.3.2	Extreme Networks Summit X440	98
A.3.3	Intel I210-T	98
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	100
	Literaturverzeichnis	101

Abstract

Ethernet-based audio networks provide more flexibility, simpler set-up and lower cost compared to existing audio transmission solutions. When used in professional recording situations it is however required to maintain a high degree of operation reliability in order to make a migration to the much more complex technology possible. The open standard AVB promises to transmit audio and video data with deterministic latency error-free across a network, even along with other data. The combination of participating protocols can however lead to problems in case devices are not operated, configured or working correctly.

This thesis therefore identifies error scenarios that can occur in the network despite the standardization of AVB, and uses them as a base for the development and verification of test routines that can detect problems during start-up and operation. In order to ensure its relevance for practical use in professional recordings, requirements were identified and then translated into parameters for operation reliability. A concept for an “AVB Doctor” is introduced. It demonstrates how the test routines can be used in combination with common single-board computers to create a system that detects problems within the network by analyzing all available information, notifies the user and assists him to solve the problem.

Zusammenfassung

Auf Ethernet basierende Audionetzwerke sind gegenüber bisherigen Lösungen zur Audioübertragung flexibler bei reduziertem Aufwand und geringeren Kosten. Im Bereich der professionellen Musikproduktion ist jedoch trotz der vielfach komplexeren Technologie eine hohe Zuverlässigkeit der eingesetzten Netzwerksysteme notwendig, damit der Umstieg funktionieren kann. Mit AVB verspricht ein offener Standard, Audio- und Videodaten mit deterministischer Latenz robust und fehlerfrei übertragen zu können, auch parallel zu anderen Daten im Netzwerk. Im Zusammenspiel der beteiligten Protokolle können durch Fehlkonfiguration, Fehlbedienung oder defekte Geräte dennoch Probleme bei Übertragung und Steuerung auftreten.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb Fehlerszenarien ermittelt, die bei AVB-Audionetzwerken trotz Standardisierung auftreten können. Auf Basis dessen werden im Hinblick auf eine automatisierte Überprüfung Testverfahren entwickelt und verifiziert, die Probleme bei Inbetriebnahme und im laufenden Betrieb erkennen können. Um die Praxisrelevanz sicherzustellen werden für den Bereich der professionellen Musikproduktion Anforderungen herausgearbeitet, die an ein Audionetzwerk zu stellen sind und daraus Parameter für die Betriebssicherheit abgeleitet. Mit dem „AVB Doctor“ wird abschließend ein Konzept vorgestellt, wie mithilfe dieser Testverfahren und handelsüblichen Einplatinencomputern ein System entworfen werden kann, welches Probleme im Netzwerk durch Verknüpfung aller zur Verfügung stehenden Informationen automatisiert erkennt, dem Nutzer signalisiert und ihm Hilfestellungen zur Lösung anbietet.

Abkürzungsverzeichnis

ADC, A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
AES	Audio Engineering Society
AVB	Audio Video Bridging
AVDECC	Audio Video Discovery Enumeration Configuration Control
AVTPDU	Audio Video Transport Protocol Data Unit
AVTP	Audio Video Transport Protocol
DAC, D/A-Wandler	Digital-Analog-Wandler
DAW	Digital Audio Workstation
FCS	Frame Check Sequence
FMS	Fault Management System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Management Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
MIB	Management Information Base
OSI	Open Systems Interconnection
PLL	Phase Locked Loop
PoE	Power over Ethernet
RFC	Request for Comments
RTP	Realtime protocol
SNMP	a Simple Network Management Protocol
TLV	type length value
TSN	Time sensitive Networking
UDP	User Datagram Protocol
WAN	Wide Area Network

1 Einleitung

Hintergrund

Datennetzwerke, sowohl drahtgebunden (Ethernet), als auch drahtlos (WLAN), basieren heute auf den Standards des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Das für Netzwerktechnologien zuständige Komitee 802 ist in Arbeitsgruppen organisiert, die jeweils in einem Teilbereich Lösungen für aktuelle Probleme im Bereich von Netzwerken erarbeiten. Sowohl die Evolution vom 10BASE5-Ethernet (10 Mbit/s, 802.3-1985) zum 40 Gbit/s schnellen 40GBASE-T (802.3ba), wie auch zum 7 Gbit/s schnellen Wireless LAN (802.11ad) geht auf die Arbeit des Komitees 802 zurück.

2004 wurde die Studiengruppe „Residential Ethernet Study Group“ innerhalb der Arbeitsgruppe 802.3 (Ethernet) gegründet, ursprünglich, um die Anforderungen an Ethernet-Netzwerke für Heimunterhaltungssysteme zu erarbeiten (Brand et al. 2004). Die Bemühungen der Gruppe sind 2005 schließlich in der Arbeitsgruppe 802.1BA – Audio Video Bridging Systems aufgegangen und wurden 2011 als IEEE 802.1BA 2011 standardisiert. Dabei handelt es sich um ein System, mit dem Audio- oder Videodaten mit vorhersehbarer Laufzeit parallel zu anderen Daten in einem Netzwerk transportiert werden können. Dieses soll dabei auch von nicht speziell ausgebildeten Fachkräften eingerichtet und betrieben werden können.¹ Da es sich um ein Netzwerk handelt, können zudem die Signale von jedem Punkt an jeden anderen übertragen werden, ohne dass zusätzliche Kabel verbunden oder verlegt werden müssen.

Diese Eigenschaften machen es interessant für den Einsatz in Festinstallationen, Beschallung, Rundfunk und der professionellen Medien- und Musikproduktion. Im Gegensatz zu Systemen anderer Hersteller und Organisationen, welche mit vergleichbaren Voraussetzungen für diese Zielgruppen entwickelt worden sind (v.a. Ravenna und Dante), wurde so tief wie nötig in den bestehenden Protokollen angesetzt, um das Problem der Vorhersehbarkeit im Ethernet nicht nur mit Workarounds zu umgehen, sondern tatsächlich zu lösen. Deshalb müssen nicht nur die End- sondern auch die Brückenpunkte eines Netzwerkes den AVB-Standard unterstützen.

Um die herstellerübergreifende Interoperabilität sicherzustellen, wurde schließlich die AVnu Alliance gegründet, die Testverfahren für deren Mitglieder bereitstellt.² Hersteller können sich die korrekte Implementierung des Standards damit kostenpflichtig bestätigen und das Gerät damit zertifizieren lassen. Die infrastrukturellen Änderungen berücksichtigend wurden zuerst die Testverfahren für die Bridges, anschließend die Zertifizierungs-Tests für Endpunkte fertig-

¹ vgl. dazu die Homepage der Arbeitsgruppe: <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1ba.html>, zuletzt abgerufen am 7. Juli 2014

² <https://www.iol.unh.edu/services/testing/AVnu>, zuletzt abgerufen am 7. Juli 2014

gestellt, so dass zehn Jahre nach der Idee nun erste zertifizierte Geräte auf dem Markt sind.

Problembeschreibung

Bedingt durch die Komplexität der verwendeten Protokolle und den vermutlich unvermeidlichen Einsatz nicht zertifizierter Geräte (tatsächlich sind bisher nur eine Bridge und ein Endpunkt zertifiziert, obwohl bereits etwa 50 AVB-fähige Geräte auf dem Markt sind) offenbaren sich hier potentielle Probleme, die unter Umständen nur qualifiziertes IT-Fachpersonal lösen kann. Dies mag für komplexe oder permanente Installationen kein Problem sein, wohl aber für kleine flexible Installationen, wie sie im Gebiet der Musikproduktion zu finden sind.

Die Demokratisierung der Aufnahmetechnik und die Änderung der Hör- und Kaufgewohnheiten in der Gesellschaft haben es hingegen mit sich gebracht, dass ein Tonmeister immer flexibler und in immer kleineren Teams agieren muss. Bereits in einem mittelgroßen Studiobetrieb kann aus Kostengründen kein dedizierter Netzwerkspezialist eingestellt werden, bei mobilen Produktionen muss der Toningenieur oder der Tonmeister selbst die Betriebssicherheit des Netzwerks sicherstellen können. Dabei ist es vor allem die Kostenersparnis, die regelmäßig als Hauptgrund für den Umstieg auf Audionetzwerke angeführt wird.

Lösungsansatz

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Zusicherungen des Standards nicht ausreichen, um in der Praxis in allen Situationen ein funktionsfähiges Audionetzwerk für die professionelle Musikproduktion zu betreiben. Als Lösungsvorschlag werden Testverfahren erarbeitet, mit denen ein nicht ordnungsgemäßer Betriebszustand erkannt werden kann. Die Verfahren werden im Hinblick darauf entwickelt AVB-Audionetzwerke bei der Inbetriebnahme und im laufenden Betrieb möglichst von einem zentralen Punkt aus zu überwachen. Auf diese Weise kann ein handliches System entwickelt werden, welches Informationen über das Netzwerk sammelt, Fehler protokolliert und die ermittelten Daten zueinander in Beziehung setzt. Das ermöglicht es nicht nur, den Benutzer über Fehler zu informieren, sondern ihm auch Hilfestellung für die Lösung zu geben. Das Konzept für ein solches System wird in dieser Arbeit abschließend vorgestellt.

Überblick

In Kapitel 2 wird zunächst anhand von Beispielszenarien untersucht, welche Vorteile der Umstieg auf digitale Audionetzwerke hat. Im Anschluss werden daraus die Anforderungen an Netzwerksysteme für den Bereich der Musikproduktion abgeleitet und auf technische Daten abgebildet.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über die technischen Grundlagen von AVB. Kapitel 4 diskutiert vorherige Arbeiten zur Überwachung von AVB und Datennetzwerken und nennt Mechanismen, die von Herstellern bereits in die Systeme implementiert werden.

Für die Entwicklung des Systems werden in Kapitel 5 zunächst Fehlerszenarien eruiert und analysiert, die trotz Standardisierung und Zertifizierung auftreten können. Hierzu werden verschiedene Systeme untersucht, die am Rande oder außerhalb des Standards operieren. Auf Grundlage dessen werden Testverfahren vorgestellt, um diese Szenarien zu erkennen und dem

1 Einleitung

Benutzer die Ursachen zu signalisieren. Diese werden durch exemplarische Messungen und Versuche verifiziert.

Abschließend werden in Kapitel 6 Konzepte für ein System vorgestellt, welches diese Tests automatisiert im Netzwerk durchführen kann und die Betriebssicherheit laufend überprüft, um dem Benutzer erkannte Probleme zu melden und ihm Lösungsvorschläge an die Hand zu geben. Durch Optimierung für den Betrieb auf einem Einplatinenrechner kann daraus ein handliches und kostengünstiges Gerät entwickelt werden.

2 Netzwerktechnologie in der professionellen Audiotechnik

2.1 Notwendigkeit von Audionetzwerken

Die Einführung von Netzwerktechnologien in der professionellen Audiotechnik wird in der Regel mit drei Argumenten begründet: Kostenersparnis, Flexibilität und Verringerung der Komplexität (ALC NetworX GmbH 2014, Holzinger & Hildebrand 2011).

Aufgrund dieser Argumente sehen auch andere Industriezweige das Potential von AVB, weshalb die IEEE Arbeitsgruppe mit Ingenieuren aus sehr unterschiedlichen Bereichen wie Flug- und Fahrzeugbau, Fertigungstechnik und Telekommunikation besetzt ist. Folglich sind auch die Ziele des Standards sehr weitläufig, er soll für möglichst viele Einsatzgebiete gleichzeitig funktionieren. Das senkt durch die Verfügbarkeit von Softwarelösungen und der Verbreitung von fertiger Hardware die Kosten für alle Beteiligten.

Auch im Bereich von reinen Audio- oder Videonetzwerken adressieren die Hersteller aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten häufig eine Vielzahl von Anwendungen, zum Beispiel aus den Bereichen Rundfunk, Festinstallationen, Interkommunikationssysteme und Beschallung.

Die als Massenprodukt gefertigten Netzwerkkabel sind günstig in der Anschaffung und in neueren Gebäuden bereits standardmäßig verlegt. Über ein Kabel können viele Kanäle in beide Richtungen übertragen (bei AVB bis zu 420 Audiokanäle bei Netzwerken mit 1 Gbit/s) und jede Quelle kann an beliebigen Punkten des Netzwerks abgegriffen werden.

Damit sind Netzwerksysteme weit mehr als der Ersatz eines digitalen Multicores. In Zukunft könnte damit das Netzwerkkabel als universelles Übertragungsmedium Mikrofone, Konsolen, DAWs, Kommunikationseinrichtungen sowie Kameras und Monitore gleichermaßen verbinden. Das Problem fehlender Adapter und inkompatibler Schnittstellen verschwindet.

In der vorliegenden Arbeit steht der Einsatz von AVB bei der Musikproduktion im Vordergrund. Um die erwähnten Vorzüge, sowie mögliche Nachteile speziell für diesen Bereich und im Umfeld von Studio- und mobilen Produktionssituationen abzugleichen, sollen im Folgenden exemplarisch Szenarien aufgezeichnet werden, in denen jeweils Audionetzwerke herkömmliche digitale Übertragungsmedien ersetzen. Die aufgeführten Fallbeispiele dienen dabei der Abgrenzung der vorliegenden Arbeit von anderen Einsatzmöglichkeiten von AVB.

2.1.1 Beispielszenarien

Mobile Orchesterproduktion

Modell für die große mobile Produktion ist eine Aufnahme von Liedern mit Orchester. Es gibt ein Hauptmikrofonsystem, Raummikrofone und Stützmikrofone für Orchester und Sänger. Der Aufnahmeleiter benötigt einen Rückweg für die Kommunikation mit dem Orchester (Talkback-Lautsprecher), sowie je ein Telefon für Dirigent und Sänger. Zusätzlich wird ein Rotlicht aufgestellt. Die Aufnahme findet in einem Konzertsaal statt, die Regie wird in einem Nebenraum aufgebaut. Um das Geschehen im Saal zu verfolgen, benötigen Aufnahmeleiter und Toningenieur einen TV-Monitor. Die Aufnahme erfolgt redundant auf zwei DAWs, für die Abhörmischung (Monitore und Kopfhörer) und einen Stereomitschnitt der Aufnahmesitzung (Sessionmix) steht eine digitale Konsole zur Verfügung.¹

Mobiler Konzertmitschnitt eines Klaviertrios

Der Konzertmitschnitt eines Klaviertrios in einer Kirche bildet das Modell für eine kleine mobile Aufnahme. Die Musiker wünschen sich, schwierige Stellen bereits am Nachmittag vor dem Konzert vorsorglich aufzunehmen, um im Konzert nicht gelungene Passagen später ersetzen zu können. Deshalb wird ein Talkback-System mit einem Mikrofon und Lautsprecher eingeplant. Neben einem Hauptmikrofonsystem stellt der Tonmeister zwei Raummikrofone und stützt die drei Musiker mit je zwei Mikrofonen. In der zum Regieraum umfunktionierten Sakristei stehen zwei DAWs zur redundanten Aufnahme, es wird über Kopfhörer und zwei kleine Nahfeldmonitore abgehört. Die Abhörmischung wird aus der Haupt-DAW ausgespielt.

Studioaufnahme eines Jazz-Oktetts

Modell für eine komplexe Aufnahmesituation im Studio ist die Produktion eines achtköpfigen Jazz-Ensembles, bestehend aus Schlagzeug, Kontrabass, Klavier, Saxofon und Streichquartett. Weil der Zeitplan eng ist und Korrekturen nötig sein werden, ist eine möglichst große Kanaltrennung gewünscht. Das Studio verfügt über vier Aufnahmeräume, drei sind untereinander über Fenster verbunden. Schlagzeug, Kontrabass und Streichquartett bekommen einen eigenen Raum, Saxofon und Klavier spielen, über Akustikwände getrennt, zusammen im vierten. Bildschirme und Kameras werden genutzt, um Sichtkontakt in und aus dem vierten Raum herzustellen. Jeder Musiker wird mit mindestens einem Mikrofon abgenommen und erhält einen Kopfhörer für das Monitoring. Dieser ist an ein Personal Monitoring System angeschlossen, mit dessen Hilfe sich die Musiker ihren individuellen Monitormix zusammenstellen können. Im Regieraum wird auf eine DAW aufgezeichnet, die für anspruchsvolle Stellen gleichzeitig einen Clicktrack ausspielen kann und für Retakes einzelner Musiker oder Musikergruppen die übrigen Spuren zuspiziert. Eine analoge Konsole ist für den Sessionmix und das Ausspielen der mit künstlichem Raum versehenen Monitor-signale zuständig. Ebenfalls stellt sie einen Eingang für ein Talk-Mikrofon

¹Diese Aufnahmesituation entspricht der Produktion der CD „Wagner“ mit Jonas Kaufmann, erschienen im September 2013 bei DECCA. Die Aufnahme hat mit dem Orchester der Deutschen Oper Berlin im großen Saal des Funkhaus Berlin Nalepastraße stattgefunden, der Autor hat einer Aufnahmesitzung beigewohnt und den Auf- und Abbau begleitet.

zur Verfügung, mit dem der Produzent zu den Musikern sprechen kann.²

Bandproduktionen im partiellen Overdub-Verfahren

Die Aufnahme einer vierköpfigen Band im partiellen Overdub-Verfahren bildet das Modell für eine kleine Aufnahmesitzung im Studio. Zunächst spielen Bassist und Schlagzeuger mithilfe eines sogenannten Clicktracks ihre Parts ein, die Sängerin singt von der Regie aus beim jeweils ersten Take eine Pilotspur ein. Anschließend nimmt der Gitarrist mehrere Spuren auf, zum Schluss die Sängerin. Im Aufnahmerraum werden maximal 16 Spuren gleichzeitig aufgenommen, sowie zwei Monitor-signale auf Kopfhörer ausgespielt. Im Regieraum wird über Monitorlautsprecher und Kopfhörer abgehört, die Sängerin benötigt für die Pilotspur ein Mikrofon, der Toningenieur ein Talkback-Mikrofon. Der hinten im Raum sitzende Produzent will ebenfalls über ein Talkback-Mikrofon in den Monitorweg einsprechen können. Für die Abhörmischungen und den abschließenden Stereomix steht eine digitale Konsole zur Verfügung.

Anmerkung: Studioproduktionen

Für Aufnahmen im Studio ist zu berücksichtigen, dass sowohl kleinere Projektstudios als auch große Studiokomplexe heute sehr flexibel ausgelegt sein müssen. Während beispielsweise an einem Tag sämtliche Aufnahmeräume für eine Bigbandproduktion belegt sind, ist es möglich, dass bereits am nächsten Tag mehrere kleine Produktionen parallel stattfinden. Unbelegte Regien werden während der Aufnahmesitzungen zum Editieren und Mischen verwendet. Es werden nur zwei Szenarien aufgezeigt, im anschließenden Abgleich werden jedoch Mehrfachbelegungen mit einbezogen.

2.1.2 Aufwand und Kosten verschiedener Lösungen

Die in Abschnitt 2.1.1 aufgestellten Szenarien werden heute meist mit Digitaltechnik in Punkt-zu-Punkt-Topologie (MADI), oder analog (Multicore) realisiert (auch gemischte Bestückung ist üblich). Zwar existieren beispielsweise mit dem Nexus-System von Stageteq bereits seit Jahren Kreuzschienensysteme, die Signale in einem netzwerkverwandten Verfahren an alle Punkte verteilen können, diese werden aber auf Grund der hohen Kosten vorwiegend im Rundfunk und großen Studiokomplexen eingesetzt. Aktuelle Audionetzwerktechnologien, die auf dem etablierten Ethernet aufsetzen und in Geräten verschiedener Hersteller implementiert sind, bieten hingegen die Möglichkeit, auch in kleinen Produktionsumgebungen ökonomisch eingesetzt werden zu können.

In Abbildung 2.1 ist exemplarisch die notwendige Infrastruktur für die Orchesteraufnahme jeweils mit und ohne den Einsatz von Audionetzwerken skizziert. Hieran lässt sich der jeweilige Aufwand für Planung, Auf- und Abbau sowie Materialeinsatz abschätzen. Für die anderen Szenarien wird nachfolgend ebenfalls eine Bewertung dahingehend vorgenommen.

²Die Aufnahme hat im Rahmen einer mehrtägigen Produktion am Erich-Thienhaus-Institut mit kleinen Veränderungen (ein Raum weniger, eine komplexe Beamer-Leinwand-Konstruktion statt vieler TV-Bildschirme) wie beschrieben stattgefunden.

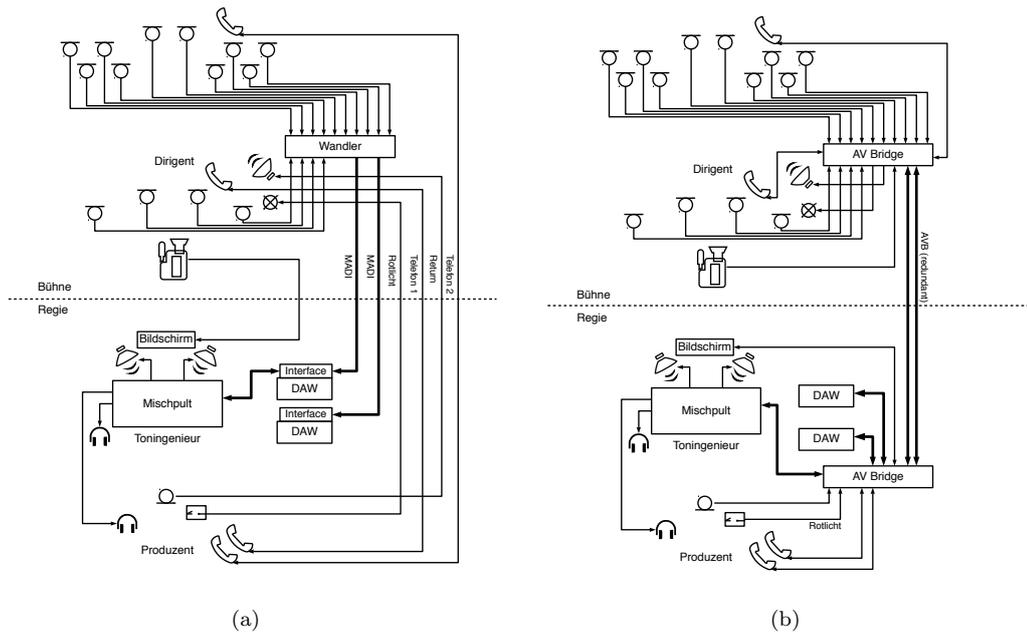


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau der Orchesteraufnahme

Die Lösungen beim mobilen Einsatz im kleinen Rahmen gleichen einander stark. Im Aufnahmerraum laufen jeweils alle Kabel zu einem gemeinsamen Punkt. Von dort muss jeweils nur ein Kabel vom Aufnahme- in den Regieraum verlegt werden. Auch dort gleicht sich der Aufbau, es sind jeweils 3 Geräte notwendig, um Monitore, Kopfhörer, Talkback und DAWs zu verbinden. Die Netzwerklösung setzt allerdings voraus, dass in den DAWs Netzwerkkarten eingebaut sind, die das jeweilige System unterstützen und dass Audiotreiber für das Betriebssystem verfügbar sind. Auf der anderen Seite ist zu erkennen, dass der Switch im System die einzige Abhängigkeit ist. Dort können Geräte entfernt oder hinzugefügt werden, ohne dass sich das grundsätzliche Setup ändern muss; ein Vorteil gegenüber MADI und der analogen Lösung.

Interessant ist der Einsatz der beiden DAWs. Häufig werden in der Praxis zwar zwei DAWs zur Sicherung gegen Systemabstürze und PC-seitige Dropouts eingesetzt, es wird aber meist nur eine MADI-Leitung in den Aufnahmerraum gelegt. Weil MADI in den letzten zwanzig Jahren zu einem robusten, von vielen Herstellern gut implementierten und etablierten Protokoll geworden ist, scheint dies ausreichend. Das Auftreten eines plötzlichen Defekts des Kabels während der Aufnahme wird als Restrisiko hingenommen.

Das Verwenden von Mechanismen der Informationstechnik auf dieser Strecke hat allerdings zur Folge, dass prinzipbedingt auch hier häufiger Störungen auftreten können. Konsequenterweise müsste man eine zweite Leitung zu einem zweiten Switch im Regieraum legen, der die DAWs über redundante Netzwerkports zusätzlich anbindet. In diesem Fall wäre der Aufwand für das Audionetzwerk im Vergleich zu einer herkömmlichen Lösung mittels MADI sogar höher.

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, fallen bei größeren mobilen Produktionen die Unter-

schiede deutlicher aus. Die Diversität sowie die Anzahl der Übertragungsmedien – respektive der Kabel – nimmt ab. Das beschleunigt neben dem Auf- und Abbau auch die Planung der Aufnahme.

Im Studio ist der Unterschied ebenfalls deutlich sichtbar. Eine komplexe Aufnahmesituation kann vor allem durch das Einsparen von Kabeltypen und Kabeln vereinfacht werden. I/O-Einheiten mit wenigen Kanälen können auf einen beliebigen Switch aufgelegt werden, die ebenfalls an beliebigen Punkten verbunden werden können. Dahingegen werden sowohl mit der analogen, als auch der digitalen Verbindung über MADI alle Signale zentral zusammengeführt, um danach wieder entsprechend verteilt werden zu können. Da die Netzwerkgeräte modularer und flexibler einsetzbar sind, kann eine größere Bandbreite von Aufnahmesituationen mit dem selben Equipment abgedeckt werden. Auch mehrere, gleichzeitig stattfindende Produktionen lassen sich so mit weniger Geräten realisieren.

In der Zukunft kann die Analyse noch deutlicher zugunsten der Audionetzwerke ausfallen, wenn etwa Wandler über die Netzwerkleitung mit Strom versorgt werden (Power over Ethernet, PoE). Dadurch entfällt die Notwendigkeit für ein separat geführtes Stromkabel, womit sich der Aufwand für Planung, Auf- und Abbau vor allem in den mobilen Produktionsszenarien reduziert. Außerdem lassen sich die I/O-Einheiten reduzieren oder einsparen, wenn alle dort angebotenen Geräte mit einer Netzwerkschnittstelle ausgestattet sind. Zumindest bei Mikrofonvorverstärkern und A/D-Wandlern dürften Toningenieure dies aber als Eingriff in die Wahl der Mittel zur Klanggestaltung sehen.

Ein detaillierter Vergleich der Kosten für die verschiedenen Lösungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Außerdem ist er noch nicht durchführbar, da nicht für alle Gerätetypen verschiedener Audionetzwerksysteme auch Produkte verfügbar sind. Für die meisten Systeme existieren bereits Einschubkarten, die vorhandene Systeme aufrüsten. Werden diese in die Kalkulation einbezogen, muss fairerweise auch das bereits vorhandene Produktionsequipment eingerechnet werden, was die Sache weiter verkompliziert.

Nimmt man an, dass die Geräte durch den hohen initialen Entwicklungsaufwand zunächst teurer sind, kann die Kostendifferenz dennoch neben dem Einsparpotential von Kabeln mit der erhöhten Flexibilität gerechtfertigt werden. Für den Käufer rechnet sich dies auf lange Sicht, da er das System in Zukunft kostengünstig modular erweitern kann, ohne ganze Blöcke auszutauschen, die dadurch obsolet werden.

Kann ein offener Standard wie AVB zudem erfolgreich in der Unterhaltungselektronik etabliert werden (Apple ist Gründungsmitglied der AVnu Alliance und hat den Standard aktiv vorangetrieben. Mac OS X unterstützt AVB nativ seit der Version 10.6³), verschwimmen womöglich die Grenzen zwischen Consumer- und Profiequipment, was die Kosten in bestimmten Bereichen weiter senken kann (man denke an Camcorder und Fernseher mit AVB-Schnittstelle, die sich zur visuellen Verbindung von Aufnahme- und Regieräumen einsetzen lassen, wie in der Orchesterproduktion bereits skizziert).

³<https://developer.apple.com/library/mac/releasenotes/macosx/whatsnewiniosx/WhatsNewInOSX.pdf>, abgerufen am 30. Juni 2014

2.2 Anforderungen aus Sicht der Musikproduktion

Aus den vorherigen Abschnitten lassen sich die Möglichkeiten, aber auch die Anforderungen an Audionetzwerke beim Einsatz in der Musikproduktion im Studio und mobilen Produktionen ableiten. Im Folgenden soll deshalb erörtert werden, welche Kriterien zwingend einzuhalten sind, welche Probleme dennoch im Vergleich zu analoger oder digitaler Punkt-zu-Punkt-Infrastruktur auftreten können und welche Hilfsmittel für deren Lösung bereit zu stellen sind.

2.2.1 Verlustfreie Übertragung von Musik

Die Audioindustrie war immer darum bemüht, die Übertragung der Musik vom Instrument zum Zuhörer so verlustarm wie möglich zu halten. Der Wechsel von der analogen in die digitale Domäne hat hier erhebliche Fortschritte mit sich gebracht. Rauschen und Probleme durch Einstrreuungen und Erdungsschleifen konnten deutlich reduziert werden. Damit wurden auch lange Leitungswege ohne Qualitätsverlust möglich.

Solange ein digitales System durchgängig mit einem Takt (Wordclock) versorgt wird, kann angenommen werden, dass die Gefahr für Signalverfälschungen innerhalb der digitalen Ebene sehr gering ist. Vor allem bei der Analog-Digital- bzw. Digital-Analog-Wandlung (A/D- und D/A-Wandlung) können Qualitätsverluste durch einen ungenauen oder fehlerhaften Takt (Jitter, Wander) entstehen. Die Einführung von Netzwerktechnologie stellt genau an diesem Punkt eine große Herausforderung dar. Grund dafür ist die Emulation eines synchronen Systems, um dass es sich de facto nicht mehr handelt. Vielmehr liegt bei einem Audionetzwerk ein verteiltes System vor, in dem jeder Knoten einen eigenen Taktgeber hat. Nur durch periodisch stattfindende Synchronisation ist die Annäherung an ein synchrones System möglich, welches zentral von einem Taktgeber gespeist wird (siehe Abschnitt 3.2).

Neben möglichen Qualitätsverlusten bei der Wandlung sind Zeitverschiebungen zwischen verschiedenen Kanälen (Interkanal-Laufzeitfehler) ein Parameter für die Beurteilung eines Audionetzwerkes. Es ist zu beachten, dass dieser Aspekt sich vor allem auf eine mögliche Evolution von Audionetzwerken bezieht. In der ersten Ausbaustufe, das heißt, wenn bestehende Systeme teilweise umgerüstet werden, wird es weiterhin zentrale Stellen im Aufnahmerraum geben, die alle aufzunehmenden Signale in das Netzwerk einspeisen. Die zentrale Einspeisung garantiert, dass alle Signale mit dem exakt gleichen Zeitstempel versehen werden und deshalb im Aufnahmemedium (der DAW) zeitlich exakt übereinander liegen. Mit sinkenden Kosten von Switches und Analogwandlern mit Netzwerkanschluss werden Signale zunehmend dezentralisiert eingespeist. Sub-Multicores werden durch Geräte mit wenigen Kanälen ersetzt, die beispielsweise nur acht Signale direkt im Netzwerk bereitstellen. Für das Szenario der Orchesteraufnahme wird man davon also zehn Stück im Saal verteilen und an einen zentralen Switch anbinden. Im Umkehrschluss besteht nun die Gefahr, dass durch fehlerhafte Zeitstempel zehn Kanalgruppen geringfügig zueinander versetzt in der DAW aufgenommen werden. Die Lage spitzt sich zu, sollten Mikrofone in der Zukunft bereits ab Werk einen Netzwerkausgang besitzen. Mit der Verfügbarkeit von Studiomonitoren, die mit Netzwerkanschlüssen ausgestattet sind, gilt das

Gleiche auch für die Wiedergabeseite.

In beiden Fällen müssen zwei hörphysiologische Effekte beachtet werden, Kammfilterbildung und Lokalisation. Kammfilter liegen im Hörbereich, wenn zwei identische Signale um mehr als $25\ \mu\text{s}$ gegeneinander verzögert sind.⁴ Christensen hat im Hinblick auf die Anwendung in Line Arrays einen maximal zu tolerierenden Laufzeitfehler von 2-3 μs ermittelt (Christensen 2007). Bei beiden Berechnungen handelt es sich aber um Vereinfachungen, die für die Praxis eher geringe Aussagekraft haben. Der Vollständigkeit halber und um eine Quantisierung der beeinflussenden Effekte zu haben, sind sie dennoch aufgeführt.

Zweifellos auch von praktischer Relevanz ist sowohl aufnahme- als auch wiedergabeseitig die Ortung von Phantomschallquellen durch Summenlokalisierung (Weinzierl 2008: S. 101). Für das Richtungshören in der Horizontalebene beträgt die wahrnehmbare Auflösung etwa 1° , das entspricht einem Laufzeitunterschied von 10 μs (Görne 2008: S. 118, 126), unterhalb dessen der Laufzeitfehler des Audionetzwerkes bleiben muss.

Aber auch für die aktuelle Situation, in der I/O-Einheiten Kanäle gemeinsam ins Netzwerk einspeisen und von dort entnehmen, darf der Interkanal-Laufzeitfehler nicht zu hoch sein. Sobald beispielsweise bei der Orchesteraufnahme zwei oder mehr I/O-Einheiten im Aufnahmeraum platziert werden, treten zwangsläufig Fehler zwischen Stützmikrofonen und Hauptmikrofonensystem auf. Theresa Leonard hat bereits in den frühen neunziger Jahren in einem Hörtest ermittelt, dass zur künstlerischen Gestaltung von Aufnahmen mit Stützmikrofonen Delays eingesetzt werden können. Sie nennt dazu abschließend eine anzustrebende Präzision von 1 ms, in den Hörbeispielen versucht sie das Delay sogar auf 100 μs genau einzustellen (Leonard 1991).

Die Spanne zwischen wahrnehmbarer Laufzeitdifferenz und tatsächlichem Einfluss auf die Musikproduktion (in diesem speziellen Aspekt der Gestaltungsfreiheit) liegt also zwischen 10 μs und 100 μs . Es lässt sich ableiten, dass es vermutlich ausreichend ist, den Laufzeitfehler im oben genannten Szenario im maximal zweistelligen Mikrosekundenbereich zu halten.

Neben der Hörphysiologie darf die Psychologie im Aufnahmeraum nicht außer Acht gelassen werden, die Musik entsteht letztlich vor dem Mikrofon. Technologie sollte Musiker und Tonmeister bei der Arbeit unterstützen, tritt der umgekehrte Fall ein, dass Technologie die Bedingungen im Studio verschlechtert, nimmt mitunter die Qualität der Darbietung ebenfalls ab. Besonders deutlich wird das im Bereich des Monitorings bei räumlich getrennten Aufnahmen beziehungsweise in Overdub-Situationen.

Lester und Boley haben in einer Untersuchung gezeigt, dass sich das Zusammenspiel von Musikern verschlechtert, wenn die Latenz des Monitorings zu hoch ist (Lester & Boley 2007). Obwohl diese Untersuchung für Live-Situationen durchgeführt worden ist, lassen sich die Ergebnisse für In-Ear-Monitoring auch auf Studiosituationen übertragen, in denen die Musiker mit Kopfhörern spielen. Die Autoren dieser Studie schlussfolgern, dass ab einer Gesamtlatenz von 6,5 ms hörbare Artefakte auftreten.

⁴Für die erste Auslöschung im Kammfilter gilt $f = \frac{1}{2\Delta t}$, daraus folgt: $\Delta t = \frac{1}{2f}$, für eine großzügig bemessene obere Hörgrenze von 20 kHz liegt die erste Auslöschung somit bei $\Delta t = 25\ \mu\text{s}$

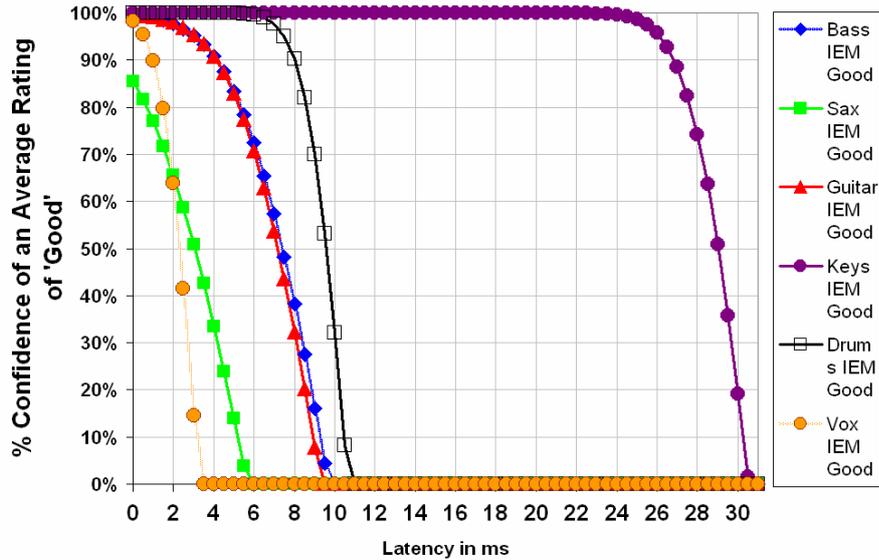


Abbildung 2.2: Bewertung von Latenzen bei In-Ear-Monitoring (Lester & Boley 2007)

Ein Team der Stanford University hat ebenfalls versucht zu erforschen, wie sich Latenzen auf das Zusammenspiel von Ensembles auswirken (Chafe et al. 2004). Im vorliegenden Kontext bringt die Untersuchung aber wenig Nutzen, weil sich der Versuchsaufbau zu stark von einem realistischen, musikalischen Kontext unterscheidet. Die Teilnehmer hatten keinen Sichtkontakt zueinander, das Geräusch des eigenen Klatschens wurde durch geschlossene Kopfhörer von der Versuchsperson isoliert. Außerdem wurden von den musikalisch nicht geschulten Teilnehmern nur simple Rhythmen durch Klatschen reproduziert. Ausgewertet wurde die Präzision der wiedergegebenen Rhythmen unter Hinzufügen von Zeitverzögerungen an den Kopfhörersignalen. Die Autoren des Artikels ermitteln, dass ein geringes Delay sogar die Genauigkeit des „Zusammenspiels“ verbessert, wohingegen ein Monitoring ohne Delay zu einer Beschleunigung führt. Dies ist ein legitimer Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen im komplexen musikalischen Zusammenspiel, darf aber auf der anderen Seite nicht als Schlussfolgerung für die Konzeption eines technischen Systems verstanden werden.

In Marentakis et al. (2012) wurde vorgeschlagen, die Latenz durch das Hinzufügen von Rauminformationen und der Faltung mit einer binauralen Impulsantwort zu kaschieren. Dies gelingt bis zu einer Latenz von 13 ms. Auch für diese Untersuchung gilt oben Gesagtes. Sind kleinere Latenzen nicht möglich, kann dieser Behelf in bestimmten Fällen eine Lösung darstellen, darf aber die Systemanforderungen nicht grundsätzlich aufweichen.

Zusammenfassend muss man deshalb vom Worst-Case-Szenario ausgehen. Wenn ein Studio oder mobiles Produktionsequipment geplant wird, lässt sich nicht vorhersehen, welchen Musikern man während der Einsatzdauer begegnet. Dies führt streng genommen zu einer maximal tolerierbaren Latenz von 1,4 ms, die der Saxofonist in der Studie Lester & Boley (2007) als „fair“ bewertet hat. Betrachtet man ihn als Ausreißer, wie es die Autoren ebenfalls vorschlagen und rundet den nächsten ermittelten Wert nach unten hin ab, ist eine Gesamtlatenz von etwa

6 ms akzeptabel (jeweils vom Mikrofon bis zum Kopfhörer).

2.2.2 Betriebssicherheit

In Zeiten immer kleinerer Budgets in der Musikproduktion wird der reibungslose Ablauf während der Aufnahme immer wichtiger. Produktionspläne sind straff organisiert, um Kosten für Musiker, Personal und Saalmiete gering zu halten. Zusätzliche Techniker werden eingespart und bei kleinen Produktionen eine Personalunion von Tonmeister, Toningenieur und Tontechniker gefordert. Folglich muss die Technik zuverlässig funktionieren, Zeitverluste durch Ausfall oder Fehler sind nicht hinnehmbar.

Auf der anderen Seite steigt aber die technische Komplexität mit der Einführung von Audionetzwerken sprunghaft an, was sich allein schon durch den Umfang der Standards zeigt: Bisher übliche Standards im Bereich der digitalen Audioübertragung waren übersichtlich, der AES-Standard für MADI (AES10 2008) etwa hat nur 18 Seiten. Der zugrunde liegende Standard von AVB (IEEE 802.1BA 2011) hat bereits 45 Seiten. Zusammen mit den zusätzlich nötigen und direkt referenzierten Standards 802.1Qat, 802.1Qav, 802.1AS, 1722-2011 und 1722.1-2013 summiert sich der Umfang bereits auf 966 Seiten. Auch wenn es keine zwingende Korrelation zwischen der Seitenzahl eines Standards und dessen Komplexität geben muss, ist absehbar, dass der Aufwand der Implementierung zunimmt. Damit steigt auch die Zahl potentieller Fehlerquellen, vor allem bei der herstellerübergreifenden Interoperabilität.

Für den Kontext dieser Arbeit kann der Begriff Betriebssicherheit aus der Dienstgüte hergeleitet werden. Während die Dienstgüte als Skalar zu verstehen ist, beschreibt die Betriebssicherheit Zustände, ähnlich einer Verkehrsampel (betriebsbereit, eingeschränkt bereit, nicht bereit). Betriebssicherheit besteht demnach, wenn die Dienstgüte über einer vorher festgelegten Schwelle liegt, die während des Betriebs nicht unterschritten werden darf.

Die International Telecommunication Union (ITU) definiert in der Empfehlungsschrift „ITU-T J. 145, Measurement and control of the quality of service for sound transmission over contribution and distribution networks“, die Dienstgüte (Quality of Service) von Netzwerken als *„collective effect of service performances which determine the degree of satisfaction of a user of the service“*. Weiterhin wird ergänzt: *„The Quality of Service is characterized by the combined aspects of service support performance, service operability performance, service integrity and other factors specific to each service.“* (ITU-T:J.145 2001:S. 2) Neben objektiven und subjektiven Qualitätsparametern für Audio werden unter anderem die Zeit für die Wiederherstellung nach einem Fehler (Recovery Time) und Verfügbarkeit von Netzwerkdiensten (Availability Parameters) genannt.

Zwar bezieht sich die ITU-Empfehlung sowohl auf die verlustfreie, als auch die verlustbetroffene Übertragung von Audiosignalen und ist daher nicht uneingeschränkt auf die untersuchten Bereiche der professionellen Musikproduktion übertragbar, dennoch kann man aus dem zitierten Abschnitt schließen, dass Dienstgüte im Bereich von Audionetzwerken immer auch netzwerkspezifische Parameter mit einbezieht, die nicht unmittelbar mit der Audioqualität zusammen-

hängen.

Um den Begriff der Betriebssicherheit schließlich in die Praxis zu überführen, ist es hilfreich, ihn für den folgenden Verlauf in vier Kategorien zu untergliedern und auf praxisrelevante Aspekte abzubilden:

1. reibungslose Inbetriebnahme
2. zuverlässige Übertragung von Audio- und Kontrolldaten
3. Fehlerbehandlung
4. Wartung

Reibungslose Inbetriebnahme

In der analogen Produktionstechnik ist die Inbetriebnahme mit dem Verkabeln der Anschlüsse und dem Einschalten der Geräte bereits abgeschlossen. Soweit Kreuzschienen zur Verfügung stehen, ist das Setzen der Koppelpunkte auch dort „greifbar“. In der digitalen Produktionstechnik muss zusätzlich dafür Sorge getragen werden, dass der Systemtakt (Wordclock) systemweit korrekt eingestellt ist, bzw. an Übergabepunkten Abtastratenwandler eingesetzt sind. Ansonsten entspricht das Stecken eines BNC-Steckers zum Aufschalten eines MADI-Signals weitestgehend dem Stecken eines analogen Multipin-Steckers. Weil es digital aber wesentlich kostengünstiger ist, fernsteuerbare Kreuzschienen zu realisieren, hat sich diese Technik hier flächendeckend verbreitet.

Betrachtet man die in 2.1.1 genannten Szenarien, sind an vielen Stellen bereits digitale Kreuzschienen zu finden. Bei der Orchesteraufnahme befindet sich eine Kreuzschiene in der digitalen Konsole, die eingehenden Signale können beliebig auf Kanäle aufgelegt werden. Die Konfiguration findet in aller Regel im Pult über eine displaygestützte Mimik statt, wahlweise kann es herstellereigene Software für den Rechner geben. Für die Kammermusikaufnahme ist eine virtuelle Kreuzschiene innerhalb der DAW zu finden, die in der Software selbst zu bedienen ist. Bei den beiden Studioproduktionen sind mehrere Möglichkeiten denkbar. Da in einer Regie eine analoge Konsole steht, könnten die Wege vom Aufnahmezimmer in einen zentralen Geräteraum und von dort in die beiden Regieräume analog ausgeführt sein. Die Verteilung würde dann über Multipin-Patchfelder erfolgen, die Mikrofonverstärker wären fest den Regien zugeordnet. Ebenfalls denkbar wäre eine feste Zuordnung der Mikrofonvorverstärker und A/D-Wandler zu den Wegen in den Aufnahmezimmern. Die Verteilung in die Regien kann in diesem Fall über einen MADI-Router realisiert werden, der entweder am Gerät oder über eine herstellereigene Software konfiguriert werden kann.

Der Einsatz von Audionetzwerken verändert mobile Produktionssituationen in puncto Routing nur wenig. Die Orchesteraufnahme bleibt unverändert. Auch wenn die digitale Konsole bei der Orchesteraufnahme den direkten Anschluss des Netzwerks erlaubt (z.B. über Zusatzkarten), können Quellen weiterhin über die Pultkonfiguration oder die Herstellersoftware angewählt werden. Bei der Kammermusikaufnahme findet keine Veränderung statt.

Im beispielhaft skizzierten Studio hingegen entfällt die Notwendigkeit für eine externe Konfiguration in der digitalen Regie. Die Koppelpunkte können direkt in der digitalen Konsole gesetzt werden, gesetzt den Fall, die Hersteller lösen das Versprechen der Interoperabilität ein. Die analoge Konsole benötigt (wie auch in der Realisation über MADI) D/A-Wandler, um die Mikrofonsignale auf das Pult zu legen. Die Koppelpunkte müssen nun über eine Drittanbieter-Software gesetzt werden, weil der MADI-Router entfällt.

Wie an den Beispielen zu sehen ist, sind jeweils zwei Varianten für das Setzen von Koppelpunkten möglich, über ein digitales Pult, sowie über eine herstellerunabhängige Software. Eine entsprechend ausgestattete Software hat den Vorteil, dass der Ingenieur bereits zu Abschluss der Planungsphase die benötigten Geräte einpflegen und virtuell vernetzen kann (Offline-Konfiguration). So vorbereitet ist das System vor Ort nach dem Verkabeln sofort einsatzbereit, es muss nur abgeglichen werden, ob die geforderten Geräte auch zur Verfügung stehen.

Entsprechende Software gibt es bereits seit längerem für einige Digitalpulte (z.B. den Studio Manager für das Yamaha DM2000). Allerdings kann dort nur ein Anschluss (z.B. „MADI 1“) festgelegt werden. Es ist somit nicht möglich, tatsächlich ein einzelnes Mikrofon zu adressieren. Änderungen innerhalb des Signalwegs führen dazu, dass das Routing nicht mehr gültig ist. Audionetzwerke bieten den Vorteil, dass Kanäle ab dem Punkt der Einspeisung ins Netz (beispielsweise ab dem Mikrofonvorverstärker oder später ggf. ab dem Mikrofon) eindeutig identifizierbar sind. Es entfällt eine Abstraktionsebene und damit eine potentielle Fehlerquelle.

Gleichzeitig ermöglicht die Identifizierbarkeit im Netzwerk, jedem Kanal einmalig einen Namen zuzuweisen, der dann systemweit bekannt ist. Diese Maßnahme kann Bedienfehler verhindern und ist deshalb im Sinne der reibungslosen Inbetriebnahme wünschenswert.

Außerdem ist es notwendig, dass eine einmal erstellte Konfiguration abgespeichert und erneut aufgerufen werden kann. Schließlich handelt es sich bei einem stromlosen System um ein sprichwörtliches „tabula rasa“. Es ist im Gegensatz zur analogen Verkabelung oder auch zur digitalen Punkt-zu-Punkt-Verbindung nicht mit bloßem Auge erkennbar, wie die Signale verlaufen. Es bleibt zu diskutieren, ob nach Wiedereinschalten des Systems zu Beginn der Produktionstage der letzte Stand automatisch wiederhergestellt werden soll. Beide Vorgehen sind seit längerem bekannt: Während digitale Konsolen nach dem Einschalten automatisch auf den letzten Stand zurückgehen, muss eine Session in der DAW manuell geladen werden.

Treten während der Inbetriebnahme Probleme auf, muss der Benutzer in der Lage sein, diese zu lösen. Roland Hemming weist darauf hin, dass dies im Vergleich zu analoger Technik nicht mehr zwingend selbstverständlich ist. Die Zunahme an Komplexität und möglicher Fehlerursachen kann dazu führen, dass Tonschaffende das Problem nicht mehr mit den gewohnten Mitteln lösen können. Wird Support von außen angefragt, stellt sich die Frage der Zuständigkeiten, weil der Fehler häufig keinem Gerät spezifisch zugeordnet werden kann. Außerdem führt er die unterschiedliche Mentalität von IT-Fachleuten („*an industry that stops work at five and doesn't work weekends*“) und Toningenieuren („*the show must go on*“) an, die in ihrer Zusammenführung weitere Probleme mit sich bringt. Er schlägt als Lösung vor, dass Audionetzwerke nicht mehr als Einzelgeräte bei vielen unterschiedlichen Händlern eingekauft werden, sondern als gesamtes

System bei einem Fachhändler. Dieser soll in der Folge herstellerübergreifenden Support leisten und sich damit länger an den Kunden binden und der Kunde an ihn. (Hemming 2013)

Auch wenn der Beitrag im Stile eines Postulats mitunter übertreibt und beispielsweise außer Acht lässt, dass es IT-Probleme in Audiosystemen bereits seit der Einführung von DAWs gibt, oder dass es zwischen der analogen Technik und Audionetzwerken bereits die Digitaltechnik mit all Ihren Fallstricken im Bereich Taktung gibt, ist der Kern der Botschaft beachtenswert. Es lassen sich hieraus drei Kernforderungen ableiten: Das Problem der Verantwortlichkeiten im Support muss herstellerübergreifend gelöst sein, Mechanismen und Werkzeuge für die Fehlersuche müssen verfügbar sein, und schließlich müssen Benutzer des Audionetzwerks im Umgang damit besonders geschult werden. Letzteres ist allerdings eine Anforderung, die von Herstellern, Händlern, Verbänden und Ausbildungseinrichtungen gemeinsam gelöst werden muss und nicht im Fokus dieser Arbeit liegt.

Zuverlässige Übertragung von Audio und Kontrolldaten

Die in Abschnitt 2.2.1 angesprochene quasi verlustfreie Übertragung von Audiosignalen muss dauerhaft zugesichert werden können. Der Verlust einzelner Samples (Dropouts) ist vor allem im Aufnahmeweg kritisch. Die im Wandler digitalisierten Signale müssen vollständig und unverändert zur DAW gelangen. Von der Regie in den Aufnahmerraum zurückgesendete Signale (Monitoring) sind vor allem in Bezug auf Latenz und Laufzeitfehler anfällig. Während Aussetzer von wenigen Samples je nach Art des Signals unhörbar sein können, kann eine sich ändernde Latenz oder veränderte Laufzeiten zwischen den Kanälen Einfluss auf die musikalische Darbietung haben. Laufzeitfehler im Abhörraum können das Urteil des Toningenieurs in Bezug auf Mikrofonaufstellungen beeinflussen und müssen deshalb auch im Betrieb dauerhaft unterhalb des festgesetzten Grenzwerts und möglichst konstant bleiben.

Das Gleiche gilt für im Netzwerk übertragene Kontrolldaten, wenn auch nicht mit den gleichen strengen Anforderungen wie an die Audioübertragung selbst. Zu spät oder gar nicht gestartete Aufnahmen verringern die Dienstgüte. Das verzögerte Stummschalten von Abhörmonitoren oder Kopfhörern kann Gehör- und Geräteschäden verursachen, wenn durch Fehlbedienung versehentlich ein sehr lautes Signal (z.B. eine Rückkopplung) auf einem Abhörweg anliegt.

Fehlerbehandlung

Probleme, die nach erfolgreicher Inbetriebnahme auftreten können und zu Übertragungsfehlern führen, lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen. Zum einen Fehler, die durch fehlerhafte Software oder zufällige Übertragungsfehler in der Leitung („Bit-Kippen“) entstehen, zum anderen fremdinduzierte Fehler wie Stromausfall oder das versehentliche Ausstecken einer Leitung.

Fehler der ersten Gruppe sollten automatisch erkannt und behandelt werden. Ausfälle, die von außen verursacht worden sind, sollten entweder automatisch behoben werden, oder der Benutzer muss in der Lage sein, den vorherigen Zustand schnell wiederherzustellen. Der oben angeführte straffe Produktionsplan legt nahe, dass die Zeitspanne zur Wiederherstellung im

niedrigen Minutenbereich liegen muss.

Es ist zu beachten, dass Fehler der ersten Kategorie ebenfalls durch Fremdeinfluss ausgelöst werden können. So kann sich ein Softwarefehler erst bemerkbar machen, wenn im Netzwerk Fremdverkehr hinzutritt, weil beispielsweise ein Programm auf einem angeschlossenen PC gestartet worden ist. In gemeinsam genutzten Daten- und Audionetzwerken nimmt die Wahrscheinlichkeit deutlich zu, dass während einer Aufnahme Geräte an- oder abgesteckt werden.

In beiden Fällen ist es notwendig, den Benutzer über aufgetretene Fehler zu informieren und ihm, wenn nötig, Hilfsmittel an die Hand zu geben, um die nötigen Schritte zur Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft einzuleiten.

Wartung und Support

Netzwerktechnologie impliziert eine höhere Komplexität der Software und damit die Notwendigkeit, die Firmware der Geräte häufiger zu updaten. Aus Kostengründen wird man versuchen, die Geräte mit eigenem Personal auf den neuesten Softwarestand zu bringen und zu halten, anstatt jedes Gerät zum Hersteller zu schicken oder einen Dienstleister in Anspruch zu nehmen. Es ist also wünschenswert, dass die nötigen Hilfsmittel dafür bereitgestellt werden. Bisher ist es auch in diesem Bereich Usus, dass jeder Hersteller eine eigene Software dafür bereit hält. Wie auch auf anderen Ebenen bietet der Umstieg auf ein einheitliches und herstellerübergreifend funktionierendes Audionetzwerk die Möglichkeit, Softwareupdates ebenfalls über ein einheitliches Frontend durchzuführen.

2.3 Übertragung auf technische Daten

Nachdem dediziert auf die Bedürfnisse und Voraussetzungen im Bereich der professionellen Musikproduktion eingegangen worden ist, sollten diese Kriterien nun knapp in technischen Daten zusammengefasst werden, um sie in den nachfolgenden Ausführungen mit existierenden Systemen abgleichen zu können. Abderrahmane Smimite et al. (Smimite et al.), Jeff Berryman (Berryman 2011), Roland Hemming (Hemming 2013) und Axel Holzinger (Holzinger & Hildebrand 2011) haben bereits Beiträge zu diesem Thema veröffentlicht, die eine breitere Zielgruppe (siehe Abschnitt 2.1) im Blick haben. Die oben herausgearbeiteten Forderungen werden wo immer möglich mit denen aus den genannten Arbeiten verknüpft.

Latenz

Der im Hinblick auf Latenz kritische Bereich ist das Monitoring. Die zulässige Latenz richtet sich nach der Konzeption. Können Signale direkt von den Mikrofonen auf den Kopfhörerverstärker respektive das Personal Monitoring System des Musikers aufgelegt werden, ist nach Abzug für Latenzen durch die A/D- und D/A-Wandlung, Processing, etc. eine Latenz bis 4 ms akzeptabel. Ist der Weg über die Regie (Monitormix in der Konsole, siehe Abschnitt 2.1.1) unerlässlich, ergibt sich eine maximal zulässige Latenz von 2 ms pro Weg.

Dieser Wert wird ebenfalls in Smimite et al. gefordert, Holzinger & Hildebrand (2011) nennen unspezifisch den „*einstelligen Millisekundenbereich*“, Berryman (2011) schlägt eine Optimierung bis auf 1 ms vor.

Laufzeitfehler

Je nach Ausbaustufe des Audionetzwerks wurde für den Interkanal-Laufzeitfehler eine Obergrenze von 10 μs bis etwa 100 μs ermittelt. Für den Fall von Wellenfeldsynthese-Systemen und ähnlichen Einrichtungen fordern Smimite et al. einen maximalen Fehler von wenigen Mikrosekunden, Berryman (2011) nennt als Anhaltspunkt 1 μs .

Jitter/Wander

Jitter und Wander bezeichnen hier die auftretenden Zeitfehler im Kontext einer Media Clock (Wordclock), die nur bei A/D- und D/A-Wandlung unmittelbaren Einfluss auf die Audioqualität haben (Görne 2008: S. 223). Nicht zu verwechseln ist dieser Wert mit dem Netzwerk-Jitter und MTIE (Maximum Time Interval Error), der Laufzeitdifferenzen beim Transport von Datenpaketen durch ein Netzwerk meint (Tanenbaum & Wetherall 2013: S. 406).

Im Sinne einer quasi verlustfreien Übertragung von Audio sollten diese Werte etwa im gleichen Bereich wie synchrone digitale Übertragungstechniken liegen. Da in den meisten Geräten mit MADI-Schnittstelle bereits PLLs zur Regeneration oder Aufbereitung des Wordclock-Signals zum Einsatz kommen, wird diese etablierte Technik auch bei der Media Clock-Regeneration zum Einsatz kommen. Damit ist nicht anzunehmen, dass es hier eine unmittelbare Verschlechterung geben muss. Als Anhaltspunkt nennt Berryman (2011) für Jitter einen Höchstwert von 500 ps peak to peak.

Kanalzahl und Bündelung

Wie in Abschnitt 3.6 angesprochen werden wird, verschickt AVB die Samples mehrerer Kanäle in gemeinsamen Netzwerkpaketen. Auch die anderen Audionetzwerksysteme bündeln Kanäle, um Overhead zu vermeiden. Dieser Kunstgriff erschwert aber die Definition der technischen Anforderungen. Zwar sollte sich der Nutzer über die Bündelung keine Gedanken machen müssen, in der Praxis ist es aber auch nicht notwendig, jeden Kanal einzeln zu versenden (Beispiel: Hauptmikrofon- und Stützensignale können gemeinsam zu den DAWs und zur Konsole übertragen werden, die Extraktion zum Vorhören kann die Konsole übernehmen).

Betrachtet man die bloße Kanalzahl und lässt die Bündelung außer Acht, ergeben sich bei großzügiger Kalkulation etwa 128 Kanäle Audio und ein Kanal Video, die über eine einzelne Verbindung zwischen zwei Knoten übertragen werden müssen (Orchesteraufnahme).

128 Kanäle nennt auch Berryman (2011) als mittleren Wert, für die Wellenfeldsynthese streben Smimite et al. sogar 1000 Kanäle an. Holzinger & Hildebrand (2011) bleiben allgemeiner und fordern lediglich, dass sich die maximal zu übertragene Kanäle nach der tatsächlichen Leitungskapazität richten und fließend damit skalieren. Im Hinblick auf die zu erwartende baldige Verfügbarkeit von 40Gbit-Netzwerken ein nicht zu vernachlässigender Punkt.

Redundanz

Alle genannten Arbeiten (Berryman 2011, Holzinger & Hildebrand 2011, Smimite et al.) fordern eine Form der Redundanz. Im Abschnitt 2.1.2 wurde bereits ein Grund angeführt, warum auch im Bereich der Musikproduktion über die Redundanz bei der Systemplanung nachgedacht werden muss. Auch wenn die genaue Ausführung einen Kompromiss zwischen Budget und Sicherheit darstellen wird, muss also zumindest die Möglichkeit vorgesehen sein, Verbindungen redundant zu führen.

Konfiguration, Steuerung und Überwachung

Der lange Abschnitt über die Inbetriebnahme (2.2.2) deutet an, dass sich mit der Einführung von Audionetzwerken ein Paradigmenwechsel in der Audiotechnik abzeichnet. Es fällt deswegen schwer, klare Kriterien für Konfiguration und Steuerung festzulegen, bevor sich allgemein gültige Workflows etabliert haben.

Berryman (2011) und Holzinger & Hildebrand (2011)⁵ weisen darauf hin, dass die entwickelten Mechanismen für einen weiten Einsatzbereich funktionieren müssen und können deshalb ebenfalls keine genaue Definition nennen. Einigkeit besteht darin, dass alle Signale aus dem Netzwerk zu jedem anderen Punkt geroutet werden können müssen und alle Geräte im Netzwerk auffindbar sind. Auch der Einsatz von mehreren Controllern wird angesprochen. Desweiteren sollen herstellerabhängige Erweiterungen möglich werden, ohne die allgemeine Interoperabilität zu gefährden.

Grundsätzlich muss sowohl das Auffinden, das Setzen von Routen als auch die grundlegende Steuerung von Geräten durch ein einheitliches Protokoll möglich sein. Erweiterungen sollen ebenfalls dieses Protokoll nutzen, um Heterogenität zwar zu ermöglichen, aber zukünftige Interoperabilität sicherzustellen.

Zum Bereich Überwachung nennen die Arbeiten lediglich, dass sie über das Netzwerk möglich sein muss. Die Anforderungen in Abschnitt 2.2.2 spezifizieren es genauer. Die Überwachung von Geräten und des Netzwerks an sich muss von einem zentralen Punkt aus erfolgen können. Wenn Fehler auftreten, müssen dem Benutzer Mittel zur Fehlersuche und -beseitigung zur Verfügung gestellt werden.

Interoperabilität und Erweiterbarkeit

Die in 2.2 genannten Überlegungen spiegeln sich in den Forderungen der aufgeführten Arbeiten. Berryman (2011) geht noch spezifisch auf die „*Evolvability*“ ein, also auf die Aufwärtskompatibilität der jetzigen Lösungen. Außerdem spricht er an, dass neben der herstellerübergreifenden Interoperabilität die Verfügbarkeit eines offenen Standards die Gefahr von Fehlinvestitionen und Obsoleszenz senkt und deshalb in Zukunft eine wichtige Voraussetzung für Netzwerksysteme sein kann. Es ist also erstrebenswert, wenn nicht nur Mikrofone, Vorverstärker und analoge Effektgeräte, sondern in Zukunft auch Netzwerkaudiogeräte eine hohe Investitionssicherheit bieten.

⁵Smimite et al. zitieren die genannten Forderungen sinngemäß ohne neue Aspekte hinzuzufügen

Wartung

Dieser Punkt entspricht Abschnitt 2.2.2 und wird von Berryman (2011) so unterstützt. Die Durchführung von Softwareupdates sollte aus der Ferne nicht nur möglich, sondern auch herstellerunabhängig einheitlich sein.

3 Technische Grundlagen von AVB

3.1 Ethernet, OSI-Modell und Protokollschichten

Die Protokolle von Computernetzwerken sind in Schichten strukturiert. Jede Schicht bietet einen fest definierten Dienst an, bleibt in der Ausführung davon aber transparent gegenüber darüber liegenden Schichten. Deshalb können darunter liegende Schichten beliebig ausgetauscht werden, so lange sich der Dienst gleich verhält. Diese Strukturierung erlaubt es, ein komplexes System in handhabbare Teile zu zerlegen. Das bekannteste Modell für die Schichtenarchitektur im Netzwerk ist das OSI-Modell (Open Systems Interconnection) der International Standards Organization (ISO). Obwohl die assoziierten Protokolle heute bedeutungslos sind, ist das dahinterliegende Modell immer noch gültig. (vgl. Tanenbaum & Wetherall 2013: S. 41f)

Auch im Zusammenhang mit Audionetzwerken ist es omnipräsent, wobei vor allem die unteren drei Schichten relevant sind, für AVB sogar nur die unteren beiden. Das Protokoll der Bitübertragungsschicht (Physical Layer, Layer 1) richtet sich nach dem Trägermedium (z.B. Kupfer- oder Glasfaserkabel) und stellt sicher, dass ein Datum (Bit) übertragen werden kann. Die nächst höhere Schicht (Sicherheitsschicht, Link Layer, Layer 2) stellt Mittel für die Übertragung von Datenrahmen (Frames) bereit. Neben der Fehlererkennung und -korrektur haben Protokolle in dieser Schicht die Aufgabe, den Zugriff auf ein geteiltes Medium zu regeln. Dies war historisch vor Einführung von Switches und Full-Duplex-Leitungen (nur ein Medium für beide Richtungen) notwendig und ist heute immer noch im drahtlosen Netzwerk nötig. Die dritte Schicht schließlich (Vermittlungsschicht, Network Layer, Layer 3) ist für das Routing der Pakete ¹ innerhalb eines Netzwerks und auch netzwerkübergreifend zuständig. Hier wird das bekannte IP (Internet Protocol) eingeordnet. (vgl. Tanenbaum & Wetherall 2013: S. 43ff)

Jason Damori versucht in einem Blogpost die Vor- und Nachteile von Layer 2 und Layer 3 basierten Audionetzwerken aufzulisten und gegeneinander abzuwägen (Damori 2013), auch in Holzinger & Hildebrand (2011) werden die Unterschiede anhand von AVB und Ravenna aufgelistet.

In verwandten Arbeiten wird häufig auf die Kollisionserkennung (Collision Detection) eingegangen, der zugrunde liegende Standard für Layer 1 und 2 im Ethernet, IEEE 802.3 (2008), trägt schließlich den Titel „Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD)

¹Die Begriffe Datenrahmen (Frame) und Paket (Packet) können je nach Kontext unterschiedliche Bedeutungen haben. Weil sich diese Arbeit vorwiegend mit dem auf Layer 2 aufsetzenden AVB beschäftigt, meint ein Paket normalerweise einen zu versendenden Datenblock, wohingegen Frame Protokollrahmen meint, aus dem oder aus denen sich ein Paket zusammensetzt (vgl. IEEE 802.3 2008: S. 48)

Access Method and Physical Layer Specifications“. Dieser Mechanismus sorgt in Netzwerken mit einem geteiltem Medium dafür, dass Geräte erkennen, wenn der Übertragungskanal belegt ist und das Senden nach kurzer Zeit erneut versuchen. Der für AVB notwendige Standard 802.1Q in aktueller Fassung macht aber deutlich, dass in einem geteilten Medium keine Garantien hinsichtlich Latenz und Bandbreitenreservierung gemacht werden können: „*Classic shared media, such as IEEE 802.3 half-duplex Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD), cannot provide latency or bandwidth guarantees, because their operation depends on random timers. Such media are, therefore, not supported by MSRP.*“ (IEEE 802.1Q 2011: S. 1110)

In dem Zusammenhang sei auch auf die Unterscheidung zwischen Bridge, AV Bridge und Switch hingewiesen. In den Anfängen des Ethernet wurden sogenannte Hubs für die Verbindung mehrerer Rechner eingesetzt, die auf physikalischer Ebene (Layer 1) Pakete auf allen Ports weitergegeben haben (weshalb oben genannte Kollisionserkennung zwingend notwendig war). So verbundene Geräte haben dadurch ein LAN aufgespannt. Bridges werten im Gegensatz dazu die Zieladressen der Datenpakete aus und leiten sie nur an die jeweiligen Ports weiter, sie verbinden beziehungsweise überbrücken mehrere (Hub-basierte) LANs auf Ebene des Data Link Layers (Layer 2). (vgl. Tanenbaum & Wetherall 2013: S. 332)

Heutzutage sind Hubs praktisch ausgestorben, Endgeräte werden stattdessen direkt an eine Bridge angeschlossen. Dadurch wird (bei bidirektionalen Verbindungen, Full-Duplex) nicht nur die Kollisionskontrolle obsolet, auch der Begriff LAN wird in der Praxis umgedeutet als die Summe von untereinander mit Brigdes verbundenen Endpunkten.

Der Begriff Switch schließlich ist nach Tanenbaum nicht nur synonym zur Bridge zu verwenden, er kommt im zugehörigen Standard (IEEE:802.1D 2004) als Bezeichnung für ein Gerät auch gar nicht vor, sondern wird nur für interne Prozesse verwendet.

AV Bridge wiederum ist der Begriff für Geräte nach IEEE 802.1Q oder IEEE 802.11 (WLAN, hier nicht behandelt), die die Anforderungen des AVB Profils nach IEEE802.1BA-2011 erfüllen (vgl. IEEE 802.1BA 2011: S. 5).

Zur besseren Unterscheidung wird in dieser Arbeit der Begriff AV Bridge für eine AVB-fähige Bridge und Legacy Switch (auch: „normaler“ Switch, nicht AVB-fähiger Switch) für eine nicht AVB-fähige Bridge benutzt.

3.2 Synchronisation

Für den Übergang von kontinuierlichen analogen zu diskreten digitalen Audiosignalen wird ein Takt benötigt. Dieser muss dem Empfänger zur Verfügung stehen, wenn er die digitalen Daten wieder verlustfrei in ein analoges Signal wandeln soll (Görne 2008: S. 148ff). Für die asynchrone Übertragung reicht es aus, die Taktfrequenz, also die Abtastrate, zu kennen. Eine auf Festplatte liegende Audiodatei kann damit zu einem späteren Zeitpunkt zu einem analogen Audiosignal gewandelt werden. Wenn mehrere Empfänger hingegen das Signal gleichzeitig abspielen sollen,

oder der Empfänger die Daten in einem sehr kurzen Zeitfenster nach der Wandlung durch den Sender ausgeben, wenn das System also echtzeitfähig sein soll, muss allen beteiligten Geräten der selbe Takt zur Verfügung stehen (Görne 2008: S. 208ff).

Bisherige Systeme zur digitalen Audioübertragung wie MADI (AES10) verwenden hierfür eine Wordclock, die entweder parallel zum Signal in einem separaten Kabel verteilt wird, oder aus dem digitalen Datenstrom selbst regeneriert werden kann. Computernetzwerke wurden hingegen asynchron ausgelegt: Es gibt keine Garantie, wann genau ein Paket beim Empfänger eintrifft (vgl. Tanenbaum & Wetherall 2013). Das zusätzliche Verlegen einer Wordclock-Leitung wäre zwar möglich, würde aber den Vorteil einer Netzwerklösung aushebeln, insbesondere wenn Audio- und Videodaten parallel und mit gemischten Abtastraten übertragen werden sollen. Damit der Takt aus Netzwerkdaten regeneriert werden kann, ist es notwendig, dass jeder Knoten die gleiche Zeitinformation hat.

Hierfür kann das Precision Timestamp Protocol (IEEE 1588 2008) genutzt werden. Es nimmt an, dass auf jeder Instanz eine eigenständige Zeitreferenz (Clock) läuft, also eine Kombination aus einem Oszillator und einem Zähler.

Syntonisation

Selbst wenn die Oszillatoren zweier Knoten mit der nominell gleichen Frequenz laufen, gibt es fertigungs- und temperaturbedingt kleine Unterschiede. Das Precision Timestamp Protokoll sendet fortlaufend sogenannte Sync-Nachrichten vom Master an jeden Slave. Diese enthalten einen Zeitstempel des Masters (t_1) und werden beim Empfang mit einem Empfangszeitstempel versehen (t_2). Aus zwei Sync-Nachrichten kann der Slave nach der Formel

$$\Delta t = (t_3 - t_1) - (t_4 - t_2) \quad (3.1)$$

die Differenz zwischen den Oszillatoren (Drift) ermitteln. Für Systeme, die eine sehr genaue Zeitreferenz benötigen, kann der Oszillator an Hand des Drifts getrimmt werden. Dieser Vorgang wird als Syntonisation bezeichnet. Wird der Oszillator nicht syntonisiert, muss bei der folgenden Berechnung des Zeitstempels das Frequenzverhältnis eingerechnet werden (Weibel 2009).

Synchronisation

Obwohl die beiden Oszillatoren jetzt mit der hinreichend gleichen Frequenz laufen (oder dies per Berechnung simuliert werden kann), ist die Phasenlage noch unterschiedlich zueinander. Ebenfalls ist nicht bekannt, ob die Zähler den gleichen Stand aufweisen. Der Abgleich von Phasenlage und absoluter Zeit wird Synchronisation genannt und kann durch das Ermitteln der Abweichung (Offset) zwischen Master und Slave erreicht werden. Es ist hierfür notwendig zu ermitteln, wie groß die Paketlaufzeit zwischen den Instanzen ist. Dazu sendet der Slave eine Delay-Request-Nachricht mit dem Zeitstempel t_3 , die zum Zeitpunkt t_4 beim Master eintrifft. Der Zeitstempel t_4 wird dem Slave in einer Delay-Response-Nachricht zugesendet. Zusammen mit den beiden Zeitstempeln einer vorhergehenden Sync-Nachricht kann die Paketlaufzeit nun nach der folgenden Formel ermittelt werden (Weibel 2009: S. 3):

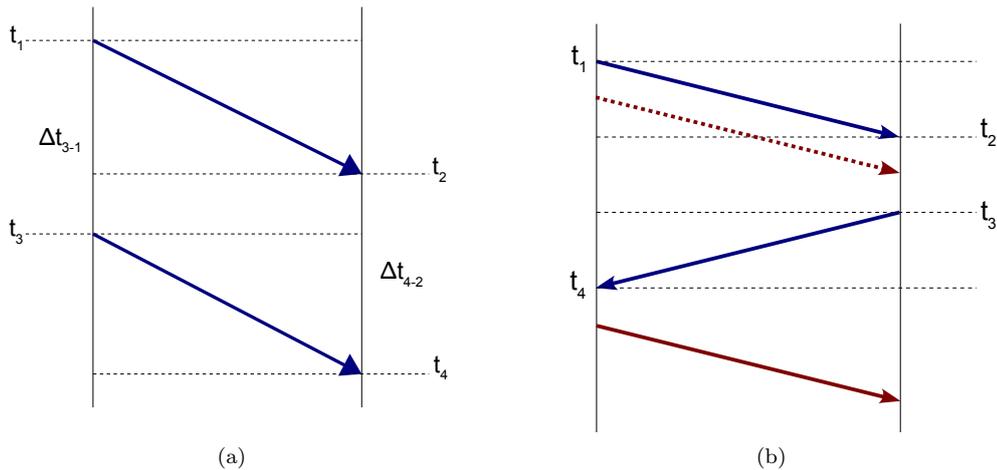


Abbildung 3.1: Ermitteln der Frequenz- und Phasenunterschiede zweier Oszillatoren über Zeitstempel (nach Weibel 2009)

$$\Delta t = \frac{(t_3 - t_1) + (t_4 - t_2)}{2} \quad (3.2)$$

Boundary Clock

Wenn es in einem Netzwerk viele Slave-Instanzen gibt, die sich alle auf einen Master synchronisieren, muss dieser und alle dazwischenliegenden Switches die ein- und ausgehenden Delay-Request- und Delay-Response-Nachrichten verarbeiten. Das erhöht die Auslastung im Netzwerk und kann dazu führen, dass die Paketlaufzeiten über mehrere Knoten nicht nur größer werden, sondern auch dynamisch schwanken. Dieser Netzwerkjitter kann nach Weibel 2005 bis zu 122 μ s betragen, was die Genauigkeit der Synchronisation verringert. Dieses Problem kann gelöst werden, indem die AV Bridge selbst als sogenannte Boundary Clock zur Instanz des PTP-Systems wird. Sie synchronisiert sich an einem Port zum Master oder Grandmaster und stellt diese Referenz an den anderen Ports zur Verfügung². Dadurch beeinflussen Paketlaufzeiten innerhalb einer AV Bridge nicht die Genauigkeit der Synchronisation und die Netzwerklast wird verringert und vorhersehbarer, weil auf jeder Verbindung nur eine Synchronisation stattfindet. (vgl. Weibel 2005)

Best Master Clock Algorithm

In den vorhergehenden Abschnitten ist davon die Rede, dass es mehrere Klassen von PTP-Instanzen gibt, Grandmaster bzw. Master und Slave. Der Grandmaster wird zu Beginn durch ein Verfahren ausgewählt, welches Best Master Clock Algorithm (BMCA) heißt. Jede Instanz sendet eine Announce-Nachricht, die unter anderem die Genauigkeitsklasse der Zeitreferenz enthält.

²Knoten, die nur einen Port haben (Endpunkte) werden in dieser Konstellation als Ordinary Clocks bezeichnet. Eine Boundary Clock synchronisiert sich also auf eine Ordinary Clock, wenn diese Grandmaster ist, oder auf eine Boundary Clock, die entweder selbst Grandmaster ist oder sich als Master ebenfalls auf eine andere Clock synchronisiert.

Basierend auf dieser und anderen Faktoren wird die am besten geeignete Instanz ausgewählt. Wenn ein Grandmaster ausfällt, oder eine PTP-Instanz hinzukommt, wird der Grandmaster neu ermittelt. (IEEE 1588 2008: S. 83ff)

Time Aware System

PTP nutzt Profile, um für verschiedene Anwendungsfälle Mechanismen und Grenzwerte zu verwalten. AVB beinhaltet den IEEE-Standard 802.1AS (IEEE 802.1AS 2011), der u.a. ein PTP-Profil beschreibt. Zusätzlich werden ergänzend zu IEEE 1588 (2008) Voraussetzungen an- und Begriffe eingeführt, um die Bedingungen für die Synchronisation des Systems beschreiben zu können. Hiernach wird das für AVB erforderliche Protokoll gPTP (generalized Precision Time Protocol) genannt. Jeder Teilnehmer in einem Netzwerk, der das Protokoll spricht, wird als Time Aware System bezeichnet. Jedes Time Aware System kann dabei einem von zwei Typen zugeordnet werden: der Time Aware Bridge (Boundary Clock) und der Time Aware Endstation (Ordinary Clock). Werden im Netz Knoten erkannt, die nicht als Bridge oder Endstation arbeiten, werden sie im weiteren Verlauf aus dem System ausgeschlossen. Es ist spezifiziert, dass die der Zeitreferenz zugrunde liegenden Oszillatoren mit einer Frequenz von mindestens 25 MHz und einer Präzision von ± 500 ppm arbeiten müssen (Teener & Garner 2008).

Die Details der Berechnungen in einem Time Aware System sowie eine detaillierte und übersichtliche Erklärung aller Mechanismen findet man in Foulkes (2012) ab Seite 116.

Media Clock

Aus der Spezifikation für den Oszillator folgt, dass das gPTP nicht unmittelbar mit der Abtastfrequenz und damit als Wordclock arbeiten kann. Auch das direkte Ableiten mit einem Frequenzteiler wäre nicht zweckmäßig, weil über ein einziges Netzwerk Audiosignale mit verschiedenen Abtastraten laufen müssen (bzw. auch im Verbund mit anderen Signalarten wie Video und MIDI). Es werden in einem AVB-Audionetzwerk deshalb Media Clocks als eine zweite Zeitebene definiert. Im Sender (Talker) werden AVB-Audiopaketen Zeitstempel hinzugefügt, die den Abspielzeitpunkt der enthaltenen Samples festlegen (Presentation Time). Der Empfänger (Listener) kann die extrahierten Zeitstempel dazu nutzen, den Takt z.B. für die D/A-Wandlung zu regenerieren (für die genaue Umrechnung zwischen gPTP-Zeit und Presentation Time siehe Abschnitt 3.6).

Wenn mehrere Sender, z.B. Mikrofone, synchronisiert werden müssen, damit beispielsweise eine DAW die Signale synchron aufnehmen oder eine Konsole sie synchron wiedergeben kann, muss es wie bisher einen Wordclock-Master geben. Dies kann realisiert werden, indem jeder Sender gleichzeitig als Listener arbeitet und seinen Taktgenerator mithilfe ankommender Audiopakete synchronisiert. Diese Pakete müssen keine Audiodaten enthalten, es reicht ein gültiger Zeitstempel zur Regenerierung der Media Clock (Mann et al. 2013: 26ff). Taktgeber kann in diesem Fall z.B. die DAW oder die Konsole sein. Wenn zusätzlich Geräte nach dem AES3- oder AES10-Standard eingebunden sind, sollte der Media Clock Master Ein- und Ausgänge für eine

Wordclock besitzen.³

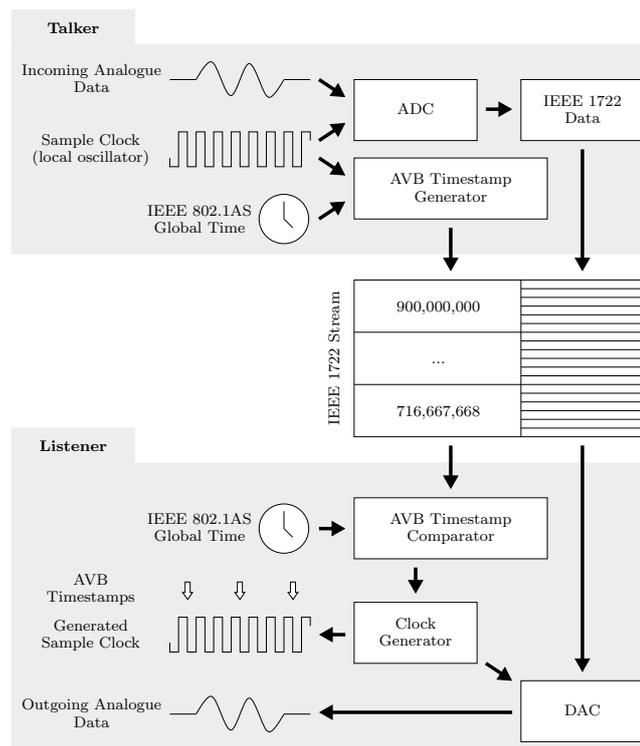


Abbildung 3.2: Prinzip der Media Clock (hier Sample Clock) Generation und Recovery (Kern et al. 2011: S. 3)

3.3 Priorisierung und Warteschlangen

Audio- und Medienetzwerke im Allgemeinen können ihre Stärken da ausspielen, wo eine Vielzahl an unterschiedlichen Audio-, Video- und Kontrolldaten gemeinsam auf einer Leitung transportiert werden können oder müssen. In den in Abschnitt 2.1.1 geschilderten Szenarien ist ersichtlich, dass einfache Aufnahmesituationen kaum vom Einsatz eines Audionetzwerks profitieren. Komplexe Studioinstallationen hingegen, in denen mehrere Produktionen gleichzeitig stattfinden, sind deutlich flexibler nutzbar bei einfacherer Verkabelung.

Computernetzwerke wurden allerdings nicht mit dem Gedanken entwickelt, Daten in Echtzeit zu übertragen. Im Gegenteil, es sollte ein Pendant zur Telefonleitung geschaffen werden, um asynchrone Operationen wie die Berechnung auf einem Rechner durchführen zu können (Kurose & Ross 2008: S. 84). Mit steigenden Datenraten haben aber auch zeitkritische Anwendungen wie

³Es ist hervorzuheben, dass der Grandmaster des Time Aware System unabhängig vom Media Clock Master ist, auch wenn beide auf einem Gerät laufen können. Während der Grandmaster über den BMCA automatisch ausgewählt wird, sollte der Benutzer weiterhin die Kontrolle über die Media Clock Master (es kann mehrere geben) übernehmen.

Streaming von Multimediainhalten und Voice over IP Kommunikation Einzug in Netzwerke gehalten. Es wurde deshalb notwendig, bei hoher Auslastung des Datenkanals die Pakete nicht nur Zwischenzuspeichern und in Warteschlangen einzuordnen, sondern bestimmte Netzwerkpakete innerhalb der Warteschlangen zu priorisieren, damit sie innerhalb eines bestimmten Zeitfensters beim Empfänger eintreffen. Auf Sicherungsschicht und Vermittlungsschicht wurden hierzu verschiedene Verfahren entwickelt.

Für IP basierte Netzwerke gibt es Differentiated Services (DiffServ) und Integrated Services (IntServ). Beim DiffServ-Verfahren, von der RFC 1998 vorgeschlagen, werden Pakete mit einer Klassifizierung versehen, die bei den Vermittlern (Switch) ausgewertet und zur Priorisierung eingesetzt werden (McCabe 2007: S. 338f). Es kommt unter anderem bei den Audionetzwerken Dante und Ravenna zum Einsatz (ALC NetworX GmbH 2013, Audinate Pty Ltd 2008).

AVB, welches auf der Sicherungsschicht arbeitet, setzt auf Mechanismen des IEEE-Standards 802.1Q auf. In der ursprünglichen Fassung von 1998 wurden hier zwei Mechanismen definiert, die Filterung von Netzwerkverkehr in Bridges, verbunden mit einer vom User zu setzenden Priorisierungsanforderung und die Unterteilung von einem physischen Netzwerk in virtuelle Untergruppen, sogenannten VLANs, ermöglichen (IEEE 802.1Q 2011: S. iv-v). Im Hinblick auf AVB wurden zwei Erweiterungen definiert, 802.1Qav und 802.1Qat, die in die aktuelle Fassung 802.1Q-2011 integriert worden sind.

802.1Qav benennt Regeln und Algorithmen zur Paketsortierung und Priorisierung im Hinblick auf die zeitkritische und zuverlässige Übertragung von Audio- und Videodaten, genannt „*Forwarding and queuing for time-sensitive streams*“ (FQTSS, vgl. IEEE 802.1Qav 2009: S. 2).

Hierfür wird zunächst zwischen zeitkritischen Streams⁴ und anderem Netzwerkverkehr unterschieden. Streams wiederum werden in die beiden Klassen A und B eingeteilt. In Klasse A wird eine Latenz von 2 ms zugesichert, in Klasse B 50 ms. Die Zusicherung gilt jeweils für die Übertragung über 7 Bridges. Der restliche Netzwerkverkehr wird als „Best Effort“ behandelt.

Der zentrale Mechanismus für das Versenden der Streams ist der Credit-based Shaper (CBS). Im Detail ist dieser Algorithmus im Anhang L von IEEE 802.1Qav (2009) beschrieben. Der Shaper sortiert Datenpakete derart, dass einem Stream zugehörige Pakete mit konstanter Datenrate versendet werden können. Verschiedene Streams werden ineinander verschachtelt. In die Lücken dieser Übertragung werden Best-Effort Pakete eingefügt. Das Anstauen von Datenpaketen und der dann notwendigerweise unmittelbare Versand (Burst) wird weitestgehend vermieden. Das führt zu einer mathematisch beweisbaren maximalen Übertragungszeit (Pannel 2010, Diemer et al. 2012) und verhindert den Verlust von zeitkritischen Paketen.

Um auch nicht zeitkritische Datenpakete zuverlässig zu übertragen, wird festgelegt, dass 75% der Bandbreite für Streams der Klassen A und B zur Verfügung steht. Damit verbleiben noch 25% für anderen Netzwerkverkehr. Die Werte können aber bei Bedarf angepasst werden (IEEE

⁴Stream (genauer: zeitkritischer Stream, time-sensitive Stream) ist in diesem Kontext definiert als „(...) *stream of traffic, transmitted from a single source station, destined for one or more destination stations, where the traffic is sensitive to timely delivery, and in particular, requires transmission latency to be bounded. Such streams include video or audio data streams, where there is a desire to limit the amount of buffering required in the receiving station.*“ (IEEE 802.1Qav 2009: S. 41)

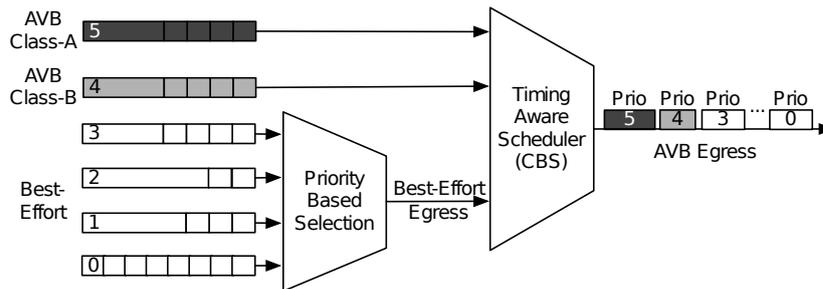


Abbildung 3.3: Prinzip des Credit-Based Shaper Algorithmus (Steinbach et al. 2012)

802.1Qav 2009: S. 42f). Simulationen haben gezeigt, dass mit dieser Architektur bis zu einer Auslastung des Netzwerks von 100% mit jeweils 50% zeitkritischen Streams und Best-Effort-Daten die Vorgaben von 2ms erfüllt werden können (Kim et al. 2008).

3.4 Bandbreitenreservierung und AVB Wolken

Der genannte Mechanismus würde allerdings dann nicht mehr funktionieren, wenn das Netzwerk oberhalb der maximalen Auslastung arbeitet. Dafür wurde mit dem Multiple Stream Registration Protocol (MSRP) im Standard 802.1Qat ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist, Bandbreite zwischen zwei Endpunkten zu reservieren, die nach erfolgreicher Reservierung exklusiv dem Stream zur Verfügung steht.

Um Bandbreite zu reservieren, sendet der Endpunkt (Talker) eine Bandbreitenanforderung, den Talker Advertise. Auf dem Weg zum empfangenen Endpunkt (Listener) ermittelt jede Bridge, ob genügend Bandbreite zur Verfügung steht. Ist das nicht der Fall, sendet sie eine Talker Failed-Nachricht. Andernfalls leitet sie die Nachricht weiter. Ist der Listener bereit zum Empfangen des Streams, sendet er nach Empfang der Advertise-Nachricht eine Listener Ready-Nachricht. Wenn die Listener Ready-Nachricht bei einer Bridge ankommt, reserviert sie die Bandbreite für das entsprechende Teilstück. Sobald die Nachricht beim Talker angelangt, ist die Bandbreite für den Stream auf der gesamten Strecke reserviert. Zusätzlich zur Reservierung dienen die Nachrichten auch zum Austausch folgender Informationen (IEEE 802.1Qat 2010, Mann et al. 2013: S. 28ff):

- eine eindeutige Kennziffer, die Stream ID
- eine eindeutige Multicast MAC Adresse
- die maximale Paketgröße
- eine VLAN ID (s.u.)
- die AVB Klasse A oder B

- die aufsummierte Latenz zwischen den Endpunkten
- die Senderate der Pakete ⁵

Grundsätzlich können die Talker Advertise-Nachrichten im gesamten Netzwerk empfangen werden, da eine AV Bridge die Nachricht auf allen Ports repliziert. In großen Netzwerken kann dies zu unnötig hohem Datenaufkommen führen. Im Vorfeld der Standardisierung von AVB wurde deshalb diskutiert, sogenanntes Talker Pruning zuzulassen (Pannel & Teener 2008: S. 14). Diese Option beschränkt Talker-Nachrichten auf die Ports einer Bridge, an denen die Ziel-MAC-Adresse des Streams zuvor per MMRP eingetragen worden ist. Während in der Mechanismus im Standard 802.1Qat als Optional gekennzeichnet ist (IEEE 802.1Qat 2010: S. 85), vermerkt der finale, übergreifende AVB-Standard: „Bridges shall not support Talker pruning.“ (IEEE 802.1BA 2011: S. 17) Außerdem wird darauf hingewiesen, dass die Implementierung von MMRP, welches Voraussetzung für ein funktionierendes „pruning“ wäre, optional ist (IEEE 802.1BA 2011: S. 19). Für die nachfolgende Generation von AVB ist der Mechanismus allerdings wieder im Gespräch (Mann et al. 2013: S. 59f, (Pannel 2013)).

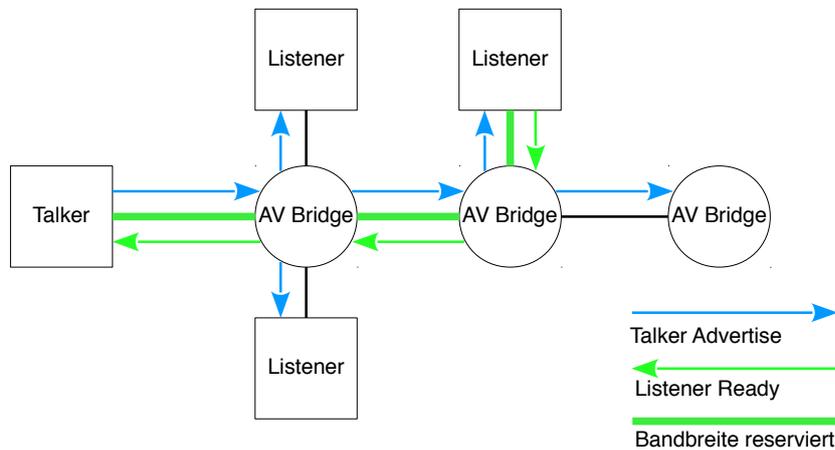


Abbildung 3.4: Reservierung von Bandbreite über MSRP

Um die Bandbreite zu garantieren, ist es erforderlich, dass alle beteiligten Switches das MSRP-Protokoll verstehen. Wenn eine Bridge registriert, dass an einem Port ein normaler Switch angeschlossen ist, sendet sie eine Talker Failed-Nachricht, welche eine entsprechende Fehlermeldung und die MAC-Adresse vom nicht AVB-fähigen Switch enthält (IEEE 802.1Qat 2010). Die Erkennung von Legacy Switches erfolgt über das gPTP-Protokoll. Wenn die Latenz deutlich höher ist als ein bestimmter Grenzwert (die maximal anzunehmende Leitungslatenz bei der maximal spezifizierten Leitungslänge, vgl. Olsen 2011), deklariert eine Bridge den entsprechenden Port als nicht AVB-tauglich (Gunther 2013).

Neben den Talker- und Listener- gibt es noch Domain-Nachrichten, die Endpunkte periodisch aussenden. Diese enthalten die Zuordnung von Stream-Klassen (A und B) zu Priority Code

⁵Diese liegt allerdings nicht in Klartext vor, sondern muss mithilfe der Klasse interpretiert werden.

Points (PCP, siehe auch Abschnitt 3.3) und die voreingestellte VID (siehe Abschnitt 3.5) für die jeweilige Klasse. Aus der Domain-Nachricht lassen sich zwei weitere Faktoren ableiten, die eine Reservierung fehlschlagen lassen können. Bleibt sie aus, kann angenommen werden, dass sich entweder kein AVB-fähiges Endgerät am Port befindet, oder dessen MRP-Nachrichten blockiert werden. Sind die Prioritätsklassen verschieden, ist eine Reservierung ebenfalls nicht möglich. Hierdurch werden die Grenzen (Domain Boundaries) aufgespannt, die die Knoten im Netzwerk in AVB Wolken oder Domänen segmentiert⁶. Alle Knoten, die an der Kommunikation eines Streams teilnehmen, müssen sich innerhalb dieser Domain befinden (IEEE 802.1BA 2011: S. 8ff).

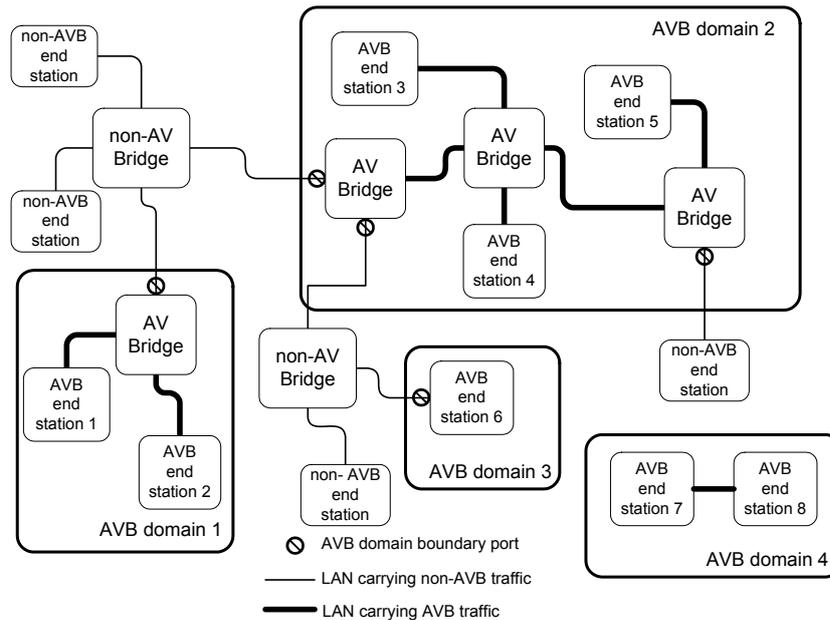


Abbildung 3.5: Das Aufspannen von AVB Wolken durch nicht AVB-fähige Geräte in einem Netzwerk (IEEE 802.1BA 2011: S. 22)

Es ist abschließend hervorzuheben, dass AVB zur Zeit die einzige Audionetzwerktechnologie ist, mit der Bandbreite wirklich reserviert werden kann. Vergleichbare Systeme wie Ravenna und Dante benötigen ein geplantes Netzwerk (Managed Network), um zu vermeiden, dass mehr Bandbreite genutzt wird, als zur Verfügung steht. Hierzu ist neben der Konfiguration jedes einzelnen Switches eine Berechnung des Bandbreitenbedarfs vorzunehmen, die mit jeder Änderung im Netzwerk (neue Geräte, geänderte Verschaltung) aktualisiert werden muss (ALC NetworX GmbH 2013, Audinate Pty Ltd 2008).

⁶Im Standard wird von Domänen (Domains) gesprochen, umgangssprachlich wird der Begriff Wolke (Cloud) verwendet, vgl. z.B. IEEE 802.1BA 2011 und Gunther 2013

3.5 Virtuelle Netzwerke

Wie bereits erwähnt erlaubt es der Standard 802.1Q, ein physisches Netzwerk in mehrere virtuelle Netzwerke, welche anhand von IDs identifiziert werden, zu unterteilen. Dieser Mechanismus ermöglicht es, Netzwerkverkehr voneinander zu separieren, ohne physische Verbindungen zu verändern oder zusätzliche Geräte einzufügen. Des Weiteren wird es möglich, dass für jedes virtuelle Netz die optimale Route zwischen zwei Endpunkten gefunden werden kann (Multiple Rapid Spanning Tree Algorithm, MRST, nicht in der aktuellen Fassung des Standards enthalten). Der Ausfall eines Knotens oder einer Verbindung hat somit nicht zwingend den Ausfall des gesamten Netzwerkverkehrs zwischen zwei Punkten zur Folge. Dabei stellt das Multiple VLAN Registration Protocol (MVRP) ein Verfahren zur Verfügung, womit virtuelle Netzwerke vom Endpunkt aus konfiguriert werden können, ohne jeden Switch konfigurieren zu müssen (MRST und MVRP wurden zuerst in 802.1ak vorgestellt und werden für 802.1Qav vorausgesetzt (IEEE:802.1ak 2007: S. 1, IEEE 802.1Qav 2009: S. 2).

Der AVB Standard legt fest, dass zeitkritische Streams mit einer speziellen VLAN ID gekennzeichnet sind (IEEE 802.1BA 2011: S. 18). Im Dokument „Endpoint Implementation Best Practices“ der AVnu Alliance wird herausgestellt, dass nicht die Standardeinstellung (VID 2) genutzt werden muss, sondern ein beliebiges, vorher ausgehandeltes VLAN genutzt werden kann. Aus diesem Grund müssen beteiligte Geräte das MVRP implementieren (Mann et al. 2013: S. 28). Schließlich ist zur Priorisierung eine Class of Service-Information notwendig. Diese wird nach IEEE 802.1Q 2011 im PCP-Feld (Priority Code Point) des 802.1Q-Headers untergebracht. Durch die Wiederverwendung dieses bereits bestehenden Felds ist es nicht notwendig, neue Headerformate zu spezifizieren.

3.6 Audio- und Videodaten

Mit dem Wissen um eine einheitliche Zeitreferenz und den Kenndaten für die zuverlässige Übertragung der zeitkritischen Daten können nun die eigentlichen Nutzdaten (Payload) versendet werden. Das Protokoll zum Verpacken der digitalen Mediendaten in Ethernet-Frames wird als Audio/Video-Transport Protocol (AVTP) im IEEE Standard 1722 spezifiziert (IEEE 1722 2011).

Da das AVTP für unterschiedliche Medien- und Kontrolldaten mit verschiedenen Anforderungen an zu übertragende Metainformationen funktionieren muss, können eine Reihe von Header-Bereichen eingefügt werden, die von oben nach unten ein Format immer genauer spezifizieren.

Allen Datentypen gemein ist dabei der sogenannte AVTPDU Common Header. Er enthält neben der Stream ID zur Identifizierung unter anderem ein Feld welches zwischen Kontroll- und Mediendaten unterscheidet (CD). Außerdem gibt es ein Subtype-Feld, welches das im Payload des Frames verwendete Protokoll anzeigt. Basierend auf der Unterscheidung zwischen Kontroll- und Mediendaten wird das 20 bit breite `type_specific_data` Feld interpretiert (IEEE 1722 2011: S. 8).

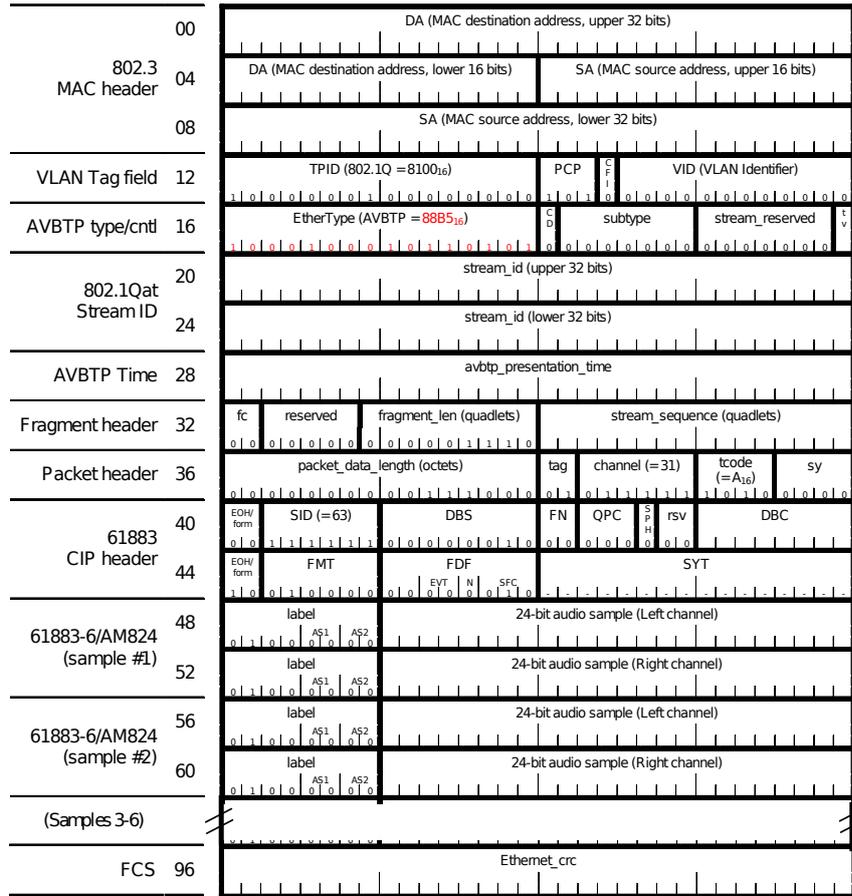


Abbildung 3.6: AVTP Audio Frame with 24bit, 6 Samples per Frame (Boatright 2009)

Im Falle von Mediendaten wird es Teil des Common Stream Data AVTPDU Headers. Dieser enthält die für den Kontext dieser Arbeit sehr wichtige Sequence ID, ein Zähler, der mit jedem versendeten Paket um eins erhöht wird. Hierdurch kann der Empfänger des Streams feststellen, ob Pakete in der Reihenfolge vertauscht ankommen, oder es zum Paketverlust kommt. Neben der eigentlichen Payload nebst Größenangabe und einem vom darunter liegenden Protokoll zu verwendenden Protocol Specific Header beziehen sich die restlichen Felder des Common Stream Header auf den Timestamp.

Neben dem eigentlichen Zeitstempel (AVTP Timestamp in der Einheit Nanosekunden) gibt es die beiden Felder Timestamp Valid (tv) und Timestamp Uncertain (tu). Letzteres sollte gesetzt werden, wenn der gPTP-Teil des Geräts meldet, dass ein neuer Master gewählt wurde, eine neue Zeitreferenz verwendet wird oder Fehler aufgetreten sind. Media Clock Restart (mr) wird gesetzt, wenn sich die Media Clock geändert hat (beispielsweise weil am Media Clock Master vom Wordclock-Eingang auf intern umgeschaltet worden ist). Timestamp Valid zeigt an, ob der Zeitstempel ausgewertet werden darf (siehe unten).

Die Presentation Time darf nicht als der Nanosekunden-Teil der gPTP-Zeit interpretiert

werden. Weil das 32 Bit große Feld nur etwa alle 4 Sekunden überläuft, ist es möglich, die niedrigsten zwei Bits des Sekunden-Teils einzuarbeiten (IEEE 1722 2011: S. 13). Die Formel hierzu lautet:

$$avtp_timestamp = (AS_{sec} * 10^9 + AS_{ns}) \bmod 2^{32} \quad (3.3)$$

Interessant am Konzept der Presentation Time ist, dass nicht die Empfänger entscheiden, wann ein Sample abgespielt wird, sondern bereits der Talker. Dieser schlägt auf seine aktuelle Referenzzeit die sogenannte Max Transit Time auf. Bei Klasse A Streams ist sie im Standard auf 2 ms festgelegt und entspricht damit der Zeit, die nach 802.1Qav als maximale Paketlaufzeit (mit etwas Puffer) über 7 Bridges angenommen werden kann (siehe Abschnitt 3.3). Dieser Wert kann jedoch zwischen Talker und Listener neu ausgehandelt werden (IEEE 1722 2011: S. 14). Dazu kann beispielsweise die aufsummierte Latenz verwendet werden, die dem Talker bei erfolgreicher Reservierung in der Listener Ready-Nachricht mitgeteilt wird.

Um sprichwörtlich das Rad nicht neu erfinden zu müssen, bauen die verwendeten Protokolle für die eigentlichen Mediendaten auf den etablierten Standards IEC 61883, IIDC und MMA auf. Während IEC 61883 und IIDC im Umfeld der 1394 Trading Association entstanden sind, bedeutet MMA „Musical Instrument Digital Interface Manufacturers Association“, die Organisation hinter dem MIDI Protokoll, die die Kapselung von MIDI-Daten in „MMA Payload Format Specification for AVTP“ beschreibt (IEEE 1722 2011: S. 29).

IIDC ist die Digital Camera Control Specification und kann deshalb in diesem Kontext vernachlässigt werden. IEC 61883 ist aus der 1394 Spezifikation „Audio and Music Data Transmission Protocol“ hervorgegangen, welches seine Grundlagen wiederum in Yamahas mLAN-Protokoll hat (Watkinson & Rumsey). Audio over Firewire (der von Apple initiierte Handelsname für 1394) hat einige Ähnlichkeiten mit den Übertragungseigenschaften von AVB. Bei beiden handelt es sich um Übertragungen in Datenblöcken, bei denen das Taktsignal aus Zeitstempeln regeneriert wird. Die Datenpakete werden außerdem mit einer Frequenz von 8 kHz, also ein Paket alle 125 μ s, versendet (bei AVB Streams der Klasse A und dem im Standard empfohlenem Sendeintervall).

IEC 61883 ist in 8 Teile untergliedert, die, abgesehen vom allgemeinen Teil 1, jeweils das Verpacken bestimmter Formate in Frames festlegt. Für Audionetzwerke ist vor allem der Teil 6, „*Audio and music data transmission protocol*“, relevant. Es beschreibt den Aufbau von Frames für den Transport von unkomprimierten, digitalen Audiodaten.

Viele Felder dieser CIP (Common Isochronous Packet) genannten Frames enthalten Informationen, die nur in Verbindung mit 1394 (über ein AVTP gateway) notwendig sind und in einem reinen AVB-Netzwerk auf einen vordefinierten Wert gesetzt werden. Aus diesem Grunde gab es kurz nach Beschluss der ersten Fassung des Standards bereits Vorschläge, ein schlankeres AVTP Audio Format zu etablieren, welches auf überschüssigen Ballast verzichtet (Jones & Butterworth 2011), bereits im Standard IEEE 1722.1-2013 erwähnt (IEEE 1722.1 2013: S. 112f) und in den Nachfolger 1722a einziehen wird (Silfvast 2013).

Einen guten Überblick über die CIP spezifischen Felder liefert Foulkes in seiner Dissertation (Foulkes 2012: S. 137ff). Hier wird nur auf wenige, zum Verständnis notwendige Aspekte eingegangen.

Das Format für die eigentlichen Audiodaten, ebenso wie die Abtastrate wird im Format Dependent Field (fdf) des CIP Headers angezeigt. Zum Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit unterstützen alle auf dem Markt befindlichen Geräte das Format AM824⁷. Der Name weist bereits auf die Zusammensetzung hin, 8 bit für ein Label und 24 bit für die Daten. Das Label informiert über die Wortbreite. Ist sie kleiner als 24 bit, wird das Datenfeld mit Nullen aufgefüllt. Die jeweils ersten Samples aller im Frame zu übertragenden Kanäle werden hintereinander angeordnet, dann folgt die Samples von Kanal zwei und so fort. Die Anzahl der Samples in einem Frame schließlich richtet sich nach dem Sendeintervall und der Abtastrate (IEEE 1722 2011):

$$N_{samples} = F_s * T_{transmission} \quad (3.4)$$

Es ist wichtig hervorzuheben, dass bei einem nach AM842 packetiertem Stream der Zeitstempel nicht immer die Abspielzeit für das erste Sample in einem Paket angibt. Vielmehr ist, je nach Abtastrate, ein Intervall festgelegt (SYT_INTERVAL), nach dem ein gültiger Zeitstempel dem jeweiligen Sample zugewiesen wird. Die Position der Samples in einem Paket, für welches die Presentation Time gültig ist, errechnet sich aus SYT_INTERVAL (N_{SYT}) und DBC (n_{DBC} , siehe unten) nach dieser Formel (IEEE 1722 2011: S. 24f):

$$i_{sample} = (N_{SYT} - n_{DBC} \bmod N_{SYT}) \bmod N_{SYT} \quad (3.5)$$

Für 48 kHz ist das SYT_INTERVAL auf 8 festgelegt, pro Sekunde müssen also 6000 Zeitstempel gesetzt werden. Gehört der Stream der Klasse A an, werden 8000 Pakete in der Sekunde versendet. Jedes Paket muss also 6 Samples transportieren. Hat das Data Block Continuity-Feld (DBC) den Wert 16, ergibt sich also $i_{sample} = (8 - 16 \bmod 8) \bmod 8 = 8 \bmod 8 = 0$, das erste Sample muss zur Presentation Time wiedergegeben werden. Das vorherige Paket hat nach der Formel den Index 6, der aber außerhalb des gültigen Bereichs (0 bis 5) liegt. Deshalb wird das Timestamp Valid-Feld auf 0 gesetzt und kein Zeitstempel übertragen.

IEEE 1722 spezifiziert ein weiteres Protokoll, das MAC Adress Aquisition Protocol (MAAP). Da ein Stream mehrere Empfänger haben kann, ist es nicht möglich, ein Paket direkt an die Adresse des Listeners zu senden. Deshalb fragt ein Talker über das MAAP im Netzwerk eine zufällig ausgewählte Multicast-Adresse aus einem reservierten Bereich an, die nach erfolgreicher Deklaration (Announce-Nachricht) als Empfangsadresse verwendet wird (IEEE 1722 2011: S. 31ff).

⁷24-bit * 4 audio pack wird von 1722-2011 ohnehin nicht unterstützt (IEEE 1722 2011: S. 25), somit verbleibt neben AM824 noch 32 bit floating point data. Der vierte mögliche Wert ist als „reserviert“ gekennzeichnet

3.7 Entdeckung, Konfiguration und Steuerung

Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits herausgestellt worden ist, bieten Audionetzwerke die Möglichkeit, nicht mehr einzelne Anschlüsse, sondern die eigentlichen Endpunkte wie Mikrofone, Aufnahmespuren oder Monitore zu adressieren. Gleichzeitig bietet sich die Gelegenheit, über ein standardisiertes Verfahren herstellerübergreifend einzelne Parameter wie Vorverstärkung, Pegel und Phantomspeisung anzusteuern. Auf der anderen Seite ist das eine große Herausforderung, da einzelne Verbindungen nicht mehr physisch erfahrbar sind, sondern nur noch virtuell „gesteckt“ werden.

Um den Herstellern hierfür ein geeignetes technisches Mittel an die Hand zu geben, wurde der Standard 1722.1 initiiert (IEEE 1722.1 2013). Dort werden Verfahren vorgestellt, Geräte im Netzwerk zu entdecken (Discovery), ihre Eigenschaften und Fähigkeiten zu ermitteln (Enumeration), sie untereinander zu verbinden (Connection Management) und schließlich zu konfigurieren und fernzusteuern (Control). Nach diesen Aufgaben lässt sich der Satz von resultierenden Mechanismen als AVDECC abkürzen.

Der Standard benennt jede an der Kommunikation teilnehmende Einheit als AVDECC Entity. Eine Entity kann eine oder mehrere Rollen der insgesamt vier Rollen Controller, Talker, Listener und Responder einnehmen. AVDECC Talker und AVDECC Listener folgen der Funktion von 802.1Qat (siehe Abschnitt 3.4), neu hinzu kommen also AVDECC Controller und AVDECC Responder (IEEE 1722.1 2013: S. 8ff). Ein Controller kann die Eigenschaften von anderen Entities abfragen, sowie deren Zustände (Verbindungen, Konfiguration) verändern. Ein Responder wird im Standard als Entity bezeichnet, *„welches weder AVDECC Controller, AVDECC Talker noch AVDECC Listener implementiert, aber trotzdem das AVDECC Protokoll benutzt“*⁸ Es ist denkbar, hiermit zum Beispiel ein Rotlicht anzusteuern, welches weder zeitkritische, kontinuierliche Daten sendet oder empfängt, noch andere Geräte kontrolliert.

AVDECC Entity Model (AEM)

AVDECC benutzt das AEM, um die Eigenschaften eines Geräts in eine hierarchische Baumstruktur zu überführen. Aus technischer Sicht ist es so spezifiziert, dass es in einer flachen Ebene vorliegt und somit protokollfreundlich maschinell zu verarbeiten ist.

Jede AVDECC Entity hat im Modell mindestens eine Konfiguration, die den Betriebsmodus des Gerätes beschreibt. Mehrere Konfigurationen sind zu erstellen, wenn beispielsweise die Anzahl der Kanäle von der Abtastrate abhängt (vgl. MADI) oder ein optischer Ausgang wahlweise ADAT- oder S/PDIF-Daten ausgeben kann. Innerhalb der Konfiguration werden die physikalischen Ein- und Ausgänge sowie ankommende und abgehende Streams beschrieben. Die Verknüpfung, Bearbeitung und Steuerung der Wege wird in einer oder mehreren Units festgelegt. Dabei spannt jede Unit eine sogenannte Clock Domain auf. (IEEE 1722.1 2013: S. 40f).

⁸ „An AVDECC Responder is an AVDECC Entity that does not implement the AVDECC Controller, AVDECC Talker, or AVDECC Listener role but still uses the AVDECC protocols“ (IEEE 1722.1 2013: S. 22).

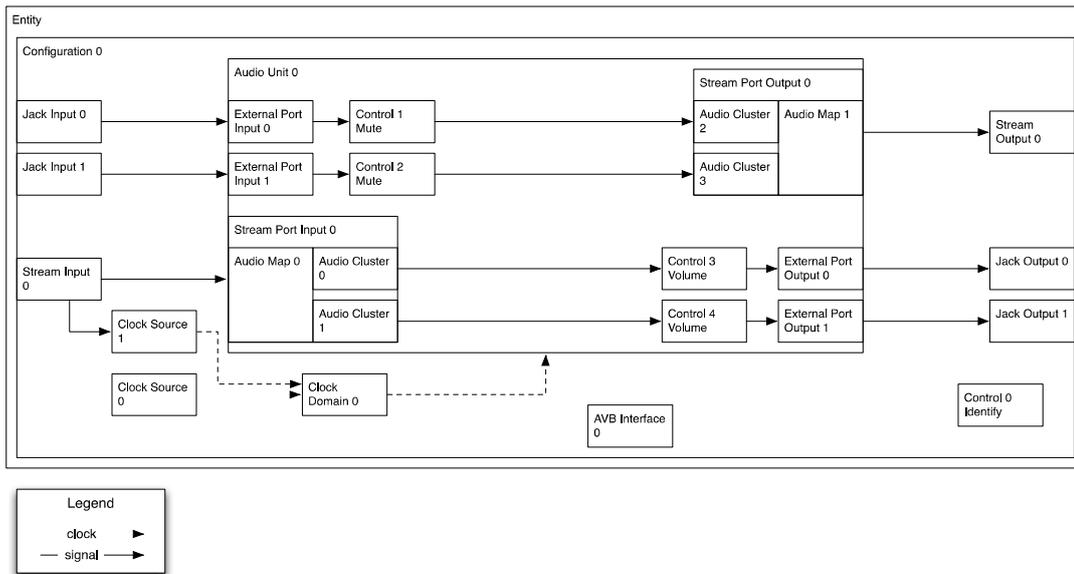


Abbildung 3.7: Beispiel für das AEM eines Audiogeräts mit zwei Ein- und Ausgängen (IEEE 1722.1 2013: S. 42)

AVDECC Discovery Protocol (ADP)

Über das Discovery Protocol kann ein AVDECC Controller alle AVDECC Entities im Netzwerk finden. Hierzu werden drei Nachrichtentypen spezifiziert. Die Entity Discover-Nachricht fordert alle Entities auf, mit einer Entity Available-Nachricht zu antworten, um sich im Netz zu erkennen zu geben. Außerdem verschickt eine Entity die Entity Available-Nachricht periodisch, um zu signalisieren, dass sie noch verfügbar ist. Andernfalls kann ein Controller nach der im Valid Time-Feld enthaltenen Zeit annehmen, dass das Gerät nicht mehr vorhanden ist. Proaktiv kann eine Entity dies außerdem über die dritte Nachricht, Entity Departing, signalisieren.

Die ADP Data Unit (ADPDU) enthält dabei Felder mit Informationen aus dem AEM und vom gPTP-Teil des Geräts, die zur Feststellung einer grundsätzlichen Kompatibilität nötig sind. Dazu gehören neben Anzahl und Typ von Quellen und Senken (Talker/Listener Stream Sources und Talker/Listener Capabilities) auch die Kennung des gPTP-Grandmasters und die gPTP-Domäne (IEEE 1722.1 2013: S. 25ff). Weil AVDECC-Nachrichten über die Grenzen der AVB-Wolke hinaus versendet und empfangen werden können, ist darüber die Zugehörigkeit zumindest auf Basis der Zeitreferenz erkennbar. Die SRP-Domäne kann jedoch erst später beim Reservieren festgestellt werden.

AVDECC Enumeration and Control Protocol (AEMP)

Nachdem ein Controller eine Entity über das ADP in seine Datenbank aufgenommen hat, kann er das Enumeration and Control Protocol nutzen, um detaillierte Informationen aus dem AEM anzufordern, Konfigurationen umzuschalten, sowie Kontrollelemente zu bedienen. Hierfür werden die beiden Nachrichtentypen AEM Command und AEM Response definiert. Darüber hinaus

benennt das Protokoll Befehlssequenzen, um größere Datenmengen zu transportieren, ohne deren genaue Struktur kennen zu müssen (Address Access), sowie herstellereigene Kommandos zu verteilen (Vendor Unique) (IEEE 1722.1 2013: S. 298ff)⁹. Es bleibt zu hoffen, dass Hersteller diese proprietären Befehle zurückhaltend einsetzen und statt dessen herstellerübergreifend Kontrollelemente definieren, die über den Control Descriptor im AEM angesprochen werden können.

AVDECC Connection Management Protocol (ACMP)

Dieses Protokoll definiert einen Mechanismus, mit dem ein Controller Verbindungen zwischen Quellen (Talker) und Senken (Listener) herstellen und trennen kann. Hierfür werden 14 Nachrichtentypen definiert (IEEE 1722.1 2013: Auflistung auf S. 270). Wie auch im AEMP gibt es zu jeder Kommando-Nachricht eine Antwort-Nachricht, die im Status-Feld signalisiert, ob ein Befehl erfolgreich war oder Fehler enthält.

Die zugehörige Data Unit (ACMPDU) enthält neben den Kennziffern der beteiligten Entities (Controller, Talker und Listener Entity ID) auch die für den Transport notwendige Empfängeradresse und VLAN ID (Stream Dest Mac, Stream Vlan ID) (IEEE 1722.1 2013: S. 268ff).

Offline-Konfiguration

Im Abschnitt Szenarien wurde bereits erwähnt, dass die Einführung von Audionetzwerken die Möglichkeit birgt, Geräte schon vor dem Aufbau am Produktionsort oder dem Eintreffen im Studio „offline“ zu konfigurieren. Der AVDECC Standard enthält im Anhang E den Link zu einem im Internet bereitgestellten XML-Schema, welches verwendet werden kann, um ein AEM Entity Model in einen XML-Datensatz zu überführen (IEEE 1722.1 2013: S. 352). Abgesehen von der Anwendung als Daten-Backend in einem Endgerät könnten Hersteller XML-Dateien ihrer Geräte zur Verfügung stellen, die von Controllern anschließend eingelesen und verwendet werden können. Eine praxistaugliche Methodik bietet der Standard jedoch nicht an, die genaue Umsetzung liegt bei den Herstellern.

3.8 Redundanz

AV Bridges sind per Definition im Standard (IEEE 802.1BA 2011: S. 18) eine Unterklasse der VLAN Bridge nach 802.1Q-2011. Damit unterstützen sie ebenfalls das Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP, Standardisierung nach IEEE:802.1D (2004), seit Revision 2011 ist die Beschreibung im Kapitel 13 von 802.1Q enthalten, vgl. IEEE 802.1Q 2011: S. V). Das Spanning Tree Protocol (STP¹⁰, Tanenbaum & Wetherall 2013: S. 340) hat in einem gebrückten Netzwerk zwei Aufgaben. Zum einen sorgt es dafür, auf einen zweiten Pfad umzuschalten, wenn der erste durch den Ausfall eines Knotens oder den Defekt eines Kabels nicht mehr funktionsfähig ist, zum zweiten verhindert es die Rückkopplungen (Loops), die sonst durch endlose Replikation

⁹Weitere Nachrichtentypen werden unter anderem für Kopierschutz und 1394-Befehle definiert. Diese sind im Kontext der vorliegenden Arbeit zu vernachlässigen.

¹⁰das hier relevante RSTP ist 2001 als Erweiterung vom ursprünglichen STP eingeführt worden.

von Paketen an den Ports entstehen würden, wenn im Netzwerk mehrere Pfade existieren.

Zunächst wird anhand eines festgelegten Werts für jede Bridge (Bridge Identifier) eine Bridge als Ausgangspunkt festgelegt (Root Bridge). Ausgehend von den direkt benachbarten Knoten wählt jede Bridge nun den Port, der die niedrigsten Kosten zur Root Bridge verursacht (Root Path Cost) und ernennt ihn zum Root Port. Der Kostenwert für einen Pfad zwischen zwei Knoten (Path Cost) ist anhand der Geschwindigkeit festgelegt (wenn nicht anders konfiguriert). Wenn zwei Ports einer Bridge die gleichen Pfadkosten zur Root Bridge haben, entscheidet die niedrigere Bridge ID. Ist der Baum vollständig entdeckt, ergibt sich für jeden Knoten anhand der auf dem Weg liegenden Root Ports genau ein möglicher Pfad zur Root Bridge. Da die Ports entlang alternativer Pfade blockiert werden, sind Rückkopplungen ausgeschlossen. Fällt ein Pfad aus, wird einer der alternativen Pfade (Backup Path) freigeschaltet. (Tanenbaum & Wetherall 2013: S. 337ff)

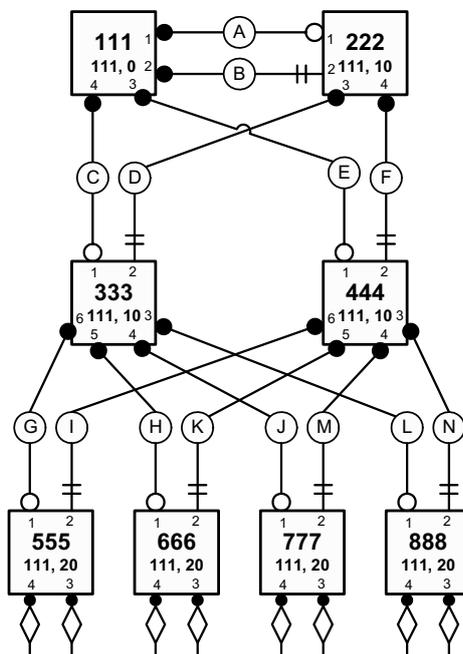


Abbildung 3.8: Beispiel eines Spanning Tree. Knoten sind mit Bride ID (große Zahl), Root Bridge Id und Pfadkosten (darunter, durch Komma getrennt) gekennzeichnet. Alternative (blockierte) Pfade sind doppelt durchgestrichen (IEEE 802.1Q 2011:S. 325)

Obwohl die Zeit, die das RSTP zur Neukonfiguration benötigt, im Vergleich zum älteren STP deutlich verkürzt worden ist, steht die neue Verbindung nicht unmittelbar bereit. Entsprechend werden die Streams für diese Zeit (mehrere Sekunden) unterbrochen, Audiodaten gehen unwiederbringlich verloren.

Weil verlustfreie Redundanzfunktionen nicht Teil des AVB-Standards sind, beginnen die Hersteller, eigene Redundanzlösungen in ihre Produkte einzubringen (z.B. Avid bei der S3L Produktreihe). Holzinger und Hildebrand kritisieren allerdings zurecht, dass die herstellereigenen

Lösungen die Interoperibilität schwächt (Holzinger & Hildebrand 2011: S. 4).

Nicht nur im Umfeld professioneller Mediensysteme ist es erstrebenswert, dass bei Ausfall oder Fehlern in der Verbindung ohne Datenverlust umgeschaltet werden kann. In sicherheitskritischen Anwendungen im Bereich der Avionik, Fahrzeugtechnik oder Automation von Fertigungsanlagen können solche Redundanzkonzepte sogar notwendig sein, um überhaupt eine Betriebserlaubnis zu erhalten.

Deshalb ist im März 2013 eine weitere 802.1-Arbeitsgruppe unter der Kennung 802.1CB gegründet worden, die zur Zeit an einem standardisierten Redundanzkonzept arbeitet. Dieser Standard wird voraussichtlich in den AVB-Nachfolger TSN (Time Sensitive Networking) einfließen (Pannel 2013).

Um ohne Datenverluste auf einen alternativen Pfad umzuschalten, gibt es nur die Möglichkeit, auf ihm bereits von Beginn an die gleichen Daten wie auf dem Hauptpfad zu senden, respektive einen zweiten Stream zu reservieren. Auch herstellerepezifische Lösungen nutzen deshalb voraussichtlich dieses Verfahren, müssen aber keine Rücksicht auf Mitbewerber nehmen. Für die Standardisierung hingegen müssen Details zur Ermittlung und Konfiguration der alternativen Pfade für eine Vielzahl von Anwendungen erörtert werden. Beispiele für mögliche Lösungen finden sich in Kleineberg et al. (2011).

4 Verwandte Arbeiten und Stand der Technik

4.1 Betriebssicherheit von AVB

Im Umfeld der Standardisierung von AVB wurde jedes Protokoll ausführlich geprüft. Dabei wurden Messungen und Tests entweder an ersten Implementierungen oder anhand von Simulationen durchgeführt. Für bestimmte Teilbereiche wurden formale Analysen (Maximalwertbetrachtungen) vorgenommen.

Die Zeitsynchronisation nach 802.1AS wurde von Teener kurz vor Fertigstellung des Standards an Hardware-Implementierungen getestet (Teener & Garner 2008), Geoffry Garner konnte während der Standardisierung anhand von Simulationen die Genauigkeit vom gPTP auf ± 500 ns über 7 Hops nachweisen (Garner 2009). Für den Einsatz in der Fahrzeugtechnik wurde der Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Genauigkeit der Zeitsynchronisation von Kern und anderen untersucht (Kern et al. 2011).

Da vor allem der Automationssektor und die Fahrzeugtechnik garantierte Paketlaufzeiten benötigen, damit AVB als Technologie erfolgreich eingeführt werden kann (vgl. z.B. Diemer et al. 2012), gibt es ebenfalls zahlreiche Arbeiten zum Mechanismus für die Priorisierung, spezifiziert in 802.1Qav. Eine erwähnenswerte Präsentation hat Don Pannel erstellt (Pannel 2010), die Formeln und Beispiele für die Berechnung der Paketlaufzeit über mehrere Stationen (Hops) enthält. Darin wird unter anderem die Grenze von 2 ms für Klasse A Streams über 7 Hops rechnerisch belegt. Pannels Berechnungen vernachlässigen aber die Existenz von konkurrierendem Netzwerkverkehr. Modelle und Simulationen zum Einfluss von mehreren, verschieden klassifizierten Streams und Best Effort-Verkehr auf Paketlaufzeiten werden unter anderem in Diemer et al. 2012, Queck 2012 und Reimann et al. 2013 vorgestellt. In Alderisi et al. 2012 wird der Priorisierungsmechanismus und die Stream-Reservierung von AVB mit einem anderen System für Realtime-Ethernet (Time Triggered Ethernet, TTE) durch Simulation verglichen. Alle Untersuchungen zeigen, dass die vom Standard versprochenen oberen Grenzwerte eingehalten werden können und es nicht zu Paketverlusten kommt.

Eine umfassende Simulationsumgebung auf der Basis von Omnet++ stellen Hyung-Taek Lim und andere in Lim et al. 2012a und Lim et al. 2012b vor. Die Simulationen beziehen die Protokolle in den Standards 802.1AS, 802.1Qat, 802.1Qav und 1722 mit ein. Weil die Gruppe Anforderungen der Fahrzeugtechnik untersucht (statische Konfiguration) wird allerdings der BMCA

in 802.1AS ausgespart und der Grandmaster manuell konfiguriert. Die Simulationen zeigen, dass die Grenzwerte (2 ms bei 7 Hops, auf 1 μ s synchron) eingehalten werden, Kontrolldaten (Best Effort) haben selbst bei hoher Last eine Latenz unter 1 ms. Zudem kann die Paketlaufzeit optimiert werden, indem die maximale Paketgröße verringert wird. Um Kontrolldaten im Zeitfenster von 100 μ s zu übertragen (Anforderung aus der Fahrzeugtechnik) müssen aber im Hinblick auf die zweite Generation des AVB-Standards weitere Konzepte entwickelt werden.

EADS Innovation Works hat ein Paper vorgelegt (Heidinger et al. 2012), in dem es um den Einsatz von AVB im sicherheitskritischen Bereich der Avionik geht. Im Hinblick auf den Aufwand der Zertifizierung wird untersucht, welchen Einfluss fehlerhaftes Verhalten des gPTP auf Latenz und Synchronizität hat. Es wird gezeigt, dass die Latenz auf etwa 5 ms (bei 12 Hops) und der Ausspielfehler auf etwa 4 ms ansteigt. Für den vorliegenden Kontext ist vor allem die Betrachtung der möglichen Fehlerfälle von Interesse.

Die professionelle Audiotechnik hingegen stand im Mittelpunkt der Untersuchung von Marcus Heyden (Heyden 2012). Neben einer sehr umfangreichen Grundlageneinführung stellt er vergleichend ältere und aktuelle Audionetzwerksysteme gegeneinander. Messungen nimmt er von Analogeingang zu Analogausgang vor, was insofern zulässig ist, als dass das gleiche Yamaha-Mischpult mit verschiedenen Einsteckkarten zum Einsatz kommt. Weil es zum Zeitpunkt der Entstehung noch keine MY-Karte für AVB gegeben hat, nutzt er ersatzweise XMOS Evaluierungsboards. Somit sind die Messergebnisse für AVB nicht mit den anderen Messungen vergleichbar.

Stefan Putzke hat sich in seiner Diplomarbeit mit der Betriebssicherheit von Audionetzwerken auseinandergesetzt (Putzke 2011). Neben Betrieb außerhalb der Spezifikation (Leitungslänge, Anzahl der Hops) wird der Einfluss von Fremdverkehr auf dem Netzwerk und elektromagnetischen Störungen längs der Leitung untersucht. Außerdem wird die Zeit von Inbetriebnahme bis zur Übertragung von Audiodaten gemessen. Putzke misst wie Heyden Ende zu Ende, verwendet aber für jedes Netzwerk andere A/D-D/A-Wandler. Leider unterliegt Putzke dem Missverständnis, dass Dante bereits AVB als unterliegenden Mechanismus einsetzen würde¹. Somit erschöpft sich der Bezug zu AVB trotz des Titels auf eine Zusammenfassung der technischen Grundlagen.

Für den Bereich des IPTVs wurde Alcatel-Lucent ein Patent zugesprochen, welches die Erkennung von normalen Switches in AVB Netzwerken ermöglicht, um eine Diagnose durch den Kundendienst zu ermöglichen. Hierzu werden eine Reihe von Wartungsnachrichten (Maintenance Messages) zwischen den beteiligten AVB Geräten ausgetauscht. Wird ein nicht AVB-fähiger Switch erkannt, wird dies in den Nachrichten vermerkt. Auf diese Weise kann die Kenntnis darüber im Netzwerk verbreitet werden (Badt et al. 2007).

Die AVnu Alliance, die als übergeordnete Organisation die herstellerübergreifende Kompatibilität von AVB Audio- und Videonetzen sicherstellt, hat in Zusammenarbeit mit dem Interoperability Laboratory (IOL) der University of New Hampshire Testumgebungen für End-

¹Auch wenn Audinate bereits 2011 einen möglichen Migrationspfad zu AVB vorschlägt, gibt es bis heute nur experimentelle Firmware, die z.B. von Yamaha auf Messen verwendet worden ist. Bei der in den Messungen verwendete MY16-AUD mit der Firmware 3.3.6 handelt es sich jedoch um eine „reguläre“ Version.

punkte und Bridges entwickelt. Werden die Tests fehlerfrei durchlaufen, erhalten die Geräte eine Zertifizierung. Diese soll sicherstellen, dass ein Gerät fehlerfrei mit jedem anderen zertifizierten Gerät zusammenarbeitet. Wie dem Autor auf eine Anfrage an das IOL hin mitgeteilt worden ist, sind Details zum Testprozess nur den Mitgliedern der AVnu Alliance zugänglich². Abgesehen davon gibt es bereits einige Geräte auf dem Markt, die nicht zertifiziert sind. Kleine Firmen werden aus verschiedenen Gründen (Kosten, Verpflichtung zur Zertifizierung aller Geräte) womöglich auch in Zukunft von einer Mitgliedschaft absehen³. Die Notwendigkeit von unabhängigen Testumgebungen und einer Überwachung im laufenden Betrieb bleibt also bestehen. Hinweise auf geprüfte Eigenschaften in den Tests des Zertifizierungsprozesses geben die von der AVnu Alliance veröffentlichten *AVB Software Interfaces and Endpoint Architecture Guidelines* (Mann et al. 2013).

4.2 Integrierte Überwachung in Systemen am Markt

Hersteller von Geräten, in denen AVB bereits integriert ist, haben verschiedene Mechanismen entwickelt, dem Nutzer zu signalisieren, dass das System funktionsfähig ist. DBX hat in der SC AVB Erweiterungskarte⁴ eine AVB QoS-Leuchte integriert. Das Datenblatt legt nahe, dass sowohl der Status der gPTP, als auch eine erfolgreiche Streamreservierung angezeigt wird. Genauere Betrachtungen erübrigen sich, weil die Produktion eingestellt worden ist. Biamp zeigt Fehlerzustände im Zusammenhang mit der Streamreservierung beim Tesira Server in der zugehörigen Software an. Ergänzend wird im AVB Referenzhandbuch vorgeschlagen, den MSRP Verkehr auf dem Switch zu beobachten.⁵ Echo Audio vertreibt zusammen mit seinem Netzwerkinterface Nic-1 die Controllersoftware „Streamware Controller“. Neben einem ausführlichen Log, welches Ereignisse zu PTP und MSRP protokolliert, befindet sich am unteren Rand des Fensters eine stilisierte LED, die leuchtet, wenn die Synchronisierung der Karte auf andere AVB-Geräte erfolgreich war. Zusätzlich wird die aktuelle PTP und Statistiken zu verbundenen Streams angezeigt.⁶ Der Hersteller bietet außerdem eine Workbench-Version seiner Software an. Diese soll in einer späteren Fassung Fehler simulieren und die Protokollimplementierungen anderer Geräte überprüfen können.

Differenzierte Werte sind ebenfalls im Dante Controller von Audinate zu finden. Es werden Paket-Latenzen und Paketverluste als Balkendiagramme dargestellt (Abbildung 4.1). Im Handbuch wird empfohlen, im Produktivsetup eine Langzeitmessung über mehrere Tage vorzunehmen, um mögliche Probleme zu identifizieren (Audinate Pty Ltd 2014: 56ff).

²Im Hinblick auf eine freie Veröffentlichung von Ergebnissen in dieser Arbeit wurde davon abgesehen, unter möglichen Geheimhaltungsverpflichtungen auf anderem Wege Einblick in die Daten zu erhalten.

³Dieses Verhalten hätte mit USB sogar ein prominentes Vorbild der Vergangenheit. Viele Geräte mit USB-Anschluss tragen nicht das Logo, welches die Zertifizierung anzeigt.

⁴<http://dbxpro.com/en-US/products/sc-avb-card>, zuletzt abgerufen am 1. Juli 2014

⁵http://c353616.r16.cf1.rackcdn.com/Biamp_AVB_Reference_Guide_Apr14.pdf, zuletzt abgerufen am 1. Juli 2014

⁶http://cdn.shopify.com/s/files/1/0153/2355/files/Streamware_for_Windows_Dec-3-2013.pdf?417, zuletzt abgerufen am 1. Juli 2014

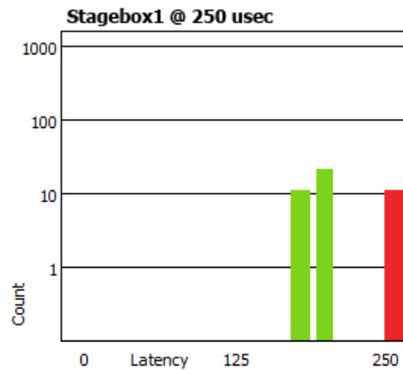


Abbildung 4.1: Latenz-Diagramm mit Paketverlust (Audinate Pty Ltd 2014: S. 56)

4.3 Netzwerkanalyse und Monitoring

Die Auswertung der im Umfeld von AVB veröffentlichten Arbeiten zeigt, dass vor allem Funktion und Zuverlässigkeit der Standards überprüft worden sind. Von den Herstellern implementierte Funktionen erkennen Fehlerzustände von Zeitsynchronisation und Streamreservierung, es wird dem nicht fachkundigen Benutzer aber keine Hilfestellung zur Lösung gegeben. Statistiken im Streamware Controller setzen zur Interpretation Detailwissen über die Standards voraus. Audinate macht es im „Dante Controller“ besser, ist aber (noch) nicht AVB fähig.

Da AVB auf etablierten Standards im Bereich von Datennetzwerken basiert, lohnt es sich, auch Veröffentlichungen aus diesem Bereich einzubeziehen. Vor allem ist es zur Fehlersuche und -analyse hilfreich, sich einen allgemeinen Überblick über die Netzwerktopologie zu verschaffen. Auch wenn die eingesetzten Geräte und deren Verbindung untereinander bekannt sind, kann die logische Topologie aus Netzwerksicht davon abweichen.

Einen Algorithmus für die automatische Erkennung der physischen Topologie von Netzwerken auf Layer-2-Ebene haben Breitbart et al. (2004) vorgestellt. Hierzu werden Adresstabellen (AFTs) aus den Switches ausgelesen und deren Informationen verknüpft. In Bejerano 2009 wird ein verbesserter Algorithmus vorgestellt, der auch funktioniert, wenn nicht alle Switches Informationen zur Verfügung stellen. Bejerano weist außerdem auf den IEEE Standard 802.1AB hin (IEEE 802.1AB 2009), dessen Mechanismen auch im AVB Standard verwendet werden.

Die vorgenannten Methoden basieren auf der Annahme, dass sich die Daten aus einem Switch von einem anderen Punkt im Netzwerk aus auslesen lassen. Hierfür wird das Simple Network Management Protocol (SNMP) verwendet, welches 1988 von der IETF unter RFC 1067 vorgestellt worden ist (Case et al. 1988, aktuelle Fassung Case et al. 2002). In Waldbusser 2000 benennt die IETF eine Management Information Base (MIB) für SNMP zur Überwachung von Netzwerken. Damit können unter anderem statistische Daten und Alarmsignale im Netzwerk übertragen werden. Allerdings setzen diese Methoden voraus, dass alle relevanten Knoten im Netz das SNMP implementiert haben.

Wenn Switches das Protokoll nicht anbieten, kann die Performance auch von Ende zu Ende

gemessen werden, um etwaige Schwachstellen einzukreisen. Ein Werkzeug welches Pakete ins Netz einspeist und durch Auslesen an anderer Stelle Durchsatz und Paketverluste ermittelt, wird mit NetBurst in Mehmood et al. 2011 vorgestellt. Die Messung über selbst erstellte Pakete (Active Monitoring) ermöglicht es allerdings nicht, Probleme von bestimmten Protokollen oder Anwendungen zu untersuchen. Eine Methode, die an zwei Endpunkten jeweils gesendete und empfangene Pakete zählt und durch Division Verluste ermittelt (Passive Packet Loss Measurement), wird in Friedl et al. 2009 vorgestellt.

Das Toolkit NetLogger bietet ein API für mit Zeitstempeln versehene Log Events, um hochperformante verteilte System zu überwachen. Gunter und Tierny heben im zugehörigen Paper (Gunter & Tierny 2003) die Bedeutung von zeitlich korrelierten Event Logs hervor, die Daten möglichst auf jeder Ebene des Systems sammeln.

Einen ganzheitlichen Ansatz haben Varga & Moldován (2007) erarbeitet. Dabei führt das System eigene Messungen durch und sammelt die Ergebnisse zusammen mit externen Daten, die über SNMP angefordert werden, in einer Datenbank. Bei einem Fehlerereignis kann auf Grundlage der gesammelten Daten eine Ursachenanalyse (Root Cause Analysis) durchgeführt werden, woraufhin das System Vorschläge zur Fehlerbehebung machen kann. Zielgruppe sind anbieterübergreifende Wide Area Networks (WANs).

4.4 Abgrenzung

Es wurde gezeigt, dass die Protokolle im Verlauf der Standardisierung und bei der Evaluierung für die jeweiligen Einsatzbereiche sowohl einzeln als auch im Zusammenspiel hinsichtlich Qualität und Robustheit sorgfältig überprüft worden sind. Insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie der Fahrzeugtechnik werden Systeme statisch vorkonfiguriert und in dieser Konfiguration beim Hersteller getestet.

In der professionellen Audiotechnik hingegen werden die eingesetzten Anlagen häufig umkonfiguriert. In gemischten Netzwerken besteht außerdem immer die Möglichkeit, dass nicht zertifizierte oder nicht AVB-fähige Geräte eingebunden werden. Die Hersteller haben deshalb bereits in verschiedenem Maße Monitoring Tools in ihre Geräte und die zugehörige Software integriert, die dem Benutzer Fehlerzustände anzeigt.

Da ein digitales Audionetzwerk jedoch die Möglichkeit bietet, Geräte verschiedener Hersteller beliebig zu mischen und dennoch von einem zentralen Punkt aus zu kontrollieren, greift dieser Ansatz zu kurz. Die einzige eigenständige AVB Controller Software am Markt ist die Freeware Unos Vision von UMAN, die aber eher als Nebenprodukt von Unos Core und Unos Creator anzusehen ist und in der AVB nur ein kleiner Teil der Funktionalität ist. Neben der Möglichkeit, Geräte im Netzwerk über AVDECC aufzulisten, sowie Routen abzufragen und zu setzen sind keine weiteren Überwachungsfunktionen integriert. Davon abgesehen existiert nach den Recherchen des Autors noch kein herstellerunabhängiges Monitoring- und Fehlermanagementwerkzeug für AVB Audionetzwerke.

Um für die mögliche Entwicklung eines solchen Tools auf Forschungsergebnisse zurückgreifen zu können, wurden in Abschnitt 4.3 relevante Arbeiten im Bereich des Netzwerkmanagements zusammengetragen. Viele Ansätze nutzen Protokolle in höheren Schichten des Netzwerkprotokollstacks ab Layer 3. Zwar wurde mit dem AVDECC-Protokoll eine Möglichkeit geschaffen, AVB komplett im Layer 2 zu betreiben, für die Überwachung und Fehlersuche müssen aus vorgenanntem Grund aber Layer-3-Lösungen in die Überlegung mit einbezogen werden. Auch eine statistische Auswertung, wie sie im Bereich von anbieterübergreifenden Netzen vorgeschlagen wird, kann hilfreich sein. Anders als dort geht es bei der Erfassung von Paketverlusten aber nicht darum den Regelbetrieb zu optimieren, sondern Fehlkonfigurationen und Bugs in der Software zu erkennen (Paketverluste sind in anderen Netzen nicht zwingend ein Fehler, sondern mitunter nur ein Indikator für die Performance. Bei AVB dürfen sie prinzipbedingt nicht vorkommen). Metriken über die Paketlaufzeit und die Stabilität der PTP können fachkundigen Nutzern und dem Support helfen, mögliche Schwachstellen im Vorfeld zu erkennen.

Vordergründige Aufgabe der Entwicklung soll es nicht sein, die AVB Standards an sich und einzelne Implementierungen in Geräten zu verifizieren. Zu diesem Zwecke werden Zertifizierungen durch die AVnu Alliance durchgeführt. Vielmehr muss ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden, der neben dem AVB Standard auch andere Protokolle wie SNMP einbezieht, um ein sich ständig änderndes Netzwerk auch laufend überwachen zu können. Die Wahrscheinlichkeit durch einen Bedienfehler oder Fehlkonfiguration die Betriebssicherheit zu gefährden, ist deutlich höher als Probleme aufgrund einer fehlenden Zertifizierung. Dem Benutzer sollen deshalb Hilfen an die Hand gegeben werden, wie er auftretende Probleme lösen kann (Ursachenforschung und Empfehlung).

Schließlich ist sich auch die Arbeitsgruppe von AVB der Notwendigkeit von Überwachungsmechanismen bewusst. Teener fordert in einem Meeting zur zweiten Generation von AVB (AVB Gen2, später umbenannt zu Time Sensitive Networking, TSN), dass Mechanismen zur Kontrolle und Überwachung sogar in den Endpunkten selbst integriert und damit stärker im Standard verankert werden sollten (Teener 2012).

5 Entwicklung einer AVB Testumgebung

Bevor ein System zur Überwachung von Audionetzwerken im laufenden Betrieb entwickelt werden kann, muss zunächst untersucht werden, welche Fehler unter Laborbedingungen provoziert und an welchen Symptomen diese erkannt werden können. Darüber hinaus muss überprüft werden, welche Freiheiten die Standards gestatten und wie diese von den Herstellern genutzt werden. Auch soll getestet werden, ob sich bei Geräten Parameter ändern lassen, die einen nicht standardkonformen Betrieb ermöglichen.

Der Autor hat dazu ein gemischtes Instrumentarium aus Geräten in Produktionsreife und aus dem OEM- bzw. Entwicklungsbereich zusammengestellt (Auflistung im Anhang unter A.1). Dabei bieten die Entwicklungsboards den Vorteil, dass die Firmware modifiziert werden kann, um Parameter während der Versuche zugänglich zu machen oder ein bestimmtes Verhalten zu simulieren. Die bislang unvollständige oder teilweise fehlerhafte Implementierung ist dabei stellenweise sogar nützlich, um Bugs in marktreifen Geräten zu antizipieren.

Die Versuche hatten dabei zunächst einen hohen explorativen Anteil, das heißt, es wurden zuerst verschiedene Szenarien der Inbetriebnahme und des Regelbetriebes durchgespielt. Wenn dort Unstimmigkeiten aufgetreten sind, wurde versucht, diese einzukreisen und daraus neue Betriebssituationen, diesmal fehlerbehaftet, zu entwickeln. Aus diesen explorativen Versuchen und anhand theoretischer Überlegungen wurden die in Abschnitt 5.1 aufgeführten Fehlerszenarien erarbeitet. Diese sind nach den Kriterien in Abschnitt 2.2.2 zunächst protokollübergreifend gegliedert. In der Diskussion der Ursachen wird dann auf einzelne Protokolle und deren Zusammenspiel eingegangen.

In Vorversuchen und den Überlegungen zu 5.3 wurde die Notwendigkeit deutlich, Fehler gezielt reproduzieren oder überhaupt generieren zu können. Im Vorfeld von 5.3 werden in Abschnitt 5.2 deshalb Verfahren und Tools vorgestellt, Fehler in ein AVB-Audionetzwerk injizieren zu können. Dafür wurden bestehende Programme und Firmwares erweitert und diese Modifikationen werden ebenfalls vorgestellt.

Der Abschnitt 5.3 ist nach Mechanismen beziehungsweise Protokollen gegliedert. In Versuchen werden Fehlerszenarien simuliert und dabei protokoll- oder mechanismusspezifische Parameter zunächst unter Laborbedingungen, also mit Zugang zu geräteinternen Ein- und Ausgängen, den Einsatz eines Oszilloskops oder den Zugriff auf eine Konsole (über die serielle Schnittstelle oder Telnet). Wenn eine Erkennung möglich ist, wird überlegt, wie man das Verfahren auf die praktische Anwendung in einem Testsystem, welches an einem zentralen Punkt am Netzwerk angebunden ist, übertragen kann. Ein Teil der dazu verwendeten Tools wurde vom Autor im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Diese werden kurz vorgestellt. Abschließend wird jeweils

anhand von exemplarischen Messungen untersucht, ob sich das Fehlerszenario auch ohne Labo-rapparat eindeutig erkennen lässt. Dabei erheben die Messungen nicht den Anspruch, für sich quantitativ belastbar zu sein. Es geht vor allem um eine qualitative Aussage, ob die Erkennung überhaupt möglich ist, die aus dem Vergleich vom normalen zum fehlerhaften Zustand abgeleitet werden kann. Detaillierte Messungen, aus denen Algorithmen für ein Testsystem abgeleitet werden können, müssen ggf. im Zuge der Implementierung nachgeholt werden.

5.1 Fehlerszenarien und Ursachen

Abgeleitet aus den in Abschnitt 2.2.2 aufgestellten Kriterien zur Betriebssicherheit sowie eigener Vorversuche im Rahmen dieser Arbeit kann im Folgenden untersucht werden, welche Szenarien den Betrieb eines AVB-Netzwerks beeinflussen und welche Ursachen vorliegen können.

5.1.1 Inbetriebnahme

AVB ist ein Satz von robusten Protokollen, die sich jeweils selbst und gegenseitig absichern. Nur wenn alle Voraussetzungen für eine fehlerfreie Übertragung gewährleistet sind, wird ein Stream reserviert und den Endpunkten signalisiert, dass die Reservierung erfolgreich war. Im Umkehrschluss bedeutet diese Stringenz, dass schon kleine Fehler bei der Konfiguration oder der Verkabelung dazu führen, dass das System nicht in Betriebsbereitschaft versetzt werden kann. Es liegt bei den Herstellern von Geräten und Software, Lösungen zu finden, um den Nutzer bei der Inbetriebnahme und auch bei der Fehlersuche zu unterstützen.

Leider verhalten sich aktuelle Implementierungen diesbezüglich sehr unterschiedlich. Die in Mac OS X 10.9 enthaltene Steuerung von AVB (Fenster Netzwerkgeräte im Audio-MIDI-Setup) ist sehr restriktiv. Geräte werden nicht über die Grenze einer AVB-Wolke hinaus erkannt, obwohl dies mit AVDECC grundsätzlich möglich wäre. Eine Diagnose diesbezüglich ist nicht vorgesehen, wird versehentlich ein normaler Switch zwischengeschaltet, oder verhindert eine Konfiguration die Zugehörigkeit zur AVB-Wolke, werden Geräte nicht im Fenster angezeigt oder verschwinden ohne Rückmeldung. UNOS Vision hingegen zeigt auch übergreifend Geräte im Netzwerk an, gibt aber keinen Hinweis darauf, ob die Konnektivität zwischen zwei Geräten überhaupt möglich ist. Weil Fehlermeldungen diesbezüglich auf der Ebene des MSRP (siehe Abschnitt 3.4) ablaufen, kann die Software als reine Implementierung des AVDECC Stacks nicht weiterhelfen. Eine Kompromisslösung bietet der Streamware Controller von Echo Audio. Zunächst werden alle Geräte per AVDECC erkannt und ausgelesen, beim Herstellen der Verbindung mit den Geräten werden fehlgeschlagene Reservierungen dann als „Connection Failed“ angezeigt.

Ein AVB-fähiger Macintosh gibt sich nicht von sich aus im Netzwerk als AVB-fähiges Gerät zu erkennen; Echos Nic-1 wird zwar als AVDECC-Endpunkt erkannt, stellt aber seine Streams nicht über dieses Protokoll zur Verfügung. Folglich ist es momentan weder möglich, zwei Computer mit den genannten Boardmitteln zu verknüpfen, noch eine Drittanbieter-Software zur herstellerübergreifenden Steuerung einzusetzen.

Die Bandbreite an verschiedenen Mechanismen und Workflows, die Hersteller aktuell implementieren, zeigt, dass die Branche bei der Benutzerfreundlichkeit noch nach dem optimalen Weg sucht. Die Heterogenität der Lösungen bedeutet gleichzeitig, dass die Gefahr von menschlichem Versagen zunimmt. Verhält sich jedes Gerät anders, können Rückmeldungen vom Benutzer leicht fehlinterpretiert werden. Ausbleibende Rückmeldungen erschweren oder verhindern die Fehlersuche und gefährden damit die Betriebssicherheit.

Auf technischer Ebene kann ein AVDECC-Controller als einziger Knoten eines AVB Audionetzwerkes außerhalb einer AVB-Wolke sitzen, bzw. übergreifend mehrere AVB-Wolken kontrollieren. Wenn ein AVDECC-Controller über normale Switches angebunden wird (oder über einen WLAN-Accesspoint), ist sicherzustellen, dass Multicast-Nachrichten bis zur AVB-Wolke weitergeleitet werden. Andernfalls werden Kontrolldaten blockiert und können von den zu steuernden Knoten nicht empfangen werden.

Fehlerszenarien bei der Inbetriebnahme beziehen sich also vor allem auf nicht erkannte Geräte, Fehler beim Auslesen von deren Eigenschaften und Konfiguration sowie das Fehlschlagen von Streamreservierungen. Ursache können defekte Kabel sein, wahrscheinlicher sind aber Fehler beim Aufbau und Fehlkonfigurationen.

Ein typischer Fehler beim Aufbau wäre das versehentliche Zwischenschalten eines „normalen“, nicht AVB-fähigen Switches, der durch angrenzende AV Bridges oder Endpunkte nicht detektiert worden ist. Die Detektion wiederum kann an einem falsch konfigurierten oder im Werkszustand zu hohen NeighborDelayThreshold scheitern. Ein weiteres Beispiel für Fehlkonfiguration sind Switches zwischen AVB-Wolke und AVDECC-Controller, bei denen die Übertragung von Multicast-Nachrichten deaktiviert ist, was zur Blockierung von AVDECC-Nachrichten führt.

Schließlich, auch als Resultat von oben genanntem, steht der „frustrierte Nutzer“ einer erfolgreichen Inbetriebnahme im Wege. Da viele Protokolle ineinandergreifen müssen, Fehlermeldungen aber nur auf Protokollebene spezifiziert sind, liegt es bei den Herstellern, Meldungen zu verknüpfen und entsprechend aufbereitet darzustellen. In Zukunft kann mit der Zunahme von zertifizierten Geräten, einheitlichen Lösungsansätzen der Hersteller (Best Practice) und Schulungen im Bereich von Audionetzwerken das Fehlerszenario des ratlosen Benutzers eliminiert werden. Trotzdem ist es im Moment noch notwendig, es in den Katalog aufzunehmen und dem Nutzer Diagnose-Tools an die Hand zu geben, um ihm die Fehlersuche zu erleichtern.

5.1.2 Zuverlässige Übertragung

Ist ein Stream reserviert, sichern Priorisierungsmechanismen im AVB Standard zu, dass Pakete im Netzwerk mit einer deterministisch bestimmbaren maximalen Laufzeit beim Empfänger ankommen. Daneben ist es laut Abschnitt 2.2.2 notwendig, dass alle teilnehmenden Knoten auf eine gemeinsame Zeitreferenz zurückgreifen, damit die Audiolatenz konstant und Laufzeitfehler zwischen Kanälen und Streams minimal bleiben. Vorherige Arbeiten haben gezeigt, dass AVB dies mit Hilfe der Standards 802.1Qat, 802.1Qav und 802.1AS leisten kann. Des Weiteren werden diese Punkte von der AVnu Alliance für Endpunkte und Bridges bei der Zertifizierung über-

prüft, um herstellerübergreifende Interoperabilität zuzusichern. Dennoch können durch defekte Geräte und Kabel, fehlerhafte Software und nicht zuletzt menschliches Versagen (s.o.) einzelne Mechanismen auch im Betrieb außer Kraft gesetzt werden.

Vor allem im Umfeld der Musikproduktion sind Dropouts auf jeden Fall zu vermeiden, können aber an mehreren Stellen im System auftreten. Ein defektes Kabel oder ein starkes elektromagnetisches Störfeld kann ein Bit-Kippen bewirken. Dieses wird in der Sicherungsschicht anhand der Checksumme (FCS, siehe Tanenbaum & Wetherall (2013)) erkannt und das Paket daraufhin verworfen (Packetloss). Weil kein Mechanismus zum wiederholten Senden vorgesehen ist, „fehlen“ in der Folge mehrere Samples.

Auch ein nach dem Abspielzeitpunkt (Presentation Time) beim Empfänger angekommenes Paket muss verworfen werden. Ursache kann in diesem Fall eine fehlerhafte Zeitreferenz (Paket hat den falschen Zeitstempel, Empfänger hat die falsche Zeitreferenz) oder ein zu langer Übertragungsweg sein.

Ebenfalls werden durch eine fehlerhafte Zeitreferenz Latenz- und Interkanal-Laufzeitfehler verursacht. Grund für Fehler in der netzwerkweiten Synchronisation können außergewöhnlich lange oder unregelmäßige Paketlaufzeiten sein, da dann die Berechnung von Phasenversatz und Frequenzdifferenz durch Mechanismen des gPTP nicht mehr funktionieren. Auch durch die Wahl eines neuen Grandmasters (wenn der vorherige beispielsweise durch Abschalten des Geräts nicht mehr verfügbar ist) kann es zu Inkonsistenzen in der gPTP-Zeit kommen. Zwar gleicht im Regelfall eine PLL sprunghafte Änderungen der Zeitreferenz aus, während der Einschwingphase ist die Präzision dennoch geringer.

In beiden oben genannten Fällen wurden lange oder unregelmäßige Paketlaufzeiten als mögliche Ursache ausgemacht. Für diese kann entweder ein nicht erkannter „normaler“ Switch im Übertragungsweg verantwortlich sein, oder ein sogenannter Babbling Idiot. Im Glossar eines Lehr- und Handbuchs über verteilte Systeme wird dieser definiert als *„component of a distributed computer system that sends messages outside the specified time interval“* (Kopetz 2011: S. 345). Zwar ist Bandbreitenreservierung und ein Warteschlangensystem essentieller Bestandteil von AVB, diese regeln aber nur den ausgehenden Netzwerkverkehr an einem Port (Egress Port), um Pakete von reservierten Streams sowie den übrigen Best-Effort-Traffic geordnet und berechenbar zum nächsten Punkt im Netzwerk weiterzuleiten. Markus Jochim schlägt deshalb als Lösung für das Babbling Idiot Problem vor, in der nachfolgenden Generation von AVB auch den eingehenden Datenverkehr zu überwachen und im Zweifel zu begrenzen (Jochim 2013). Bis dahin muss ein Babbling Idiot vom Testsystem erkannt werden.

Obwohl die Bandbreitenreservierung nur für die beiden Streamklassen A und B anwendbar ist, konnte in Lim et al. 2012b gezeigt werden, dass auch Kontrolldaten bei hoher Netzauslastung innerhalb von 1 ms übertragen werden. Hierzu wurden den Kontrolldaten in der Simulation die nächste Prioritätsklasse unterhalb der AVB-Streams zugewiesen. Dies setzt allerdings voraus, dass auch AVDECC-Netzwerkpakete mit einem VLAN-Header nach 802.1Q versehen sind. Der Standard IEEE 1722.1 2013 macht diesbezüglich keine Vorschriften und eine Paketauswertung der vorhandenen Geräte zeigt, dass AVDECC-Pakete bisher ohne VLAN-Header und somit oh-

ne Priorisierung versendet werden. In den oben beschriebenen Szenarien sind die Netzwerke jeweils quasi dediziert ausgelegt, es wird also davon ausgegangen, dass für die Verwaltung innerhalb des Studios ein eigenes Netzwerk existiert. Dennoch verspricht AVB die problemlose Zusammenlegung von Audio- und Datennetzwerken. Deshalb ist davon auszugehen, dass zumindest die Anbindung der DAWs untereinander und an ein zentrales Speichersystem (NAS) über das gleiche Netzwerk erfolgen kann. Wenn große Datenmengen, beispielsweise während eines Backups, das Netzwerk auslasten, ist es daher zur Zeit nicht selbstverständlich, dass Kontroll-daten zuverlässig übertragen werden.

5.1.3 Fehlerbehandlung

Zwei Faktoren, die durch keine Zertifizierung beseitigt werden können, sind menschliches Versagen und Naturgewalten. Stromausfällen kann man mit unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USVs) abfangen, die gleichzeitig die Netzspannung glätten. In einer Produktionsumgebung, die fast von Ende zu Ende auf IT-Technologie setzt, nimmt die Notwendigkeit eine USV einzusetzen ohnehin zu. Gegen versehentlich ausgeschaltete Geräte und herausgezogene Stecker ist die Technik allerdings machtlos. Durch die oben beschriebene Forderung die Kosten gering zu halten steigt aber die Gefahr, dass das Personal überlastet ist, womit auch dieses Problem eher zunimmt. Umso wichtiger ist es daher, dass die Wiederherstellungszeit (Recovery Time) nach fremdinduzierten Fehlern möglichst kurz ist.

Im Falle von AVB trifft das auf alle beteiligten Knoten sowie auf alle Protokolle zu. Die Aufgabe jedes Geräts ist es, möglichst schnell nach dem Herstellen der Stromzufuhr einsatzbereit zu sein. Dies betrifft vor allem Geräte, bei denen traditionell ein schnelles Hochfahren erwartet wird. Es sollte ebenfalls selbstverständlich, dass die plötzliche Unterbrechung der Stromzufuhr nicht zu dauerhaften Störungen führt.

Im AVB-Umfeld können die eingesetzten Protokolle den Ausfall und das Einbinden einzelner Knoten behandeln. Das bedeutet für unbeteiligte Streams, dass sie theoretisch ohne Störungen fortgesetzt werden können, wenn das gPTP einen neuen Grandmaster wählt (siehe Abschnitt 5.1.2). Fällt ein an einem Stream beteiligter Knoten aus, führt dies jedoch bis zur Spezifikation von Redundanzkonzepten (siehe Abschnitt 3.8) zu einem Abriss des Datenstroms. Den Herstellern wird überlassen, was nach Wiederherstellung des ausgefallenen Knotens passiert. In einem digitalen oder analogen System in Punkt-zu-Punkt Topologie erwartet der Benutzer, dass mit dem erneuten Einstecken des Kabels auch das Signal wiederhergestellt ist. Deshalb könnte ein Ausbleiben dieses Verhaltens vom Nutzer als Fehler gewertet werden. Auf der anderen Seite erwartet kein Tonschaffender, dass nach dem Neustart der abgestürzten DAW die Wiedergabe automatisch fortgesetzt wird. Gravierender ist das Ausbleiben der erneuten Reservierung bei Talk-/Talkback-Mikrofonen und Telefoneinrichtungen. Da nach Drücken der Talk-Taste unmittelbare Bereitschaft erwartet wird, muss die Streamreservierung im Vorfeld ausgehandelt und gehalten werden. Wird die Reservierung nicht wiederhergestellt, nachdem beispielsweise eine nicht bemerkte Stromunterbrechung einen Neustart eines Gerätes ausgelöst hat, entspricht dies einer Fehlfunktion, weil die Betriebsbereitschaft in diesem Falle nicht gewährleistet ist. Allen

Szenarien gemein ist, dass sich ein wiederhergestellter Knoten im System nach dem Hochfahren automatisch in Bereitschaft bringen muss. Nur so kann ein beteiligter Endpunkt oder eine Controller Software das jeweils gewünschte Verhalten abbilden.

5.2 Fehlerinjektion

Die Verifizierung der im Folgenden entwickelten und genannten Tools muss exemplarisch mit den in Abschnitt 5.1 herausgearbeiteten Situationen erfolgen. Diese Szenarien lassen sich reproduzieren, indem explizit Fehler ins System injiziert werden. Das erfordert die Entwicklung weiterer Tools bzw. die Modifikation bestehender Firmware.

Legacy Ethernet Switch im Signalweg (unerkannt)

Für die Laboruntersuchungen liegt die Lösung auf der Hand, tatsächlich einen Legacy Switch zwischenzuschalten. Die Erkennung kann durch ein Erhöhen des NeighborDelayThreshold in den Einstellungen der beteiligten AVB-Bridges ausgehebelt werden.

Der Switch bewirkt ohne zusätzliche Last voraussichtlich eine Erhöhung der Paketlaufzeit auf dieser Strecke. Je nach Modell bleibt diese aber relativ konstant. Um schwankende Laufzeiten zu simulieren, muss deshalb Fremdverkehr durch den Switch geleitet werden. Unter Unix bietet sich das Tool PackETH¹ an, welches auch von Christoph Kuhr für die Verifikation der Entwicklung eingesetzt worden ist (Kuhr 2012). Bei der Simulation hoher Last hat jedoch die Leistung des Rechners, auf dem PackETH ausgeführt wird, erheblichen Einfluss auf die Senderate. Stößt das System an diese Grenze kann alternativ das im Linux-Kernel enthaltene pktgen² eingesetzt werden. Die Bedienung ist im Vergleich zur graphischen Benutzeroberfläche von PackETH deutlich komplizierter, dafür können die Parameter aber sehr fein eingestellt werden.

Ausfall oder Wechsel des gPTP Grandmasters

Der Ausfall des gPTP Grandmasters lässt sich am einfachsten realisieren, indem ein kontrollierbares Testsystem zum Grandmaster gewählt wird. Hierzu müssen die Priority-Werte so eingestellt werden, dass sie unterhalb der anderen sich bewerbenden gPTP-Knoten liegen. Laut IEEE 802.1AS (2011: S. 33) sind Werte unterhalb von 246 nur manuell zu konfigurieren, mit dem Wert 0 wird ein Knoten mit großer Sicherheit zum Grandmaster gewählt. Für die folgenden Versuche wurde der gPTP Daemon aus dem OpenAVB-Repository genutzt, der sich über das Kommandozeilenargument `-R n` mit einem benutzerdefinierten Priority1-Wert `n` starten lässt.

Ausfall und Neustart einzelner Knoten (Stromausfall)

Die offensichtliche Lösung, Knoten stromlos zu setzen oder das Netzkabel auszustecken ist tatsächlich ein guter Ansatz für die Laborversuche. Es kann jedoch nützlich sein, gezielt Talker oder Listener in einem Testsystem (rudimentär) zu implementieren und die beteiligten

¹<http://packeth.sourceforge.net>

²<http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/pktgen>

Programme per Software ein- und auszuschalten. Auf diese Weise kann genauer untersucht werden, welchen Einfluss die Reihenfolge hat, in der einzelne Dienste starten.

Paketverlust und fehlerhafte Pakete

Der Verlust von vollständigen Paketen auf der Übertragungsstrecke wird durch Bandbreitenreservierung und FQTSS wirkungsvoll verhindert, wie mehrfach nachgewiesen worden ist (siehe Abschnitt 4.1). Durch ein defektes Kabel, Leitungslängen weit außerhalb der Spezifikation oder sehr hohe elektromagnetische Strahlung können jedoch einzelne Bits verfälscht werden (Bit-Kippen), so dass die Überprüfung der Prüfsumme der Pakete (FCS) beim Empfänger fehlschlägt und das Paket verworfen wird. Außerdem kann ein Verlust auf Sender- oder Empfängerseite vorkommen, wenn Hard- oder Software fehlerbehaftet sind.

Die reale Provokation eines Fehlers auf der Übertragungsstrecke ist ohne Spezialwerkzeuge schwer zu realisieren. Stefan Putzke hat in seiner Arbeit sowohl Einstreuungen einer Dimmerleitung, als auch große Leitungslängen untersucht (Putzke 2011:S. 42f). Es ist ihm allerdings sehr wahrscheinlich nicht gelungen, Netzwerkpakete tatsächlich zu beschädigen. Weil er jedoch nur auf analoger Seite misst und nicht die empfangenen Netzwerkpakete analysiert, kann dies nicht mit Gewissheit gesagt werden. Es zeigt aber, dass dieser Fehler in der Praxis eher selten vorkommen wird. Ein defektes Kabel ist wahrscheinlicher, aber schwierig reproduzierbar darzustellen. Es scheint deshalb sinnvoller, sowohl FCS-Fehler als auch ausbleibende Pakete auf Sendeseite zu simulieren.

Die FCS kann vom Intel-Netzwerkcontroller I210 per Hardware den Paketen hinzugefügt werden, um Ressourcen zu sparen und damit die Performance des Systems zu erhöhen. Um manuell die Prüfsumme hinzuzufügen (oder ganz auszulassen), muss die Funktion im Treiber deaktiviert werden. Das Datenblatt nennt das dazu nötige Bit IFCS, welches im Command Byte Register gesetzt werden muss (Intel Corp. 2014:S. 283). Mit dieser Information konnte der entsprechende Aufruf in der `igb_xmit`-Funktion ausfindig gemacht werden, die auch vom `simple_talker`-Example genutzt wird. Eine entsprechende Modifikation konnte durch den RMON Counter im AVB-SW verifiziert werden (siehe Abbildung 5.1). Daraus ist auch zu ersehen, dass Tests mit fehlerhafter Prüfsumme nur Punkt-zu-Punkt ausgeführt werden können, weil AVB-Bridges fehlerhafte Pakete verwerfen.

Überschreitung der Bandbreitenreservierung (Babbling Idiot)

Bis in der nächsten Generation von AVB auch der eingehende Datenverkehr an einem Port standardmäßig überwacht wird, muss damit gerechnet werden, dass ein fehlerhaftes Gerät mehr Bandbreite beansprucht, als ihm zusteht und damit die Übertragung anderer Streams im Netzwerk stört. Dabei kann die reservierte Bandbreite entweder dadurch überschritten werden, dass mehr Pakete gesendet werden, als das Übertragungsintervall zulässt, oder die Pakete größer sind, als bei der Reservierung angefragt (`MaxFrameSize` und `MaxIntervalTime` in der Traffic Specification, IEEE 802.1Qat 2010: S. 61f).

Für die Simulation eines Babbling Idiot wurde zunächst die Idee verfolgt, das `simple_talker`

```

# swcfg -rmon 0 3
RMON Counter for Port 3
InGoodOctetsLo 01128301 InGoodOctetsHi 00000000
InBadOctets 46921322 OutFCSErr 00000000
InUcast 00000000 Deferred 00000000
InBroadcasts 00000000 InMulticasts 00015629
64Octets 00042750 1270Octets 00550860
255Octets 00000265 5110Octets 00000000
1023Octets 00000000 MaxOctets 00000000
OutOctetsLo 07754841 OutOctetsHi 00000000
OutUcast 00000000 Excessive 00000000
OutMulticasts 00099457 OutBroadcasts 00000000
Single 00000000 OutPause 00000000
InPause 00000000 Multiple 00000000
Undersize 00000000 Fragments 00000000
Oversize 00000000 Jabber 00000000
InMACRcvErr 00000000 InFCSErr 00478789
Collisions 00000000 Late 00000000

```

Abbildung 5.1: Ausgabe der RMON Statistik nach Deaktivierung der FCS auf Sendeseite

Tool aus dem OpenAVB-Repository zu modifizieren. Allerdings konnten nicht zuverlässig und reproduzierbar hohe Datenraten und Paketgrößen ins Netzwerk eingebracht werden. Die Grenze scheint hier allerdings nicht die Performance der Hardware zu sein, sondern Probleme im Zusammenhang mit eingesetztem Linux Kernel (Version 3.14.6) und der OpenAVB Userspace Library (lib/igb). Da der Simulator allerdings ohnehin vor allem der Verifikation von Testverfahren dienen soll, scheint eine Automatisierung nicht unbedingt notwendig. Deshalb wurde die Firmware für XMOS-basierte Development Boards (getestet mit XR-AVB-LC-BRD und XR-AVB-LC-BRD) dahingehend modifiziert, dass sich zur Kompilierzeit eine Multiplikation der Kanäle (BABBLING_IDIOT_CHANNEL_MULTIPLIER), sowie eine Division der zu reservierenden Bandbreite (BABBLING_IDIOT_BANDWIDTH_DIVIDER) einstellen lässt, die als Ausgangspunkt die eingestellte Kanalzahl (AVB_DEMO_NUM_CHANNELS) nutzen. Diese Modifikationen machen es möglich, „zu große“ Pakete zu senden. Die fehlenden Informationen werden dabei mit Rauschen (aktueller Zustand des Speichers) aufgefüllt. Es ist eine zweite Version denkbar, in der auch die Sendeintervalle variiert werden können, die aber im Rahmen der Arbeit nicht implementiert worden ist. Die Babbling-Idiot-Firmware wurde mithilfe der Netzwerk-Tap (siehe A.1) und Wireshark verifiziert. Sowohl die Reservierung der Bandbreite, als auch das Senden der eingestellten Paketgröße funktionieren fehlerfrei.

5.3 Testverfahren und exemplarische Messungen

Aus den in Abschnitt 5.1 vorgestellten Fehlerszenarien lässt sich ablesen, dass eine Fehlfunktion ihre Ursache in dem Zusammenspiel mehrerer Protokolle haben kann. Ebenso kann die eingeschränkte Betriebsbereitschaft eines Protokolls durch andere Protokolle im Netzwerk vermittelt werden. Im Folgenden werden zunächst Testverfahren diskutiert, die sich innerhalb eines Protokolls bewegen.

Hier kann zwischen reiner Beobachtung (Monitoring) und der aktiven Kommunikation mit

einem Protokoll (Probing) unterschieden werden. Außerdem ist es notwendig, dass das Testsystem Daten ins Netzwerk einspeist und eine Kommunikation mit anderen Knoten herstellt, um Fehlverhalten zu provozieren. Aus der Kombination dieser drei Methoden über mehrere Protokolle hinweg ist es schließlich möglich, ein System ganzheitlich zu beschreiben. Dies schließt auch ein, Daten über einen längeren Zeitraum in einer Datenbank vorzuhalten und mit neu gewonnenen Erkenntnissen zu verknüpfen. Hierdurch ergeben sich vier Kategorien, in welche die Testverfahren eingeordnet werden können:

- passive Überwachung (Monitoring)
- aktive Überwachung (Probing)
- Fehlerinjektion
- zusammenfassende Systemanalyse

5.3.1 Gemeinsame Zeitreferenz

Eine korrekte Funktion des Precision Time Protocol nach 802.1AS ist im Hinblick auf oben genannte Fehlerszenarien von essentieller Bedeutung. Neben der eigentlichen Aufgabe, eine gemeinsame und präzise Zeitreferenz im Netzwerk zur Verfügung zu stellen, aus der sämtliche Media Clocks abgeleitet werden, entscheidet eine Bridge anhand des Link Delay, ob der entsprechende Port noch Teil der AVB-Wolke ist („asCapable“).

Um die Funktion und Genauigkeit einer gemeinsamen Zeitreferenz zu testen, wird in anderen Arbeiten vorgeschlagen, ein Ausgangssignal an jedem Gerät abzugreifen und mithilfe eines Oszilloskops oder Frequenzzählers die Differenzen der Geräte auszuwerten.

Diese Methode setzt allerdings voraus, dass jeder Knoten ein periodisches Signal zu einem definierten Zeitpunkt ausgeben kann (z.B. einen Puls pro Sekunde, PPS). Bei der in dieser Arbeit verwendeten Apparatur konnte das bei folgenden Geräten erreicht werden: AVB-SW, XMOS-Boards, Netzwerkkarte I210.

Das Referenzdesign vom Intel I210 Netzwerkcontroller hat eine Headerleiste mit frei belegbaren Pins (Software Defineable Pins, SDP). Die quelloffene gPTP-Implementierung für diesen Chip im OpenAVB-Repository ermöglicht über einen Parameter beim Start eine PPS zu aktivieren. XMOS stellt im gPTP-Modul eine Funktion `ptp_output_test_clock` bereit, die ein Rechtecksignal beliebiger Periodendauer an einem GPIO ausgeben kann. Der für die Versuche zur Verfügung stehende Switch AVB-SW von DSP4YOU kann an einem Pin des GPIO Headers J4 ein 8 kHz Rechtecksignal ausgeben (siehe Abschnitt A.3.1).

Da die Quellen für die auf dem AVB-SW eingesetzte Software nicht zugänglich sind, bildet das 8 kHz-Signal den kleinsten gemeinsamen Nenner. Die XMOS-Firmware und der OpenAVB gPTP Daemon wurden entsprechend modifiziert, um ebenfalls ein solches Signal auszugeben. Gegenüber dem Sekundenpuls hat das deutlich schnellere Rechtecksignal den Nachteil, dass die absolute Zeit weniger genau überprüft werden kann. Dafür eignet sich das schnelle periodische Signal zur einfachen Überprüfung mithilfe des analogen Oszilloskops. Die absolute Zeit

kann nachfolgend beispielsweise mit bloßem Auge durch Terminalausgaben überprüft werden (Auflösung > 1 s).

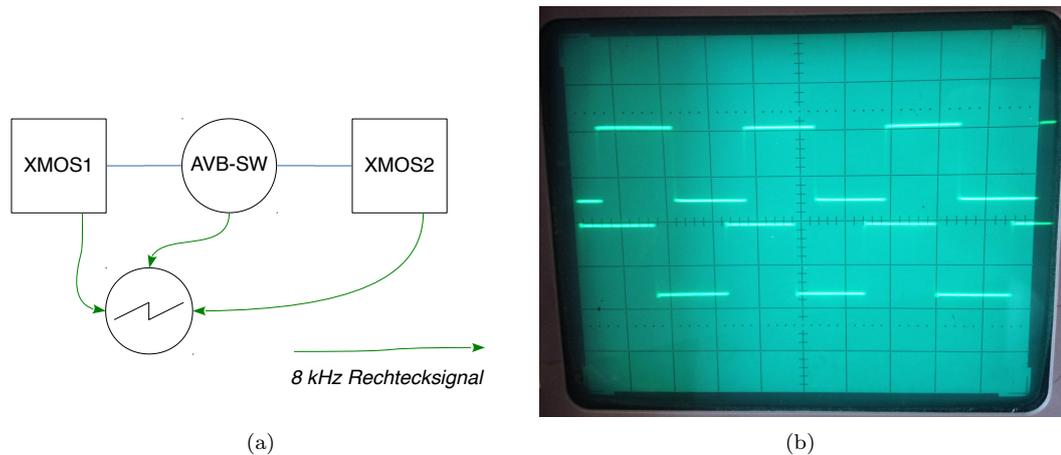


Abbildung 5.2: Messung an 3 nicht synchronisierten gPTP-Knoten (3. Signal als Trigger, Auflösung 20 $\mu\text{s}/\text{DIV}$)

Während die Messung per periodischem Signal und Oszilloskop eine gute Möglichkeit bietet, Funktion und Präzision der Zeitreferenz festzustellen, sowie als Referenzmessung weitere Testverfahren zu verifizieren, ist das Verlegen zusätzlicher Kabel im Hinblick auf eine mögliche Automatisierung ebenso hinderlich wie die Notwendigkeit, an möglichst jedem Knoten ein extern abgreifbares Signal zu erzeugen. Allerdings können anhand der Kommunikation des Protokolls im Netzwerk ebenfalls Indizien gesammelt werden, ob die Zeitreferenz fehlerfrei funktioniert.

Erste Voraussetzung für den störungsfreien Betrieb ist die Existenz eines einzigen Grandmasters auf den alle Knoten zugreifen (gPTP Domain, siehe IEEE 802.1AS 2011: S. 27). Diese Information ist in den folgenden Feldern enthalten:

- gPTP, Announce Message: grandmasterClockIdentity, außerdem der Pfad zum Grandmaster im Path Trace TLV
- AVDECC, Entity Available Message: AS Grandmaster ID

Die der Sync-Nachricht folgende Follow Up-Nachricht enthält das Feld preciseOriginTimestamp und einen Type Length Value-Abschnitt (TLV), der die Information enthält, ob ein neuer Grandmaster gewählt worden ist und in welchem Verhältnis (Frequenz und absolute Zeit) alter und neuer Grandmaster zueinander stehen. Aus dem cumulativeScaledRatioOffset-Wert lässt sich das Frequenzverhältnis zwischen der sendenden Stelle und dem Grandmaster ablesen (IEEE 802.1AS 2011: S. 128f). Indikator eines eingeschwungenen Systems ist, dass der preciseOriginTimestamp an den Ports jeder Bridge, also jedes verteilenden Zeitsystems, in der gleichen Größenordnung liegt. Die Wahl eines neuen Grandmasters bedeutet Verlust der Synchronisation in Verbindung mit möglichen Dropouts im Audiosignal, weshalb dieses Feld im Betrieb ebenfalls zu überwachen ist. Eine standardkonforme Implementierung vorausgesetzt, hat das Verhältnis

der Oszillatoren von Grandmaster und nächstgelegener Bridge eher informativen Charakter, kann aber helfen, einen Hardwaredefekt oder einen Bug in der Software zu identifizieren, wenn der Wert ungewöhnlich hoch ist.

Das Empfangen der vorgenannten Nachrichten des gPTP-Protokolls ist allerdings nur zwischen zwei gPTP-Knoten möglich. Antwortet die Gegenstelle nicht auf Delay Request-Nachrichten, bleiben in der Folge auch Announce- und Sync-Nachrichten aus (IEEE 802.1AS 2011: S. 118). Zu Versuchszwecken kann deshalb die in Abschnitt A.1 aufgeführte Network Tap zwischen zwei Knoten geschaltet werden (Monitoring). Wahlweise kann auch ein gPTP Daemon auf dem PC, der zur Erfassung der Messwerte dient, laufen (Probing).

Mit einem kontrollierbarem gPTP Daemon kann außerdem untersucht werden, ob Fehler in der Zeitreferenz provoziert werden können und wie sich diese in der Folge auswirken (Fehlerinjektion). Beispielsweise können die Parameter des eigenen Knotens dahingehend eingestellt werden, dass dieser beim BMCA als Grandmaster gewählt wird. In der Folge kann so sehr einfach der Ausfall des Grandmasters simuliert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Genauigkeit eines Time Aware System abzuschätzen, ist die Fehler zwischen dem eigenen Oszillator und der Referenz (Grandmaster bzw. Master) aufzuzeichnen und statistisch auszuwerten. Der Messfehler hängt natürlich maßgeblich von der Genauigkeit des eigenen Oszillators ab. Die Methode genügt aber für eine grobe Abschätzung, ob das System grundsätzlich funktionsfähig ist.

Messung: Wechsel des Grandmasters

Für die exemplarische Messung werden beide XMOS-Boards, sowie das Messsystem an den AVB-SW angeschlossen (siehe Abbildung 5.3). Der gPTP Daemon wird mit hohem Prioritätswert (255) gestartet, um nicht selbst zum Grandmaster gewählt zu werden. Per Telnet wird für den ersten Versuch die Priorität der PTP auf dem AVB-SW auf 248 herauf- und wieder auf 250 heruntergesetzt.

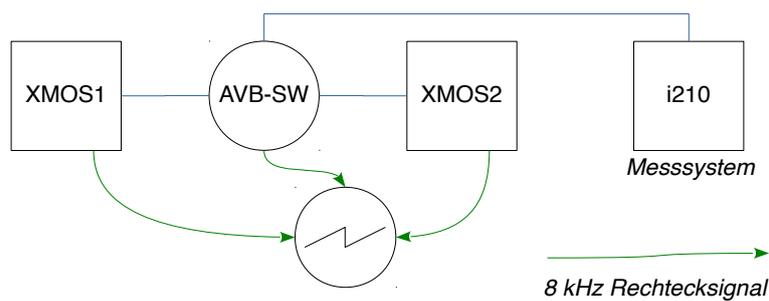


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau „Wechsel des Grandmasters“

Beim zweiten Test wird das zum Grandmaster gewählte XMOS-Board aus- und wieder einge-

schaltet, so dass zwischenzeitlich das andere XMOS-Board die Grandmaster-Rolle übernimmt. Per Oszilloskop werden die Rechtecksignale kontrolliert (Videos beider Versuche befinden sich auf der beiliegenden CD).

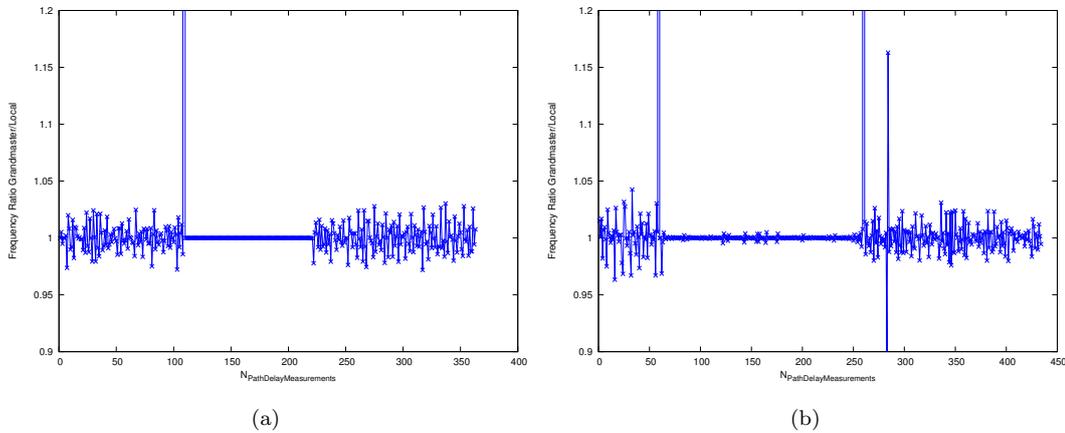


Abbildung 5.4: Umschaltung des Grandmaster auf benachbarte Bridge und zwischen den zwei Endpunkten

Die Diagramme (5.4) zeigen das Frequenzverhältnis vom lokalen Oszillator des gPTP Daemon zum Grandmaster (`ml_freqoffset`), welche über das Tool `ptp_dump` periodisch (ein Datensatz pro DelayRequest-Messung) aufgezeichnet worden sind. Es ist zu erkennen, dass die Werte quasi konstant sind, wenn kein weiterer Hop zwischen Grandmaster und Messpunkt liegt (Abbildung 5.4a), aber um bis zu 5% schwanken, wenn ein weiterer Knoten in die Berechnung eingeht (Abbildung 5.4b). Diese Schwankungen sind allerdings nur punktuell, im Mittel entsprechen die Werte den Messungen im AVB-SW³.

Deutlich treten allerdings die Spitzen hervor, wenn der Grandmaster wechselt. Die zweite Spitze in Abbildung 5.4(b) beim Wechsel auf den ursprünglichen Grandmaster ließ sich auch auf dem Oszilloskop nachvollziehen, die Stabilisierung hat also länger gedauert als in vorherigen Umschaltvorgängen.

Messung: Legacy Switch

AV Bridges, die standardkonform implementiert sind, erkennen Legacy Switches anhand der Paketlaufzeitmessung zum nächsten gPTP-Knoten. Hierzu wird ein nach dem verwendeten Medium (z.B. Glasfaser oder Kupferkabel) und der maximal spezifizierten Länge des Kabels seitens der Hersteller ein `neighborDelayThreshold` festgelegt. Wird diese Grenze überschritten, definiert die Bridge an diesem Punkt eine Grenze der AVB-Wolke und wird im folgenden Streamreservierungen zurückweisen (Talker Failed, Asking Failed, siehe Abschnitt 5.3.3). Wird der `neighborDelayThreshold` allerdings umkonfiguriert (möglich beim Summit von Extreme Networks) oder

³abzulesen über die Konsole: `ptpconfig get ports_status`

ist er so hoch eingestellt, dass schnelle Switches nicht eindeutig identifiziert werden (DSP4YOU AVB-SW), kann es nötig werden, den fehlerhaften Knoten anderweitig zu erkennen.

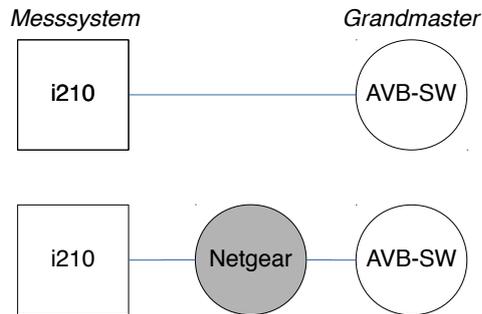


Abbildung 5.5: Versuchsaufbau „Legacy Switch“

In den vorherigen Versuchsaufbau wird dazu nun ein Legacy Switch eingebracht, Grandmaster ist der AVB-SW (siehe Abbildung 5.5). Das Messsystem ist über den Legacy Switch direkt am Grandmaster-Knoten angeschlossen. Dadurch entspricht das gemessene Frequenzverhältnis von Grandmaster zum lokalen Oszillator gleichzeitig der Neighbor Rate Ratio (Der Switch ist für das Time Aware System transparent).

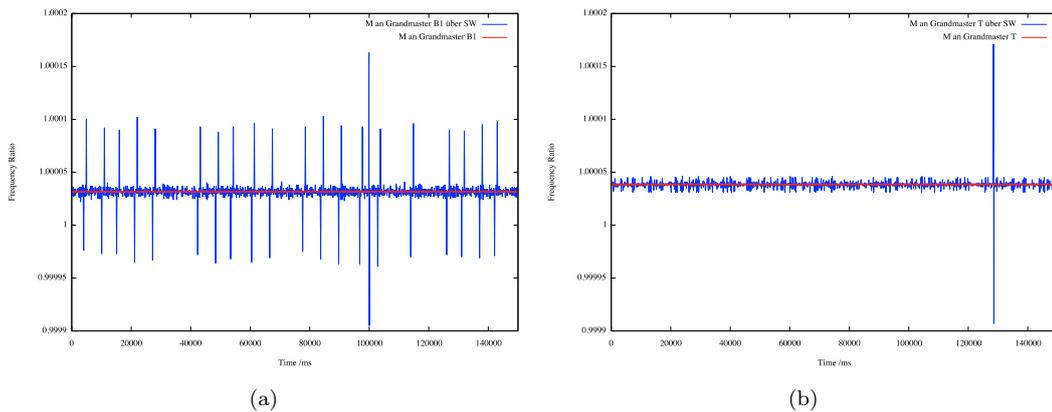


Abbildung 5.6: gemessene NeighborRateRatio an zwei verschiedenen Geräten (Grandmaster) jeweils mit und ohne Legacy Switch

Es ist zu erkennen, dass die vom gPTP-Mechanismus gemessenen Frequenzdifferenzen stark schwanken, wenn ein normaler Switch zwischengeschaltet wird (Abbildung 5.6). Damit ist unter der Voraussetzung, dass der Messpunkt direkt am Grandmaster angeschlossen ist und sich der Legacy Switch unmittelbar dazwischen befindet eine zuverlässige Erkennung gewährleistet.

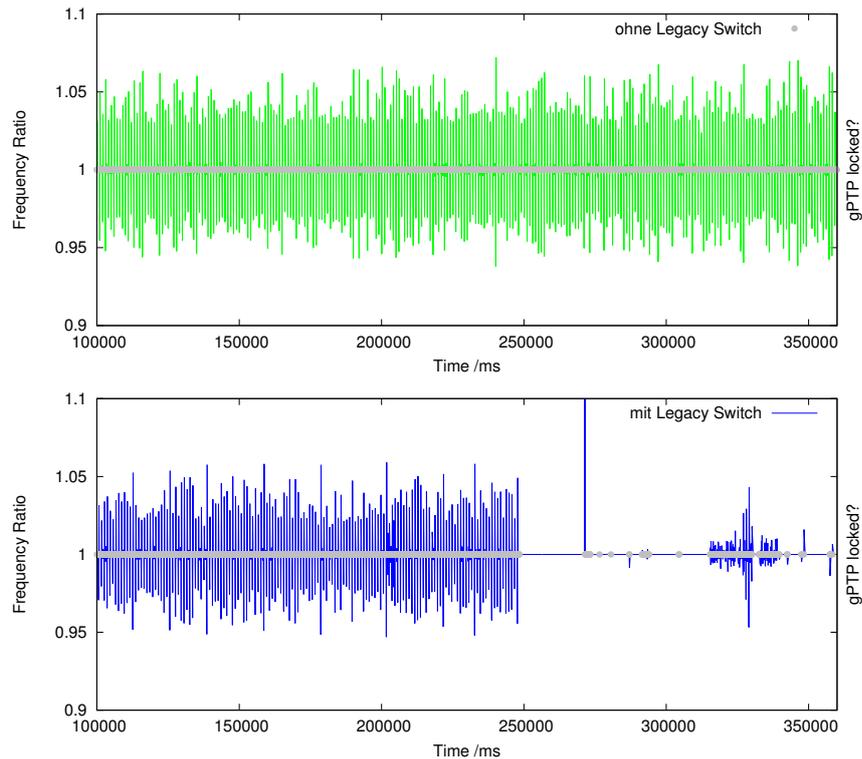


Abbildung 5.8: gemessene NeighborRateRatio am AVB-SW jeweils mit und ohne Legacy Switch, ansteigende Last bis zum Abriss der Synchronisation

Verbindungen eine hohe Last an oder über der Auslastungsgrenze erzeugt werden und durch das manuelle Setzen von Priority-Werten jeweils die Wahl eines Grandmasters am anderen Ende des Messsystems erzwungen werden.

5.3.2 Media Clock Synchronisation

Auf den XMOS AVB-Referenzboards liegen ein- und ausgehende Signale im I2S-Format auf einem GPIO-Header (J7) auf. Es ist deshalb möglich, hier direkt eine Wordclock abzugreifen. Die Masterclock, aus der die Wordclock abgeleitet ist, wird mithilfe eines IC (U6, CS2300) generiert, welches ein niederfrequentes Signal multipliziert und mit einer PLL stabilisiert. Hierfür liefert der Mikrocontroller ein 1 kHz-Signal an, welches entweder intern erzeugt wird (Media Clock Master), oder aus einem 1722-Stream regeneriert wird (Media Clock Slave). Mit einem Oszilloskop ist also sehr einfach nachzuprüfen, ob zwei dieser Boards bezüglich der Media Clock hinreichend synchronisiert sind. Soweit in anderen Geräten mit Wordclock-Ausgang kein Sample Rate Converter (SRC) verwendet wird, können diese ebenfalls auf diese Weise überprüft werden.

Geräte ohne Wordclock-Ein- und Ausgang (z.B. Netzwerkkarten mit ASIO-Treiber) lassen sich mit zwei weiteren AVB-Endpunkten (mit Wordclock-Ausgang) überprüfen. Hierfür wird das zu testende Gerät eingangsseitig mit dem einen und ausgangsseitig mit dem anderen End-

punkt über je einen Stream verbunden. Die Clock Source der Endpunkte muss dabei entsprechend einmal auf „intern“, einmal auf „eingehender Stream“ eingestellt sein. Nun können die Wordclock-Signale auf ein Oszilloskop aufgelegt und dort verglichen werden. Sind sie gleich in Frequenz und Phase, kann geschlussfolgert werden, dass das Gerät Media Clocks korrekt verarbeitet.

Ohne Zugriff auf einen Wordclock-Ausgang, oder wenn diese Ausgänge nicht an einem zentralen Punkt zusammengeführt werden können, ist die Überprüfung der Media Clock etwas schwieriger. Eine Möglichkeit ist, die Zeitstempel aus den AVTP-Paketen der Streams zu extrahieren. Sind alle Geräte per gPTP hinreichend genau synchronisiert (siehe Abschnitt 5.3.1), kann der Vergleich der Zeitstempel darüber Aufschluss geben, ob mehrere Streams zu einer gemeinsamen Media Clock synchron sind. Das passive Abgreifen der Streams ist jedoch nicht an einem zentralen Punkt möglich, da die entsprechenden Pakete von den AVB-Bridges nur an den für den Stream reservierten Ports repliziert werden. Abhilfe schafft hier entweder der Einsatz von mehreren Netzwerkanzapfungen oder das aktive Reservieren der zu überwachten Streams (Probing).

Wurden die Pakete passiv über eine Tap abgehört und mit Wireshark im pcap-Format aufgezeichnet, lassen sich die Zeitstempel mit dem Python-Skript `avtp_astimes.py` aus dem OpenAVB-Repository in eine CSV-Datei extrahieren.

Für das aktive Empfangen von Streams wurde das Kommandozeilentool `timestamp_reader` entwickelt. Es reserviert die gewünschten Streams anhand der ID und schreibt die Zeitstempel der empfangenen AVTP-Pakete direkt in CSV-Dateien. Nicht valide Zeitstempel werden übersprungen. Außerdem werden die Sequenznummer des Pakets (der erste Sequenzwert wird als Offset gespeichert und jeweils subtrahiert, so dass die Sequenz in der Datei stets bei 0 startet) und das Timestamp Uncertain-Feld ausgelesen. Der Zeitstempel wird sowohl unverändert (mit Überlauf), als auch akkumuliert (Gesamtzeit) in die Datei geschrieben.

Messung: Zwei Media Clock Master

Die AVB-fähige Netzwerkkarte Nic-1, für die Echo Audio Controller-Software und ASIO-Treiber für Windows bereitstellt, besitzt keinen eigenständigen Wordclock Ein- oder Ausgang. Die Media Clock, die sie als Master zur Verfügung stellt, ist also freilaufend. Alternativ kann die Karte sich als Slave auf einen Stream verbinden, wenn dessen Talker per AVDECC eine externe Clock Source listet, wie beispielsweise beim AVB-SW von DSP4YOU.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.9 skizziert. Zunächst wird ein Stream von der Nic-1 mit einem XMOS-Board verbunden. Das XMOS-Board wiederum stellt einen Stream für das zweite XMOS-Board zur Verfügung. Per AVDECC wird überprüft, dass das XMOS-Board 1 den eingehenden Stream als Clock Source verwendet. Die Zeitstempel beider Streams werden mit dem Programm `timestamp_reader` ausgelesen. Im Diagramm ist die Differenz der Zeitstempel über der Anzahl empfangener Pakete aufgezeichnet. Die Spitzen in beiden Diagrammen weisen auf die Überläufe der Zeitstempel hin, ein zusätzlich aufsummierter Zeitstempel wird erst ab

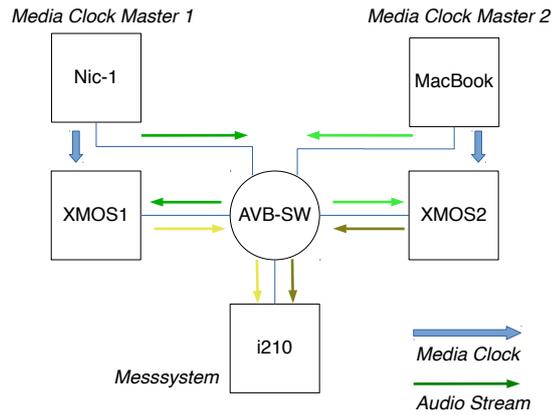


Abbildung 5.9: Versuchsaufbau „Zwei Media Clock Master“

einer späteren Version des Tools (nach Versuchsdurchführung) mit in den Datensatz geschrieben.

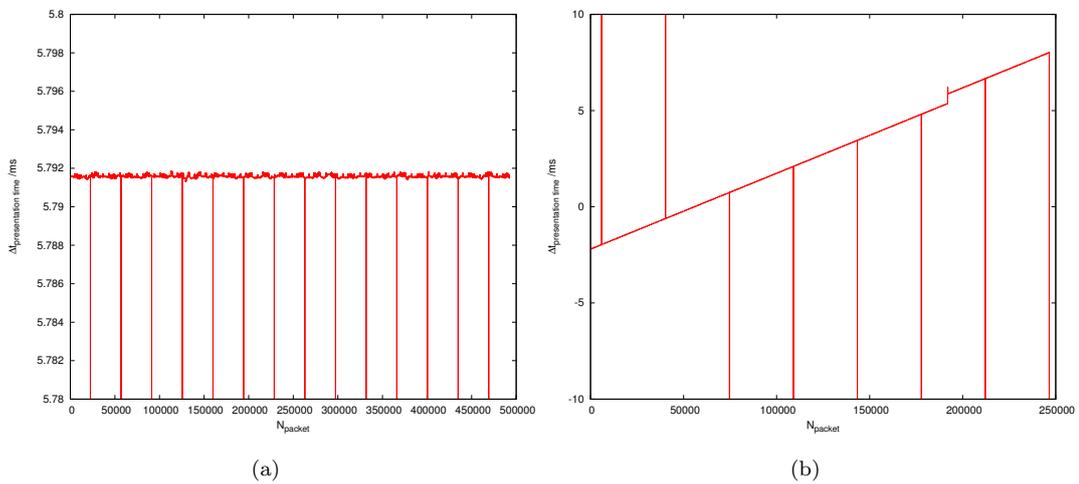


Abbildung 5.10: Drift bei verschiedenen Media Clock Mastern

Es ist zu erkennen, dass das XMOS-Board die von der Nic-1 empfangene Media Clock verarbeitet und als eigene Media Clock für ausgehende Streams verwendet. Die Abweichungen kommen durch das 4:3-Verhältnis von Paketen zu gültigen Zeitstempeln (siehe Abschnitt 3.6) zu Stande. Die absolute Abweichung von etwa 5,792 ms ergibt sich aus den verschiedenen Startzeitpunkten der Aufzeichnung der Streams (siehe unten).

Für die Fehlersimulation erhält XMOS-Board 2 den Stream eines MacBook mit Mac OS X 10.9. Clock Source laut AVDECC ist der PC. Wie durch die unterschiedlichen Media Clock Master zu erwarten, driften die Zeitstempel auseinander. Der erkennbare Sprung bei etwa 200.000 Paketen resultiert aus mehreren ausgelassenen Paketen in beiden Streams. Eine Überprüfung der Performance des Tools ist notwendig, um solche Dropouts in späteren Versionen zu vermeiden.

Messung: Legacy Switch

Für den letzten Versuch wird ein Legacy Switch zwischen AVB-SW und XMOS-Board geschaltet. Da der AVB-SW den Switch nicht erkennt (siehe Abschnitt 5.3.3), sind die Reservierungen weiterhin möglich. gPTP Grandmaster ist der AVB-SW. Über den Streamware Controller wird der Stream des AVB-SW auf die Nic-1 geschaltet, es kann angenommen werden, dass sie diesen Stream als Clock Master übernimmt (weil sich die Karte nicht regulär von einem Controller über AVDECC ansprechen lässt, kann dies nicht geprüft werden). Es werden die ausgehenden Streams vom XMOS-Board, der Nic-1, sowie der Media Clock Stream des AVB-SW aufgezeichnet (siehe Abbildung 5.11).

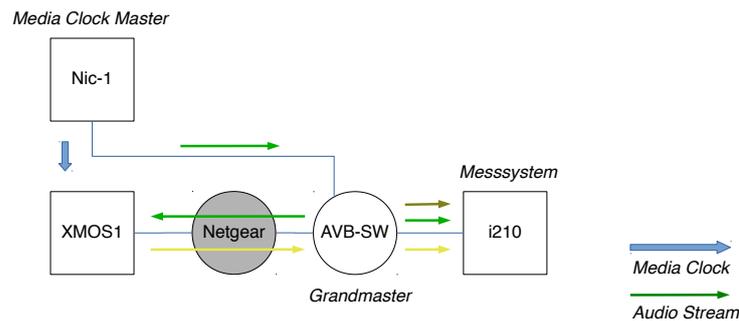


Abbildung 5.11: Versuchsaufbau „Media Clock mit Legacy Switch“

Es fällt der Sprung am Anfang auf. Hier springt der vom XMOS gesendete Zeitstempel um 2,167 ms (sonst sind die Schritte etwa 166,667 μ s groß). Das deutet auf einen plötzlichen Sprung in der gPTP Zeitreferenz hin, dem die Media Clock folgen muss. Normalerweise sind Wechsel des Grandmaster für derartige Sprünge verantwortlich, weshalb dieser über mehrere Mechanismen des gPTP signalisiert wird. Durch die Asymmetrie des Path Delay können solche Sprünge jedoch auch spontan auftreten, wenn ein normaler Switch zwischengeschaltet ist.

An den deutlichen Schwankungen der Media Clock in einem Bereich von ungefähr 40 μ s erkennt man, wie ungenau die Zeitreferenz ist. Diese Media Clock und folglich der gesendete Stream ist stark fehlerbehaftet und kann deswegen als unbrauchbar ausgewiesen werden.

Zuletzt fällt die konstante Steigung des Graphen „XMOS-SW - Referenz“ auf. Die Referenz ist die errechnete Media Clock für Paket N bei 48 kHz mit 6000 gültigen Zeitstempeln pro Sekunde nach der Formel $f(N) = N * \frac{6000}{48 \text{ kHz}}$. Die Steigung entspricht der Beobachtung, dass etwa alle 300 Pakete 10 ns zu dem ansonsten konstanten Zeitstempel von 500 μ s (2000 gültige Zeitstempel pro Sekunde) addiert werden. Weil der AVB-SW selbst Grandmaster ist, wäre zu vermuten, dass die Media Clock durch einen separaten Oszillator generiert wird. Dafür spricht, dass der Summand konstant 10 μ s beträgt und das Intervall, in dem er aufaddiert wird, sich geringfügig ändert. Weil die Referenzunterlagen zum verwendeten Marvell Chip nicht offen zugänglich sind, kann man die Vermutung nicht anhand der Implementierung belegen.

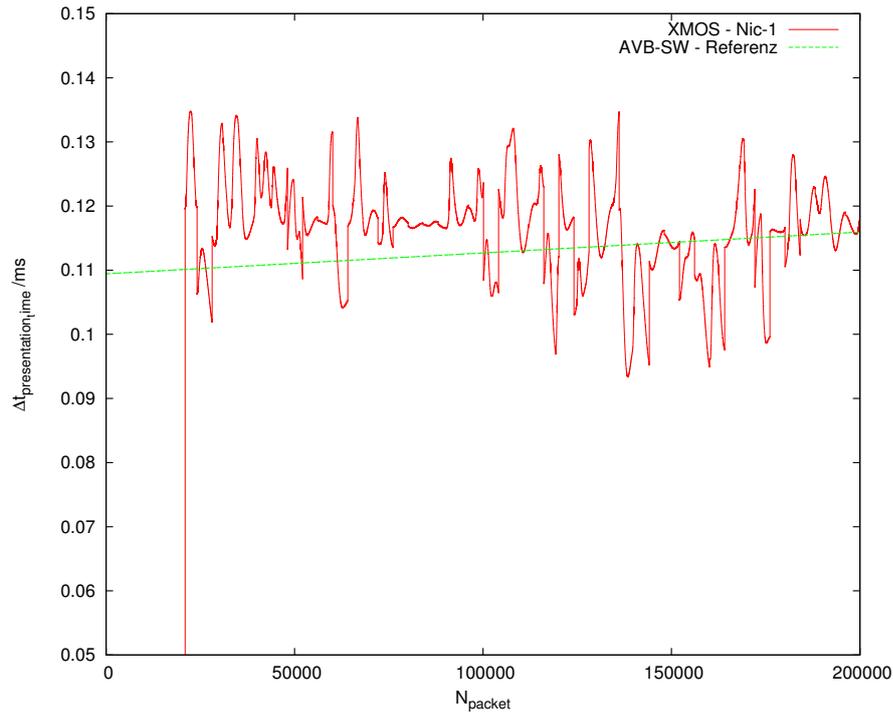


Abbildung 5.12: Media Clock-Fehler durch Legacy Switch

5.3.3 Streamreservierung

Die meisten der zu erwartenden Fehlersituationen im Zusammenhang mit der Streamreservierung über das MSRP werden vom Protokoll selbst behandelt. Darunter fällt der Versuch einer Reservierung von oder zu einem Punkt außerhalb der AVB-Wolke sowie die Rückmeldung, wenn auf einem Teilstück die maximal nutzbare Bandbreite für die jeweilige Klasse überschritten ausgeschöpft ist.

Die Verteilung der Nachrichten (Propagation) ist in 802.1Qat geregelt. Abbildung 5.13 zeigt exemplarisch den Ablauf einer fehlerfreien und einer fehlerbehafteten Reservierung. Es ist zu erkennen, dass die Fehlermeldungen nicht an allen Punkten zu empfangen sind. Talker Advertise-Nachrichten werden grundsätzlich an alle nicht blockierten Ports repliziert⁴, die Nachrichten des Listeners werden jedoch nur auf dem direkten Pfad zum Talker weitergereicht.

Im Fehlerfall (hier: nicht genügend verfügbare Bandbreite an B2) wird die Talker Advertise-Nachricht ab der Bridge, an der ein Problem aufgetreten oder erkannt worden ist, in eine Talker Failed umgewandelt. Listener Asking Failed-Nachrichten werden durchgereicht, so lange nicht ein anderer Listener den Stream erfolgreich reservieren kann (nicht abgebildet). In dem Fall fasst die Bridge beide Nachrichten zu einer eine Listener Ready Failed-Nachricht zusammen (IEEE 802.1Qat 2010: S. 67). Die Talker Failed-Nachricht enthält die Adresse der Bridge, an der ein

⁴Die Blockierung bezieht sich hierbei laut Standard auf einen durch das Rapid Spanning Tree Protocol nicht freigegebenen Pfad (IEEE 802.1Qat 2010: S. 53). Im Beispiel ist das RSTP nicht berücksichtigt.

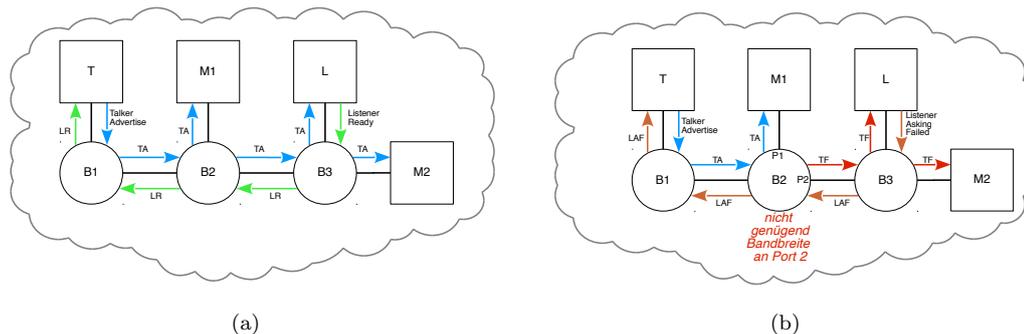


Abbildung 5.13: Verteilung von MSRP-Nachrichten bei erfolgreicher und fehlgeschlagener Bandbreitenreservierung

Fehler aufgetreten oder erkannt worden ist, sowie den Grund des Fehlers (einen Überblick über die Fehlercodes gibt Tabelle 5.1).

Um aus der Ferne also den Erfolg oder Misserfolg einer Bandbreitenreservierung zu überwachen, scheint es zunächst ausreichend, die MSRP-Nachrichten passiv zu überwachen und entsprechend mit anderen Informationen zu verknüpfen. In den unten stehenden Versuchen hat sich aber herausgestellt, dass AV Bridges mit der Verteilung der Nachrichten im Netzwerk durchaus unterschiedlich umgehen.

Grund dafür kann entweder Fehlkonfiguration sein (aktiviertes Talker Pruning, siehe Abschnitt 3.4) oder ein nicht vollständig definiertes Verhalten des MSRP. Gunther (2013) bemerkt in einer Präsentation zum Thema, dass Reservierungen über gPTP Links hinaus nicht erlaubt sind und MSRP-Nachrichten nicht über normale Switches verbreitet werden. Während der zweite Punkt in den Versuchen für den zur Verfügung stehenden Switch widerlegt worden ist, scheint der erste Punkt bei DSP4YOU respektive Marvell derart interpretiert worden zu sein, dass MSRP-Nachrichten nicht über die Grenzen einer gPTP-Domäne hinaus zu replizieren sind. Zumindest ist beim AVB-SW dieses Verhalten festzustellen, während die zertifizierte Extreme AV-Bridge Summit X440 Nachrichten auch zu Knoten oder Endpunkten weiterleitet, die nicht gPTP-fähig sind. Der Standard verbietet weder das eine, noch schreibt er das andere Verhalten ausdrücklich vor.

Ohne die Sicherheit, welche Meldungen tatsächlich bis zum Testrechner repliziert werden, ist es notwendig, auf andere Mittel zurückzugreifen. Glücklicherweise wurde der dem 802.1Qat zugrunde liegende Standard 802.1 nicht dediziert für Medien- oder Audionetze, sondern für große Datennetze entwickelt. Viele Funktionen daraus ergeben daher erst bei großer Skalierung wie für ein Firmengebäude, Fabrikgelände oder Campus einen Sinn. Deshalb spezifiziert der Standard Mechanismen zur Konfiguration und Überwachung von einem zentralen Punkt aus. Mit der Erweiterung um das SRP-Protokoll wurden auch diese Teile erweitert (IEEE 802.1Qat 2010: Kapitel 12. und 17.). Für den vorliegenden Zweck scheint vor allem das SNMP-Protokoll zur Abfrage der Management Information Base (MIB) geeignet. Neben den angefragten oder reservierten Streams lassen sich damit weitere Informationen wie Fehlercode, Ort des Fehlers,

Failure Code	Description of cause
1	Insufficient bandwidth
2	Insufficient Bridge resources
3	Insufficient bandwidth for Traffic Class
4	StreamID in use by another Talker
5	Stream destination_address already in use
6	Stream preempted by higher rank
7	Reported latency has changed
8	Egress port is not AVB capable ^a
9	Use a different destination_address (i.e. MAC DA hash table full)
10	Out of MSRP resources
11	Out of MMRP resources
12	Cannot store destination_address (i.e., Bridge is out of MAC DA resources)
13	Requested priority is not an SR Class (3.3) priority
14	MaxFrameSize [35.2.2.8.4 a)] is too large for media
15	msrpMaxFanInPorts [35.2.1.4 f)] limit has been reached
16	Changes in FirstValue for a registered StreamID
17	VLAN is blocked on this egress port (Registration Forbidden) ^b
18	VLAN tagging is disabled on this egress port (untagged set)
19	SR class priority mismatch

Tabelle 5.1: MSRP Fehlercodes nach IEEE 802.1Qat (2010: S. 64)

Alter des Streams und Anzahl verlorener Frames abfragen.

Allerdings ist die Implementierung vom SNMP weder im Standard 802.1BA noch in den Endpoint Best Practices (Mann et al. 2013) als Voraussetzung für den Regelbetrieb von AVB erwähnt. Es kann deshalb nicht davon ausgegangen werden, dass jede Bridge über diese Schnittstelle überwacht werden kann. In der Apparatur zu dieser Arbeit stellt zwar der von der AVnu Alliance zertifizierte Switch von Extreme Networks eine SNMP-Schnittstelle bereit, das Einpflegen der nötigen Erweiterungen steht allerdings noch aus⁵. Weder der DSP4YOU Switch, noch das Daisy Chain-Referenzdesign von XMOS lassen sich über das SNMP-Protokoll abfragen. Die Zukunft wird zeigen, ob die Hersteller flächendeckend SNMP in ihre Geräte integrieren. Die Wahrscheinlichkeit dafür steigt mit der Verfügbarkeit von Programmen, die darüber Informationen abfragen und bereitstellen. Leider gibt es auch hier bisher keine für Mediennetzwerke (und deren Benutzer) ausgerichtete Software.

⁵http://esupportkb.extremenetworks.com/dox/RN/ExtremeXOS_15.3.1-patch1-36_RelNotes.pdf, Seite 9. Zuletzt abgerufen am 1. Juli 2014

Einen weiteren Weg bietet das AVDECC-Protokoll an. Sowohl während des Verbindungsaufbaus über das ACM-Subprotokoll, als auch bei der Abfrage von Stream-Informationen aus dem AEM können Informationen aus dem MSRP übertragen werden (IEEE 1722.1 2013: S. 183, S. 273). Schlägt die Verbindung fehl, wäre im gesamten Netzwerk (soweit Multicast-Nachrichten freigeschaltet sind) das gesetzte TALKER FAILED-Flag in der ACMPDU sichtbar. Leider macht noch keines der in dieser Arbeit genutzten Geräte von dieser Signalisierung Gebrauch. Im XMOS-Quelltext ist an der entsprechenden Stelle vermerkt: „/* TODO: Add flags */“.

Das Ziel, alle sinnvollen Informationen über ein Netzwerk mit minimaler Kooperation der Hersteller für den Benutzer einfach und übersichtlich darzustellen, erfordert also eine andere Lösung, die unkooperative Geräte berücksichtigt. Dazu bietet sich das aktive Bereitstellen eines AVB-Endpunkts an, der versucht, nacheinander Streams bei allen gefundenen Talkern zu reservieren. Schlägt eine Reservierung fehl, enthält die Talker Failed-Nachricht Fehlercode und die Adresse der Bridge, an der der Fehler aufgetreten ist. Gelangt die Nachricht nicht bis zum Endpunkt, ist eine weitere Fehlerursache gefunden.

Versuch: Erkennen der Ursache für eine fehlgeschlagene Reservierung

Anhand eines Versuchs soll geprüft werden, welche Informationen über das Fehlschlagen einer Reservierung tatsächlich zentral gesammelt werden können. Hierbei werden eventuelle Unzulänglichkeiten der Implementierung in den genutzten Geräten bewusst in Kauf genommen, um die Auswirkungen von Softwarefehlern abschätzen zu können.

In Abbildung 5.14 sind zwei Versuchsaufbauten skizziert. Zusätzlich zu den beteiligten Knoten T, L, B1 und B2 sind drei mögliche Überwachungspunkte M1 bis M3 eingezeichnet, an denen je eine Wireshark-Instanz die empfangenen Pakete aufgezeichnet hat.

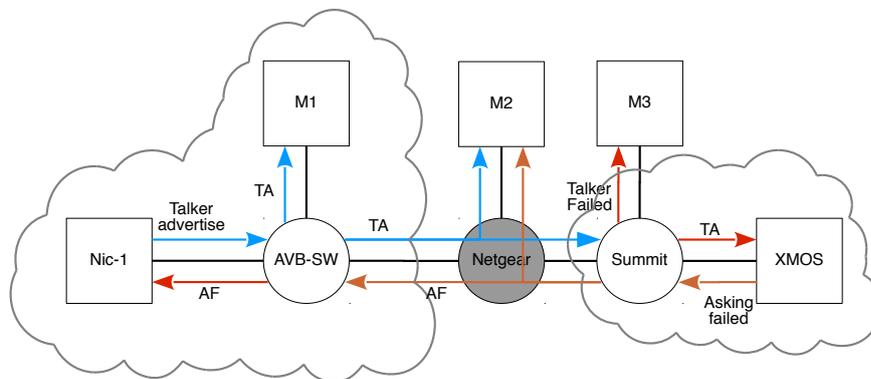


Abbildung 5.14: Versuchsaufbau: „Erkennen der Ursache für eine fehlgeschlagene Reservierung“

Es wird versucht über den Streamware Controller eine Verbindung von der Nic-1 zum XMOS-Board aufzubauen. Erwartungsgemäß schlägt die Reservierung fehl, weil sich ein Legacy Switch im Signalweg befindet. Die Software nennt sowohl im Log, als auch im „Stream Information“-

Fenster als Grund „Asking Failed“, was soweit standardkonform ist. Um an die Fehlerursache zu gelangen, wäre das Empfangen der zugehörigen Talker Failed-Nachricht sinnvoll, weil sie Grund und Ort des Fehlers nennt.

Theoretisch sollte der Legacy Switch von beiden AV Bridges erkannt werden. In der Folge würde an jedem weiteren Port eine Talker Failed-Nachricht ausgegeben. Tatsächlich abzurufen ist sie im Versuchsaufbau nur an B3. Wie oben erwähnt erwartet der AVB-SW einen gPTP-fähigen Endpunkt oder Knoten, damit dort MSRP-Nachrichten weitergegeben werden. Zwar werden mit aktiviertem gPTP-Daemon Nachrichten empfangen (der Übersicht halber per mrpd und mrpctl aus dem OpenAVB-Repository), der Talker (Stream ID 00148600017b0001) wird jedoch als gültig ausgegeben (Abbildung 5.15). Weiterhin fällt die Talker Failed-Nachricht der Gegenseite auf (das zweite XMOS-Board kann ignoriert werden). Vermerkt ist der Fehlercode8, „Egress port is not AVB capable“, jedoch ist die Bridge, die den Fehler erkannt hat nicht der AVB-SW, sondern der Summit X440 (Bridge ID 000496979365).

```
MRPD ---> MMRP:Empty
?? RESP:
V:I=0002 R=000496979365 QA/IN
?? RESP:
D:C=5, P=2, V=0002 R=000496979365 V0/IN
D:C=6, P=3, V=0002 R=000496979365 AA/IN
T:S=00148600017b0001, A=91e0f00cf0b, V=0002, Z=256, I=1, P=112, L=138368, B=0000000000000000, C=0 R=000496979365 V0/IN
T:S=00229700437b0000, A=91e0f00db4e, V=0002, Z=224, I=1, P=112, L=387601, B=8000000496979365, C=8 R=000496979365 V0/IN
T:S=00229700437c0000, A=91e0f0003713, V=0002, Z=224, I=1, P=112, L=387601, B=8000000496979365, C=8 R=000496979365 V0/IN
```

Abbildung 5.15: Passives Mithören der MSRP-Nachrichten am AVB-SW

Daraus lässt sich also schlussfolgern, dass der AVB-SW den Legacy Switch nicht erkennt und den Port als AVB-fähig ansieht. Das ist in der Folge einerseits ein Problem, wenn keine AV-Bridge von Extreme Networks, sondern ein weiterer AVB-SW zum Einsatz kommt. Andererseits erschwert das auch die Fehlersuche, weil die notwendigen Informationen (warum der Talker der Nic-1 keinen Stream reservieren konnte) an diesem Punkt fehlen.

Während das vorgenannte Verhalten auf ein zu hoch eingestelltes Neighbor Delay Threshold hindeutet, wurde vermutlich ein Softwarefehler bei dem Versuch entdeckt, den Stream über den Streamware Controller erneut zu verbinden. Diesmal ist eine Verbindung zu Stande gekommen, Stream Info und Log wiesen den Status als Ready Failed aus, es wurden aber AVTP Pakete gesendet. Die genaue Ursache konnte nicht identifiziert werden. Die Pakete sind (über beide AV-Bridges und Legacy Switch) blockweise mit hohem Paketverlust am XMOS-Board angekommen. Der Fehler ließ sich in einem anderen Aufbau (Echo, Summit, Legacy Switch, XMOS-Board) reproduzieren, womit der AVB-SW als Ursache ausgeschlossen werden kann. Eine weitergehende Fehlersuche ist hier notwendig.

Auswertung

Das Fehlen der Information über die Ursache einer nicht erfolgreichen Reservierung ist kein spezifisches Problem für AV-Bridges, an denen ein Legacy Switch unerkannt bleibt. Die Übersetzung der Talker Advertise- in eine Talker Failed-Nachricht soll in erster Linie dazu dienen, potentiellen Empfängern einen Status zu signalisieren. Liegt der Messpunkt näher am Talker als

der Legacy Switch (Position von M1), erscheint der Talker dort als sendebereit, signalisiert durch eine Talker Advertise-Nachricht. Weil die Listener-Nachrichten zudem nur zum Ursprungspunkt zurückgeleitet werden, ist in diesem Fall aus der Ferne überhaupt keine Überwachung über das MSRP möglich.

Eine Lösung dieses Problems lässt sich über die im OpenAVB-Repository enthaltenen Tools `mrpd` und `mrpValidate` realisieren. Bislang wurde das Tool `mrpd` nur zum passiven Abhören von Nachrichten genutzt, da es empfangene MSRP-, MVRP- und MMRP-Nachrichten in einer internen Datenbank abspeichert, die über das Programm `mrpctl` abgerufen werden können. Jedoch stellt es über das Loopback-Interface eine UDP-Schnittstelle zur Verfügung, mit der sich auch aktiv Streams ankündigen und reservieren lassen.

Mit Hilfe der aktiven Streamreservierung und möglichst mehreren, im Netzwerk verteilten Messpunkten, die untereinander kommunizieren, ist es möglich, reihum Streams zu reservieren (sowohl vorher fehlgeschlagene, als auch eigens zur Verfügung gestellte) und aus den gesammelten MSRP-Nachrichten die Ursache zu ermitteln.

5.3.4 Übertragung von Audio

Eine vollständige Ende-zu-Ende-Überwachung (E2E) ist in der Praxis natürlich nicht durchzuführen, weil zusätzliche Messleitungen zu jedem Knoten zu führen sind, was die Idee des Netzwerks ad absurdum führen würde. Auch bei bisherigen digitalen Systemen wird natürlich nicht separat überwacht, dass jedes Frame fehlerfrei beim Empfänger ankommt. Wie auch weiter oben dient ein E2E-Test vielmehr der Verifikation von weiteren Tests.

Dennoch hat das Überprüfen der fehlerfreien Audioübertragung auch im Labor seine Tücken. Vorherige Abschlussarbeiten in diesem Themenfeld wie Putzke (2011), Kuhr (2012: S. 34ff) und Heyden (2012) beschränken sich auf Messungen inklusive A/D- und D/A-Wandlung. Es ist nicht abzustreiten, dass die Präzision der Zeitreferenz auch direkt die Qualität der Wandlung beeinflusst und im Vergleich Unterschiede aufgrund verschiedener Netzwerktechnologien belegen. Trotzdem besteht die Gefahr, vor allem Wandler und zugehörige PLL zu messen und nicht so sehr netzwerkspezifische Qualitätsparameter. Um beispielsweise über Bursts die Latenz der Übertragung zu verifizieren, kann eine E2E-Überprüfung aber tatsächlich genutzt werden, solange die Wandler vorher separat gemessen worden sind und bei der Auswertung herausgerechnet werden.

Wenn bereits untersucht und verifiziert worden ist, dass die gemeinsame Zeitreferenz im Netzwerk hinreichend gut funktioniert (siehe Abschnitt 5.3.1 und 5.3.2), können sich weitere Tests auf die Überprüfung der Vollständigkeit der digitalen Daten und die Korrektheit der zugeordneten Zeitstempel beschränken.

Aus den in Abschnitt 5.1 herausgearbeiteten Fehlerszenarien bei der Audioübertragung lassen sich demnach folgende zu erfassenden Parameter ableiten:

- Paketverlust

- verspätete (nach der Abspielzeit angekommene) Pakete

In Abschnitt 5.3.3 wurde bereits erwähnt, dass diese Daten über SNMP von einer Bridge abgefragt werden können, soweit diese das SNMP-Protokoll und das SRP MIB unterstützt. Andernfalls ist nur ein rein passives Monitoring über eine Tap zwischen zwei Knoten möglich, da AVTP Pakete nur an den Ports einer Bridge ausgegeben werden, die für den jeweiligen Stream reserviert sind. Allerdings kann ähnlich wie in Abschnitt 5.3.1 ein aktives Monitoring erfolgen, indem ein zu prüfender Stream aktiv reserviert wird. Anhand der Sequenznummer im AVTP Frame kann dann überprüft werden, ob Frames verloren gegangen sind. Weil zur Erkennung als AVB-fähiger Endpunkt ohnehin eine gPTP-Instanz auf diesem Knoten laufen muss, kann im zweiten Schritt der Zeitstempel mit der gPTP-Zeit verglichen werden. Liegt der Abspielzeitpunkt über der aktuellen Zeit, wird das Paket als „verspätet“ gezählt.

Versuch: Einfluss durch Legacy Switch

In den oben behandelten Versuchen wurde jeweils ein Legacy Switch in den Weg zwischen Talker und Listener eingebracht, mit dem Ziel, ihn anhand von Messungen aus der Ferne zu erkennen. Die Messung der Media Clock deutet bereits an, dass auch die Audioübertragung an Qualität einbüßt. Dies soll im folgenden Versuch aber bestätigt werden, um die anderen Messungen zu verifizieren.

Es wird auf einen ähnlichen Aufbau wie in Abschnitt 5.3.2 zurückgegriffen, wobei auf die externe Media Clock verzichtet und an Stelle der Nic-1 ein zweites XMOS-Board verwendet wird. Zusätzlich wird mit einem Prismsound dScope ein Rechteckimpuls erzeugt, auf dem ersten XMOS-Board eingespeist und vom zweiten XMOS-Board wieder abgegriffen. Der zweite Kanal wird als Referenz im dScope durchgeschliffen.

Wie oben erwähnt, müssen die A/D- und D/A-Wandler der Boards separat gemessen werden, damit Fehlinterpretationen hinsichtlich absoluter Werte ausgeschlossen werden. Da die Boards identisch sind, genügt es, auf einem Board die beiden Datensignale des I2S-Signals zu verbinden. Zwar sind alle I2S-Leitungen auf dem GPIO-Header aufgelegt, eine direkte Verbindung scheitert aber an zwei Widerständen zwischen D/A-Wandler, Ausgangspin und Mikrocontroller, an dem die Signale zusammenlaufen. Der entstehende Spannungsteiler halbiert das Signal, so dass die Zustandswechsel nicht mehr vom D/A-Wandler erkannt werden. Um trotzdem eine Messung durchzuführen, ohne Änderungen per Lötkolben vorzunehmen, wurden die entsprechenden Ports des Mikrocontrollers per Firmware-Modifikation auf einen hochohmigen Zustand gelegt, so dass dort keine Spannung mehr abfällt. Mit der modifizierten Firmware können nun die Messungen durchgeführt werden. Alle Messungen wurden mit einer internen Abtastrate von 192 kHz durchgeführt.

Die knapp 8 dB Pegeldifferenz können über die Ein- und Ausgangsbeschaltung der Wandler erklärt werden. Die Ausgangsstufe folgt dem Beschaltungsbeispiel im Datenblatt⁶, wohingegen

⁶http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatashheet/CS4344-45-48_F2.pdf, abgerufen am 1. Juli 2014

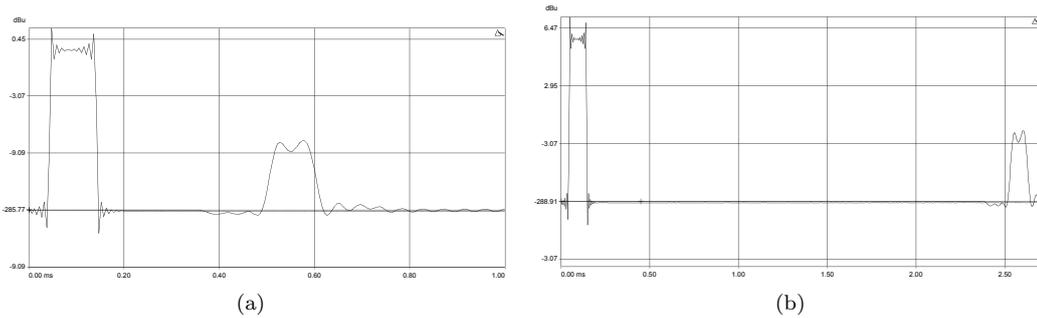


Abbildung 5.16: Messung der Latenz der A/D- und D/A-Wandler der XMOS-Boards und Ende-zu-Ende-Messung über Netzwerk

der Spannungsteiler der Eingangsstufe mit höherer Dämpfung ausgelegt ist⁷. In einer regulären Anwendung würde man den Pegelverlust durch eine Verstärkerschaltung wieder aufholen, dass scheint hier aus Kostengründen eingespart worden zu sein.

Davon abgesehen wird eine Wandlerlatenz von insgesamt 480 μs gemessen. Eine weitere Messung, bei der die beiden XMOS-Boards direkt über ein kurzes Netzkabel verbunden sind, zeigt, dass die 2 ms Latenz präzise eingehalten werden, die Gesamtlatenz liegt bei 2,48 ms. Im eingeschwungenen und synchronisierten Zustand ist außerdem praktisch keine Schwankung der Latenz festzustellen.

Auf die genaue, quantitative Analyse der Übertragung wurde verzichtet, weil dies nicht im Fokus dieser Arbeit liegt. Für den Nachweis der allgemeinen Betriebssicherheit und den Abgleich mit den vorherigen Testverfahren genügt die rudimentäre, qualitative Erfassung der Flanke des Rechtecks und seiner zeitlichen Position in Bezug auf das Referenzsignal.

Als Vergleichsmessung wurde daher wiederum ein Legacy Switch in den Versuchsaufbau eingebracht. Der Trigger des Analyzers der dScope Software wurde auf den Start des Rechteck-Pulses eingestellt, um ein stabiles Bild vom Referenzsignal zu erhalten. Das auf der beiliegenden Daten-CD enthaltene Video zeigt, dass das Audiosignal direkt von der Qualität der Media Clock und damit indirekt auch von der Funktionsfähigkeit der gPTP beeinflusst wird.

Für zukünftige Versuche wäre es wünschenswert, auf die Wandler zu verzichten und direkt auf digitaler Ebene zu messen. Ohne Erweiterungen ist das zur Verfügung stehende dScope allerdings nur mit S/PDIF- bzw. AES3-Schnittstellen ausgerüstet. Die schwerwiegendere Begrenzung ist aber, dass die I2S-Schnittstellen auf den XMOS-Boards nur als Master arbeiten können. Das heißt es ist nicht möglich, ein externes Taktsignal zuzuführen. Endpunkte wie Pivitecs e16i-ADAT lassen sich zwar extern takten, allerdings entfallen die Möglichkeiten, die das Modifizieren der Firmware bietet, wie es bei den XMOS Boards möglich ist.

⁷http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatashheet/CS5343-44_F4.pdf, abgerufen am 1. Juli 2014

5.3.5 Konfiguration und Kontrolldaten

Im Vergleich mit den anderen Protokollen kann bei der Konfiguration und Kontrolle der Geräte via AVDECC vergleichsweise wenig passieren. Wenn es Probleme bei der Erkennung von Geräten gibt (siehe Mac OS X), liegt dies meist nicht an Fehlern im Zusammenhang mit dem AVDECC-Protokoll, sondern an der Implementierung des Gesamtsystems. Nur wenn der AVDECC-Controller nicht Teil der AVB-Wolke ist, kann ein Switch mit deaktiviertem Multicast-Traffic die Daten blockieren. Die Überprüfung davon ist sehr einfach möglich. Sobald eine Controller-Software gestartet wird, sendet sie eine Entity Discover-Nachricht. Ist diese innerhalb der AVB-Wolke sichtbar, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass Multicast-Nachrichten entweder generell freigeschaltet sind, oder über entsprechende Protokolle (IGMP) Multicast-Adressen freigegeben wurden, über die AVDECC-Nachrichten übertragen werden können.

Dass Nachrichten eines AVDECC-Controllers nicht bis in die AVB-Wolke gelangen ist nur durch das Ausschlussverfahren zu ermitteln. Ein Testsystem sollte deshalb bei der Bestandsaufnahme des Systems (siehe Abschnitt 5.3.7) AVDECC-Aktivitäten an den Knoten erkennen und in die Liste der Dienste mit aufnehmen. Wird der Dienst dort nicht aufgeführt, obwohl der Benutzer ihn an dem Gerät erwartet, liegt ein Fehler vor. Auch sollten alle weiteren AVDECC-Eigenschaften, die durch passives Mithören oder aktives Auslesen zu ermitteln sind, aufgelistet werden.

AVDECC-Daten werden nicht von den AV Bridges priorisiert, sondern fallen unter Best Effort-Verkehr. Eine mögliche Fehlersituation ist daher, dass Kontrolldaten durch hohe Netzauslastung mit Fremdverkehr verloren gehen. Der Standard spezifiziert bei verbindungsrelevanten Nachrichten daher einen Wiederholungsmechanismus (Retry), um die Zuverlässigkeit zu erhöhen (IEEE 1722.1 2013: S. 273ff). Allerdings können auch „normale“ Kontrolldaten Schaden verursachen wenn sie ausbleiben (siehe Abschnitt 5.1). Da zu jedem Kommando eine Antwort-Nachricht spezifiziert ist, können die Hersteller sehr einfach einen Wiederholungsmechanismus implementieren. Der tatsächlicher Einfluss von hoher Fremdlast auf die AVDECC-Kommunikation soll dennoch im Folgenden überprüft werden.

Versuch: AVDECC-Kommunikation unter hoher Netzwerkauslastung

Beide XMOS-Boards und ein Linux PC mit einer I210 Netzwerkkarte und der Nic-1 werden wie in Abbildung 5.17 dargestellt über AVB-SW (100 Mbit/s) und Summit X440 (1 Gbit/s) verbunden. Zwei weitere Netzwerkkarten (je 100 Mbit/s) werden am Legacy Switch (1 Gbit/s) angeschlossen. Diese senden über packETH nutzlosen Datenverkehr an den Switch, der die Daten akkumuliert an den X440 weiterreicht. Mit diesem Aufbau ist es möglich, die AV-Bridge an die Auslastungsgrenze zu bringen, ohne dass die Performance des Last erzeugenden Rechners relevant wird. Die Pakete sind an die MAC-Adresse der Nic-1 adressiert, um den Pfad zwischen den AV Bridges zuverlässig auslasten zu können. Am PC werden Kontrolldaten per `avdecc-lib (avdeccmdline)` verschickt und empfangen.

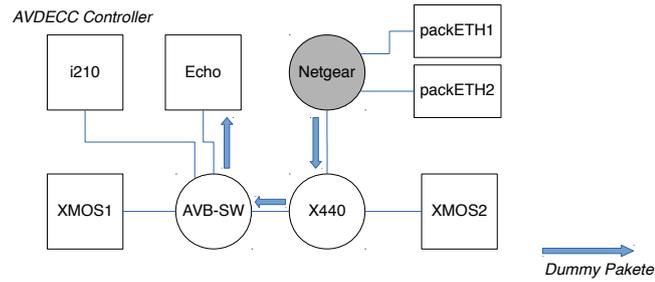


Abbildung 5.17: Versuchsaufbau: „AVDECC-Kommunikation unter hoher Netzwerkauslastung“

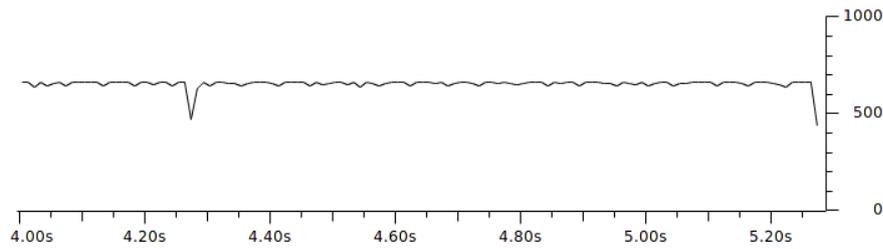


Abbildung 5.18: IO-Graph der Nic-1 bei gestarteten packetETH-Instanzen

Es zeigt sich, dass die AVDECC-Nachrichten auch unter hoher Last (bis etwa 60 Mbit/s) noch problemlos übertragen werden. Längere Paketlaufzeiten im Millisekundenbereich spielen für die Steuerung im Umfeld dieser Arbeit keine Rolle.

Knapp an der Auslastungsgrenze, bei einer Übertragungsrates der Dummy Pakete von etwa 65 Mbit/s⁸ kann das System nur noch partiell kontrolliert werden. Während des Auslesens der Eigenschaften greift bei einigen Anfragen der Timeout, die Entity Available-Nachrichten können jedoch noch empfangen werden. Das Abfragen von Werten bei den XMOS-Boards ist noch möglich, das Setzen und Trennen von Verbindungen nicht mehr (siehe Abbildung 5.19). Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass Eigenschaften einer Entity mithilfe von Unicast-Messages abgefragt werden, Verbindungen jedoch über Multicast-Nachrichten übertragen werden.

Oberhalb der Auslastungsgrenze (des AVB-SW und der XMOS-Endpoints, sowohl Netzwerkkarten als auch Summit X440 haben noch genügend freie Bandbreite) gelangen keine Antworten auf die Kontrolldaten mehr zum kontrollierenden Rechner und anders herum. Keine Abfrage wird mehr erfolgreich beantwortet. Symptomatisch greift das Timeout der avdecc-lib, welches standardkonform auf 250 ms eingestellt ist (vgl. IEEE 1722.1 2013: S. 293, Wert durch Quellcodeanalyse ermittelt). Knoten werden als „Disconnected“ angezeigt. Dieser Mechanismus greift bereits, wenn die periodischen Entity Available-Nachrichten ausbleiben. Dadurch lässt sich auch ein entferntes Netzsegment überwachen. Wiederum müssen diese Status-Nachrichten aber mit anderen Daten wie der im nächsten Abschnitt erörterten Topologie-Entdeckung abgeglichen wer-

⁸Für die Streams der XMOS-Boards ist eine Bandbreite von insgesamt 34 Mbit/s reserviert, Audiopakete werden übertragen

5 Entwicklung einer AVB Testumgebung

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
623798	9.598976000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
947459	14.583270000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
948693	14.602136000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1235227	19.021569000	IntelCor_26:79:44	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	70	AVDECC Connection Management Protocol
1271706	19.586602000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1272925	19.604985000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1345504	20.723450000	Dsp4you_03:3a	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1527017	23.526824000	IntelCor_26:79:44	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	70	AVDECC Connection Management Protocol
1595970	24.589450000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1597177	24.608067000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1920168	29.593023000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
1921342	29.610913000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2243019	34.596137000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2244993	34.614262000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2317656	35.732734000	Dsp4you_03:3a	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2568302	39.599463000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2569458	39.617106000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2892695	44.602553000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
2893835	44.619951000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3051696	47.053149000	IntelCor_26:79:44	XmosSemi_00:43:7c	IEEE1722	42	AVDECC Enumeration and Control Protocol
3051704	47.053380000	XmosSemi_00:43:7c	IntelCor_26:79:44	IEEE1722	64	AVDECC Enumeration and Control Protocol
3217037	49.605889000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3218136	49.622792000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3290425	50.736853000	Dsp4you_03:3a	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3408885	52.564991000	IntelCor_26:79:44	XmosSemi_00:43:7c	IEEE1722	42	AVDECC Enumeration and Control Protocol
3408897	52.565145000	XmosSemi_00:43:7c	IntelCor_26:79:44	IEEE1722	64	AVDECC Enumeration and Control Protocol
3541363	54.609003000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3542473	54.625912000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3865636	59.611865000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
3866729	59.628766000	XmosSemi_00:43:7b	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol
4073127	62.012852000	IntelCor_26:79:44	XmosSemi_00:43:7b	IEEE1722	42	AVDECC Enumeration and Control Protocol
4074379	62.832017000	XmosSemi_00:43:7b	IntelCor_26:79:44	IEEE1722	64	AVDECC Enumeration and Control Protocol
4189062	64.615031000	XmosSemi_00:43:7c	Ieee1722_01:00:00	IEEE1722	82	AVDECC Discovery Protocol

Abbildung 5.19: Eingegangene AVDECC-Pakete

```
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, JACK_OUTPUT, 0, 40)
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor JACK_OUTPUT index 0)
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AVB_INTERFACE, 0, 41)
[NOTIFICATION] (COMMAND_TIMEOUT, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AVB_INTERFACE, 0, UNKNOWN, (nil))
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor AVB_INTERFACE index 0)
[NOTIFICATION] (COMMAND_TIMEOUT, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, LOCALE, 0, UNKNOWN, (nil))
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, LOCALE, 0, 43)
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor LOCALE index 0)
[NOTIFICATION] (COMMAND_TIMEOUT, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 4, UNKNOWN, (nil))
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 4, 53)
[NOTIFICATION] (COMMAND_TIMEOUT, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 7, UNKNOWN, (nil))
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 7, 56)
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor AUDIO_CLUSTER index 4)
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor AUDIO_CLUSTER index 7)
[NOTIFICATION] (COMMAND_TIMEOUT, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 14, UNKNOWN, (nil))
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 14, 64)
[NOTIFICATION] (COMMAND_TIMEOUT, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 15, UNKNOWN, (nil))
[LOG] ERROR (Command Timeout, 0x2297ffffe00437c, READ_DESCRIPTOR, AUDIO_CLUSTER, 15, 65)
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor AUDIO_CLUSTER index 14)
[LOG] ERROR (Background read timeout reading descriptor AUDIO_CLUSTER index 15)
```

Abbildung 5.20: Timeouts der avdecc-lib

den, um zwischen ausgeschaltetem Gerät und ausgefallenem Netzsegment durch Überlastung unterscheiden zu können.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich hier tatsächlich eine Lücke im Standard auftut. Bei sehr hoher Auslastung des Netzwerks werden Kontrolldaten nicht mehr zuverlässig übertragen. Ein möglicher Ausweg ist, AVDECC-Pakete mit einer Priorisierung über den VLAN-Header zu versenden wie von Lim et al. 2012b vorgeschlagen. Bis dahin können mithilfe der avdecc-lib Timeouts erfasst und das System dadurch auch aus der Ferne überwacht werden.

5.3.6 Erkennung von Legacy Switches über passives Monitoring

Nicht AVB-fähige Switches werden im Normalfall zuverlässig von AV Bridges erkannt, andernfalls kann ihre Existenz über Messungen am gPTP nachgewiesen werden (siehe 5.3.1).

Für den Fall, dass das Testsystem direkt am Switch angeschlossen ist, lässt sich anhand der Analyse eingehender Pakete ablesen, dass der Switch nicht AVB-fähig ist. Diese Betrachtung

basiert zwar auf praktischen Erfahrungen in den Vorversuchen, da das Verfahren aber recht trivial ist, wird auf ein detailliertes Versuchsprotokoll verzichtet. Es soll hier vor allem der Vollständigkeit halber eingebracht werden.

Folgende Symptome identifizieren einen Legacy Switch (oder eine fehlerhafte AV Bridge), wenn das Testsystem dort angeschlossen ist:

1. mehr als zwei Delay Requests oder mehr als eine Delay Response-Nachricht pro Anfrage
2. AVTP Pakete nicht reservierter Streams sichtbar
3. MSRP-Nachrichten kommen von verschiedenen Absendern

5.3.7 Entdeckung von Topologie und Diensten

In den verwandten Arbeiten im Bereich Netzwerkanalyse (Abschnitt 4.3) wurde bereits angesprochen, dass die Topologie-Entdeckung in großen Netzwerken ein entscheidender Schritt für die Überwachung und Sicherung der Betriebsbereitschaft ist. Aus den vorhergehenden Abschnitten lässt sich außerdem ablesen, dass die physikalische Struktur eines Netzwerkes nicht zwingend mit der logischen Struktur aus Protokollsicht übereinstimmen muss. Vor allem für eine Testumgebung ist es aber notwendig, den Blick auf das Netzwerk zu haben, so wie es von jedem einzelnen Protokoll gesehen wird. So lassen sich nicht nur protokollspezifisch Hilfestellungen geben, sondern es ist auch eine protokollübergreifende Verknüpfung von Informationen möglich. Der erste Schritt ist, möglichst alle Geräte im Netzwerk zu entdecken, egal ob sie an der Medien- oder Audioübertragung beteiligt sind oder nicht.

Im Bereich von großen Datennetzen wird dafür auf das SNMP zurückgegriffen, um beispielsweise die Routing- und Address-Tabellen möglichst aller Switches auszulesen. Ausgehend von diesen Daten können auch nicht SNMP-fähige Switches erkannt werden (siehe die Arbeiten von Breitbart et al. (2004) und Bejerano (2009)). Weil davon auszugehen ist, dass viele AVB-Bridges SNMP unterstützen werden, ist dies für eine AVB Testumgebung ein guter Ausgangspunkt.

Auch wenn eine AVB-Bridge keine SNMP-Implementierung besitzt (oder diese nicht aktiviert ist), kann ein Auslesen der Tabellen möglich sein. Der AVB-SW von DSP4YOU bietet einen Zugang über Telnet, was das Auslesen der Adresstabelle über Shell-Befehle⁹ ermöglicht.

Versuch: Entdeckung einer unbekanntem Netzwerktopologie

Es wird ein exemplarisches AVB-Audionetzwerk mit allen zur Verfügung stehenden Geräten aufgebaut. Als Ausgangspunkt sind nur die IP-Adressen der beiden AV Bridges AVB-SW und Summit X440 bekannt. Im Folgenden werden alle aus der Ferne abrufbaren Daten genutzt und verknüpft, um auf Topologie und Details über die Geräte zu schließen.

Zunächst werden die Adresstabellen der AV Bridges ausgelesen, per SNMP beim Summit

⁹Mac Adress Table: `cat /proc/driver/mvswitch/dumpfdb` oder `swcfg -atushow 0 0`,
VLAN-Zuordnung: `swcfg -vtushow 0 0`

```

→ ~ snmpwalk 10.0.0.3 -u initial -m ALL 1.3.6.1.2.1.17.4.3
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'....q]' = STRING: 0:0:e8:71:5d:cd
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'....{' = STRING: 0:14:86:0:1:7b
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'....C{' = STRING: 0:22:97:0:43:7b
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'....C]' = STRING: 0:22:97:0:43:7c
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'....}' = STRING: 0:22:97:80:0:b9
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'.0....' = STRING: 0:30:84:b:80:cb
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'.P..3.' = STRING: 0:50:c2:d4:33:19
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'.P..3.]' = STRING: 0:50:c2:d4:33:3a
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbAddress.'.6....' = STRING: a0:36:9f:3a:db:8
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'....q]' = INTEGER: 1
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'....{' = INTEGER: 5
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'....C{' = INTEGER: 1
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'....C]' = INTEGER: 1
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'....}' = INTEGER: 5
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'.0....' = INTEGER: 1
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'.P..3.' = INTEGER: 7
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'.P..3.]' = INTEGER: 1
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbPort.'.6....' = INTEGER: 1
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'....q]' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'....{' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'....C{' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'....C]' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'....}' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'.0....' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'.P..3.' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'.P..3.]' = INTEGER: learned(3)
BRIDGE-MIB::dot1dTpFdbStatus.'.6....' = INTEGER: learned(3)

```

(a)

```

# cat /proc/driver/mvswitch/dumpfdb

Mac Address Table
=====
MacAddress      Trunk  Port  Prio DBNum State Use  FPri QPri
Member         Vec
00:00:e8:71:5d:cd  0    8    0    0    1    0    0    0
00:04:96:97:93:65  0    8    0    0    1    0    0    0
00:14:86:00:01:7b  0    8    0    0    1    0    0    0
00:22:97:00:43:7b  0   16    0    0    1    0    0    0
00:22:97:00:43:7c  0    1    0    0    1    0    0    0
00:22:97:80:00:b9  0    8    0    0    1    0    0    0
00:30:84:0b:80:cb  0    8    0    0    1    0    0    0
00:50:c2:d4:33:19  0    8    0    0    1    0    0    0
00:50:c2:d4:33:3a  0   32    0    0   15    0    0    0
01:00:5e:00:00:01  0  127    0    0    7    0    0    0
01:1b:19:00:00:00  0  127    0    0    7    0    0    0
33:33:00:00:00:01  0  127    0    0    7    0    0    0
33:33:ff:d4:33:3a  0  127    0    0    7    0    0    0
91:e0:f0:00:ff:00  0  127    0    0    7    0    0    0
91:e0:f0:01:00:00  0  127    0    0    7    0    0    0
a0:36:9f:3a:db:08  0    8    0    0    1    0    0    0

```

(b)

Abbildung 5.21: MAC Adresstabellen eines exemplarischen Netzwerks an zwei Punkten über SNMP und Telnet ausgelesen

X440 (Abbildung 5.21a) und per Telnet am AVB-SW (Abbildung 5.21b). Der Switch von DSP4YOU listet auch die Multicast-Adressen, die jeweiligen Bereiche dafür sind aber bekannt und standardisiert, deshalb kann man sie einfach herausrechnen. Übrig bleiben beim AVB-SW zehn Adressen, beim Summit neun. Die überzählige Adresse ist die eigene MAC-Adresse des Switches, die der Summit nicht mit auflistet. Weil die IP-Adresse bekannt ist, kann diese beispielsweise per ARP ermittelt werden, oder man stellt eine weitere Anfrage per SNMP (BRIDGE-MIB::dot1dBaseBridgeAddress). Um alle nötigen Informationen zu extrahieren, ist ein weiterer Zwischenschritt nötig, da der AVB-SW die Ports als Vektoren darstellt (Multicast-Adressen müssen mehreren Ports zugeordnet werden können). Wandelt man die Werte in die Binärdarstellung um, lässt sich aus der Position des gesetzten Bits der Port ablesen (Bitfeld), beginnend bei Index 0. Weil der AVB-SW nur 5 Ports besitzt, entspricht Index 5 also der internen Adresse. Daraus ergibt sich Tabelle 5.3.7. Aus der Tabelle lässt sich bereits ablesen, dass es mindestens zwei weitere Switches gibt. An Port 5 des Summit sind zwei Mac-Adressen gelistet, der DSP4YOU-Switch ist aber an Port 1 angeschlossen. Außerdem wird a0:36:9f... jeweils auf den Port des anderen Switch verwiesen, deshalb muss sich auch da noch ein weiterer Knoten befinden.

In den verwandten Arbeiten wird zumeist vorgeschlagen, durch Pings oder ARP-Anfragen an einen IP-Adressbereich die Adresstabellen der Switches aufzufüllen, um bisher nicht aktiv kommunizierende Knoten entdecken zu können. Weil ein AVB-Audionetzwerk vollständig auf Layer 2 betrieben werden kann, sind aber mitunter überhaupt keine IP-Adressen vergeben. Dennoch kann es in heterogenen Netzwerken wie dem beschriebenen Studio-Konzept hilfreich sein, einen DHCP-Client auf dem Messsystem zu starten, um zu ermitteln, ob sich im Netz ein DHCP-Server befindet. Mit dem Bereich der zugewiesenen Adresse kann dann doch ein Ping Scan (z.B. mit dem Tool nmap) gestartet werden. Außerdem kann im Adressbereich vom Zero-Conf-Verfahren (Bonjour), 169.254.0.0/16, ein Scan gestartet werden. Eine weitere

MAC	Port AVB-SW	Port Summit
00:04:96:97:93:65	4	intern
00:50:c2:d4:33:3a	intern	1
00:14:86:00:01:7b	4	5
00:22:97:00:43:7b	5	1
00:22:97:00:43:7c	1	1
00:22:97:80:00:b9	4	5
00:50:c2:d4:33:19	4	7
a0:36:9f:3a:db:08	4	1

Tabelle 5.2: bereinigte Adresstabellen der beiden Switches

Quelle für IP-Indizien ist eine direkte Abfrage der ARP-Tabelle des Switches über SNMP (IP-MIB::ipNetToMediaPhysAddress).

Im untersuchten Versuchsaufbau hat die ARP-Tabelle lediglich eine Zuordnung enthalten (a0:36:9f:3a:db:08 \Rightarrow 10.0.0.2). Eine weitere IP-Adresse konnte noch durch die Beobachtung der Pakete an einem Switch-Port in Erfahrung gebracht werden. Von 00:14:86:00:01:7b (10.0.1.1) wurden verschiedene Daten an die Broadcast-Adresse versendet, unter anderem Pakete mit dem Dropbox LAN Sync Protokoll und NetBios Domain/Workgroup-Announce-Nachrichten. Der PC an Port 5 des Summit (über einen weiteren Switch angebunden), ist also voraussichtlich ein Windows-Rechner, auf dem ein Dropbox-Client läuft. Auch aus Sicherheitsaspekten ist solch eine Analyse hilfreich, etwa wenn Netzwerkanschlüsse frei zugänglich sind.

Die Aufschlüsselung aller gängigen Dienste, über die sich Mac OS X und Windows im Netz erkennen zu geben können, sprengt den Rahmen dieser Arbeit. Es konnte jedoch exemplarisch gezeigt werden, dass über das Auslesen der Switches hinaus auch durch Beobachtung des Netzverkehrs weitere Geräte sowie deren Eigenschaften ausfindig gemacht werden können. Besonders wertvoll sind in diesem Sinne natürlich AVB-zugehörige AVDECC-, MSRP- und gPTP-Nachrichten.

Wünschenswert wäre es außerdem, Daten über das Rapid Spanning Tree Protocol (siehe Abschnitt 3.8) in Erfahrung zu bringen. Insbesondere die Kenntnis über die alternativen Pfade kann Aufschluss darüber geben, ob im Fehlerfall eine Umschaltung möglich ist. Das Auslesen dieses Protokolls ist nach Wissen des Autors aber nur über das SNMP an Bridges möglich, soweit sie es unterstützen. Da zu den Endpunkten nur Nachrichten der nächstgelegenen Bridge gelangen, ist eine Abfrage hierüber von einem Punkt aus nicht möglich. Einzig die Root Bridge lässt sich aus der BPDU noch auslesen, sowie die Path Cost dorthin. Wenn es, beispielsweise über mehrere verteilte Messpunkte, die Möglichkeit gibt, die jeweils empfangenen Nachrichten logisch zu verknüpfen, lässt sich der Baum zumindest teilweise rekonstruieren.

6 Praxiseinsatz – der „AVB Doctor“

6.1 Zusammenfassende Systemanalyse

Im Abschnitt 4.3 ist bereits auf die Arbeit von Varga & Moldován (2007) hingewiesen worden. Dort wird aufgezeigt, wie Daten verschiedener Quellen im gesamten System gesammelt und anschließend verknüpft werden können. Außerdem bietet das System die Möglichkeit, weitere Datenerhebungen oder Messungen anzustoßen, wenn bestimmte Ereignisse eintreten. Durch diesen ganzheitlichen Ansatz werden Probleme und Fehler im Netzwerk nicht nur erkannt, sondern es kann auch deren Ursache (Root Cause) analysiert werden, was zu einer schnellen Fehlerbehebung beitragen kann. Diese Maßnahmen ermöglichen schließlich, die Übereinkunft zwischen den Anbietern der Netzwerkinfrastruktur und deren Kunden (Service Level Agreement) zu überwachen. Außerdem geben sie den Anbietern Mittel an die Hand, das Servicelevel über dem vereinbarten Schwellwert zu halten.

Implizit besteht auch zwischen den Benutzern eines Audionetzwerks und den Verfassern des Standards, Herstellern der Geräte und überwachenden Instanzen (hier die AVnu Alliance) eine Übereinkunft in Bezug auf die Betriebsbereitschaft. In der vorliegenden Arbeit wurde bereits herausgearbeitet, welche Parameter im Bereich der professionellen Musikproduktion zu überwachen sind und welche Grenzwerte das System einzuhalten hat.

Nicht nur darin besteht ein Zusammenhang zwischen dem von Varga und Moldovan entwickelten Fault Management System (FMS) und einer Überwachungsplattform für AVB. In der Vorstellung der Testverfahren (Abschnitt 5.3) wird häufig darauf verwiesen, dass die beteiligten Protokolle eng verzahnt sind und erst eine Zusammenfassung der Daten Rückschluss auf den Zustand eines Moduls ermöglicht. Das FMS arbeitet dabei auf der Basis von Ereignissen (Event), die gesammelt und gefiltert werden, um dann auf Basis des Ereignisses in Bezug auf vorherige Daten oder Zuhilfenahme Aktionen ausführt (siehe Abbildung 6.1).

Das hier zu entwickelnde System unterscheidet sich dahingehend vom FMS, dass Ereignisse nicht beliebig über SNMP oder Syslog abrufbar sind. Häufig müssen basierend auf einem Event weitere Informationen gesammelt werden, um das Problem vollständig beschreiben zu können. Deshalb ist es sinnvoll, Module zur Analyse der Fehlerursache (Root Cause Analysis) mit dem Event Processor zusammenzulegen. Die Ereignisse müssen bei der Erzeugung deshalb bereits gefiltert und aufbereitet werden, um zielgerichtet weiterverarbeitet werden zu können. Varga und Moldován definieren Ereignisse unmittelbar als Nachrichten aus dem System, die zuerst gefiltert werden müssen. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Modulstruktur unterscheidet sich

Data Miner. Schließlich sollte auch dem Benutzer über die grafische Oberfläche die Möglichkeit gegeben werden, manuell Ereignisse auszulösen.

6.1.1 Ereignisse

Für die fünf möglichen Typen werden im Folgenden exemplarisch Ereignisse mit auszuführenden Aktionen, Verknüpfungen und Schlussfolgerungen gelistet.

AVDECC: Verbindung hergestellt

Das Ereignis kann unmittelbar aus empfangenen AVDECC-Nachrichten generiert werden. Hierzu werden folgende Nachrichtentypen ausgelesen: Connect TX Command/Response, Connect RX Command/Response, Disconnect TX Command/Response, Disconnect RX Command/Response.

Nach dem zwei AVDECC-Endpunkte die Verbindung ausgehandelt haben, kann das Ereignis an den EVP weitergegeben werden. Dieser muss im nächsten Schritt entscheiden, ob es notwendig ist, beispielsweise anhand des MSRP zu überprüfen, ob tatsächlich ein Stream erfolgreich reserviert worden ist.

AVDECC: Verbindung fehlgeschlagen

Der AVDECC Ereignisgenerator muss nach Empfang einer Command-Nachricht auf die entsprechende Antwort warten. Bleibt sie aus (Timeout), kann dies als Ereignis weitergegeben werden, woraufhin der EVP folgende mögliche Probleme ableiten kann: Gerät nicht mehr verfügbar, Netzwerksegment ausgefallen, Blockierung der Nachrichten durch hohe Auslastung eines Netzwerksegments.

Wird eine Antwort empfangen, werden dort das Status-Feld und das Signalfeld (Flags Field) ausgelesen. Lautet der Status nicht Success oder ist das Talker Failed-Flag gesetzt, sendet er die Information als Ereignis weiter („Verbindung fehlgeschlagen, Talker Failed“).

AVDECC: neues Gerät

Das Event wird im Regelfall über eine Entity Available-Nachricht ausgelöst. AVDECC-Endpunkte, die sich nur während der Verbindungsaufnahme zu erkennen geben, wie die AVDECC-Implementierung von Mac OS X, können zusätzlich über die in anderen Nachrichten enthaltenen IDs erkannt und gemeldet werden (Talker ID, Listener ID).

Der EVP kann anhand des Events die Topologie-Daten ergänzen und über Filterung oder den Abgleich mit historischen Daten entscheiden, ob er weitere Informationen über den Data Miner abrufen.

AVDECC: Gerät getrennt

Wenn sich eine AVDECC Entity über Entity Departed abmeldet, wird dieses Ereignis gesendet. Ein interner Timer im AVDECC Ereignisgenerator kann außerdem eine Entität, die sich lange nicht zu erkennen gegeben hat, an den EVP melden, der dies durch aktives Probing des

AVDECC Data Miners überprüfen kann.

MSRP: Talker Failed

Im Gegensatz zu Listener Failed-Nachrichten sind Talker Failed-Nachrichten ab dem Punkt des Fehlers im Netzwerk sichtbar. Erkennt der MSRP Ereignisgenerator diese Nachricht, übergibt er die Information dem EVP. Ein weiteres Ereignis des Moduls ist die Talker Advertise-Nachricht, um die Topologie-Datenbank entsprechend zu ergänzen.

gPTP: Wechsel Grandmaster

Für dieses Ereignis werden die TLV Informationen aus der Sync Follow Up-Nachricht des gPTP ausgelesen.

gPTP: Schwankungen Zeitreferenz

Weil aus den in Abschnitt 5.3 genannten Gründen ohnehin ein gPTP Daemon auf dem Messsystem laufen muss, können die Daten der Zeitreferenzmessungen (wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben) zur Erfassung eines Wechsels genutzt werden. Liegen die gemessenen Werte oberhalb eines Grenzwertes, wird das Ereignis zum EVP gesendet, der es mit weiteren Daten (Wechsel Grandmaster, fehlgeschlagene Reservierungen, unterbrochene Audioübertragung) korrelieren kann.

RMON: Paketverluste

Für alle Bridges und Endpunkte, die einen SNMP Server und das entsprechende MIB implementieren, kann periodisch ausgelesen werden, ob Paketverluste vorliegen.

RMON: Hohe Netzwerkauslastung

In der gleichen Art kann die Zahl übertragener Pakete über die Zeit ausgewertet und ab einem Grenzwert an den EVP gemeldet werden. Dieses Ereignis spricht für die Notwendigkeit einen Rückkanal vom EVP zu den Ereignisgeneratoren zu schaffen, über den Grenzwerte eingestellt werden können.

RSTP: Wechsel der Root Bridge / Änderung Path Cost

Die genaue Untersuchung des RSTP wurde aus den in Abschnitt 3.8 genannten Gründen nicht explizit in den Testverfahren behandelt. In der zusammenfassenden Systemanalyse kann das Sammeln der am Messpunkt verfügbaren Informationen allerdings helfen, Änderungen der Netzwerkpfade zu erkennen. Dies kann beispielsweise der Erkennung von ausgefallenen Geräten oder defekten Kabeln dienen.

Topologie: neues Gerät / Gerät ausgefallen

Der Topologie-Ereignisgenerator ist ein Beispiel dafür, dass es sinnvoll sein kann, in einem Modul bereits eine interne Datenbank zu pflegen und Daten gesammelt an den EVP weiterzugeben, um ihn zu entlasten und die Modularität zu stärken. So ist es zwar nützlich, ein neues Gerät anzukündigen, der EVP müsste aber viele Prozesse manuell in Gang setzen, um die Position

im Netzwerk herauszufinden. Besser ist es also, wenn das Topologie-Modul periodisch Bridges über die genannten Methoden abfragt und bereits intern eine Topologie-Analyse durchführt. Die Korrelation mit anderen Diensten (z.B. AVDECC) führt der EVP gesondert durch.

Benutzer: Unterbrechungen im Audiosignal / angeschlossenes Gerät nicht verfügbar

Selbst wenn die automatische Erkennung von Problemen fehlschlägt, ist es notwendig, diese Information explizit vom Benutzer zu erhalten. Dadurch können benutzergenerierte Ereignisse vom EVP mit anderen Events korreliert werden, um die Ursache zu analysieren und Hilfestellungen anzubieten.

Exemplarisch seien wahrgenommene Dropouts im Audiosignal genannt. Interessant ist in dem Zusammenhang, ob der EVP erkennen kann, dass das Problem nicht am Audionetzwerk gelegen hat, sondern beispielsweise in der DAW aufgetreten ist.

Ebenfalls ein wichtiges Instrument für den EVP ist die Information, dass ein angeschlossenes Gerät entweder nicht in der gelisteten Topologie des Testsystems, oder nicht im AVDECC Controller des Benutzers erscheint. Zumindest im letztgenannten Fall kann sich der EVP selbst auf die Suche begeben. Die erste Situation sollte sich im fertigen System nicht ergeben, außer der Benutzer hat das Gerät mit der falschen Netzwerkbuchse verbunden.

Benutzer: Snapshot aktueller Systemzustand

Dieses Ereignis kann eine halbautomatisierte Funktion anstoßen, die der Netzwerksicherheit dient. Drückt der Benutzer den entsprechenden Knopf im Programm, wird der aktuelle Systemzustand in der Datenbank gespeichert. Werden im Folgenden Abweichungen festgestellt, wie beispielsweise das versehentliche oder nicht autorisierte Hinzufügen eines Gerätes, kann das Programm den Nutzer darüber informieren.

6.1.2 Burn In-Test

Ein entscheidender Unterschied zwischen einem anbieterübergreifenden, weitläufigen Datennetzwerk und einem AVB-System besteht in der Laufzeitdauer des Systems. Im ersten Fall werden zwar einzelne Segmente und Knoten vom Netz genommen oder hinzugefügt, es ist aber unwahrscheinlich, dass das gesamte Netzwerk komplett heruntergefahren und später wieder eingeschaltet wird. Bei Audionetzwerken hingegen kommt dies sprichwörtlich täglich vor. Auf der einen Seite besteht dadurch das Risiko, dass die Reihenfolge, in der Dienste und Geräte eingeschaltet werden, zu Problemen bei der Inbetriebnahme führt. Andererseits wird hierdurch die Möglichkeit eröffnet, nach dem Hochfahren des Systems einen Burn In-Test vorzunehmen, der wichtige Aspekte ohne Rücksicht auf laufende Audioübertragungen prüfen kann. Aus den Daten dieser Tests können danach Ereignisse generiert werden, die initial die Datenbank füllen und sich so bereits verknüpfen lassen, um auf bestehende Probleme hinzuweisen.

6.2 Substitution von Labor-Apparatur und Automatisierung

Die Testverfahren in Abschnitt 5.3 wurden bereits im Hinblick darauf entworfen, sowohl von einem zentralen Punkt im Netzwerk aus zu agieren, als auch automatisiert ablaufen zu können. Dennoch lassen sich einige Tests kaum durchführen, ohne dScope, Oszilloskop oder Network Tap zu benutzen. Diese Verfahren setzen außerdem häufig voraus, dass sich an den Geräten Ein- und Ausgänge für Wordclock und Audiosignale befinden, um die Apparatur anzuschließen. Dies ist beispielsweise bei Netzwerkinterfaces für den PC selten der Fall. Andere Messungen erfordern, dass das laufende System bewusst Fehlern ausgesetzt wird, um aus dem Verhalten der beteiligten Geräte Schlussfolgerungen für mögliche Probleme zu ziehen. Eine weitere Kategorie bilden Verfahren, bei denen das Testsystem aktiv an der Übertragung von Nutzdaten beteiligt ist und dadurch Bandbreite im Audionetzwerk konsumiert, welche folglich für nicht mehr für den produktiven Betrieb zur Verfügung steht.



Abbildung 6.3: Durchführbarkeit und Nebenwirkungen von Testverfahren im Regelbetrieb

Die Grafik 6.3 veranschaulicht, dass mit steigender Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse auch Aufwand und Beeinträchtigung des Regelbetriebes zunehmen. Für den AVB Doctor entfallen somit alle der roten Kategorie zuzuordnenden Verfahren. Im Einzelnen sind das die Erfassung der Audiolatenz und zeitliche Schwankungen des Audiosignals (Laufzeitfehler), die Überprüfung der regenerierten Wordclock, sowie das Verifizieren der gPTP-Synchronisation an beliebigen Knoten.

Für den orangefarbenen und gelben Sektor wird vorausgesetzt, dass an mehreren Knoten (im Idealfall an jeder Bridge) ein Messpunkt installiert ist, der seine Daten zum zentralen Messsystem schickt oder Befehle von dort entgegennimmt. Die Erfassung von Daten an mehreren Punkten wird vor allem von den gPTP-Testverfahren vorausgesetzt, um belastbare Ergebnisse über deren Zuverlässigkeit zu erhalten. Ein anderer Weg wurde durch das Übernehmen der

Grandmaster-Rolle aufgezeigt, was aber voraussetzt, dass der Produktivbetrieb des Netzwerkes unterbrochen werden kann. Es wurde in den Testverfahren weiterhin gezeigt, dass sich verlässliche Ergebnisse über die Media Clock nur erzielen lassen, wenn die Zeitstempel mehrerer Streams verglichen werden können. Dies beeinträchtigt zwar den Regelbetrieb nicht, erfordert aber, dass zusätzliche Bandbreite auf dem Weg zum Messsystem reserviert wird, oder wahlweise verteilte Messpunkte die Daten aufzeichnen und gesammelt an den auswertenden Punkt senden.

Der grüne Bereich schließlich enthält fast ausschließlich Testverfahren, die sich auf die korrekte Funktion der im Standard enthaltenen Protokolle stützen. Sie lesen passiv Nachrichten mit und fragen aktiv Statusmeldungen und Eigenschaften von den beteiligten Endpunkten und Bridges ab. Das setzt nicht nur die Zuverlässigkeit der erfassten Werte, sondern auch die Kooperation der Geräte voraus, um über zusätzliche Protokolle wie SNMP Daten abzurufen.

Ein weiterer Punkt, der bis zu einem funktionierenden AVB Doctor gelöst werden muss, ist die automatisierte Auswertung von statistischen Daten. Für die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Verfahren, bei denen statistische Auswertungen erfolgt sind, wurden die Daten in csv-Textdateien exportiert, um sie anschließend über Programme wie Gnuplot und Scidavis zu visualisieren und auszuwerten. Die Möglichkeit, Daten permanent und kontinuierlich auszuwerten und bei vorher festgelegten (oder automatisch ermittelten) Grenzwerten eine Nachricht zu versenden, muss hierfür implementiert werden. Dies ist jedoch ein eigener großer Bereich, der momentan durch Themen wie Big Data ausführlich wissenschaftlich behandelt wird und damit die Grenzen der vorliegenden Arbeit bei weitem überschreitet.

6.3 Miniaturisierung

Die Testverfahren wurden bis zum Abschluss dieser Arbeit auf handelsüblichen PCs (x86-Architektur) mit Linux-Betriebssystem durchgeführt. AVB-spezifische Voraussetzungen an die Hardware wurden durch Einsatz einer Netzwerkkarte mit Intels I210 Netzwerkcontroller gelöst. Von Anfang an war jedoch das Ziel, dass das System auf einem Einplatinenrechner in der Größe einer Zigarettenschachtel laufen kann. Die Notwendigkeit, mehrere zusätzliche Messpunkte ins System einzubringen, überführt diesen Wunsch in eine Anforderung, damit das System tatsächlich für den Praxiseinsatz tauglich ist.

Waren Einplatinenrechner ursprünglich vor allem in fertigen Produkten anzutreffen¹, hat der Raspberry Pi ihren Siegeszug für den Einsatz als Hobby- und Experimentierplattform eingeläutet. 2008 ursprünglich als Lehr- und Lernplattform für Kinder entwickelt², ist er heute in vielen Haushalten anzutreffen und verrichtet dort seinen Dienst als Medienzuspieler, Lichtsteuerung oder Server. Grund dafür (und der größte Unterschied zu oben genannten Routern) ist die Zugänglichkeit zu Dokumentations- und Schulungsmaterialien, sowie der große Fundus fertiger Software, der gemeinschaftlich und quelloffenen gepflegt wird. Mittlerweile wird der Raspberry Pi sogar von Herstellern im Bereich der professionellen Audiotechnik als Netzwerkerweiterung

¹tatsächlich läuft auf den meisten heimischen Internet-Routern ein Linux-System auf einem Einplatinenrechner
²<http://www.raspberrypi.org/about/>, abgerufen am 5. Juli 2014

zur Kontrolle von Geräten für den Produktivbetrieb in Erwägung gezogen³.

Spätestens die Nutzung quelloffener Tools als Grundlage für die im AVB Doctor zu implementierenden Verfahren und die damit verbundene Verpflichtungen (zumindest moralisch), den Quelltext ebenfalls zugänglich zu machen, legt die Nutzung einer offenen und zugänglichen Plattform wie dem Raspberry Pi nahe.

Allerdings setzt AVB für einen standardkonformen Betrieb voraus, dass Zeitstempel der Präzision wegen in Hardware erfasst werden und dass der Netzwerkcontroller mehrere Warteschlangen bereitstellt, um den FQTSS-Mechanismus zuverlässig implementieren zu können. In den vorhergehenden Kapiteln wurde allerdings herausgearbeitet, dass es für die meisten Verfahren ausreichend ist, nur einen gPTP Daemon zum Empfang von AVB-Streams bereitzustellen. Die Priorisierungsmechanismen hingegen werden nur für das Senden benötigt. Ursprünglich entstand in diesem Zusammenhang die Idee, die Zeitstempel-Mechanismen so gut es geht in Software zu implementieren und trotzdem als Hardware-gestützt zu kennzeichnen, um den übrigen AVB-fähigen Geräten Kompatibilität vorzutäuschen. Die Verfahren zur Überprüfung der Zeitreferenz (siehe Abschnitt 5.3.1) setzen hingegen präzise Messungen der Timestamps voraus. Damit scheidet der Raspberry Pi als Plattform aus, weder dessen MAC, noch der PHY unterstützen das Erfassen von Zeitstempeln.

Der Prozessor (SoC, System on Chip) des Beaglebone Black, der zu einem ähnlichen Zweck entwickelt worden ist, unterstützt den IEEE 1588v2-Standard auf MAC-Ebene und kommt somit in Frage⁴. Dem Autor ist es in Versuchen aber nicht gelungen, den Linux-Kernel mit entsprechenden Patches zu versehen, um die Hardware-Unterstützung derart zu aktivieren, dass die PTP-Implementierung `linuxptp` sie erkennt. Die Situation wird sich mit der Weiterentwicklung der Kernel-Treiber verbessern, so dass dieses Board in der Zukunft verwendet werden kann.

Ein weiterer quelloffener Einplatinenrechner ist das Riotboard⁵, das auf dem SoC i.MX6 Solo von Freescale basiert. Unter der Linux-Distribution ArchLinux, die auch für ARM-basierte Prozessoren erhältlich ist, war es ohne Probleme möglich, einen hardwaregestützten gPTP-Daemon auszuführen, der sowohl vom AVB-SW als auch vom Summit X440 problemlos und reproduzierbar als 802.1AS-fähig erkannt worden ist. Im Gegensatz zu den anderen Boards unterstützt der Ethernet-Port außerdem 1 Gbit/s, so dass auch Verfahren, die einen hohen Netzwerkdurchsatz benötigen (Erzeugung von Last), dort ausgeführt werden können. Die Implementierung eines AVB konformen Talkers, der das FQTSS unterstützt, ist aber auch auf dem Riotboard nicht ohne Weiteres möglich, weil der Netzwerkcontroller je nur eine Warteschlange (Queue) für das Senden und Empfangen von Paketen bereitstellt⁶. Eine aufwändige Implementierung in Software über ein echtzeitfähiges Betriebssystem ist zwar denkbar, aber wegen des hohen Aufwands nicht wirtschaftlich.

Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieser Arbeit bietet sich das Riotboard somit als ideale

³siehe http://www.directout.eu/upload/dokumente/info_do_net_e_v11.pdf, abgerufen am 1. Juli 2014

⁴<http://beagleboard.org/black>, Datenblatt des Prozessors: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/am3359.pdf>, jeweils abgerufen am 1. Juli 2014

⁵<http://riotboard.org/>, zuletzt abgerufen am 7. Juli 2014

⁶laut Ausgabe von `ethtool -S eth0` und `ls /sys/class/net/eth0/queues/`

Plattform für die Entwicklung und Ausführung des AVB Doctors an.

6.4 Abgleich von Zielen und Lösungen

Es sollte ein Testsystem entworfen werden, mit dessen Hilfe ein Tontechniker, Toningenieur oder Tonmeister ohne tiefes Wissen im Bereich Netzwerktechnik die Betriebsbereitschaft eines AVB-Audionetzwerks nachprüfen kann, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Zu diesem Zwecke musste zunächst in einer Laborumgebung nachgewiesen werden, dass es möglich ist, Fehlerzustände im System zu erkennen. Es wurden in Kapitel 5.3 Testprozeduren entwickelt und verifiziert, um Fehlkonfigurationen, Softwarefehler, nicht AVB-fähige Switches und defekte Kabel zu erkennen.

Die Erkennung von Ethernet Switches erfolgt über protokolleigene Nachrichten von MSRP, sowie über das Auslesen von Informationen aus AV Bridges über SNMP und Telnet. Für den Fall, dass das Auslesen nicht unterstützt wird oder das MSRP-Nachrichten am Messsystem nicht verfügbar sind, wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, welches über den Abgleich von Synchronisationsdaten des gPTP und Fehlerinjektion einen Legacy Switch erkennt.

Für das Überprüfen der einheitlichen Zeitreferenz im Netzwerk wurde die Firmware und Software von Entwicklungsboards und einer Netzwerkkarte modifiziert, um mit der Zeitreferenz synchrone Signale an Ausgängen abgreifen und über ein Oszilloskop kontrollieren zu können. Im Hinblick auf die Automatisierung der Tests wurden zwei weitere Verfahren vorgestellt. Das eine stützt sich auf das Auslesen von Nachrichten des gPTP-Protokolls an mehreren Punkten im Netzwerk, um Indikatoren für eine nicht einheitliche oder ungenaue Zeitreferenz zu ermitteln. Das andere nutzt die Möglichkeit, kontrolliert Messpunkte im Netzwerk zum Grandmaster zu erheben und durch das Verhalten an den übrigen Punkten die Funktionsfähigkeit des Systems zu überprüfen.

Das automatisierte Überprüfen der Zeitreferenz erfordert allerdings einen hohen Aufwand und ist nicht im Regelbetrieb einer Produktion durchführbar. Die Genauigkeit der Messungen ist ebenfalls sehr gering. Weitere Methoden, die eine höhere Präzision erreichen, sind in der Zukunft zu erarbeiten.

Für die Kontrolle einer funktionierenden Media Clock im AVB-Audionetzwerk, die an allen nötigen Punkten einheitlich ist, wurde ein Programm entwickelt, welches mehrere Audiostreams reservieren und die Zeitstempel sowie weitere Informationen aus den Paketen extrahieren kann. Bisher wurden die Daten manuell über Diagramme und ein Statistikprogramm ausgewertet. Als nächster Schritt ist eine Weiterentwicklung des Tools notwendig, um ausgelesene Zeitstempel automatisiert auswerten und direkt in Beziehung setzen zu können.

Es wurde gezeigt, dass Fehler bei der Bandbreitenreservierung in der Regel über AVB-eigene Protokolle kommuniziert werden können. In Versuchen ist aber nachgewiesen worden, dass von dieser Möglichkeit in der Praxis noch kein Gebrauch gemacht wird. In der Folge wurden mit Hilfe von Programmen aus dem OpenAVB-Repository weitere Tests durchgeführt, um zu ermit-

teln, wie die notwendigen Informationen über Probleme und Fehler an einem zentralen Punkt gesammelt werden können. Es wurde abschließend ein Weg aufgezeigt, dieses Verfahren mit Hilfe bestehender und neu zu entwickelnder Programme automatisiert umzusetzen. Die Implementierung steht jedoch noch aus.

Für die Überprüfung einer fehlerfreien Audioübertragung wurde mit einem Versuch demonstriert, welche Einflüsse die an ein AVB-Modul angegliederten Komponenten A/D- und D/A-Wandler auf eine Ende-zu-Ende-Messung haben. Es wurde gezeigt, welche Maßnahmen notwendig sind, um zuverlässige Messungen auch bei der Inbetriebnahme eines Produktivsystems vorzunehmen. Da der Aufwand für derartige Verfahren hoch ist, wurde auf Möglichkeiten hingewiesen, durch aktives Reservieren der Streams durch das Messsystem oder das Auslesen von Information aus Bridges und Endpunkten Fehler in der Audioübertragung zu erkennen. Ein Babbling Idiot wurde zwar als Firmware-Modifikation entwickelt und in Vorversuchen eingesetzt und verifiziert, protokollierte Messungen wurden damit allerdings nicht durchgeführt.

In einem Versuch zur Übertragung von Konfigurations- und Kontrollnachrichten im Netzwerk wurde nachgewiesen, dass das Protokoll Schwächen in Bezug auf eine hohe Netzwerkauslastung aufweist. Es wurde erläutert, wie mit Hilfe der quelloffenen `avdecc-lib` und Verfahren zur Topologie-Erkennung überlastete Netzwerksegmente und in der Folge verlorene AVDECC-Nachrichten erkannt werden können.

Die Funktion der zu dieser Testprozedur notwendigen Topologie-Erkennung wurde mit einem exemplarischen Versuch nachgewiesen. Es wurde diskutiert, dass die Kooperation von AV Bridges wünschenswert ist, um eine genaue Aufschlüsselung der Topologie, sowie der tatsächlich genutzten Pfade bei redundanten Verbindungen zu erreichen. Die Implementierung eines Programms zur automatisierten Erkennung von Netzwerken steht noch aus.

Im Abschnitt 6.1 wurde die Struktur für ein System vorgestellt, welches die entwickelten Testverfahren und Programme nutzt, um aus den einzelnen Daten eine Aussage über die Betriebssicherheit im AVB-Audionetzwerk zu treffen. In Abschnitt 6.2 wurde die Praxistauglichkeit des Systems diskutiert, wobei festzustellen ist, dass sich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ein gleichzeitiger Betrieb und eine lückenlose Überwachung ausschließen. Außerdem nimmt der Aufwand zu, je zuverlässiger das Netzwerk untersucht werden soll.

Der Abschnitt 6.3 schließlich weist darauf hin, dass die Umsetzung eines solchen Systems auf günstigen, gut dokumentierten und hinreichend kleinen Einplatinenrechnern mit dem Betriebssystem Linux möglich ist.

Abschließend betrachtet wurden viele der notwendigen Testverfahren herausgearbeitet, mit denen die Betriebsbereitschaft eines AVB-Audionetzwerkes überprüft und damit die Betriebssicherheit gewährleistet werden kann. Es wurden Programme entwickelt, die als Basis für ein vollautomatisiertes System dienen können. Weiterhin sind zusätzliche, bereits verfügbare, Bibliotheken für den Kern des Systems aufgezählt und untersucht worden. Die Struktur für ein solches System wurde vorgestellt. Damit sind alle Voraussetzungen erfüllt, unter Verwendung dieser Arbeit ein funktionsfähiges System zu implementieren.

7 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über den Einsatz von Audionetzwerken im Bereich der professionellen Musikproduktion. Neben dem Ermitteln technischer Anforderungen wurde auch herausgearbeitet, dass die Betriebssicherheit in diesem Feld einen hohen Stellenwert hat, sollen etablierte Lösungen wie das MADI-Protokoll durch technisch vielfach komplexere Netzwerksysteme abgelöst werden. Dabei erweist sich der offene Standard AVB im Hinblick auf die Betriebssicherheit als geeignet, dennoch können nicht alle Probleme im herstellerübergreifenden Zusammenspiel abgefangen werden. Deshalb wurden mögliche Fehlerszenarien analysiert, die die Betriebssicherheit gefährden und nach Lösungen gesucht, Probleme zu erkennen und Hilfestellung für die Behebung zu geben.

Im Einzelnen hat das Aufstellen von exemplarischen Aufnahmeszenarien dazu beigetragen, sehr praxisnah am Thema arbeiten zu können. Infolgedessen konnte klar formuliert werden, welche Ansprüche hinsichtlich technischer Voraussetzungen, aber auch in Bezug auf Support, Wartung und Erweiterbarkeit an Netzwerksysteme zu stellen sind. Dennoch unterscheiden sich Aufnahmesituationen meist im Detail. Dies können Beispiele nicht abbilden, dennoch wurde versucht, die Szenarien umfassend genug auszulegen.

Hieraus leitet sich gleichzeitig ab, dass Aufwand und Kosten die Summe vieler Parameter sind. So wurde deutlich, dass bei kleinen Aufnahmen das Verhältnis in Richtung MADI kippen kann. Sobald sich jedoch eine kleine Anforderung geändert hat, waren Audionetzwerke im Vorteil. Somit kann dieser Abschnitt nur eine grobe Richtlinie sein. Außerdem ist die Verbreitung eines neuen Systems immer auch ein komplexes System aus Vorteilen der Technologie, Anforderungen des Marktes und Marketingstrategien der Hersteller.

In den verwandten Arbeiten wurde ermittelt, dass AVB ein sehr robustes und fehlertolerantes Protokoll ist, belegt durch Simulationen, Berechnungen und Experimenten mit echter Hardware. Wenig Material gibt es bislang allerdings über die Überwachung eines laufenden Systems. Das ist in dem Sinne erstaunlich, als dass vergleichbare Arbeiten im Bereich von reinen Datennetzwerken in hoher Stückzahl existieren. Auch die Hersteller von AVB-fähigen Geräten implementieren Überwachungsmaßnahmen und Fehlermeldungen nicht vollständig genug oder in einer Art, die zur Interpretation der Anzeigen Expertenwissen voraussetzt.

Dies berücksichtigend wurden Fehlerszenarien in Theorie und Praxis erläutert und mithilfe von Versuchen und Messungen bezüglich ihrer automatisierten Überprüfbarkeit untersucht. Dazu wurden bestehende Firmware und Tools modifiziert und neue Programme entwickelt, um Fehler zu provozieren und an anderer Stelle zu erkennen. Bei einigen Testverfahren, vor allem im Bereich von gPTP, konnte jedoch mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ein Fehler nicht

hinreichend genau erkannt werden. Auch wurden die Tools nicht weit genug entwickelt, um sie direkt in automatisiert ablaufenden Tests einsetzen zu können.

Das im letzten Kapitel vorgestellte Konzept für ein Testsystem bietet eine gute Grundlage, um oben genannte Tools einzubinden. Das System muss aber noch um Konzepte für Benutzeroberfläche und Details zu Datenaufbereitung und Datenbankverwaltung ergänzt werden. Es ist außerdem zu überlegen, wie es als verteiltes System mit mehreren Messpunkten und einem zusammenführenden Messsystem im Netzwerk kommunizieren soll.

Dass viele Verfahren nur bis zur manuellen Verifikation fertiggestellt werden konnten und auch das System nur als Konzept vorliegt, zeigt, wie komplex das Thema Audionetzwerke auf technischer Ebene tatsächlich ist. Das macht einmal mehr die Notwendigkeit deutlich, einerseits Tonschaffende in diesem Bereich zu schulen, aber andererseits technische Details so weit wie möglich zu abstrahieren, damit in der praktischen Anwendung der künstlerische Umgang mit Musik und nicht die Bewältigung der Technik im Vordergrund steht.

Für die Zukunft ist das vorgeschlagene Konzept des AVB Doctors deshalb als fertige Software zu implementieren, um die Lücke zu schließen, die im Bereich geräteübergreifender und netzwerkweiter Überwachung momentan besteht.

Damit eine vollständige Überwachung des Netzwerkes auch im Produktivbetrieb möglich wird, müssen Wege gefunden werden, Statusinformationen auch ohne Fehlerinjektion und das Belegen von Bandbreite durch Abfragen von Endpunkten und Bridges zu erhalten. Die notwendigen Protokolle und Formate sind in den Standards bereits optional enthalten. Es bleibt zu hoffen, dass die Hersteller von AVB-Geräten sie flächendeckend implementieren.

Eine mögliche Erweiterung des AVB Doctors besteht schließlich darin, AVB-Daten in handelsübliche, also encodierte und komprimierte, „Streams“ für IP-basierte Netzwerke zu überführen. Neben der Systemdiagnose kann das Gerät somit auch zur Bereitstellung von Signalen im gesamten LAN, WLAN oder Internet dienen. An einem Tonmeister-Institut könnte so ein Zweispurmix des laufenden Konzertmitschnittes an jedem Arbeitsplatzrechner abgehört werden, im Theater und Konzerthaus kann der Intendant vom Büro aus das akustische Geschehen auf der Bühne verfolgen, ohne dass zusätzliche Kabel verlegt werden oder Client-Rechner und Switches auf dem Weg den AVB-Standard unterstützen müssen. Damit wäre ein kostengünstiger Einstieg in AVB-Audionetzwerke gewährleistet, auch wenn nicht gleich das gesamte System auf AVB umgestellt wird.

Schließlich wird man die weitere Entwicklung des AVB-Standards beziehungsweise die seines Nachfolgers, TSN, abwarten müssen. Möglicherweise gelingt es, wie bereits von Michael J. Teener vorgeschlagen, umfassendere Überwachungsfunktionen bereits im Standard zu etablieren. Bis TSN allerdings als Standard verabschiedet und anschließend von den Herstellern auch flächendeckend implementiert wird, könnte ein AVB Doctor gute Dienste für Tonmeister und alle anderen Tonschaffenden leisten.

A Anhang

A.1 Apparatur

Für die Versuche stehen folgende Geräte zur Verfügung:

- XMOS AVB Audio Endpoint Kit (Atterotech Referenzdesign), 2 Endpoints auf Mikrocontroller-Basis mit ADC/DAC
- DSP4YOU AVB-DG, Endpoint auf Mikrocontroller-Basis (ebenfalls XMOS)
- ECHO Audio Streamware NIC-1, PCIe Karte mit ASIO-Treibern und Controller-Software für Windows
- Hewlett-Packard Intel I210-T1, PCIe Netzwerkkarte (Intel Referenzdesign)
- DSP4YOU AVB-SW, AVB-Bridge mit 5 Ports
- Extreme Networks Summit X440-8P, AVB-Bridge mit 8 Ports, AVnu-Alliance AVB-Zertifizierung
- Netgear GS108E, Ethernet-Switch mit 8 Ports, nicht AVB-fähig, konfigurierbare Portspiegelung
- HAMEG HM605, analoges Oszilloskop
- PrismSound dScope Series III, Audio-Messsystem

Für die Analyse des Netzwerkverkehrs wurde die Software Wireshark in Version 1.10.8 eingesetzt. Diese kann von einer Netzwerkkarte empfangene Ethernet-Pakete protokollieren und analysieren. Prinzipbedingt ist an einem Port im Netzwerk allerdings nicht der gesamte Netzwerkverkehr sichtbar. Während eine Multicast-Übertragung, auf der AVB in weiten Teilen basiert, auf einem normalen Switch noch an alle Ports repliziert wird, leitet eine AV Bridge AVTP Pakete nur an die jeweils registrierten Endpunkte weiter.

Um trotzdem die Kommunikation zwischen Endpoint und Bridge beziehungsweise zwei Endpoints analysieren zu können, kann eine sogenannte Network Tap („Netzwerk-Anzapfung“) verwendet werden. In 100 Mbit-Netzwerken können einfache, passive Taps eingesetzt werden, für Gigabit-Netzwerke werden aktive Komponenten benötigt. Weil einige der zu testenden Geräte nur mit 100 Mbit arbeiten, hat der Autor mit einfachen Hilfsmitteln eine passive Tap konstruiert. Die Funktion wurde mit Hilfe von Wireshark und PackETH überprüft.

A.2 Entwicklung der Software

A.2.1 Überblick über entwickelte Tools

ptp_dump

Greift auf ein Speichersegment zu, in dem der gPTP Daemon Drift- und Offsetwerte ablegt. Liest dieses regelmäßig aus und schreibt die Werte in eine CSV-Datei

i210_stats

Stellt ein Gerüst bereit, um beliebige Hardware-Register des Netzwerkcontrollers I210 auszulesen. Funktionen sind für die Anzeige von RMON-Statistiken und Zeitstempeln vorhanden. Die Änderung der Ausgabe erfordert erneutes Kompilieren.

timestamp_reader

Reserviert einen oder mehrere Streams im Netzwerk. Liest ankommende AVBTP-Pakete aus und schreibt die Felder Presentation Time, Timestamp Valid, Timestamp Uncertain und Sequence in eine CSV-Datei pro Stream.

media_clock_extractor

Liest ankommende AVBTP-Pakete aus und gibt zum Abspielzeitpunkt (Presentation Time) einen Puls auf dem ersten Ausgang (SDP0) der Netzwerkkarte aus.

xAVDECC_endpoint

Stellt einen AVDECC Endpoint zur Verfügung, der als Talker, Listener und Responder arbeiten kann. Parameter (Anzahl der Streams, Anschlüsse, etc.) werden über eine Konfigurationsdatei zur Kompilierzeit festgelegt. Die MAC-Adresse, von dem die Pakete gesendet werden, lässt sich zur Programmzeit festlegen. Somit kann dieses Programm den AVDECC-Part eines nicht AVDECC-fähigen AVB-Stacks übernehmen. Das nutzt das AVDECC-Modul aus dem XMOS AVB Stack. Durch die Entwicklung von Abstraktionsschichten und Kompatibilitätsschichten konnte der Code vom Mikroprozessor auf UNIX-basierte PCs portiert werden.

A.2.2 Benutzte Libraries

Hauptanlaufpunkt für eigene Entwicklung ist das OpenAVB-Repository gewesen. Ursprünglich von Intel auf der Hosting-Plattform Github.com bereitgestellt und gepflegt, wurde es Anfang des Jahres der AVnu Alliance übergeben. Eric Mann von Intel ist aber immer noch der Maintainer des Repositories. Die meisten Codeteile sind unter der BSD lizenziert, einzelne Teile (Kerneltreiber) unter der GPLv2. Die Entwicklung wird recht aktiv im Branch `open-avb-next` vorangetrieben. Das Repository kann unter <https://github.com/AVnu/Open-AVB> per Browser oder git erreicht werden.

Für die Versuche im Zusammenhang mit dem AVDECC-Protokoll wurden die in C++ geschriebenen `avdecc-lib` von Audioscience (<https://github.com/audioscience/avdecc-lib>) und die umfangreiche C-Library von Jeff Koftinoff (<https://github.com/jdkoftinoff/jdksavdecc-c>) verwendet. Jeff Koftinoff ist im Standard IEEE 1722.1 2013 als Co-Editor aufgeführt und hat für sämtliche Data Units im Standard Header-Dateien zusammengestellt. Funktionen, mit denen sich Formate konvertieren, sowie einzelne Felder aus Netzwerkpaketen auslesen und hineinschreiben lassen, sind ebenfalls Bestandteil der Bibliothek. Audioscience implementiert mithilfe der Library von Koftinoff einen AVDECC-Controller, dessen Klassen in eigenen Programmen verwendet werden können. Außerdem ist ein Kommandozeilenprogramm als Beispielprogramm und zur unmittelbaren Nutzung enthalten.

Unter https://github.com/xcore/sw_avb pflegt XMOS den Quelltext seines AVB Stacks. Die beigelegte Firmware `app_simple_demo` enthält Board-Definitionen für die hier eingesetzten XMOS Developmentboards, das XMOS SliceKit und das ebenfalls genutzte AVB-DG-Board von DSP4YOU.

A.2.3 Entwicklungsumgebung

Für die Modifizierung der XMOS Firmware wurde die XTimecomposer IDE benutzt, die auch eine Toolchain zum Kompilieren, Linken, Debuggen und Flashen der Boards enthält.

Die Quelltexte der anderen Programme wurden mit einem Texteditor (Sublime Text 2 und vim) bearbeitet. Zum Kompilieren und Linken wurde die gcc-Toolchain in der Version 4.8 verwendet (PC und Mac), als Build-System kommt Make zum Einsatz.

A.3 Gerätespezifische Hinweise und Kommandoreferenzen

A.3.1 DSP4YOU AVB-SW

Der AVB-SW von DSP4YOU benutzt den auf der ARM9-Architektur basierenden 88E7251 von Marvell. Neben USB-Anschlüssen, SD-Kartenslot und JTAG-Header befindet sich auf dem Board auch eine GPIO-Leiste. Leider stellt Marvell die Dokumentation zum Chip und dem verwendeten Betriebssystem (FFxAV) nicht öffentlich zur Verfügung, sondern fordert vorher ein Non Disclosure Agreement (NDA) ein.

Um alle gefundenen Informationen frei veröffentlichen zu können, wurde auf den Abschluss eines solchen Vertrages verzichtet. Die nachfolgende Referenz stützt sich ausschließlich auf Informationen, die öffentlich zugänglich sind oder die ich dem Gerät investigativ entnehmen konnte. Alle Befehle und Scripte beziehen sich auf die Firmware-Version FW0.8 RC6.

Konsolenzugriff

- Serielle Schnittstelle: 115200 Baud/s, 8N1, Flow Control Off

- Telnet: IP: 192.168.1.2
- Username: root, kein Passwort

ptpconfig

Konfigurationstool für gPTP-Instanz. Listet Kurzreferenz bei Aufruf ohne Argumente.

- `ptpconfig set 8kclock 1` aktiviert den 8kHz-Puls auf dem GPIO-Header, Pin 11.

swcfg

Anzeigen und Ändern der Switchconfiguration. Kurzreferenz bei Aufruf ohne Argumente.

- `swcfg -atushow 0 0` Anzeige der Adresstabelle
- `swcfg -vtushow 0 0` Anzeige des VLAN-Status
- `swcfg -qavr 0 [port_index] 0xFF` Zeigt Informationen über die Warteschlangen pro Port

cm

AVB Configuration Manager. Kurzreferenz über `cm -h`

- `cm -m portmng -c 1 -p all` zeigt den Portstatus. Die zusammengefassten Ports haben den Index 10-13, der abgesetzt ist 0.

msrp_client

Frontend für MSRP-Daemon. Interaktiver Modus wenn ohne Argumente aufgerufen. Für MVRP (`mvrp_client`), MAAP (`maap_client`), AVDECC (`avdecc_client`) existieren ebenfalls Konfigurationstools, deren Kurzreferenz sich durch Aufruf ohne Argumente anzeigen lässt.

- `msrp_client -c dump` Anzeige aller Streams mit Statusinformationen

ffaud

Audio Control Application, steuert einen angeschlossenen Audiocodec an. Informationen, an welchen Pins dieser angeschlossen werden muss, liegen nicht vor.

/etc/app/showmactable.sh

Andere Darstellungsform der Adresstabelle mit zusätzlicher Anzeige von Prioritätsdaten.

/etc/app/port_mirror.sh

Richtet einen Monitoring Port ein (Unicast-Nachrichten anderer Ports werden hier repliziert).

/etc/app und /etc/test

Enthält Skripte zum Aktivieren bestimmter Funktionen und Testprogramme.

A.3.2 Extreme Networks Summit X440

Alle Befehle finden sich im „*ExtremeXOS User Guide*“, die unter der URL <http://extrcdn.extremenetworks.com/wp-content/uploads/2014/04/ExtremeXOS-15.5-User-Guide.pdf> erreichbar ist (Link zuletzt geprüft am 8. Juli 2014).

A.3.3 Intel I210-T

Für Netzwerkkarten, die auf dem Netzwerkcontroller I210 von Intel basieren gibt es eine Bibliothek von quelloffener Software, um einen AVB-Endpunkt zu realisieren. Außerdem verfügt das Referenzdesign über mehrere konfigurierbare Ein- und Ausgänge (Software Definable Pins, SDP), welche direkt mit der Timestamping Engine verbunden werden können.

Das bereits erwähnte OpenAVB-Repository stellt alle nötigen Treiber und Programme bereit, um mit der Netzwerkkarte einen funktionsfähigen AVB-Endpunkt zu betreiben. Damit die PPS-Ausgabe auf den SDPs funktioniert, ist der gPTP mit dem der Umgebungsvariable ARCH=I210 zu kompilieren.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau der Orchesteraufnahme	12
2.2	Bewertung von Latenzen bei In-Ear-Monitoring (Lester & Boley 2007)	16
3.1	Ermitteln der Frequenz- und Phasenunterschiede zweier Oszillatoren über Zeitstempel (nach Weibel 2009)	28
3.2	Prinzip der Media Clock (hier Sample Clock) Generation und Recovery (Kern et al. 2011: S. 3)	30
3.3	Prinzip des Credit-Based Shaper Algorithmus (Steinbach et al. 2012)	32
3.4	Reservierung von Bandbreite über MSRP	33
3.5	Das Aufspannen von AVB Wolken durch nicht AVB-fähige Geräte in einem Netzwerk (IEEE 802.1BA 2011: S. 22)	34
3.6	AVTP Audio Frame with 24bit, 6 Samples per Frame (Boatright 2009)	36
3.7	Beispiel für das AEM eines Audiogeräts mit zwei Ein- und Ausgängen (IEEE 1722.1 2013: S. 42)	40
3.8	Beispiel eines Spanning Tree. Knoten sind mit Bridge ID (große Zahl), Root Bridge Id und Pfadkosten (darunter, durch Komma getrennt) gekennzeichnet. Alternative (blockierte) Pfade sind doppelt durchgestrichen (IEEE 802.1Q 2011: S. 325) .	42
4.1	Latenz-Diagramm mit Paketverlust (Audinate Pty Ltd 2014: S. 56)	47
5.1	Ausgabe der RMON Statistik nach Deaktivierung der FCS auf Sendeseite	57
5.2	Messung an 3 nicht synchronisierten gPTP-Knoten (3. Signal als Trigger, Auflösung 20 μ s/DIV)	59
5.3	Versuchsaufbau „Wechsel des Grandmasters“	60
5.4	Umschaltung des Grandmaster auf benachbarte Bridge und zwischen den zwei Endpunkten	61
5.5	Versuchsaufbau „Legacy Switch“	62
5.6	gemessene NeighborRateRatio an zwei verschiedenen Geräten (Grandmaster) jeweils mit und ohne Legacy Switch	62
5.7	Versuchsaufbau „Legacy Switch, hohe Netzauslastung“	63
5.8	gemessene NeighborRateRatio am AVB-SW jeweils mit und ohne Legacy Switch, ansteigende Last bis zum Abriss der Synchronisation	64
5.9	Versuchsaufbau „Zwei Media Clock Master“	66
5.10	Drift bei verschiedenen Media Clock Mastern	66
5.11	Versuchsaufbau „Media Clock mit Legacy Switch“	67

5.12	Media Clock-Fehler durch Legacy Switch	68
5.13	Verteilung von MSRP-Nachrichten bei erfolgreicher und fehlgeschlagener Bandbreitenreservierung	69
5.14	Versuchsaufbau: „Erkennen der Ursache für eine fehlgeschlagene Reservierung“ .	71
5.15	Passives Mithören der MSRP-Nachrichten am AVB-SW	72
5.16	Messung der Latenz der A/D- und D/A-Wandler der XMOS-Boards und Ende-zu-Ende-Messung über Netzwerk	75
5.17	Versuchsaufbau: „AVDECC-Kommunikation unter hoher Netzwerkauslastung“ .	77
5.18	IO-Graph der Nic-1 bei gestarteten packETH-Instanzen	77
5.19	Eingegangene AVDECC-Pakete	78
5.20	Timeouts der avdecc-lib	78
5.21	MAC Adresstabellen eines exemplarischen Netzwerks an zwei Punkten über SNMP und Telnet ausgelesen	80
6.1	Ereignisverarbeitung im von Varga und Moldovan entwickelten Fault Management System (Varga & Moldován 2007)	83
6.2	Ereignisverarbeitung im AVB Doctor	83
6.3	Durchführbarkeit und Nebenwirkungen von Testverfahren im Regelbetrieb	87

Tabellenverzeichnis

5.1	MSRP Fehlercodes nach IEEE 802.1Qat (2010:S. 64)	70
5.2	bereinigte Adresstabellen der beiden Switches	81

Literaturverzeichnis

AES10: *AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering - Serial Multichannel Audio Digital Interface (MADI)* AES 2008

ALC NetworX GmbH: *Ravenna Network Requirements Draft v0.2*, http://ravenna.alcnetworx.com/uploads/media/RAVENNA_Network_Requirements_-_Draft_0.2.pdf, 2013, letzter Zugriff: 14.04.2014

ALC NetworX GmbH: *Ravenna White Paper v1.0*, http://ravenna.alcnetworx.com/uploads/media/RAVENNA__AES67_V1.0.pdf, 2014, letzter Zugriff: 14.04.2014

Alderisi, Giuliana, Caltabiano, Alfio, Vasta, Giancarlo, Iannizzotto, Giancarlo, Steinbach, Till & Lo Bello, Lucia: „Simulative assessments of IEEE 802.1 Ethernet AVB and Time-Triggered Ethernet for Advanced Driver Assistance Systems and in-car infotainment“, in: *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference 2012*, Seoul 2012

Audinate Pty Ltd: *QoS Configuration of Ethernet Switches*, <http://support.labgruppen.com/attachments/token/1hrgpplobxwyoxj/?name=AUD-ANO-QoS+Switch+Configuration-Lab.gruppen.pdf>, 2008, letzter Zugriff: 07.07.2014

Audinate Pty Ltd: *Dante Controller User Guide*, <http://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/pdf/latest/AUD-MAN-DanteController-3.5.x-v1.5.pdf>, 2014, letzter Zugriff: 28.04.2014

Badt, Sig H., Jr., Rouyer, Jessy V. & Ozugur, Timucin: „Detecting legacy bridges in an audio video bridging network“, *US Patent App. 12/004,972*, 2007

Bejerano, Yigal: „Taking the skeletons out of the closets: a simple and efficient topology discovery scheme for large ethernet lans“, *IEEE/ACM Transactions on Networking* vol. 17 (5), 2009

Berryman, Jeffrey: „Technical Criteria for Professional Media Networks“, *44th AES Int'l Conf. Audio Networking*, San Diego 2011

Boatright, Robert: „Understanding IEEE 1722 AVB Transport Protocol - AVBTP“, *IEEE 802.1 Plenary, March 2009*, Vancouver 2009

Brand, Richard, Carlson, Steve, Gildred, John, Lim, Seyoun, Cavendish, Dirceu & Haran, Onn: „Residential Ethernet – IEEE802.3 Call for Interest“, *IEEE 802.3 CFI*, Portland 2004

- Breitbart, Yuri, Garofalakis, Minos, Jai, Ben, Martin, Cliff, Rastogi, Rajeev & Silberschatz, Avi: „Topology discovery in heterogeneous IP networks: the NetInventory system“, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)* vol. 12 (3), 2004
- Case, J.D., Fedor, M., Schoffstall, M.L. & Davin, J.: *Simple Network Management Protocol*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc1067.txt>, 1988, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Case, J.D., Fedor, M., Schoffstall, M.L. & Davin, J.: *Simple Network Management Protocol*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3418.txt>, 2002, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Chafe, Chris, Gurevich, Michael, Leslie, Grace & Tyan, Sean: „Effect of Time Delay on Ensemble Accuracy“, in: *Proc. Int'l Symp. Musical Acoustics*, Nara, Japan 2004
- Christensen, Carl: *AVB Application Requiring Better than 5uS Accuracy of the PTP Clock*, <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2007/as-christensen-AVB-accuracy-0407-v2.pdf>, 2007, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Damori, Jason: *Are Layer 2 or Layer 3 Protocols Better? Yes.*, von: <http://www.biamp.com/blog/are-layer-2-or-layer-3-protocols-better-yes/>, 2013, letzter Zugriff: 5.Juni2014
- Diemer, Jonas, Thiele, Daniel & Ernst, Rolf: „Formal worst-case timing analysis of Ethernet topologies with strict-priority and AVB switching“, in: *Proc. 7th IEEE Int'l Symp. Industrial Embedded Systems*, Karlsruhe 2012
- Foulkes, Philip J.: *An investigation into the control of audio streaming across networks having diverse quality of service mechanisms*, PhD Thesis, Rhodes University, Grahamstown 2012
- Friedl, Aleš, Ubik, Sven, Kapravelos, Alexandros, Polychronakis, Michalis & Markatos, Evangelos P.: „Realistic Passive Packet Loss Measurement for High-Speed Networks“, in: *Proc. 1st Int'l Workshop, Traffic Monitoring and Analysis*. Aachen 2009
- Garner, Geoffrey M: *Initial Simulation Results for Initial Simulation Results for 802.1AS Synchronization Transport with Longer Sync and Pdelay Intervals*, <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2009/as-garner-simulation-results-longer-intervals.pdf>, 2009, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Görne, Thomas: *Tontechnik*, Hanser, Hamburg 2008
- Gunter, Dan & Tiemey, Brian: „NetLogger: a toolkit for distributed system performance tuning and debugging“, in: *Proc. 8th IFIP/IEEE Int'l Symp. Integrated Network Management* 2003
- Gunther, Craig: *SRP in Automotive*, http://www.avnu.org/files/static_page_files/90CCF082-1D09-3519-ADAE61C5932B5DBF/AVnu%20AAA2C_SRP%20in%20Automotive_Craig%20Gunther.pdf, 2013, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Heidinger, Emanuel, Geyer, Fabien, Schneelee, Stefan & Paulitsch, Michael: „A performance study of Audio Video Bridging in aeronautic Ethernet networks“, in: *Proc. 7th IEEE Int'l Symp. Industrial Embedded Systems*, Karlsruhe 2012

- Hemming, Roland: *The problems with audio networks*, <http://rhconsulting.eu/blog/files/NetworkProblems.html>, 2013, letzter Zugriff: 05.05.214
- Heyden, Markus: *Untersuchung von Qualitätsparametern ethernetbasierter Audionetzwerke*, MA Thesis, Beuth Hochschule für Technik, Berlin 2012
- Holzinger, Axel & Hildebrand, Andreas: „Realtime Linear Audio Distribution Over Networks: A Comparison of Layer 2 and 3 Solutions Using the Example of Ethernet AVB and RAVENNA“, *44th AES Int'l Conf. Audio Networking*, San Diego 2011
- IEEE 1588: „IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems“, *IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002)*, 2008
- IEEE 1722: „IEEE Standard for Layer 2 Transport Protocol for Time Sensitive Applications in a Bridged Local Area Network“, *IEEE Std 1722-2011*, 2011
- IEEE 1722.1: „IEEE Standard for Device Discovery, Connection Management, and Control Protocol for IEEE 1722(TM) Based Devices“, *IEEE Std 1722.1-2013*, 2013
- IEEE 802.1AB: „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks– Station and Media Access Control Connectivity Discovery“, *IEEE Std 802.1AB-2009 (Revision of IEEE Std 802.1AB-2005)*, 2009
- IEEE 802.1AS: „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks“, *IEEE Std 802.1AS-2011*, 2011
- IEEE 802.1BA: „802.1BA - Audio Video Bridging (AVB) Systems“, *IEEE Std 802.1BA-2011*, 2011
- IEEE 802.1Q: „IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks“, *IEEE Std 802.1Q-2011 (Revision of IEEE Std 802.1Q-2005)*, 2011
- IEEE 802.1Qat: „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 14: Stream Reservation Protocol (SRP)“, *IEEE Std 802.1Qat-2010 (Revision of IEEE Std 802.1Q-2005)*, 2010
- IEEE 802.1Qav: „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams“, *IEEE Std 802.1Qav-2009 (Amendment to IEEE Std 802.1Q-2005)*, 2009
- IEEE 802.3: „IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications“, *IEEE Std 802.3-2008 (Revision of IEEE Std 802.3-2005)*, 2008

- IEEE:802.1ak: „IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Virtual Bridged Local Area Networks - Amendment 7: Multiple Registration Protocol“, *Std 802.1ak-2007 (Amendment to IEEE Std 802.1QTM-2005)*, 2007
- IEEE:802.1D: „IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Media Access Control (MAC) Bridges“, *IEEE Std 802.1D-2004 (Revision of IEEE Std 802.1D-1998)*, 2004
- Intel Corp.: *Intel Ethernet Controller I210 Datasheet*, von: <http://www.intel.de/content/dam/www/public/us/en/documents/datasheets/i210-ethernet-controller-datasheet.pdf>, 2014
- ITU-T:J.145: „Measurement and control of the quality of service for sound transmission over contribution and distribution networks“, *Series J: Cable Networks and Transmission of Television, Sound Programme and other Multimedia Signals*, 2001
- Jochim, Markus: „Ingress Policing“, *IEEE 802.1 TSN Plenary, November 10-15, 2013*, Dallas, TX 2013
- Jones, Girault & Butterworth, Ashley: „1722 AVTP Audio Format“ 2011
- Kern, Andreas, Zinner, Helge, Streichert, Thilo, Nöbauer, Josef & Teich, Jürgen: „Accuracy of Ethernet AVB Time Synchronization Under Varying Temperature Conditions for Automotive Networks“, in: *Proc. 48th Design Automation Conf.*, ACM, New York City 2011
- Kim, Min-Jun, Jang, Yong-Suk, Jung, Min-Suk & Kim, Sung-Ho: „Frame Forwarding Rules for Link Utilization in IEEE 802.1 AVB Networks“, in: *Proc. Int'l Conf. Advanced Language Processing and Web Information Technology*, Liaoning, China 2008
- Kleineberg, Oliver, Fröhlich, Peter & Heffernan, Donal: „Fault-tolerant ethernet networks with audio and video bridging“, *16th IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, Toulouse 2011
- Kopetz, Hermann: *Real-Time Systems – Design Principles for Distributed Embedded Applications*, Springer, Berlin 2011
- Kuhr, Christoph: *Entwicklung einer Audio- / Video-Bridge (AVB) nach IEEE 802.1AVB mit Audiofilterfunktionen*, Fachhochschule Köln 2012
- Kurose, James F. & Ross, Keith W.: *Computernetzwerke: Der Top-Down-Ansatz*, Pearson Studium 2008
- Leonard, Theresa Ann: *Time delay compensation of distributed multiple microphones in recording - an experimental evaluation*, MA Thesis, McGill University, McGill University Montreal 1991
- Lester, Michael & Boley, Jon: „The Effects of Latency on Live Sound Monitoring“, *123rd AES Convention*, New York City 2007

- Lim, Hyung-Taek, Herrscher, Daniel & Chaari, Firas: „Performance comparison of IEEE 802.1Q and IEEE 802.1 AVB in an Ethernet-based in-vehicle network“, in: *8th Int'l Conf. Computing Technology and Information Management* Band 1 1–6 2012a
- Lim, Hyung-Taek, Herrscher, Daniel, Waltl, Martin Johannes & Chaari, Firas: „Performance Analysis of the IEEE 802.1 Ethernet Audio/Video Bridging Standard“, in: *Proc. 5th Int'l Conference on Simulation Tools and Techniques*, Brüssel 2012b
- Mann, Eric et al.: *Best Practices AVB Software Interfaces and Endpoint Architecture Guidelines* AVnu Alliance 2013
- Marentakis, Georgios, Kranzler, Christian, Frank, Matthias, Opitz, Martin & Sontacchi, Alois: „Latency Tolerance Enhancement in In-Ear Monitoring Systems“, *DAGA 38. Jahrestagung für Akustik*, Darmstadt 2012
- McCabe, James D: *Network Analysis, Architecture, and Design*, Morgan Kaufmann 2007
- Mehmood, Mirza Aamir, Sajid, Althasham & Khokhar, Amir Shahzad: „Framework for Ethernet Network Functionality Testing.“, *Int'l Journ. of Computer Science Issues* vol. 8 (6), 2011
- Olsen, Dave: *neighborPropDelayThresh Defaults*, <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2011/as-dolsen-neighborPropDelay-v1.pdf>, 2011, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Pannel, Don: „AVB latency math“, *802.1 AVB Face to Face* 2010
- Pannel, Don: „Audio Video Bridging (AVB) Gen 2 Assumptions“, *IEEE 802.1 Plenary, Jan 2013*, Vancouver, Kanada 2013
- Pannel, Don & Teener, Michael J.: „Audio Video Bridging (AVB) Assumptions“, *IEEE 802.1 Plenary, Nov 2008*, Dallas, TX 2008
- Putzke, Stefan: *Untersuchung zur Betriebssicherheit und Audioqualität von digitalen Audionetzwerken mit Blick auf den Entwurf des AudioVideo Bridging (AVB)-Standards*, Doktorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg 2011
- Queck, Rene: „Analysis of Ethernet AVB for automotive networks using Network Calculus“, *IEEE Int'l Conf. Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, Istanbul, Türkei 2012
- Reimann, Felix, Graf, Sebastian, Streit, Fabian, Glaß, Michael, & Teich, Jürgen: „Timing analysis of Ethernet AVB-based automotive E/E architectures“, in: *IEEE 18th Conf. Emerging Technologies Factory Automation* 2013
- Silfvast, Rob: *IEEE 1722 Media on AVB Networks*, von: http://www.avnu.org/files/static_page_files/94D3E7B2-1D09-3519-AD64C79709632880/AVnu%20AABAC_IEEE%201722%20Media%20on%20AVB%20Networks_Rob%20Silfvast.pdf, 2013, letzter Zugriff: 07.07.2014

- Smimite, Abderrahmane, Chen, Ken & Beghdadi, Azeddine: „Next-Generation Audio Networking Engineering for Professional Applications“, *20th Telecommunications Forum*, Belgrad
- Steinbach, T., Lim, Hyung-Taek, Korf, F., Schmidt, T.C., Herrscher, D. & Wolisz, A.: „Tomorrow’s In-Car Interconnect? A Competitive Evaluation of IEEE 802.1 AVB and Time-Triggered Ethernet (AS6802)“, in: *Vehicular Technology Conference 2012*
- Tanenbaum, Andrew S. & Wetherall, David J.: *Computer Networks*, Prentice Hall, Boston 2013
- Teener, Johas & Garner, Geoffrey M: „Overview and timing performance of IEEE 802.1 AS“, in: *IEEE Int’l Symp. Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication 2008*
- Teener, Michael J.: *AVB Gen 2: the Next Step* AVnu Alliance, http://www.avnu.org/files/static_page_files/90CC193D-1D09-3519-AD9B14D519D2E88C/AVnu%20AAA2C_AVB%20Gen2_The%20Next%20Step_Michael%20Johas%20Teener.pdf, 2012, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Varga, Pál & Moldován, István: „Integration of service-level monitoring with fault management for end-to-end multi-provider ethernet services“, *IEEE Transactions on Network and Service Management* vol. 4 (1), 2007
- Waldbusser, S.: *Remote Network Monitoring Management Information Base* Internet Engineering Task Force, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2819.txt>, 2000, letzter Zugriff: 07.07.2014
- Watkinson, John & Rumsey, Francis: Focal Press, Burlington, MA
- Weibel, Hans: „High precision clock synchronization according to IEEE 1588 implementation and performance issues“, *Embedded World*, Nürnberg 2005
- Weibel, Hans: „Technology Update on IEEE 1588: The Second Edition of the High Precision Clock Synchronization Protocol“, *Embedded World*, Nürnberg 2009
- Weinzierl, Stefan (Herausgeber): *Handbuch der Audiotechnik*, Springer, Berlin 2008

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Marc Schettke