

Untersuchung der Latenzunterschiede zwischen OSI Layer 1, Layer 2 und Layer 3 Audio-Netzwerke

Diplomarbeit

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades
Dipl.-Ing. für technisch-wissenschaftliche Berufe

am Masterstudiengang Digitale Medientechnologien an der
Fachhochschule St. Pölten, **Masterklasse Audiodesign**

von:

Andreas Negrei, BSc

DM151555

Betreuer/in und Erstbegutachter/in:
FH-Prof. Dipl.-Ing. Andreas Büchele

Zweitbegutachter/in: FH-Prof. Dr. Michael Iber

St. Pölten, 30.04.2019

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

- ich dieses Thema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter bzw. der Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

.....
Stockerau, 13.05.2019

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Kurzfassung

Diese Arbeit ist im Fachgebiet der Audiotechnik angesiedelt und beschäftigt sich mit digitalen Mischpulten und deren Audionetzwerke. Im professionellen Bereich sind Audionetzwerke bei Live Veranstaltungen, Rundfunk- und Musikproduktionseinrichtungen sowie bei Fixinstallationen nicht mehr wegzudenken. Sie erleichtern nicht nur die Planung, sondern auch die Umsetzung und Konfiguration kleiner bis hin zu Groß-Projekten. Verschiedene Protokolle wie z.B. Dante, CobraNet, Ravenna, AES50, SoundGrid, EtherSound und viele andere werden für die Audioübertragung eingesetzt. All diese Netzwerkkarten verwenden zwar Ethernet-Schnittstellen, jedoch sind sie untereinander nicht kompatibel, da jeder Hersteller proprietäre Lösungen anbietet. Weiters kommen in einer Audiosignalkette verschiedene Parameter vor, die für Verzögerungen in der Übertragung sorgen. AD- bzw. DA-Wandler in digitalen Mischpulten, in Stageboxen oder sogar in einzelne Wireless Mikrofone können für mehr Latenz sorgen. Eine möglichst geringe Latenz ist aber insbesondere für Musiker unverzichtbar, da davon ihre Leistung abhängt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, derzeit verfügbare und im professionellen Audibereich eingesetzte Audionetzwerke zu analysieren und das Problem der Interkompatibilität zu untersuchen. Weiters sollen OSI-Layer 1, Layer 2 und Layer 3 Audio-Netzwerke anhand ihrer Latenzzeiten verglichen werden und somit dabei helfen, zu verstehen, welchen Einfluss die einzelnen Layer auf die Übertragung haben.

Abstract

This thesis is located in the field of digital audio technology and deals with audio networks. Various protocols such as Dante, CobraNet, Ravenna, AES50, SoundGrid or EtherSound use the Ethernet network connection for audio transmission, but they are not compatible with each other. Furthermore, there are several parameters in an audio signal chain that cause latency. Manufacturers often give flattering information in the data sheets about these details. For this reason, this thesis aims to analyze currently available audio networks used in the fields of Live-Events, Broadcast or Music Studios to give an overview and describe the problem of intercompatibility. Furthermore, three different networks (OSI-Layer 1, Layer 2 and Layer 3) should be compared on the basis of their latencies.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Digitale Signale	3
2.1 Kontinuierliche und diskrete Signale	3
2.2 AD / DA Wandlung	4
2.2.1 Abtastung	5
2.2.2 Quantisierung	9
2.2.3 Codierung	13
2.2.4 D/A Wandlung	14
3 Grundlagen der Netzwerktechnik	17
3.1 Was ist ein Netzwerk?	17
3.2 Netzwerkkategorien	18
3.3 Topologien	19
3.3.1 Bus	20
3.3.2 Stern	21
3.3.3 Ring	22
3.3.4 Mischformen	22
3.4 Übertragungsmedien	24
3.4.1 Koaxialkabel	25
3.4.2 Twisted-Pair-Kabel	25
3.4.3 Glasfaserkabel	28
3.4.4 Drahtlose Übertragung per WLAN	34
3.4.5 Weitere Drahtlose Übertragungen	37
3.5 Schnittstellen	38
3.5.1 RJ45	38
3.5.2 Universal Serial Bus (USB)	41
3.5.3 FireWire / IEEE 1394 / i.Link	41
3.5.4 Thunderbolt 3	42

3.5.5	Optische Schnittstellen	42
3.6	Schichtenmodelle	44
3.6.1	Proprietäre Systeme	44
3.6.2	Offene Systeme	44
3.6.3	DoD-Schichtenmodell	45
3.7	OSI-7-Schichtmodell	46
3.7.1	Bitübertragungsschicht (Schicht 1)	47
3.7.2	Sicherungsschicht (Schicht 2)	48
3.7.3	Vermittlungsschicht (Schicht 3)	48
3.7.4	Transportschicht (Schicht 4)	48
3.7.5	Sitzungsschicht (Schicht 5)	49
3.7.6	Darstellungsschicht (Schicht 6)	49
3.7.7	Anwendungsschicht (Schicht 7)	49
3.8	IEEE 802	49
3.9	Zugriffsverfahren	51
3.9.1	CSMA/CD	51
3.9.2	CSMA/CA	54
3.9.3	Halbduplex vs. Vollduplex	56
3.10	Protokolle	57
3.10.1	TCP/IP	57
3.10.2	IP-Internet Protocol	60
3.10.3	TCP – Transmission Control Protocol	62
3.10.4	Weitere Protokolle	63
3.11	Ethernet	63
3.11.1	Strukturierte Verkabelung	64
3.11.2	Kabellängen	65
3.11.3	Ethernet-Frame	66
3.12	Kopplung von Netzwerken	68
3.12.1	Repeater und Hub (Schicht 1)	68
3.12.2	Bridge (Schicht 2)	69
3.12.3	Switch (Schicht 2)	69
3.12.4	Router (Schicht 3)	72
3.12.5	Gateway (Schicht 7)	73
3.12.6	Multifunktionsgeräte	73
4	Qualitätsmerkmale von Audio-Netzwerke	74
4.1	Fehlertoleranz und Ausfallsicherheit	74
4.2	Quality of Service	76
4.3	Jitter, Wander und Latenz	78
4.3.1	Jitter	78
4.3.2	Wander	81

4.3.3	Latenz	81
4.4	Clocking	84
5	Audio-Netzwerke	86
5.1	Layer 1 Audio-Netzwerke	86
5.1.1	AES50	87
5.1.2	Aviom A-Net	90
5.1.3	Riedel RockNet	91
5.2	Layer 2 Audio-Netzwerke	93
5.2.1	Waves SoundGrid	93
5.2.2	EtherSound	96
5.2.3	CobraNet	100
5.2.4	Roland Ethernet Audio Communication (REAC)	102
5.2.5	Weitere Layer 2 Netzwerke	102
5.3	Layer 3 Audio-Netzwerke	102
5.3.1	Dante	102
5.3.2	Ravenna	106
5.3.3	Audio Video Bridging (AVB)	108
5.4	Vergleich der Audio-Netzwerke	110
5.5	AES67	112
6	Messtechnische Untersuchung	115
6.1	Forschungsfrage und Hypothese	116
6.2	Allgemeiner Messaufbau	116
6.2.1	Konfiguration Smaart	118
6.3	Latenzmessung Mischpult	120
6.3.1	Messaufbau	120
6.3.2	Variablen	121
6.3.3	Blockschaltbild	122
6.3.4	Messverfahren und Ergebnisse	123
6.3.5	Fazit	126
6.4	Latenzmessung der Netzwerk-Protokolle	127
6.4.1	Messaufbau	127
6.4.2	Grenzen dieser Untersuchung	128
6.4.3	Variablen	128
6.4.4	AES50	128
6.4.5	Waves SoundGrid	130
6.4.6	Dante	133
6.5	Evaluierung und Interpretation	139
7	Fazit	142

Literaturverzeichnis	144
Abbildungsverzeichnis	148
Tabellenverzeichnis	153

1 Einleitung

Seit Anfang der 90er sind Ethernet-Netzwerke für die Audiotechnik immer interessanter geworden und wurden seitdem zunehmend weiterentwickelt (Hildebrand, 2010). Bei Ethernet handelt es sich um Technik, die es ermöglicht Daten zwischen einzelnen Geräten zu transportieren. Als Übertragungsmedium werden Cat5, 6 oder 7 Twisted-Pair-Kupferkabel verwendet und wie bei anderen Netzwerken werden hierfür auch handelsübliche RJ-45 Stecker bzw. Buchsen eingesetzt. (Heyden, 2012a) Obwohl Ethernet nicht für den Echtzeit-Transfer von Audiosignalen entwickelt wurde, konnten sich viele proprietäre Layer 1-, Layer 2- und Layer 3 Lösungen etablieren. Jedoch haben diese Netzwerke eines gemeinsam, und zwar die Inkompatibilität zueinander. Live Veranstaltungen, Rundfunk- und Musikproduktionseinrichtungen sowie Fixinstallationen und viele andere Einsatzgebiete setzen schon auf digitale Audionetzwerke und erleichtern den Audioingenieuren die Planung und die Umsetzung. Mit digitalen Audionetzwerken können hunderte von Kanälen gleichzeitig und mit geringer Latenz über ein einziges Netzkabel übertragen werden. Es ist somit nicht mehr notwendig für jeden einzelnen Signalweg ein Kabel zu verlegen. Man spart hiermit nicht nur sehr viel Geld, sondern auch sehr viel Zeit. Anstatt jede Verbindung an einer analogen Kreuzschiene anzuschließen kann dieser Arbeitsschritt von einer Softwareoberfläche abgelöst werden. Mit nur wenigen Klicks gelingt es dem Audioingenieur die Signale an einem beliebigen Ausgang im Netzwerk zu routen. Weiters reichen heutige Netzwerkressourcen dazu aus, beliebige Datenformate mit verschiedenen Sampling-Frequenzen simultan zu transportieren. Somit ist es möglich, bestehende lokale Netzwerke an den Veranstaltungsbetrieben für die Audioübertragung zu verwenden. Mit leistungsstarken Netzwerken ist es sogar möglich, IP-Basierte Video-Streams und Audio-Streams parallel zu übertragen. Das Fachgebiet der Videoübertragung wird aber in dieser wissenschaftlichen Arbeit nicht angesprochen, sondern nur die Übertragung von Audiosignalen in Netzwerken.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema Audio-Netzwerke, da herausgefunden werden soll, welche Latenzunterschiede zwischen OSI-Layer 1, Layer 2 bzw. Layer 3 Audio-Netzwerke vorkommen. Den LeserInnen soll somit geholfen werden zu verstehen, welche Auswirkungen die Verkapselung und die

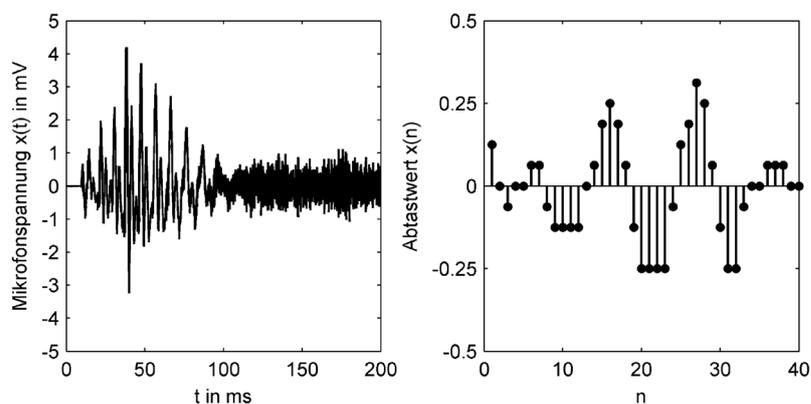
1 Einleitung

Übertragung der Audiodaten in den einzelnen Layern auf die Latenz hat. Weiters soll es dazu beitragen einen Einblick in diese Materie zu erlangen und die heutzutage eingesetzten digitalen Audio-Netzwerke kennenzulernen und vergleichen zu können. Anhand von AES67 soll das Thema Interkompatibilität zwischen den Netzwerken beschrieben werden. Zum Schluss soll mittels der messtechnischen Untersuchung ermöglicht werden die Unterschiede drei bekannter Audio-Netzwerke zu analysieren und somit die Latenzunterschiede zu ermitteln.

2 Digitale Signale

2.1 Kontinuierliche und diskrete Signale

Laut Weinzierl sind Signale mathematische Funktionen oder Zahlenfolgen, die verändernde Größen beschreiben und dadurch Information repräsentieren. Er beschreibt es anhand Abbildung 1. Die linke Grafik zeigt den Spannungsverlauf des Sprachsignals über der Zeit, indem die horizontale Achse den Zeitverlauf des Signals darstellt und die vertikale Achse für die Mikrofonspannung steht. Man spricht von einem zeitkontinuierlichen bzw. wertekontinuierlichen Signal, da die horizontale Achse sowie die vertikale Achse beliebig feine Werte darstellt. Solche Signale werden auch analoge Signale genannt. Die rechte Grafik hingegen zeigt einen 1ms Ausschnitt der Analog/Digital-Wandlung vom selben Sprachsignal. Die Zahlenfolge von Werten $x(n)$ wird dabei über der horizontalen Achse n dargestellt. Hierbei spricht man von zeit- und wertediskreten Signalen oder auch digitale Signale (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 5).

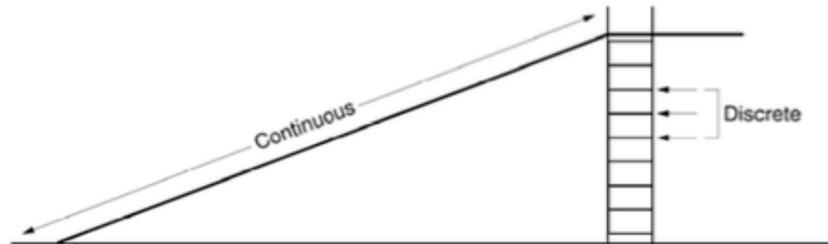


*Abbildung 1 Das Wort "Ich" als zeit- und wertekontinuierliches Signal (Links) und als zeit- und wertediskretes Signal (Rechts) dargestellt.
(Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 6)*

Bei digitalen Signalen werden in bestimmten Abtastintervallen die Spannungswerte numerisch gespeichert und adressiert, sodass sie bei einer Digital/Analog-Wandlung wieder ausgegeben werden können. Da die Abtastung nicht kontinuierlich passiert, werden somit nur Werte an den jeweiligen

2 Digitale Signale

Messpunkten abgespeichert und liefern daher keine Informationen über den kontinuierlichen Verlauf des Signals.



*Abbildung 2 Kontinuierliche und diskrete Signale
(Watkinson, 2001, S. 218)*

Digitale Netzwerke können natürlich nur digitale Signale verarbeiten, da es sich um Binärsysteme handelt und diese intern nur die Zustände 0 und 1 kennen. Unendlich fein abgestufte Werte wie bei analogen Signalen würde dazu führen, dass das System unendlich viel Speicherplatz und unendlich hohe Rechenleistung brauchen würde. Jedoch kann die Auflösung digitaler Signale so hoch sein, dass man glauben könnte es handelt sich um ein analoges Signal. Digitale Signale sind weitestgehend gegenüber Störfaktoren wie Signalverzerrungen, Kabelgeräusche, Übersprechen oder auch Netzbrummen immun. Überträgt man analoge Signale über weite Entfernungen, verliert das Signal natürlich an Qualität, da sich der Nutz- und Störsignalabstand stetig verkleinert. Betrachtet man digitale Signale hingegen, wird die Qualität des Signals durch die Wandlung und die Codierung bestimmt und die codierten Signale können verlustfrei decodiert werden. (Heyden, 2012a, S. 3)

2.2 AD / DA Wandlung

Die Audioübertragung über Netzwerke findet in der digitalen Ebene statt. Da sich jedoch am Anfang der Übertragungskette z.B.: Mikrofone und am Ende Lautsprecher befinden und diese nach wie vor analoge Systeme sind, muss an einer geeigneten Stelle eine Wandlung durchgeführt werden. Diese Aufgabe übernehmen sogenannte Analog/Digital – bzw. Digital/Analog-Wandler. Es werden somit zeitkontinuierliche Signale in diskrete Abtastwerte (Samples) umgewandelt (Werwein & Schick, 2008, S. 885). Dabei sind folgende Schritte notwendig:



Abbildung 3 Notwendige Schritte für eine A/D-Wandlung

2.2.1 Abtastung

Bei der Abtastung oder auch Sampling genannt, wird das analoge, zeit- und wertkontinuierliche Signal diskretisiert. Das bedeutet, zu bestimmten Zeitpunkten, in äquidistanten Abständen wird die Analogspannung abgefragt. Dies geschieht punktweise, also in zeitdiskreten Schritten und liefert genaue Amplitudenwerte. Ein digitales Signal kann daher nur eine Annäherung an das analoge Signal sein und ist somit abhängig vom Messintervall. Die Größe dieses Messintervalls wird auch Abtastrate oder Samplingfrequenz f_s genannt.

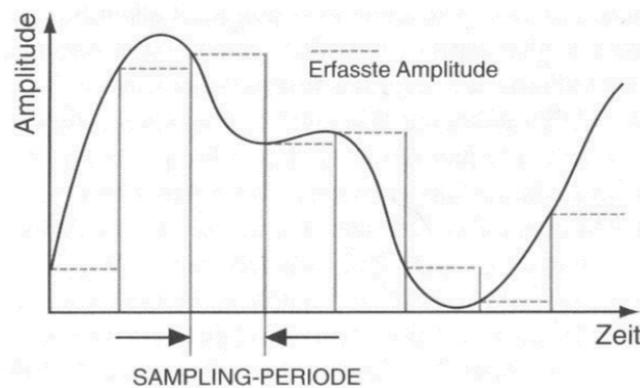


Abbildung 4 Analoges Signal mit diskreten Abtastwerten
(Kuzmowicz, 2015, S. 7)

2.2.1.1 Sample and Hold

Um diskrete Werte aus dem noch immer analogen, Wert-kontinuierlichen Signal zu erhalten, wird die sogenannte Sample and Hold Schaltung angewendet. Vereinfacht ausgedrückt handelt es sich hierbei um einen elektronischen Schalter und einem Kondensator der als Zwischenspeicher dient. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, wird der Schalter S vom Schalteingang U_s gesteuert. Liegt an U_s ein Sample-Takt an, schließt dieser den Schalter. Die Signalspannung gelangt zum Kondensator wo sie zwischengespeichert wird. Wird der Schalter geöffnet, bleibt die gespeicherte Ladespannung erhalten und gelangt über den Operationsverstärker OV2 an den Ausgang U_a . Diese Schaltung wird vor dem A/D-Wandler eingesetzt welcher die Quantisierung

durchführt. Sample and Hold Schaltungen werden heutzutage in den A/D-Wandlern schon integriert, somit keine separat aufgebauten Schaltungen notwendig sind. (Stotz, 2011, S. 41)

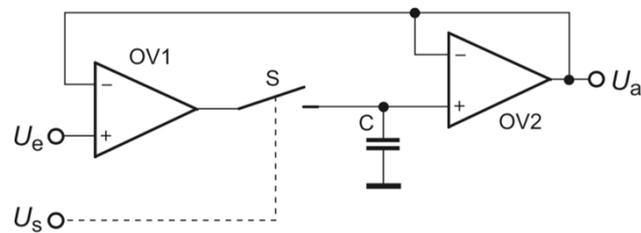


Abbildung 5 Aufbau einer Sample and Hold Schaltung
(Stotz, 2011, S. 41)

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, wird der Eingangssamplwert bis zum nächsten Intervall gehalten damit nur ein Sample gemessen wird.

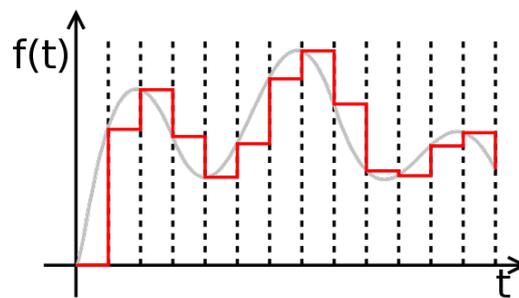


Abbildung 6 Sample and Hold Darstellung

2.2.1.2 Aliasing

Das Abtasttheorem oder auch Nyquist-Shannon Theorem genannt, besagt, dass die Abtastrate f_s mindestens doppelt so hoch wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz f_{\max} sein muss, um das Signal ohne Informationsverlust rekonstruieren zu können. Wird das Abtasttheorem nicht eingehalten, kommt es zu einer Unterabtastung. Es entstehen Spiegelfrequenzen die sich in der Bandbreite des Originalsignals befinden und nicht mehr entfernt werden können. Dieser Effekt wird auch als Aliasing bezeichnet.

Wird zum Beispiel eine Abtastrate von $f_s=48\text{kHz}$ verwendet, können nur Frequenzen bis 24kHz korrekt umgewandelt werden, da sich die Frequenzen oberhalb der halben Abtastrate ins Basisband spiegeln. Die Frequenz der halben Abtastrate wird auch Nyquistfrequenz f_N genannt. Um diesen Aliasing – Effekt zu vermeiden und das Theorem zu erfüllen, muss das analoge Signal vor der

Abtastung bandbegrenzt werden. Daher wird vor jeder A/D-Wandlung ein analoges Tiefpassfilter eingesetzt, welches alle Frequenzanteile oberhalb der halben Abtastrate f_s stark abdämpft bzw. abschneidet. Die Qualität des Tiefpassfilters hat maßgebliche Auswirkungen auf die Qualität der A/D-Wandlung. Soll ein Frequenzbereich von 20kHz übertragen und eine Abtastrate von 44,1kHz verwendet werden, befindet sich die Nyquistfrequenz f_N bei 22,05kHz. Idealerweise sollte das Tiefpassfilter daher sehr steiflankig sein, um den Übertragungsbereich von 20kHz nicht zu beeinflussen. Jedoch ist das in der Praxis kaum realisierbar. Daher werden andere Techniken wie Überabtastung oder Dezimation angewendet, um dieses Problem zu lösen. (Heyden, 2012a, S. 4; Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 787).

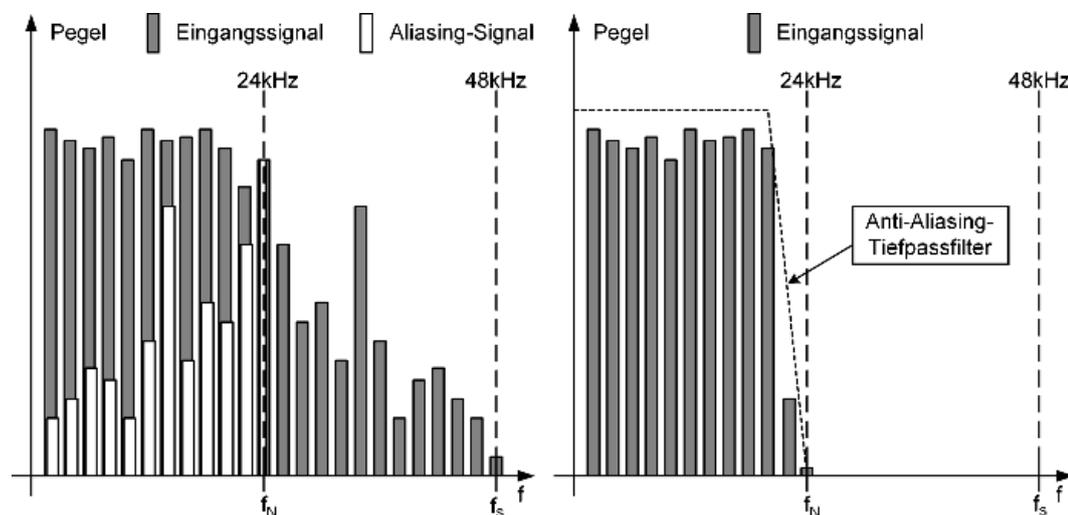


Abbildung 7 Links: Bsp. für Spiegelfrequenzen innerhalb der Bandbreite des Originalsignals; Rechts: kein Aliasing-Effekt durch Tiefpassfilterung (Werwein & Schick, 2008, S. 887)

2.2.1.3 Oversampling

Damit die Qualität der Digitalisierung verbessert wird, kommt Oversampling (Überabtastung) zum Einsatz. Dabei wird das Audiosignal mit einer viel höheren Frequenz abgetastet als durch das Abtasttheorem gefordert. Anschließend wird es bearbeitet und zum Schluss in die vom Wandler geforderte Samplingfrequenz zurück konvertiert. Das Ziel ist es, die maximale Audiobandbreite so nah wie möglich an die halbe Samplingfrequenz zu bekommen und somit der Einsatz des Tiefpassfilters keine Auswirkungen auf das Basisband hat. Da es in der Praxis sehr aufwändig ist steiflankige Anti-Aliasing-Tiefpassfilter zu produzieren, behilft man sich dieser Überabtastungsmethode. Die Abtastrate wird dabei so weit erhöht, damit die Nyquistfrequenz f_N möglichst weit entfernt vom

Übertragungsbereich liegt. Somit ist der Einsatz eines einfachen Filters mit moderater Flankensteilheit ausreichend.

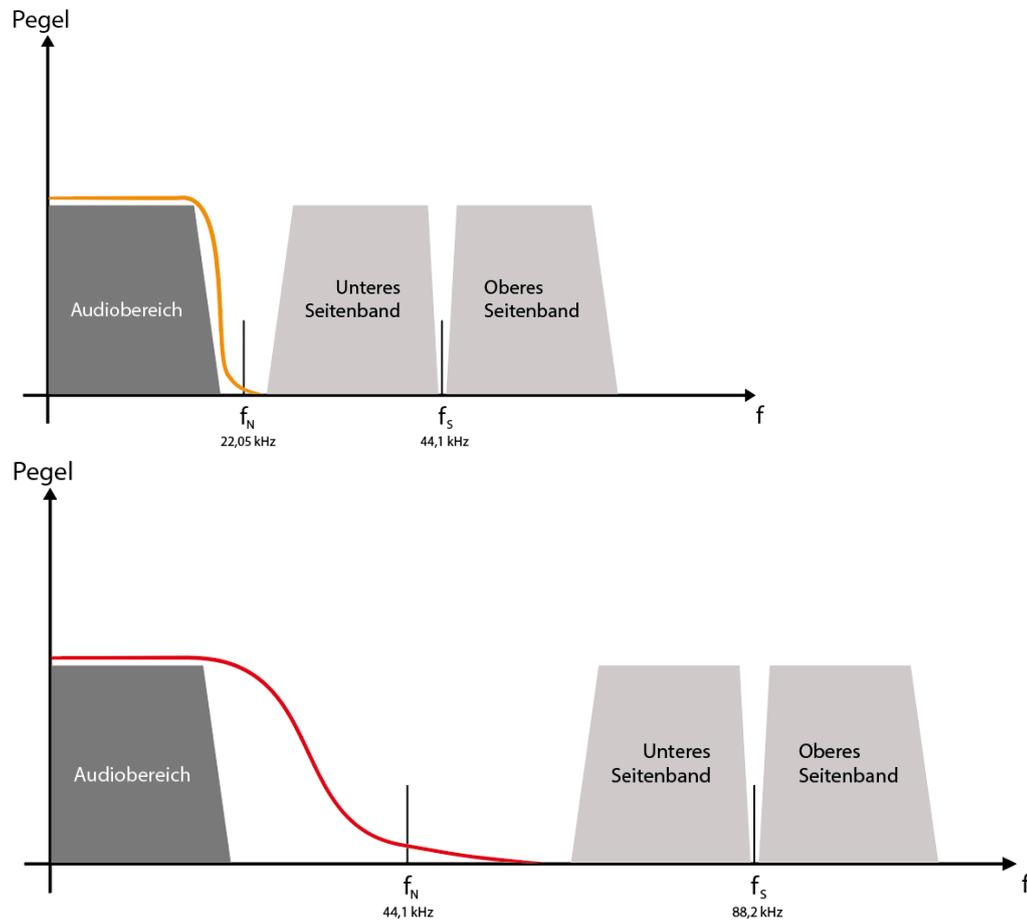


Abbildung 8 Abtastung mit normaler Abtastrate (oben) und mit doppelter (unten)

Dies hat einen weiteren Vorteil, dass der Signal-Rausch-Abstand hiermit verbessert wird. Das hängt damit zusammen, dass das Quantisierungsrauschen sich bei einer Überabtastung auf einen größeren Frequenzbereich verteilt und somit der SNR steigt. Laut Lerch und Weinzierl gewinnt man dabei ca. 3dB an Signal-Rausch-Abstand pro Frequenzverdoppelung (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 802).

Wie Heyden darlegt, hat die Überabtastung auch bei der Bearbeitung der Signale mit digitalen Equalizern einen Vorteil. Da die Algorithmen die zum Einsatz kommen nicht nur die gewünschten Samples, sondern auch ihre benachbarten Samples bearbeiten, wäre eine präzisere Bearbeitung möglich, da mehr Samples pro Zeiteinheit vorhanden wären (Heyden, 2012a, S. 7).

2.2.2 Quantisierung

Laut Nocker wird durch die Quantisierung „[...] ein amplitudenkontinuierliches Eingangssignal in ein amplitudendiskretes Ausgangssignal umgesetzt“ (Nocker, 2004, S. 1). Digitale Signale können keinen kontinuierlichen Zeit- bzw. Amplitudenverlauf besitzen, da nur eine bestimmte Anzahl an diskreten Werten abgespeichert werden können. Das bedeutet, dass zu jedem Abtastzeitpunkt der dazugehörige Spannungswert des Amplitudenverlaufs in einen digitalen Wert umgewandelt wird. Dies geschieht mittels einer Quantisierungskennlinie. Diese Kennlinie entspricht einer Treppenfunktion wie es in Abbildung 9 dargestellt wird.

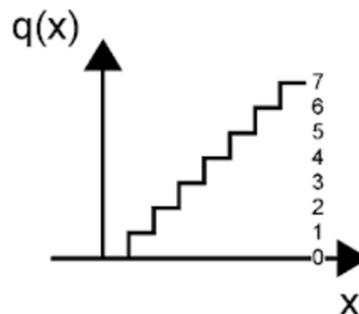


Abbildung 9 Beispiel für eine Quantisierungskennlinie mit 8 Stufen
(Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 668)

Dabei wird das noch zeitdiskrete und wertekontinuierliche Signal über die Quantisierungskennlinie auf die einzelnen Stufen der Treppenfunktion umgesetzt. D.h. dass der jeweilige Amplitudenwert einen Wert annimmt, der der Ordnungsnummer der am nächsten liegenden einzelnen Stufe entspricht. Jeder Amplitudenwert wird mittels dieser Einstufung durch einen binären Zahlenwert beschrieben, der von der Wortbreite und den damit verbundenen Quantisierungsstufen abhängig ist. Je mehr Quantisierungsstufen zur Verfügung stehen, desto genauer kann das Signal rekonstruiert werden (Dickreiter et al., 2014, S. 668; Kuzmowicz, 2015, S. 9).

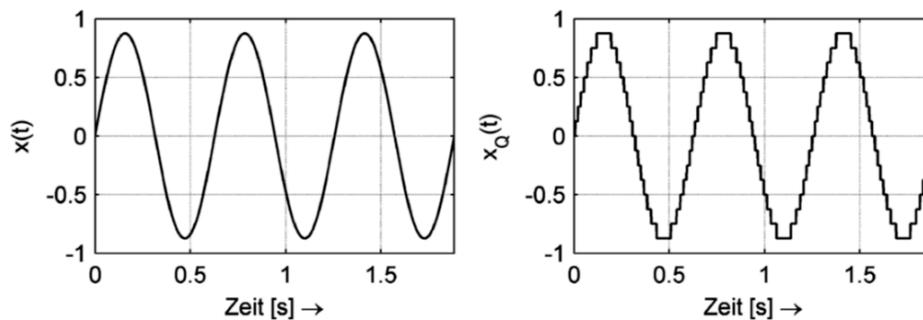


Abbildung 10 Links: Originalsignal; Rechts: Quantisiertes Signal mit einer Auflösung von 4 Bit
(Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 792)

Laut Lerch und Weinzierl lassen sich verlorene Signalanteile während der Abtastung, zumindest theoretisch, durch bestimmte Voraussetzung wieder komplett rekonstruieren, jedoch wäre dies bei der Quantisierung nicht mehr möglich. (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 791)

2.2.2.1 Quantisierungsfehler

Bei jeder Quantisierung kommt es zu einem Quantisierungsfehler $q(n)$. Betrachtet man Abbildung 11, erkennt man, dass eingestufte Amplitudenwerte innerhalb eines Quantisierungsintervalls liegen und somit nicht genau zugeordnet werden können. Daher werden diese Spannungsamplituden auf- bzw. abgerundet. Es kommt also vor, dass zwei unterschiedlich hohe analoge Signalwerte ins gleiche Quantisierungsintervall fallen. Sie werden demnach beide mit derselben Binärzahl codiert. Dieser Fehler darf laut Kuzmowicz maximal plus/minus einer halben Quantisierungsstufe betragen (Kuzmowicz, 2015, S. 9). Kommt es zu einer zu geringen Anzahl an möglichen Einstufungen, kann es zu hörbaren Störungen kommen. Bei Audiosignalen hat dies zur Folge, dass man ein weißes oder gefärbtes Rauschen wahrnimmt. Daher spricht man auch von einem Quantisierungsrauschen. Je genauer das analoge Signal jedoch nachgebildet wird, desto geringer ist dieses Rauschen.

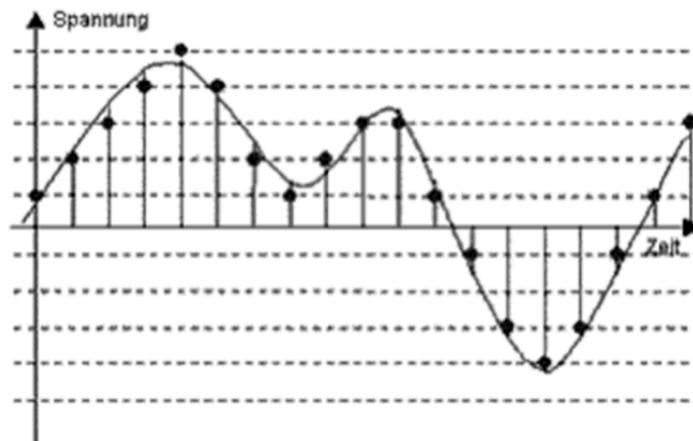


Abbildung 11 Quantisierungsfehler plus/minus einer halben Stufe
(Heyden, 2012a, S. 9)

Die Quantisierung lässt sich laut Lerch und Weinzierl wie in Abbildung 12 dargestellt beschreiben. Sie ist das Resultat der Addition des Eingangssignals $x(n)$ mit dem Fehlersignal $q(n)$. (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 791)

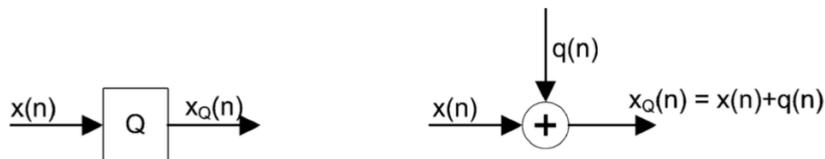


Abbildung 12 Beschreibung des Quantisierungsfehlers $q(n)$
(Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 791)

2.2.2.2 Signal-Rausch-Abstand

Der Quantisierungsfehler steht im direkten Bezug zum Signal-Rausch-Abstand (Signal-to-Noise-Ratio SNR) und wird üblicherweise auch durch diesen Faktor beschrieben. Als Formel könnte man es so formulieren, dass die Leistung des Nutzsignals W_S im Pegelverhältnis zur Leistung des Rauschsignals W_Q steht.

$$SNR = 10 \log \left(\frac{W_S}{W_Q} \right)$$

Der SNR ist ein Maß für die Reinheit eines Signals und wird in Dezibel (db) angegeben. Je größer der Signal-Rausch-Abstand ist, desto störungsfreier das eigentliche Nutzsignal. Dies kann durch die Verwendung von höheren Abstraten oder durch die Quantisierung mit höheren Wortbreiten erzielt werden. In Abbildung 13 lässt sich schnell erkennen, dass mit zunehmender Quantisierungsstufen auch der damit verbundene Störabstand steigt. (Lipinski, 2014)

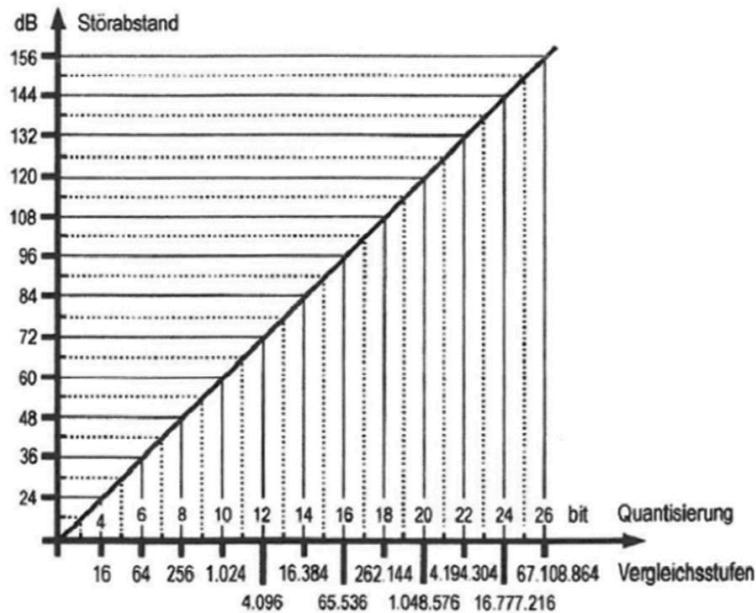


Abbildung 13 Vergleich Störabstand zu Quantisierungsstufen
(Heyden, 2012a, S. 10)

2.2.2.3 Noise-Shaping

Neben der Methode des Überabtastens kann auch dieses Verfahren dazu verwendet werden das Quantisierungsrauschen zu reduzieren und somit den Signal-Rausch-Abstand zu erhöhen. Dabei macht man sich die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs zum Vorteil. Das Quantisierungsrauschen wird in einem Frequenzbereich verschoben, bei dem das Gehör sehr Empfindungsarm ist. Die Rauschenergie bleibt konstant und unverändert, hingegen sinkt die Rauschwahrnehmung. Noise-Shaping ist in Verbindung mit Oversampling sehr effizient. Dabei werden die Rauschanteile die sich im Übertragungsbereich befinden in einem Bereich verschoben der oberhalb der Wahrnehmungsgrenze liegt. Somit ist es möglich dieses Rauschen im Nachhinein herauszufiltern. (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 803)

2.2.2.4 Dithering

Dithering ist ein weiteres Verfahren mit dem Quantisierungsfehler reduziert werden können. Durch die Zugabe eines geringen Rauschanteils - z.B weißes Rauschen – wird das Quantisierungsrauschen abgemildert. Bei zu geringer Aussteuerung des Eingangssignals werden nur eine geringe Anzahl an Quantisierungsstufen überdeckt und das Quantisierungsrauschen nimmt den größten Teil des Gesamtsignals ein. Ist das Nutzsignal kleiner als eine Quantisierungsstufe würde es zu keiner Änderung des Digitalsignals kommen.

Wird jedoch Dithering angewendet würde das Signal zufällig gerundet werden und dessen Mittelwert würde eher dem Originalsignal entsprechen. Man kann also sagen, dass Dithering den Rauschanteil erhöht, aber zugleich der mittleren Quantisierungsfehler kleiner wird. (Stotz, 2011, S. 51) Laut Weinzierl ist Dithering bei der A/D-Wandlung nicht notwendig, da der Signal-Rausch-Abstand des analogen Signals nicht wesentlich größer ist als der des geditherten Signals. (Heyden, 2012a, S. 10)

2.2.3 Codierung

Nach der Abtastung und Quantisierung sind alle Voraussetzungen erfüllt für die Übertragung des Signals. Man unterscheidet zwischen Quell-, Kanal- und Leitungskodierung.

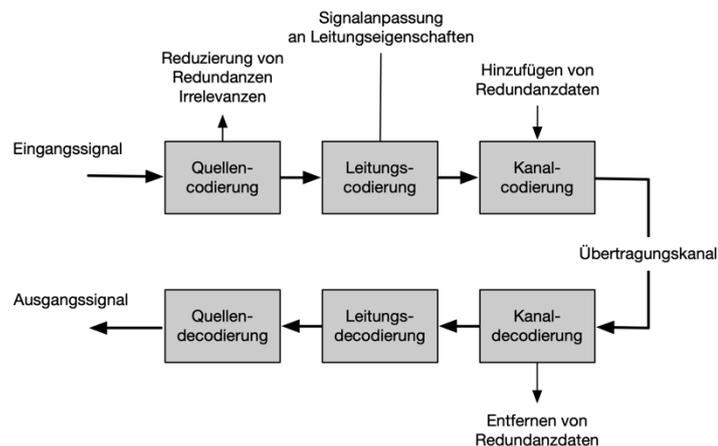


Abbildung 14 Codierung Blockschaltbild

Die diskreten Werte werden in ein effizienteres Format umgewandelt. Für die Verarbeitung des Signals wird das Binäre Zahlensystem verwendet. Die Wortbreite beschreibt die Anzahl der Bits pro Zahlenwert. Je größer die Wortbreite ist, desto genauer kann das Signal rekonstruiert werden, jedoch erhöht sich der Rechenaufwand exponentiell bei Vergrößerung der Wortbreite. Daher muss der Aufwand und Nutzen gut gegenübergestellt werden.

Im Consumer Bereich werden z.B. 16 Bit ($2^{16} = 65536$ Spannungswerte) eingesetzt. In der professionellen Audiobranche haben sich jedoch höhere Wortbreiten durchgesetzt. Da werden z.B. 20, 24, 32 bzw. auch 40 Bit Wortbreiten eingesetzt. Die am häufigsten verwendete Wortbreite ist aber 24 Bit mit $2^{24} = 16777216$ möglichen Spannungswerten. Je größer die Wortbreite, desto

mehr mögliche Spannungswerte stehen für die Quantisierung zur Verfügung und desto genauer wird das Signal abgebildet.

2.2.3.1 Quellkodierung

Bei der Quellkodierung geht es um die effiziente Nutzung der Daten. Die Hauptaufgabe ist es nur relevante Informationen ökonomisch zu übertragen. Dazu müssen die Daten möglichst ohne Informationsverlust komprimiert und redundante und irrelevante Informationen entfernt werden, da diese meist durch nicht genutzte Datenwörter entstehen. Man unterscheidet zwischen verlustlose Kompression und verlustbehaftete Kompression. Beim verlustlosen Kompressionsverfahren sind die Originaldaten rekonstruierbar. Hierunter zählen z.B. die Huffman-Kodierung oder die Shannon-Kodierung. Beim verlustbehafteten Verfahren hingegen können die Daten nicht mehr rekonstruiert werden. Als bestes Beispiel zählt hier die Audiokompression MP3. In der professionellen Audiotechnik werden verlustfreie Formate bevorzugt. Daher wird für die reine Umsetzung der quantisierten Spannungswerte laut Heyden die Pulse-Code-Modulation (PCM) eingesetzt. Dabei wird jeder Spannungswert mit einem Zahlenwert und einem Codewort beschrieben. (Heyden, 2012a, S. 12)

2.2.3.2 Kanalkodierung

Bei der Kanalkodierung werden die umgewandelten Daten für die Übertragung aufbereitet. Hierzu zählen auch das Hinzufügen von Redundanz, um somit Übertragungsfehler vorzubeugen. Weiters soll mittels der Kanalkodierung die Übertragungsrate effizient verwendet werden.

2.2.3.3 Leitungskodierung

Das Binärsignal welches nach der Quellkodierung und Kanalkodierung nun anliegt, muss nun für die Übertragung im Netzwerk codiert werden, um die Eigenschaften optimal auszunutzen. Sie legt fest, wie das Signal auf der physikalischen Ebene übertragen wird.

Nach der Codierung erfolgt noch die Einbindung von Informationen zum logischen Verhalten auf der Übertragungsstrecke bzw. an den Schnittstellen. Diese sogenannten Protokolle fügen unter anderem Informationen zur Codierungsart, Übertragungsfrequenz oder Taktrückgewinnung hinzu.

2.2.4 D/A Wandlung

Um das digitale Signal in ein analoges Signal zurück zu wandeln, wird ein D/A Wandler eingesetzt. Für die Rekonstruktion wird wie beim A/D

2 Digitale Signale

Wandlungsprozess ein Tiefpassfilter oder ein sogenanntes Rekonstruktionsfilter benötigt. Dieses ist so ausgelegt, dass es nur Signalfrequenzen unterhalb der halben Samplingfrequenz durchlässt (Abbildung 15, rechts). Da der D/A Wandler analoge Spannungsfolgen erzeugt, die den digitalen Wertefolgen entsprechen, kommt es zur Wiederholung des Spektrums bis zur Nyquistfrequenz f_N . Wie in Abbildung 15 links dargestellt, kommen diese links und rechts von der Samplingfrequenz f_s und deren Vielfachen vor. Man könnte meinen, dass der Frequenzbereich ab 20kHz für den Menschen nicht mehr hörbar ist und somit es keine Auswirkungen haben würde, jedoch beschreiben es Werwein und Schick so, dass es zu hörbaren nichtlinearen Verzerrungen im Übertragungsfrequenzbereich kommen würde, da sich die „[...] hohen Frequenzanteile aufgrund der immer vorhandenen Nichtlinearitäten nachfolgender Halbleiterschaltungen (z.B. Endverstärker) durch Intermodulation in den Übertragungsfrequenzbereich zurückspiegeln [...]“ würden. (Werwein & Schick, 2008, S. 887) Daher wird nach jedem D/A Wandler ein analoges Tiefpassfilter eingesetzt.

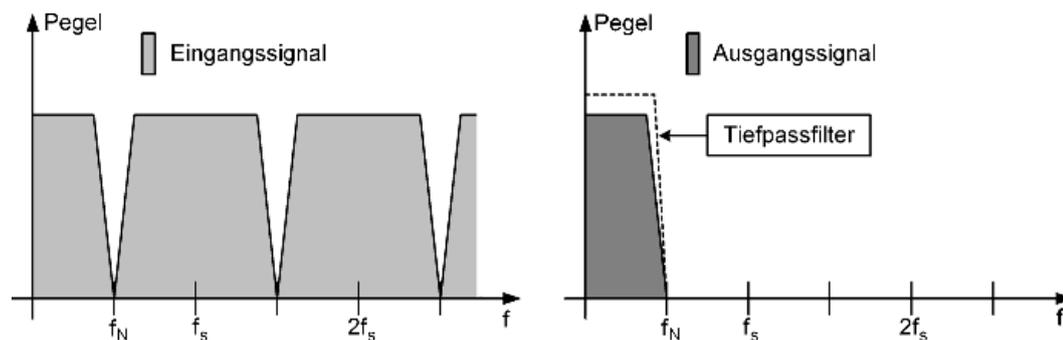
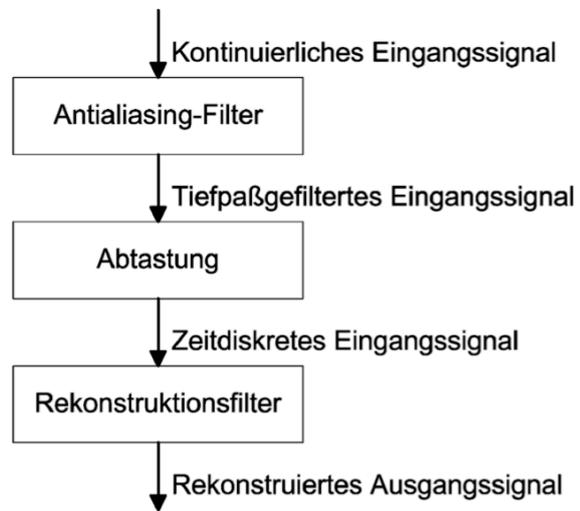


Abbildung 15 Links: Spiegelung des Nutzsinal-Spektrums nach der D/A Wandlung. Rechts: Ausgangssignal nach der Tiefpassfilterung (Werwein & Schick, 2008, S. 887)

Um eine fehlerfreie Rekonstruktion des Signals zu erzielen, müssen alle Verarbeitungsschritte, die in Abbildung 16 beschrieben werden, eingehalten werden.



*Abbildung 16 notwendige Schritte um ein Signal fehlerfrei zu rekonstruieren
(Lerch & Weinzierl, 2008a, S. 790)*

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

In diesem Kapitel sollen Netzwerktechnikbegriffe erläutert werden, um somit ein grundlegendes Verständnis für die in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden Audionetzwerke und deren Protokolle zu erlangen.

Jede Datenübertragung lässt sich in drei Teile unterteilen:

- Anwendung
- Übertragungsweg
- Protokoll

Als Anwendung versteht man die Bereitstellung der Daten für die Kommunikation und dementsprechend auch wieder die Entgegennahme. Unter Übertragungsweg versteht man das verwendete Medium, über welches die Informationen übertragen werden. Darunter zählen hier z.B. Kupferkabel oder eine Funkverbindung. Und das Protokoll regelt die Kommunikation über den Übertragungsweg.

3.1 Was ist ein Netzwerk?

Laut Slavik sind Netzwerke nicht zwingend digital. Sie müssen dementsprechend auch nicht immer etwas mit „IP (Internet Protokoll)“ zu tun haben. Netzwerke findet man grundsätzlich immer dann, wenn elektronische Komponenten miteinander verbunden werden. So spricht man auch von Schaltungsnetzwerken, wenn Widerstände, Kondensatoren oder andere aktive Bauelemente miteinander verbunden werden und somit eine bestimmte Funktion ermöglichen. Für den Zweck dieser Arbeit, behandeln wir jedoch sogenannte „IT-Netzwerke“. Netzwerke in der Informationstechnologie (IT) haben den Hauptzweck der Datenkommunikation und sind definiert als ein Verbund von mehr als zwei Geräten, die über Hardware und Software miteinander verbunden sind und somit auch untereinander kommunizieren können. (Bouillot et al., 2009, S. 4)

Der Hauptvorteil eines Netzwerks besteht darin, dass Ressourcen und Informationen gemeinsam genutzt werden können. Die Kommunikation

untereinander erfolgt über Übertragungsprotokolle, die neben dem eigentlichen Datentransfer auch den Verbindungsaufbau und die Adressierung der einzelnen Geräte im Netzwerk durchführt.

3.2 Netzwerkkategorien

Man klassifiziert Netzwerke grundsätzlich nach ihrer Reichweite und ihrer Übertragungstechnologie. Dabei werden sie zwischen lokale bzw. nicht-lokale Netzwerke kategorisiert.

Die einfachste Netzwerkkategorie ist das Personal Area Network (PAN). Hierbei handelt es sich um die Verbindung von Geräten, die in einem Arbeitsradius von ca. 10m liegen und zum persönlichen Zweck dient. Als Beispiel zählen hier der Anschluss vom Computer zu Peripheriegeräten wie Drucker oder externe Festplatten mittels USB, FireWire oder Thunderbolt oder das anschließen vom Telefon am Computer. Weiters kann hier auch der Anschluss zum KFZ dienen durch das Analysegeräte.

In der professionellen Audiotechnik arbeitet man meist in sogenannten LANs (Local Area Networks). Diese verbinden alle Geräte untereinander in unmittelbarer Nähe. Dabei können die Geräte zum Beispiel in verschiedenen Räumen oder Gebäudeetagen sein, aber nicht weiter als über den Grundstücksgrenzen hinaus. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist die Anzahl der Netzwerkteilnehmer. Diese können von wenigen bis hin zu hunderten Teilnehmern variieren. Ein weiterer Vorteil von LAN's ist die hohe Datentransferrate.

Man unterscheidet noch unter regionalen Netzen – MAN (Metropolitan Area Network). Dabei werden mehrere LAN's über den Gebäudegrenzen zusammengefasst. Beschränkt werden MAN's üblicherweise bis zu den Stadtgrenzen. Geht die Vernetzung über den Stadtgrenzen hinaus, spricht man von sogenannten öffentliche Netzwerken - WAN's (Wide Area Network). Diese können verschiedene Unternehmenssitze bzw. Rundfunkanstalten untereinander vernetzen. Als Beispiel wäre hier die Vernetzung der ARD Anstalten mit dem Sternpunkt in Frankfurt zu nennen. Hierfür wird ein sogenanntes HYBNET eingesetzt, um die Verbindung zu den einzelnen Anstalten herzustellen.

Die bekannteste Netzwerk-Dimension ist das GAN (Global Area Network) welches als globales Netz definiert wird. Als Beispiel hierfür ist das Internet zu nennen. (Slavik, 2017a)

Weitere Netzwerkkategorien sind VLAN (Virtual Local Area Network) oder VPN (Virtual Private Network). Dabei werden ins Netzwerk nur ausgewählte Teilnehmer zugelassen und ist somit nicht öffentlich zugänglich. Ein Vorteil solcher Netzwerkkategorien ist die geringere Latenzzeit, die höhere Übertragungsrate und eine erhöhte Sicherheitsstufe gegen unerwünschte Zugriffe. (Heyden, 2012a, S. 28)

Netzwerke werden auch durch verschiedene Topologien unterschieden die in Kapitel 3.3 Topologien beschrieben werden.

3.3 Topologien

Unter einer Netzwerk-Topologie versteht man grundsätzlich den strukturellen Aufbau eines Netzwerks aus physikalischer und logischer Sicht. Die physikalische Topologie dient dazu, den Datenverkehrsweg zu beschreiben. Das bedeutet, dass es hierbei um einzelne Ports bzw. Kabelverbindungen geht. Man kann sich das so vorstellen, dass es die Kabelverlegung kennzeichnet. Die wichtigsten Grundformen hierbei sind:

- Bus
- Stern
- Ring

Dabei muss aber hingewiesen werden, dass die Stern-Topologie sich im LAN eindeutig etabliert hat.

Die Logische-Topologie beschreibt die Datenübertragungsregeln. Näher ausgedrückt wird hier beschrieben, wer wie auf das Datenübertragungsmedium zugreifen darf.

Zwischen physikalischer und logischer Topologie existiert natürlich auch ein Zusammenhang. Früher wurden einer physikalischen Topologie gezielt eine logische Topologie zugewiesen, jedoch ist es aus heutiger Sicht nicht mehr notwendig, da mit VLAN's physikalische und logische Topologien unterschiedlich sein können. Die physikalische Topologie ist jedoch ausschlaggebend und sollte nicht vernachlässigt werden, da sie Informationen zur Flexibilität bzw. Ausbaufähigkeit des Netzwerkes preisgibt. Weiters sind Aspekte wie Übertragungsbandbreite, Geschwindigkeit oder Ausfallsicherheit mit dieser Topologie in Zusammenhang zu bringen.

3.3.1 Bus

Die Bus-Topologie ist eine der einfachsten und kostengünstigsten Lösungen ein Netzwerk aufzubauen. Es zeichnet sich dadurch aus, dass nur ein einzelnes Kabel verwendet wird, um alle Geräte miteinander zu verbinden. Sie wird auch noch Linien- bzw. Reihennetzwerk genannt.

Da diese Topologie keine Wiederaufbereitung des Signals durchführt, wird von einer passiven Topologie gesprochen. Die angeschlossenen Geräte greifen dabei das Signal direkt vom Kabel ab oder senden darauf. Dabei verbreiten sich die Informationsdaten in beide Richtungen.

Ein großes Problem hierbei ist die Signaldämpfung, da das Signal durch das Kabel gedämpft wird. Daher ist die verwendete Kabellänge bei dieser Topologie beschränkt. Durch sogenannte Repeater wäre es aber möglich die Länge zu erweitern. Um Kollisionen bei der Datenübertragung zu vermeiden müssen bei der Bus-Topologie spezielle Abschlusswiderstände eingesetzt werden. Somit werden die Signale an den Enden nicht zurück ins Kabel reflektiert und können keine Daten zerstören. (Bauch, 2008, S. 17)

Vorteile der Bus-Topologie

- kostengünstig aufgrund geringer Kabelmengen

Nachteile der Bus-Topologie

- einziges Übertragungskabel
- kein simultanes senden mehrerer Geräte
- bei Kabelbruch oder lockerer Steckverbindung ist der gesamte Netzstrang betroffen. Dies führt zu einer aufwendigen Fehlersuche.
- Keine Sicherheitsverschlüsselung – Daten können direkt am Bus ausgelesen werden.

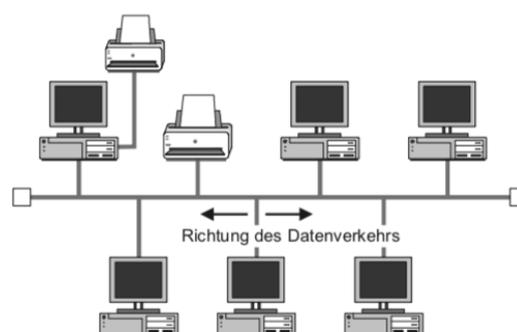


Abbildung 17 Darstellung einer Bus-Topologie

3.3.2 Stern

Die Stern-Topologie hat als zentrale Stelle den sogenannten Hub welcher als Verteilstation dient. Der Hub ist das eigentliche „Herzstück“ dieser Topologie, da er zuständig für die Übermittlung des Datenverkehrs ist. Jede einzelne Station wird über ein dediziertes Kabel angeschlossen. Somit existieren in diesem Netzwerk viele einzelne Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen Hub und den jeweiligen Geräten. Der Hub hat als Kernaufgabe dazu zu sorgen, dass alle Geräte miteinander kommunizieren können und somit stellt dieser dafür eine Zentrale zur Verfügung, bei der sich alle Geräte verbinden können. Heutzutage werden diese Hubs oft durch leistungsfähigere Switches ersetzt. Dies wird aber später näher erläutert. Verwendung findet die Stern-Topologie heutzutage bei den gängigsten Ethernet-Varianten wie zum Beispiel Gigabit Ethernet. (Bauch, 2008, S. 18)

Vorteile der Stern-Topologie

- Bei Defekt eines Kabels oder Gerätes hat das keine Auswirkungen auf das gesamte Netzwerk
- Hubs die Aktiv sind können als Signalverstärker dienen
- Es sind höhere Datendurchsatzraten möglich durch Verwendung von Switches (Ausnutzung der vollen Bandbreite)
- Einfache Erweiterung durch anschließen neuer Geräte am Hub

Nachteile der Stern-Topologie

- Verwendung mehrere Kabel – Teurer
- Sollte der Hub ausfallen, ist somit das ganze Netzwerk betroffen.

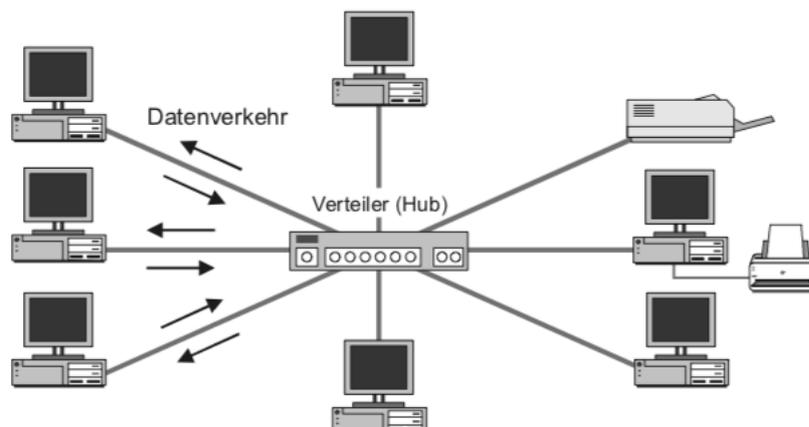


Abbildung 18 Darstellung einer Ster-Topologie

3.3.3 Ring

Bei der Ring-Topologie handelt es sich um einen geschlossenen Kreis. Dabei kann nicht genau definiert werden wo das Netzwerk anfängt oder endet. Jedes angeschlossene Gerät ist mit jeweils zwei anderen direkt benachbarten Geräten verbunden und bildet somit eine Punkt-zu-Punkt Verbindung. Bei dieser Topologie sind die Vorgänger und Nachfolger klar definiert. Das Signal kann nur in eine Richtung gesendet werden und wird vom Empfänger verarbeitet und verstärkt weitergesendet. Ein Vorteil hierbei ist, dass keine aktiven Verstärkerelemente notwendig sind. Jedoch liegt hier auch andererseits der Nachteil. Denn sollte ein Gerät ausfallen, wird das gesamte Netzwerk unterbrochen und somit ist keine Kommunikation mehr möglich. Es muss aber erwähnt werden, dass diese Netzwerkart sehr selten heutzutage als physikalische Topologie eingesetzt wird. Der Grund dafür ist der enorme Aufwand bei der Kabelverlegung. Hingegen findet sie aber als logische Topologie noch Einsatz bei sogenannten Ringleitungsverteilern. Hier entspricht die physikalische Verkabelung einer Sterntopologie, aber die Vorhergehensweise wie die Daten übermittelt werden entspricht der einer Ring-Topologie. (Bauch, 2008, S. 3)

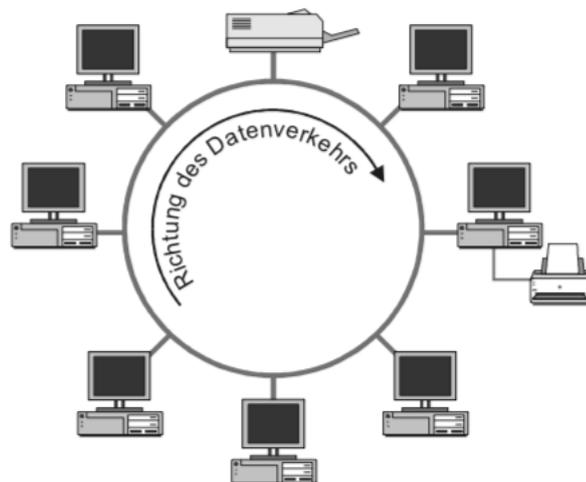


Abbildung 19 Darstellung einer Ring-Topologie

3.3.4 Mischformen

In der Praxis kann es vorkommen, dass verschiedene Teilnetze physikalisch miteinander verbunden werden. Dabei spricht man auch von sogenannten Backbones. Diese können zum Beispiel verschiedene Gebäude miteinander verbinden, damit die jeweiligen Teilnetze miteinander kommunizieren können.

Stern-Bus-Netz

Bei dieser Mischform werden einzelne Sternnetze mittels eines Buskabels miteinander verbunden. Die Sternnetzwerke haben als zentrale Schnittstelle einen Hub die miteinander dann über ein Bus-Kabel verbunden werden. Wird die Verbindung zwischen den Hubs getrennt durch einen Kabelbruch zum Beispiel, fällt nur die Kommunikation zwischen den einzelnen Sternnetzen aus. Alle Geräte innerhalb eines Netzwerkes können aber miteinander noch kommunizieren.

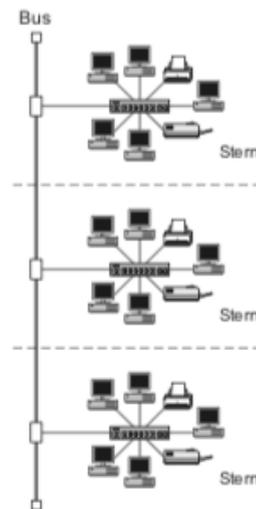


Abbildung 20 Darstellung Stern-Bus-Netz

Stern-Stern-Netz

Beim Stern-Stern-Netz sind die einzelnen Teilnetze wieder in Stern-Form verkabelt. Das bedeutet jedes Netzwerk besitzt seinen eigenen Verteiler-Hub. Jedoch sind diese dann mit einem zentralen Haupt-Hub verbunden an dem in der Praxis dann auch wichtige Server zum Beispiel angeschlossen werden. Weiters ist es in der Praxis üblich den Haupt-Hub redundant auszulegen. Das bedeutet, sobald ein Fehler beim ersten Haupt-Hub auftritt, der zweite Haupt-Hub eingreift und die Kommunikation aufrechterhält.

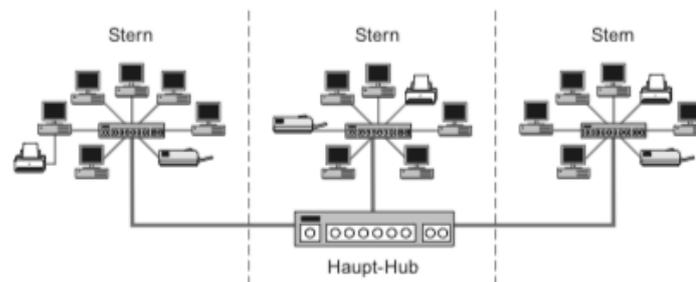


Abbildung 21 Darstellung Stern-Stern-Netz

Baum

Bei einem Baum-Netz handelt es sich eigentlich um eine Erweiterung des Stern-Stern-Netzwerkes. Dabei gehen von einer zentralen Stelle aus viele kleinere Verzweigungen. Vorstellen kann man sich das so, als wären die abgebildeten Knotenpunkte neue Hubs die wiederum mit anderen Hubs verbunden werden

und in letzter Instanz dann die Endgeräte angeschlossen sind. Diese Struktur eignet sich grundsätzlich gut bei der Implementierung von Firmennetzwerken, da von einem sogenannten Rechenzentrum aus die einzelnen Zweigstellen bzw. Firmengebäude verbunden werden.

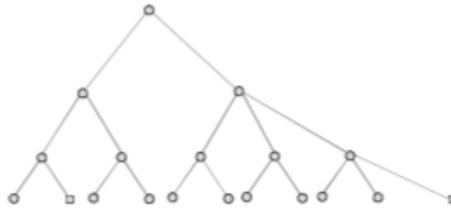


Abbildung 22 Darstellung Baum-Netz

Maschennetz

Das Maschennetz ist die komplexeste Art dieser Netze, da hier die Verbindung der einzelnen Netzknoten mit anderen Knotenpunkten besteht. Das heißt, dass alle Knoten untereinander physikalisch verbunden sind. Dies hat den Vorteil, dass somit redundante Verbindungen aufgebaut sind und auf diese bei Ausfall direkt zugegriffen werden kann. Man unterscheidet grundsätzlich noch bei diesen redundanten Leitungen, ob sie aktiv (load sharing) oder passiv (standby) eingesetzt werden.



Abbildung 23 Darstellung Maschennetz

3.4 Übertragungsmedien

Für die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger ist der Übertragungsweg ausschlaggebend. Verschiedene Parameter wie zum Beispiel die Übertragungsrates, Zuverlässigkeit, Reichweite und die Robustheit dienen als Kenndaten um das richtige Medium für das jeweilige Einsatzgebiet auszuwählen. (Heyden, 2012a, S. 16)

Man unterscheidet heutzutage zwischen Kupferkabeln, Glasfaserkabeln und drahtloser Übertragung.

3.4.1 Koaxialkabel

Koaxialkabel, oder auch BNC-Kabel genannt, können für verschiedene Einsatzgebiete eingesetzt werden wie zum Beispiel in der Antennentechnik oder im Hochfrequenzbereich. In der Netzwerktechnik spielten diese Kabeltypen früher eine sehr wichtige, jedoch werden sie heutzutage nicht mehr eingesetzt.

3.4.2 Twisted-Pair-Kabel

Kupferkabel sind heutzutage noch immer das am weit verbreitetste Übertragungsmedium in der Audiotechnik. Hierbei werden die Daten als nieder- oder hochfrequenter elektrischer Wechselstrom über das gut leitende Kupfer übertragen. Bei Twisted-Pair-Kabel handelt es sich um vier-, acht- oder mehradrige Kupferkabel. Jeweils zwei Adern sind miteinander verdreht um somit Leitungsstörungen entgegenzuwirken und das Übersprechen auf andere Adernpaare zu minimieren. Je mehr Adern das Kabel besitzt, desto höher ist die Übertragungsrage. Die Datenübertragung kann Voll-Duplex bzw. Halb-Duplex stattfinden. Bei der Voll-Duplex-Übertragung ist das gleichzeitige Empfangen und Senden möglich. Bei der Halb-Duplex-Übertragung hingegen wird abwechselnd gesendet und dann empfangen. Für jede Übertragungsrichtung (senden oder empfangen) wird zum Beispiel für eine 100Mbit Übertragung jeweils ein Adernpaar benötigt. Für eine 1000Mbit Übertragung hingegen schon zwei Adernpaare pro Übertragungsrichtung. Durch den Aufbau des Kabels lässt sich die Übertragungreichweite bestimmen. Weiters hängt diese von der Dämpfung (= Länge) des Kabels und von den externen Störeinflüssen ab. Ein Nachteil dieses Übertragungsmediums ist die maximale Übertragungslänge von 100 Metern. Kommen höhere Distanzen vor, ist die Leitungsdämpfung und die Einstreuung von Störungen so groß, dass der Rauschanteil gegenüber dem Nutzsignal ineffizient hoch wird.

Twisted Pair-Kabel sind je nach Übertragungsfrequenz, Übertragungsrage und der verwendeten Schirmung in verschiedenen Kategorien unterteilt. Man unterscheidet zwischen folgende Schirmungen:

3.4.2.1 U/UTP (*Unshielded / Unshielded Twisted Pair*)

Bei dieser Variante sind die Adernpaare verdreht, jedoch besitzen sie keine zusätzliche Abschirmung. Bei Verwendung hoher Datenraten sollten diese Kabel vermieden werden. Sie gehörten früher typischerweise der CAT-3. Heutzutage kommen diese Kabel auch als CAT-5/5e vor.

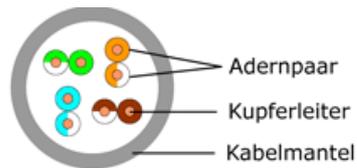


Abbildung 24 U/UTP

3.4.2.2 S/UTP (Screened / Unshielded Twisted-Pair)

Es handelt sich hierbei um die UTP Variante nur mit zusätzlicher Gesamtabschirmung aller Adernpaare. Dazu wird ein dünnes Kupfergeflecht verwendet um äußere Störeinflüsse zu reduzieren.



Abbildung 25 S/UTP

3.4.2.3 F/UTP (Foilshielded / Unshielded Twisted-Pair)

Für den Gesamtschirm wird meist eine metallisierte Kunststoffolie verwendet um die Adernpaare vor äußeren Störeinflüssen zu schützen. CAT-5 / 5e

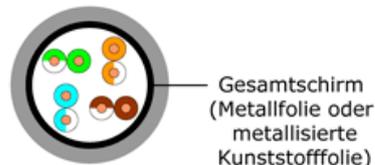


Abbildung 26 F/UTP

3.4.2.4 U/FTP (Unshielded / Foilshielded Twisted-Pair)

Bei U/FTP werden alle einzelnen Adern Paare abgeschirmt. Man unterscheidet zwischen PiMF (Paarweise in Metallfolie) oder ViMF (Vierer in Metallfolie). ViMF tritt nur ab CAT 6 auf.

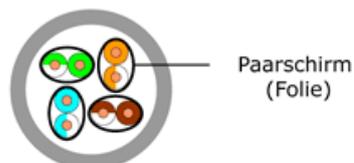


Abbildung 27 U/FTP

3.4.2.5 S/FTP (Shielded / Foilshielded Twisted-Pair)

Diese Kabel sollten dort verwendet werden wo hohe Störeinwirkungen möglich sind. Wie zum Beispiel in Büros mit mehreren Computer. CAT-6e / CAT-7

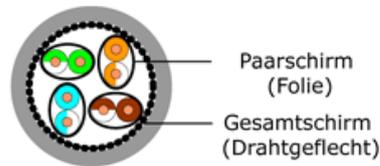


Abbildung 28 S/FTP

3.4.2.6 SF/FTP (Screened Foilshielded / Foilshielded Twisted-Pair)

Jedes einzelne Adernpaar besitzt eine Folienabschirmung und wird durch eine doppelte Gesamtabschirmung vor externen Störungen gesichert. Durch diese Art und Weise werden das Übersprechen der einzelnen Adernpaare unterdrückt sowie eine optimale Störunterdrückung gewährleistet. CAT-7

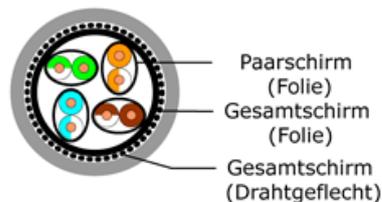


Abbildung 29 SF/FTP

Twisted Pair-Kabel werden in genormte Kategorien und Klassen unterteilt. Dabei kommen drei wichtige Standards vor:

- EIA/TIA 568 (USA)
- ISO/IEC 11801 (International)
- EN 50173 (Europa)

Je nach Einsatzgebiet soll eine bestimmte Klasse bzw. Kategorie verwendet werden. Laut Schnabel stehen die Bandbreite und die Kabellänge in einem Verhältnis zueinander. Die nutzbare Kabellänge würde sich bei zu hoher Übertragungsfrequenz drastisch reduzieren.

EIA/TIA 568	ISO/IEC 11801	EN 50173	Bandbreite	Anwendung
Cat. 1	-	-	0,4 kHz	Telefon- und Modemleitungen
-	-	Class A	100 kHz	Telefon- und Modemleitungen

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

Cat. 2	-	Class B	4 MHz	Terminal-Systeme, ISDN
Cat. 3	-	Class C	12,5 - 16 MHz	10Base-T, 100Base-T4, ISDN, analoges Telefon
Cat. 4	-	-	20 MHz	Token Ring (16 MBit)
Cat. 5	Cat. 5	Class D	100 MHz	100Base-TX, SONET, SOH
Cat. 5e	Cat. 5e	Class D	100 MHz	1000Base-T
Cat. 6	Cat. 6	Class E	250 MHz	1000Base-T, 155-MBit-ATM, 622-MBit-ATM
Cat. 6A	Cat. 6	Class EA	500 MHz	10GBase-T (bis 55 Meter)
-	Cat. 7	Class F	600 MHz	10GBase-T (bis 100 Meter)
-	Cat. 7	Class FA	1.000 MHz	10GBase-T
-	Cat. 8	Class G	1.600 - 2.000MHz	40GBase-T und 100GBase-T

Tabelle 1 Übersicht der Klassen und Kategorien von Twisted Pair-Kabel (Schnabel, o. J.-b)

3.4.2.7 Steckverbinder für Twisted-Pair-Kabel

Der standardmäßig verwendete Stecker für Twisted-Pair-Kabel ist der 8 polige RJ45 Stecker bzw. auch Western Stecker genannt. Man unterscheidet zwischen zwei Arten der Belegung. EIA/T-568A und EIA/T-568B. Die am weit verbreitetste Art ist die EIA/T-568B Belegung. Sie unterscheiden sich grundsätzlich nur durch die Vertauschung zweier Pin Belegungen.

3.4.3 Glasfaserkabel

Glasfaserkabel oder auch bekannt als Lichtwellenleiter (abgekürzt LWL) ist ein optisches Übertragungsmedium. Dabei werden die Daten in Form von Licht bzw. Lichtimpulsen übertragen. Es können somit höhere Übertragungsraten und längere Distanzen ohne Probleme erzielt werden. Mit LWL sind zum Beispiel Datenraten von mehreren Gigabit pro Sekunde und einer Übertragungsentfernung von mehreren Kilometern realisierbar. Ein weiterer wichtiger Vorteil bei der Verwendung von Lichtwellenleiter ist die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Einstrahlungen. Jedoch muss

auch erwähnt werden, dass LWL nur halbduplex-fähig sind und somit bei einer bidirektionalen Datenübertragung immer mindestens zwei Fasern für den Hin- und Rückweg notwendig sind. Da die Bandbreite eines Lichtwellenleiters ca. 60THz beträgt, zählt es zum Übertragungsmedium der Zukunft. (Heyden, 2012a, S. 18)

3.4.3.1 Aufbau und Prinzip

Für die Datenübertragung werden im Gegensatz zur elektrischen Übertragung kein nieder- oder hochfrequenter elektrischer Wechselstrom eingesetzt, sondern Lichtimpulse übertragen. Im inneren des Kabels befindet sich eine dünne Glasfaser (Kern). Um den Kern herum befindet sich ein Glasmantel der wiederum von einer Gummiummantelung, der gegen äußere Einflüsse schützt, versehen ist. Der Kern an sich kann aus Glas oder Kunststoff bestehen. Dabei muss das Material einen hohen Brechungsindex aufweisen. Der Glasmantel hingegen muss einen niedrigen Brechungsindex besitzen. Das Prinzip bei der LWL Übertragung beruht auf der Totalreflexion des Lichts. Dabei wird das einfallende Licht, welches in einem bestimmten Winkel eintrifft, am Übergang von Kern zu Glasmantel vollständig reflektiert. Dieser Vorgang wiederholt sich bis das Licht am Ende der Glasfaser ankommt.

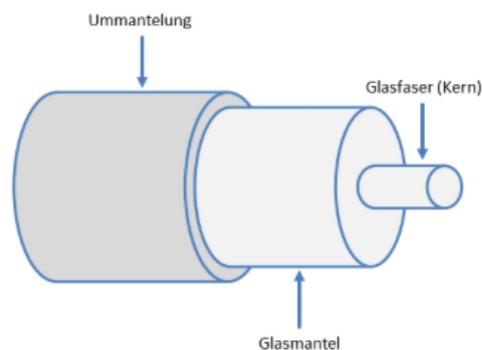


Abbildung 30 Aufbau eines LWL

Um die Daten über einen Lichtwellenleiter zu transportieren muss das vorliegende elektrische Signal zuerst in ein digitales Signal gewandelt werden. Dies geschieht mittels eines Analog-Digital-Wandlers. Vor der Übertragung muss das Signal noch in ein optisches Signal umgewandelt werden was mittels einer speziellen Leuchtdiode bzw. Laserdiode geschieht. Mittels eines Fototransistors am anderen Ende der Übertragung wird das optische Signal wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt. Der letzte Schritt bei der Übertragung ist die Rückwandlung in ein rein Analoges Signal über den Digital-Analog-Wandler

sollten die Daten in analoger Form an einem Empfänger übergeben werden. (Schnabel, o. J.-c)

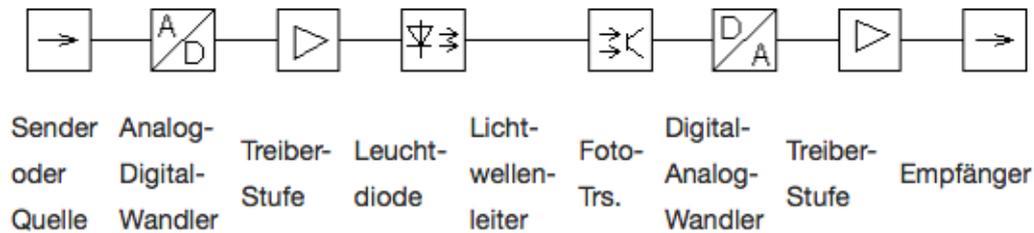


Abbildung 31 Prinzip eines Lichtwellenleiter

3.4.3.2 Vorteile gegenüber Kupferkabel

Aufgrund der optischen Übertragung können bei Lichtwellenleiter keine Masseprobleme oder Störstrahlungen auftreten. Weiters sind LWL gegen elektromagnetische Störeinflüsse resistent und können somit parallel zu anderen Versorgungsleitungen verlegt werden. Da bei Lichtwellenleiter mehrere Trägerwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen (Farbspektrum) vorkommen können, können somit Übertragungsraten fast unbegrenzt erhöht werden. Ein großer Nachteil gegenüber Kupferkabel ist aber natürlich der Anschaffungspreis. Die Materialkosten und das geschulte Personal das für die Montage notwendig ist wirken sich auch auf den Preisunterschied aus. Nichtsdestotrotz eignen sich Lichtwellenleiter für weitere Strecken aufgrund ihrer geringeren Dämpfung.

3.4.3.3 Typen von Lichtwellenleitern

Monomode-Glasfaser

Bei der Monomode-Glasfaser wird nur eine einzige Lichtwelle (Mode) übertragen. Da der Kerndurchmesser der Faser gegenüber der Wellenlänge des Lichts so klein ist, kommt es vor, dass sich nur eine einzige Mode ausbreiten kann. Daraus resultieren natürlich hohe Bandbreiten und geringere Dämpfungen. Laut Heyden kommen dabei Dämpfungen von nur 0,3 dB/km vor. Weiters zeichnen sich Monomode-Glasfaser durch ihre Signaltreue aus. Das bedeutet, dass das Signal durch bestimmte Einflüsse nicht verändert wird. Um das zu erreichen werden zur Erzeugung der Lichtimpulse Laser-Dioden eingesetzt. Der Grund hierfür ist, dass der Laserstrahl gebündelter als normales Licht ist. Somit kommt es zu weniger Reflexionen. Der Kerndurchmesser einer solchen Glasfaser beträgt 9µm und der Gesamtdurchmesser 125µm. Jedoch sind Monomode-Glasfaser sehr teuer, da das Licht sehr präzise eingespeist werden muss und darüber hinaus immer nur ein Signal übertragen werden kann. Daher werden solche Glasfaser weitgehend

nur für lange Strecken eingesetzt. Die hier eingesetzten Wellenlängen liegen zwischen 1550nm und 1310nm. (Heyden, 2012a, S. 19)

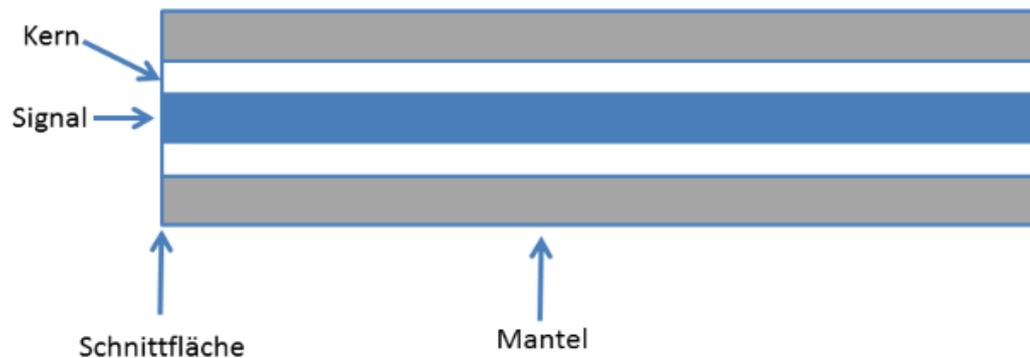


Abbildung 32 Aufbau eines Monomode-Glasfaserkabels

Multimode-Glasfaser

Multimode-Glasfaser können mehrere Lichtwellen (Moden) gleichzeitig übertragen, da der Kerndurchmesser im Vergleich zur Monomode-Glasfaser wesentlich größer ist. Das einfallende Licht wird nicht senkrecht wie bei der Monomode-Glasfaser eingestrahlt, sondern in einem bestimmten Winkel auf die Schnittfläche. Somit kommt es zu Reflexionen an der Außenseite des Kerns. Multimode-Glasfaserkabel werden meist für kürzere Entfernungen eingesetzt. Dabei werden Wellenlängen zwischen 1310nm und 850nm eingesetzt. Der Kerndurchmesser für solche Kabel liegt bei 50µm und einem Gesamtdurchmesser von 125µm. Das Einsatzgebiet von Multimode-Glasfaser sind im LAN bzw im MAN Bereich.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Arten: Multimode-Glasfaser mit Stufenindex und Multimode-Glasfaser mit Gradientindex.

Multimode-Glasfaser mit Stufenindex

Bei einer Multimodefaser mit Stufenindex-Profil wird das Licht an den Wänden der Faser hart reflektiert. Das geschieht deshalb, da der Brechungsindex zwischen Kern und Mantel sehr stark abgegrenzt ist. Solche Glasfaser haben üblicherweise eine geringere Bandbreite und eine mittlere Dämpfung. Dabei wird das Ausgangssignal schlechter, umso größer die zu Überbrückende Entfernung ist. Der Gesamtdurchmesser einer solchen Glasfaser liegt zwischen 200µm bis 500µm. Aufgrund des Stufenindex kommt es vor, dass die einzelnen Signale

verschiedene Laufzeiten aufweisen. Aus diesem Grund werden heutzutage ausschließlich Glasfaser mit Gradientenindex verwendet. (Schnabel, 2016b)

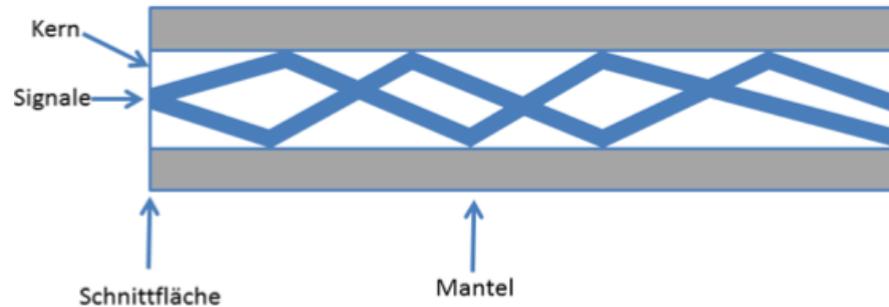


Abbildung 33 Aufbau einer Multimode-Glasfaser mit Stufenindex

Multimode-Glasfaser mit Gradientenindex

Der Unterschied zum Stufenindexprofil liegt in der Brechung des Lichts. Bei diesem Modell wird das Signal an den Wänden leicht reflektiert. Das bedeutet, dass die Brechzahl des Kerns laut Schnabel zum Mantel parabelförmig abnimmt. Dadurch ergibt sich ein besseres Ausgangssignal verglichen mit dem Stufenindexprofil. Der Gesamtdurchmesser hierbei liegt bei $125\mu\text{m}$. Glasfaser mit Gradientenindex können Bandbreiten größer 1GHz übertragen und besitzen geringere Dämpfung wenn die Kabel keine Spleißstellen aufweisen. (Schnabel, 2016b)

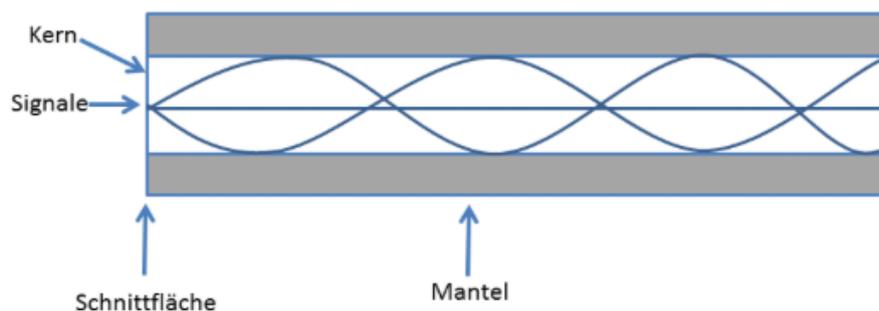


Abbildung 34 Aufbau einer Multimode-Glasfaser mit Gradientenindex

3.4.3.4 Lichteinkopplung

Für die optische Übertragung muss das Lichtsignal sehr präzise schaltbar sein. Dadurch kommen hierzu ausschließlich LED's oder Laser zum Einsatz. Wobei bei der LED-Lichteinkopplung alle Moden angeregt werden und somit den ganzen Faserkern anregen. Dadurch begrenzt sich die Datenrate auf 622Mbit/s .

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

Weiters kommen LED-Transceiver nicht in Gigabit bzw. 10 Gigabit Ethernet zum Einsatz, aufgrund der charakteristischen Trägheit der Schalthysterese. Stattdessen werden dafür Laser eingesetzt. Der Unterschied zu LED's liegt in der Anregung der Moden. Laser regen nur eine bestimmte Anzahl an Moden an. Das wiederum hat den Vorteil, dass größere Übertragungsentfernungen, höhere Übertragungsleistungen und niedrigere Dämpfungen bei der Signaleinkopplung erzielt werden können. Daher wurde für die optische Übertragung ein spezieller Laser, der viel effizienter als andere Laser arbeitet, entwickelt und ist heutzutage weitgehend im Einsatz. Der sogenannte VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). (Schnabel, 2016b)

3.4.3.5 Klassifizierung der Multimode-Glasfaser

Um eine standardisierte Verkabelung der LWL-Kabel zu ermöglichen, wurden die sogenannten OM-Klassen (Optical Multimode) eingeführt. Sie sind vergleichbar mit den Klassifizierungen für die Twisted-Pair-Verkabelung. Sie geben an welche Übertragungsraten und Übertragungsdistanzen mit den einzelnen Multimode-Glasfaser-Kabeln erzielt werden können. Heyden gibt an, dass die Klassen OM1 und OM2 für LEDs als Lichtquelle konzipiert wurden. Nachfolgende Tabelle zeigt die einzelnen Klassifizierungen, deren mögliche Übertragungreichweite bei den jeweiligen Datenraten und beim Einsatz von den jeweiligen Wellenlängen.

LWL Typ	Kern-ø	Wellenlänge	Dämpfung	Indikative Länge pro Kabelstück/ Übertragungsgeschwindigkeit					Mantelfarbe
				100Mbit/s	1 Gbit/s	10Gbit/s	40Gbit/s	100Gbit/s	
OM1 Multimode	62,5 µm	850 nm	4,0 dB/km	550 m	275 m	33 m	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	orange
		1300 nm	1,5 dB/km	2 km	550 m	300 m	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	
OM2 Multimode	50 µm	850 nm	3,5 dB/km	550 m	550 m	82 m	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	orange
		1300 nm	1,5 dB/km	2 km	550 m	300 m	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	
OM3 Multimode	50 µm	850 nm	3,5 dB/km	550 m	1 km	300 m	100 m	100 m	aqua
		1300 nm	1,5 dB/km	2 km	550 m	300 m	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	
OM4 Multimode	50 µm	850 nm	2,5 dB/km	550 m	1,1 km	400 m	150 m	150 m	aqua
		1300 nm	0,8 dB/km	2 km	550 m	10 km	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	
OS1/OS2 Singlemode	9 µm	1310 nm	1,0 dB/km	10 km	5 km	10 km	10/30 km	10/30 km	gelb

Abbildung 35 Lichtwellenleiter Klassifizierung

Quelle: <https://www.black-box.at/at-at/page/35551/Ressourcen/Technische-Ressourcen/Produkt-Ubersichten/Auswahlhilfe-fur-Glasfaserkabel>

3.4.4 Drahtlose Übertragung per WLAN

Im Gegensatz zum kabelgebundenen Übertragungsmedium existiert auch die Funkübertragung. Hierbei wird anstelle von Kabeln das Übertragungsmedium Luft verwendet. Besser gesagt wird die Eigenschaft der Luft genutzt, um somit elektromagnetische Wellen zu übertragen. (Köhre, 2005)

Wireless LAN oder abgekürzt WLAN hat im Gegensatz zur Kabelgebundenen Verbindung die Vorteile, dass keine baulichen Veränderungen innerhalb eines Gebäudes notwendig sind. Weiters ist hiermit auch die höhere Mobilität zu nennen, da per WLAN theoretisch jeder Ort eines Firmengebäudes drahtlos erreicht werden kann. Jedoch bietet diese Übertragungsart auch Nachteile. Die geringeren Übertragungsraten im Vergleich zum Kabel ist ein großer Defizit. Sie ist abhängig von Hindernissen und somit auch Störanfälliger und bei gleichzeitiger Nutzung einer WLAN-Verbindung ist es möglich, dass die Übertragungsrate einbricht (Shared Media). Bei Shared Media wird die Übertragungsrate innerhalb eines Funkkanals auf allen verbundenen Geräten geteilt. (Schmidt, 2016, S. 32)

Grundsätzlich erfolgt die Kommunikation bei WLAN als Punkt-zu-Punkt oder Mehrpunkt-Kommunikation. Bei letzterer Verbindung werden sogenannte Access Points eingesetzt, um somit die Reichweite zu erhöhen. Sie dienen grundsätzlich als Verteiler und koordinieren die Datenströme mehrerer Clients. (Schmidt, 2016, S. 38)

Spread-Spectrum (Frequenzspreizungs-Verfahren)

Das Spread-Spectrum Übertragungsverfahren ist das am weit verbreitetste Verfahren in der drahtlosen Übertragungstechnik. Es arbeitet im Mikrowellenbereich und ist auch als Spreiztechnik bzw. Multifrequenz-Verfahren bekannt. Das Datensignal wird hierbei nicht nur über eine feste Frequenz übertragen, sondern durch das ständige wechseln der Frequenz wird die Störanfälligkeit somit verhindert und das Signal in einer größeren Bandbreite als notwendig übertragen. Man unterscheidet grundsätzlich noch unter Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) und Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).

Bei ersterem werden mehrere Frequenzunterbänder zur Datenübertragung eingesetzt. Dabei wurde für das 2,4-GHz-Band festgelegt, dass 79 Kanäle mit je 1 MHz Bandbreite als Unterbänder zu Verfügung stehen müssen. Beim Datenaustausch zwischen Sender und Empfänger werden bis zu 1600-mal pro Sekunde die Frequenzkanäle gewechselt. Man spricht hier von Hopping. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist, dass Funkzellen parallel genutzt werden

können. Dabei müssen aber die entsprechenden Frequenzkanäle und Hopping-Zeiten aufeinander eingestellt werden. Der Nachteil ist, dass es relativ unsicher und fehleranfällig ist. Derzeit kommt es noch bei Bluetooth zum Einsatz.

Das Direct Sequence Spread Spectrum Verfahren ist auch unter Pseudo-Noise-Verfahren bekannt. Dabei erfolgt die Datenübertragung über dem ganzen Band. Das hat den Vorteil, dass höhere Übertragungsraten und größere Entfernungen erzielt werden können. Dieses Verfahren ist sehr abhörsicher und wird im militärischen Bereich eingesetzt. (Schmidt, 2016, S. 34)

ISM-Frequenzbänder

ISM steht für „Industrial, Scientific and Medical“. Das ISM-Band wird heutzutage von fast allen Herstellern verwendet, da es genehmigungs- und gebührenfrei ist. Die wichtigsten ISM-Bänder für WLAN sind folgende: (Schmidt, 2016, S. 35)

- 2,4 GHz Band (2,3995 GHz – 2,4845 GHz)
Bei einer Bandbreite von 20 MHz sind max. 13 überlappende Kanäle möglich. Die Verwendung von 40 MHz Bandbreite ist auch möglich jedoch mit einer weit niedrigeren Anzahl an Kanälen.
- 5 GHz Band
Aufgrund der höheren Anfälligkeit gegen Reflexionen ist die Reichweite bei diesem Band weit geringer als beim 2,4 GHz Band. Die Frequenzen unterteilen sich hier auf die Kanäle. Für die Kanalnummer 36-64 ist die Frequenz 5,150 GHz bis 5,350 GHz nutzbar. Für Kanalnummer 100 bis 140 ist 5,470 GHz bis 5,725 GHz vorgesehen. Dabei werden sind Bandbreiten in 20, 40, 80 oder 160 MHz Abständen möglich. Bei einer Bandbreite von 20 MHz sind max. 19 Kanäle die sich nicht überlappen verfügbar.
- 60 GHz Band (57 GHz – 66 GHz)
Dieses Frequenzband wird auch als Wireless Gigabit genannt. Die Reichweite hierbei liegt nur bei wenigen Metern und beschränkt sich auf eine Nutzung im selben Raum. Die mögliche Bandbreite hierbei liegt bei 1760 MHz und wird auf 4 Kanäle unterteilt. Wegen der hohen Bandbreite ist es somit möglich eine Datenrate von einigen Gigabit pr Sekunde zu erzielen.

IEEE 802.11

IEEE 802.11 ist der Standard für WLAN und wurde Juni 1997 veröffentlicht. Der erste Standard galt für Datenraten bis zu 2 Mbit/s im 2,4 GHz ISM-Band, jedoch ist dieser heutzutage veraltet. Heutzutage ist der Standard 802.11ac aktuell bei

dem mit 3 Antennen im 5 GHz-Band bis zu 1300 Mbit/s erreicht werden können. Dabei kommen Übertragungsverfahren wie OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) und QAM256 (Quadratur Amplituden Modulation) zum Einsatz. Diese zwei Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie viel Bandbreiten-effizienter arbeiten und somit ein wesentlich geringeres Frequenzband benötigen. Eine Weiterentwicklung davon ist der 802.11ac Wave-2 Standard bei welchem unter anderem auch Bandbreiten von 80 bis 160 MHz vorkommen. Ein weiteres wichtiges Feature wäre die Multi-User-MIMO (MU-MIMO) Option im Downstream. Mittels MIMO (Multiple Input Multiple Output) ist es möglich, dass mehrere Sende- und Empfangsantennen gleichzeitig genutzt werden. Damit sollen bis zu 6,9 Gbit/s erreicht werden können, jedoch muss aber erwähnt werden, dass dafür die notwendigen Kanäle frei sein müssen und in Europa nur 2 Kanäle mit einer Bandbreite von 160 MHz und 4 Kanäle mit 80 MHz vorhanden sind. Laut Schmidt sind davon aber nur ein 160 MHz Band und drei 80 MHz-Bänder störungsfrei. (Schmidt, 2016, S. 36)

Aufgrund der instabilen Übertragungsraten bzw. wegen des fehlenden Quality-of-Service spielte WLAN bei den Audionetzwerken bisher keine sehr große Rolle. Jedoch wird es jetzt seit der Einführung des IEEE 802.11ac Standards und den damit verbundenen möglichen Datenraten von bis zu 6Gbit/s immer interessanter. Folgende Tabelle zeigt ein paar einzelne WLAN-Standards, um einen Überblick zu bekommen welche Übertragungsraten und Reichweiten heutzutage erzielt werden können. (Heyden, 2012a, S. 20)

Spezifikation	IEEE802.11	IEEE802.11g	IEEE802.11n	IEEE802.11a/c
Geschwindigkeit	2Mbit	54Mbit	Bis 600Mbit	Bis 6Gbit
Frequenz	2,4GHz	2,4GHz	2,4, 5 GHz	5 GHz
Kompatibel	Ja	Ja	Ja	Nur mit 802.11n
Reichweite	20m	38m	70m	50m

Tabelle 2 WLAN Standards

Theoretisch wäre es möglich ca. 400 unkomprimierte Audiokanäle mit einer Abtastrate von 48kHz und einer Quantisierung von 24Bit über den IEEE 802.11ac Standard zu übertragen. Heutzutage werden aber Wireless LAN Verbindungen hauptsächlich für die Übermittlung von Steuerdaten verwendet. Als Beispiel hierfür dienen die heutzutage sehr begehrten Rack Mixer von Behringer oder Soundcraft. Mittels eines WLAN Routers verbindet sich ein Tablet oder Smartphone mit dem Digitalen Mixer und steuert somit Remote alle

notwendigen Parameter und kann direkt Live mischen. Audiofusionsystems haben es erstmals dieses Jahr geschafft eine In-Ear-Monitoring Lösung auf den Markt zu bringen die ausschließlich über WLAN funktioniert. Sie basiert auf den IEEE 802.11a/c Standard und streamt bis zu 32 Kanäle simultan auf bis zu 16 Smartphones. Mehr Informationen unter: <https://audiofusionsystems.com>

3.4.5 Weitere Drahtlose Übertragungen

Bluetooth

Bluetooth ist nicht als Ersatz von WLAN gedacht, sondern eher für preiswerte Funkverbindungen im Nahbereich konzipiert wurde. Mittlerweile ist Bluetooth 4.0 als Standard definiert worden. Angefangen mit Bluetooth 1 waren am Anfang Übertragungsraten von 723 Kbit/s in Empfangsrichtung und 128 Kbit/s in Senderichtung möglich. Bluetooth 2.0 wurde so verbessert, dass Datenraten von bis zu 2,2 Mbit/s möglich waren. Die nächste Weiterentwicklung war dann Bluetooth 3.0. Hier sind Übertragungsraten von bis zu 24 Mbit/s sogar möglich. Ab dieser Version erfolgt jedoch nur mehr die Verbindung an sich über Bluetooth-Technik, die Datenübertragung wird dabei über ein WLAN-Modul mit dem Standard 802.11g realisiert. Ein großer Vorteil von Bluetooth ist, dass sogenannte Profile eingesetzt werden können und schon vordefiniert sind. Somit sind zum Beispiel Profile für den LAN-Zugriff und die Audio-Übertragung vordefiniert und können somit schon eingesetzt werden. Der Nachteil hierbei ist aber, dass diese Funkübertragung unverschlüsselt ist. Somit ist Bluetooth sehr leicht abhörbar. (Schmidt, 2016, S. 38)

NFC und RFID

NFC ist die Abkürzung für Near Field Communication und wird als drahtloses Übertragungsmedium für kurze Entfernungen eingesetzt. Angefangen von wenigen Zentimetern bis zu ca. 1 Meter können hiermit Daten übermittelt werden. Die Übertragungsrates beträgt dabei maximal 424 kBit/s und sendet auf den Funkfrequenzen 135 kHz oder 13,56 MHz. Als Übertragungstechnik basiert NFC auf die RFID-Technik (Radio Frequency Identification) jedoch können auch Bluetooth oder WLAN direkt als Technik hierfür genutzt werden. Es kann daher gesagt werden, dass diese Funktechnik nicht direkt für die Übertragung von Audiodaten verwendet werden kann, jedoch wäre es denkbar, dass sie für andere Einsatzgebiete in der Audiotechnik Verwendung findet kann.

WPAN

WPAN steht für Wireless Personal Area Network. Dieses Netzwerk wurde als IEEE 802.15 standardisiert und ist mit dem Standard 802.11 kompatibel. Eingesetzt wird es für kleine Distanzen (bis zu 10m). Es verwendet als Übertragungsverfahren Bluetooth 3.0 und es können somit Datenraten bis zu 24Mbit/s erzielt werden. WPAN findet hauptsächlich derzeit Verwendung für das IoT (Internet of Things).

3.5 Schnittstellen

Unter einer Schnittstelle versteht man den Teil eines Systems, der zur Kommunikation dient. Sie ist für die Informationsübermittlung zwischen Systemen verantwortlich. Standardisierte Schnittstellen wie zum Beispiel der XLR- oder RJ45-Stecker helfen dabei, dass unterschiedliche Systeme zueinander Kompatibel sind und somit eine einfache Integration neuer Geräte in bestehende Systeme gewährleistet wird. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Schnittstellen die bei einer Netzwerkverbindung eingesetzt werden können näher beschrieben werden.

3.5.1 RJ45

Die RJ45 Steckverbindung ist die am meist eingesetzte Schnittstelle im Ethernet. Sie hat sich weltweit etabliert und ist somit zum Standard geworden. Die RJ-Reihe wurde Anfangs für Telekommunikationsanwendungen entwickelt, konnte aber dann auch in der Netzwerktechnik Fuß fassen. Unterschieden werden RJ-Steckverbindungen zwischen zwei, vier, sechs und acht Aderpaar-Steckern. Die Stecker Bauform wurde so konzipiert, dass die Kompatibilität zwischen den unterschiedlichen Aderpaare gewährleistet wird. Das bedeutet, dass ein Stecker mit zwei Aderpaare auch in einer Buchse mit 8 Aderpaare passt. RJ45 Stecker sind heutzutage an allen Cat. - Kabeln auffindbar. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Standards bei der Pin-Belegung. Zum einen der EIA/TIA568A Standard bzw. der EIA/TIA/568B Standard. In der DACH Region bzw. im europäischen Raum hat man sich aber eher auf den EIA/TIA/568B Standard geeinigt und daher ist dieser hier weitestgehend verbreitet. Grundsätzlich ist es aber jedoch nicht wichtig welchen Standard man einsetzt. Es muss nur sichergestellt werden, dass in der gesamten Verkabelungsinfrastruktur der gleiche Standard verwendet wird.

Weiters gibt es zwei Arten von Verkabelungen. Gekreuzte bzw. nicht gekreuzte Netzwerkkabel. Erstere werden auch Crossoverkabel genannt und werden hauptsächlich für die Verbindung zwischen zwei Computern oder Switches eingesetzt. Dies hat den Grund, dass die Sende- bzw. Empfangsleitung vertauscht werden muss um die Daten direkt übermitteln zu können. Jedoch ist dies mit der Einführung von Gigabit-Ethernet nicht mehr notwendig, da die automatische Erkennung und Umschaltung intern passiert. (Heyden, 2012a, S. 21)

Stecker	Verwendung	Kontakte
RJ45	Patchpanel, Anschlussdose, Switch, PC, Telefon (ISDN)	8
RJ12	Telefon, Sprechanlage	6
RJ11 (RJ14)	Telefon, Sprechanlage	4
RJ10	Telefonhörer	4

Tabelle 3 Verschiedene RJ Stecker und ihre Einsatzgebiete

Üblicherweise werden in der IT normale Plastik Stecker verwendet die nicht sonderlich robust sind und nicht für den „mobilen“ Einsatz in der Eventbranche geeignet sind. Für Fixinstallationen reichen diese normale Bauform jedoch vollkommen aus. Für die AV-Branche werden aber robustere Ausführungen eingesetzt bei der der Stecker in einer XLR-Hülse noch untergebracht wird wie es in Abbildung 36 zu sehen ist.



Abbildung 36 RJ45 Stecker (Rechts) + EtherCon-Stecker (Links)

3.5.1.1 EIA/TIA 568 A Belegung

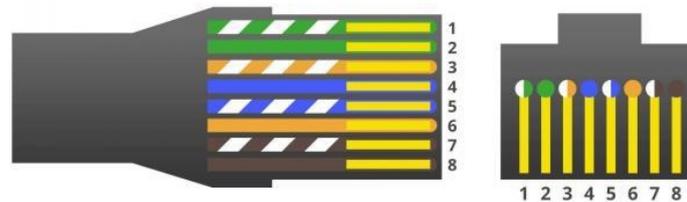


Abbildung 37 Belegung nach Standard T568A

- Pin 1: weiß/grün (Paar 3) RecvData +
- Pin 2: grün (Paar 3) RecvData –
- Pin 3: weiß/orange (Paar 2) TxData +
- Pin 4: blau (Paar 1)
- Pin 5: weiß/blau (Paar 1)
- Pin 6: orange (Paar 2) TxData –
- Pin 7: braun (Paar 4)
- Pin 8: weiß/braun (Paar 4)

3.5.1.2 EIA/TIA 568 B Belegung

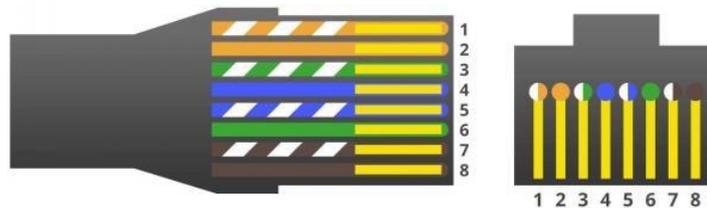


Abbildung 38 Belegung nach Standard T568B

- Pin 1: weiß/orange (Paar 2) TxData +
- Pin 2: orange (Paar 2) TxData –
- Pin 3: weiß/grün (Paar 3) RecvData +
- Pin 4: blau (Paar 1)
- Pin 5: weiß/blau (Paar 1)
- Pin 6: grün (Paar 3) RecvData –
- Pin 7: braun (Paar 4)
- Pin 8: weiß/braun (Paar 4)

3.5.2 Universal Serial Bus (USB)

USB wird derzeit nur bei der Übertragung von Audiodaten von Interfaces zu DAW's eingesetzt und ist eigentlich ein Peripherie-Anschluss. Mit USB 2.0 werden Datenraten von bis zu ca. 36 MB/s erzielt. Die Weiterentwicklung USB 3.0 erreicht sogar mehr als 400 MB/s und USB 3.1 verfügt über besseres Daten-Encoding und erreicht eine Datenrate von bis zu 800 MB/s unter optimalen Umständen. USB ist abwärtskompatibel. Das heisst, dass USB 2.0 Geräte auch an USB 3.0 Ports angeschlossen werden können. Jedoch liegt dann die mögliche Übertragungsrate nur bis zum maximalen USB 2.0 Standard. Wenige Firmen wie zum Beispiel Stagetec oder Riedel von proprietären Netzwerken setzen USB dazu ein, Steuerdaten zu senden, um somit das Netzwerk zu konfigurieren bzw. zu verwalten. Für den eigentlichen Audiotransfer im Netzwerk wird trotzdem Ethernet eingesetzt, da hierbei auch die maximale Kabellänge eine sehr wichtige Rolle spielt. Daher ist USB für Audionetzwerke eher ungeeignet. (Heyden, 2012a, S. 23)

3.5.3 FireWire / IEEE 1394 / i.Link

FireWire ist unter den Bezeichnungen IEEE 1394 und i.Link (Sony) bekannt. Um genau zu sein wurde FireWire von Apple entwickelt und 1995 unter IEEE 1394 standardisiert. Es handelt sich hierbei wie bei USB, um ein serielles Übertragungssystem jedoch mit anderen Steckern und Kabeln. Von Anfang an war FireWire dafür ausgelegt höhere Übertragungsraten zu erzielen und wurde daher auch mit dem Schwerpunkt auf Audio-Video-Anwendungen entwickelt. Mit FireWire lassen sich Datenraten von 800, 1600 oder 3200 Mbit/s erreichen. Von Anfang an wurde es nicht als Peripherie-Anschluss konzipiert sondern als Vernetzungstechnik auf Basis einer Punkt-zu-Punkt-Architektur. Es können bis zu 63 FireWire-Geräte beliebig miteinander verbunden werden. Die Stromversorgung für den Controller wird über dem Bus bezogen und es ist kein zentraler Host definiert der die Adressierung und die Übertragung steuert. Die eingehenden Daten werden von allen Geräten direkt weitergeleitet, da fast jedes Gerät zwei oder mehrere Ports hat und somit als Hub und Repeater fungiert. Da unter FireWire alle angeschlossenen Geräte sich die Bandbreite teilen, bestimmt somit auch das langsamste Geräte die maximal mögliche Datenrate innerhalb dieser Übertragungsstrecke. Weiters ist es nur möglich eine Übertragung gleichzeitig aufzubauen, um somit Kollisionen zu vermeiden. Ein sogenannter Busmaster oder Host dient als Taktgeber. Bei dieser Schnittstelle unterscheidet man zwischen sechs Geschwindigkeitsmodi. Dabei können alle Geschwindigkeiten auf dem selben Bus verwendet werden.

Modus	S100	S200	S400	S800	S1600	S3200
Geschwindigkeit	100 Mbit/s	200 Mbit/s	400 Mbit/s	800 Mbit/s	1600 Mbit/s	3200 Mbit/s

Tabelle 4 FireWire Übertragungsgeschwindigkeiten

FireWire verwendet für die Datenübertragung einen asynchronen und einen isochronen Modus. Der isochrome Modus hat den Vorteil, dass eine bestimmte Bandbreite für eine gewisse Zeitdauer garantiert wird. Dies ist für die Übertragung von Audio- bzw. Video-Daten sehr wichtig, um somit Echtzeit Daten übertragen zu können. (Schnabel, o. J.-a)

3.5.4 Thunderbolt 3

Thunderbolt 3 ist ein direkter Konkurrent zu USB 3.0 und wurde 2015 auf den Markt gebracht. Thunderbolt an sich wurde 2010-2011 als vereinfachter Highspeed-Daten- und Videoanschluss entwickelt. Diese Schnittstelle kombiniert Ethernet, Firewire, Thunderbolt 2, VGA, HDMI und USB 3 in einem. Weiters werden über nur eine Schnittstelle mehrere Protokolle übertragen (Thunderbolt, DisplayPort, PCI Express und USB). Dies hat den großen Vorteil, dass mit nur einem Kabel verschiedene Anschlussmöglichkeiten gewährleistet werden. Thunderbolt 3 ist bis jetzt die schnellste Übertragungsmöglichkeit und bietet mit bis zu 40 Gbit/s eine acht mal schnellere Übertragungsrate als USB 3.0. Bis jetzt wird diese Schnittstelle im AV-Bereich bei Videoproduktionseinrichtungen eingesetzt, da dort hohe Datenübertragungen sehr wichtig sind. Im Audiobereich wird Thunderbolt hauptsächlich bei der Verbindung von Audiointerfacen eingesetzt. Laut Heyden soll es in Zukunft eine optische Übertragungsmöglichkeit geben. Dabei sollen VCSEL-Laser zum Einsatz kommen. (Heyden, 2012b)

3.5.5 Optische Schnittstellen

Unter optischen Schnittstellen versteht man lösbare Verbindungen mit speziellen Steckern. Verbunden können damit Lichtwellenleiter selbst oder LWL mit anderen Systemkomponenten. Eines der wichtigsten Merkmale solcher Schnittstellen ist die geringe Signaldämpfung (insertion loss) und die hohe Rückflusdämpfung (return loss) die diese aufweisen müssen um somit hohe Übertragungsraten erzielen zu können. Wichtig hierbei ist auch das diese Parameter über hunderte von Verbindungszyklen aufrecht erhalten bleiben. Die am weitverbreitetsten Steckverbindungen im AV-Bereich sind die LC- und SC-

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

Duplex-Stecker. Bei der digitalen Audioübertragung im Home-Entertainment- bzw. auch im Studio-Bereich werden hauptsächlich Toslink-Stecker eingesetzt. Im Outdoor-Event-Bereich werden auch OpticalCon von Neutrik oder Steckverbindungen von Connex (Fiberfox) eingesetzt.



Abbildung 39 Unterschiedliche LWL-Stecker

Quelle: <http://www.haedrich.de/faktendaten/lwlstecker.htm> (aufgerufen am 22.01.19)

Verglichen mit elektrischen Schnittstellen wie z.B. USB oder FireWire sind optische Schnittstellen viel empfindlicher. Angefangen mit einer starken Schmutzempfindlichkeit bis hin zu Kratzempfindlichkeit. Optische Schnittstellen sind aber auch viel aufwendiger in der Konfektionierung. Der Grund hierfür liegt beim Übergang zwischen dem Kabelende und dem Stecker. Die größte Herausforderung dabei ist, dass das Licht nicht gebrochen werden darf. Hierfür kommen zwei Techniken zum Einsatz. Zum einen das Spleißen bei der die zwei Enden plan zueinander gelegt werden und dann mit Hilfe eines Spleiß Gerätes mit einander verbunden werden. Das geschieht indem ein kurzer Lichtbogen die zwei Enden schmilzt und dann ineinander verschiebt. Da die Verbindungsstellen viel Bruchempfindlicher ist als bei elektrischen Schnittstellen müssen diese daher dagegen besser geschützt werden. Die zweite Technik die hier zum Einsatz kommen kann, ist die Klebetechnik. Dabei werden die zwei Enden mithilfe eines Gels zusammengeklebt. Das Gel hat dabei den selben Brechungsindex wie Glas. Somit kommt es zu keiner Lichtbrechung beim Übergang vom Kabel zum Stecker. Optische Schnittstellen sind wie zuvor schon erwähnt sehr empfindlich. Die kleinste Verunreinigung bzw. der kleinste Kratzer kann dazu führen, dass das

Signal deutlich verschlechtert bzw. komplett unterbrochen werden kann. (Heyden, 2012b)

Schnittstelle/Anschluss	USB 2.0	USB 3.0	FireWire 400	FireWire 800	Gigabit Ethernet	eSATA
Transferrate (theoretisch)	bis 60 MByte/s	bis 600 MByte/s	bis 50 MByte/s	bis 100 MByte/s	bis 125 MByte/s	bis 750 MByte/s
Geräteanzahl (maximal)	127	127	63	63	1 (Punkt-zu-Punkt)	1 (Punkt-zu-Punkt)
Kabellänge pro Gerät	5 m	3 m	4,5 m	4,5 m	100 m	1 m

Tabelle 5 Gegenüberstellung diverser Schnittstellen

3.6 Schichtenmodelle

In der Netzwerktechnik arbeitet man mithilfe von Schichtenmodellen, um somit komplexe Vorgänge in einzelne Arbeitsabläufe aufzuteilen und zu bearbeiten. Jede Aufgabe wird als Schicht dargestellt, die in einer bestimmten Reihenfolge durchschritten werden muss. Man erreicht dadurch eine hohe Flexibilität, da einzelne Schichten durch eigene Protokolle geändert oder angepasst werden können was bei einer Anpassung an einem Übertragungsweg notwendig wäre. (Hempel, o. J.)

3.6.1 Proprietäre Systeme

Sind Anwendung, Übertragungsweg und Protokoll vom selben Hersteller, spricht man von einem proprietären System. Das bedeutet, dass man keine Möglichkeit hat nähere Informationen über dieses System zu erhalten. Es handelt sich hierbei um ein geschlossenes System, bei dem der User an den Hersteller gebunden ist. Diese Systeme sind daher nicht transparent und sehr wenig flexibel, wenn es um Erweiterungen geht. Ihre Struktur ist nicht offen zugänglich und beim Einsatz solcher Systeme werden meist sehr hohe Lizenzgebühren fällig. Ein Beispiel für solch ein Protokoll ist AES50.

3.6.2 Offene Systeme

Bei offenen Systemen sind alle Informationen zu Anwendung, Übertragungsweg und Protokoll frei zugänglich. Alle Daten sind spezifiziert und unterliegen einer Norm. Der Grundgedanke bei offenen Systemen ist, dass Produkte von unterschiedlichen Herstellern untereinander kommunizieren können sollen. Ein Beispiel hierfür wäre Ravenna.

Man unterscheidet in der Netzwerktechnik zwei grundlegende Schichtenmodelle. Das OSI-7-Schichtenmodell und das DoD-Schichtenmodell.

3.6.3 DoD-Schichtenmodell

Das DoD-Schichtenmodell (Department-of-Defense) ist jenes auf dem das Internet basiert. Es besteht aus vier Schichten und es wird als eine vereinfachte Version des OSI-7-Schichtenmodells bezeichnet.

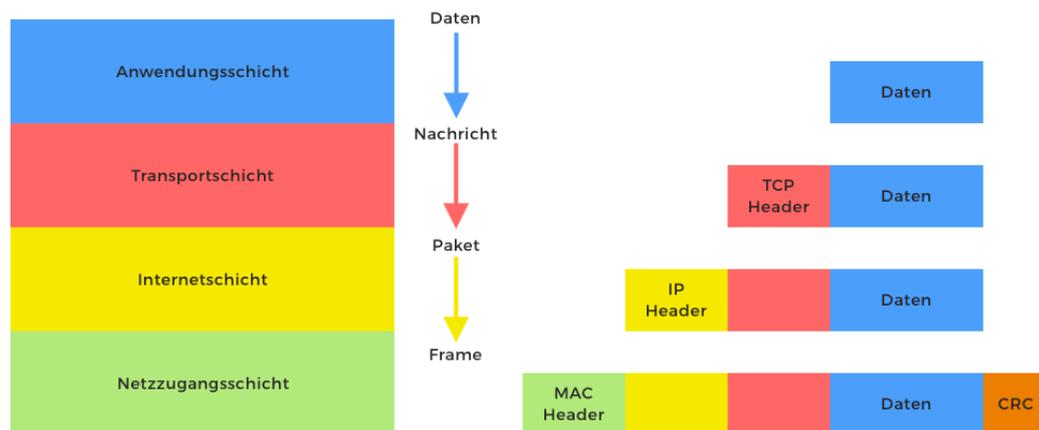


Abbildung 40 DoD-Schichtenmodell

Anwendungsschicht (Application Layer)

In der Anwendungsschicht wird der Aufbau des Datenpakets definiert. Dabei werden je nach verwendetem Protokoll die Daten dementsprechend konfiguriert und abgelegt. Für jedes Datenpaket wird hier die exakte Position der Information im gesendeten Paket und deren genauer Aufbau festgelegt.

Die bekanntesten Protokolle in dieser Schicht sind SMTP – welches für die Übertragung von E-Mails verwendet wird, HTTP – das verwendete Protokoll für die Kommunikation im Internet oder FTP – welches für die Übertragung von Dateien zuständig ist.

Transportschicht (Transport Layer)

Bei der Transportschicht wird sichergestellt, dass der Datentransport reibungslos abläuft. Weiters sind die hier eingesetzten Protokolle dafür zuständig, dass die Daten zum richtigen Programm gesendet werden, da es nicht ausreicht die Daten nur zum Zielgerät zu transportieren. Diese Schicht dient auch als Kontrollschicht für die Daten, die zwischen Anwendungsschicht und Internetschicht ausgetauscht werden. Die zwei hier verwendeten Protokolle sind

TCP und UDP. Diese werden in Kapitel 3.2.4 OSI-7-Schichtenmodell näher beschrieben.

Internetschicht (Internet Layer)

In der Internetschicht geht es um die netzwerkweite Adressierung. Dabei ist die Aufgabe der Protokolle, dafür zu sorgen, dass jedes Gerät unabhängig vom Übertragungsmedium adressiert wird. Dies geschieht mithilfe von den IP-Adressen. Weiters wird die Wegsteuerung und die Lebensdauer (TTL – Time-To-Live) eines Pakets hier definiert.

Beispiel für die Protokolle in dieser Schicht sind das Internet Protocol – IP (zuständig für die Datenübertragung), ICMP – Internet Control Message Protocol (zuständig für die Kontrolle und Fehlersuche).

Netzzugangsschicht (Network Access Layer)

In dieser Schicht wird die Datenübertragung zwischen den Geräten auf physikalischem Weg übertragen. Hierbei spielt der Übertragungsweg (Kupferkabel, Funknetz, usw.) eine wichtige Rolle. Weiters muss auch der verwendete Leitungscodex (NRZ-Code, RZ-Code) und das verwendete Zugriffsprotokoll (z.B. Ethernet) in Betracht gezogen werden. Über die Auflösung einer IP-Adresse in eine MAC-Adresse wird dabei sichergestellt, dass das Datenpaket zum richtigen Endgerät ankommt.

Beispiele hierfür sind Ethernet, Token Ring, V.24.

3.7 OSI-7-Schichtmodell

Das OSI-7-Schichtmodell wurde einige Jahre nach dem DoD-Schichtenmodell von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelt und basiert auch auf dieses. Es ist das ISO-Standardisierte Referenzmodell für die Kommunikation zwischen Systemen und ist herstellerunabhängig. Der Hauptunterschied zum DoD-Schichtenmodell ist, dass es auf sieben Schichten aufgeteilt ist und nicht nur auf vier. Somit ist das OSI-7-Schichtenmodell viel feiner und detaillierter gegliedert. Der Hauptzweck des OSI-Modells ist, wie auch vom DoD-Modell, die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemen zu ermöglichen. Es beschreibt die Funktionen, die die einzelnen Schichten aufweisen und erfüllen müssen, jedoch werden keine konkreten Angaben zur Netzwerkarchitektur gemacht. Jede Schicht hat dabei ihre bestimmte Aufgabe innerhalb der Kommunikation. Wichtig ist zu erwähnen, dass bei jeder Kommunikation zwischen zwei Systemen alle 7-Schichten immer einmal beim Sender und einmal beim Empfänger durchlaufen werden. Für die Verarbeitung

der Dateien innerhalb der Kommunikation in einer bestimmten Schicht ist das Protokoll zuständig welches die Regeln hierfür festlegt. Dabei sind die Protokolle einer Schicht zu den Protokollen, die über oder unter dieser Schicht liegen, transparent ausgelegt, um somit den Kommunikationsaustausch zu ermöglichen. Als Schnittstellen zwischen den Protokollen nennt man die Übergänge zwischen den einzelnen Schichten. Diese müssen von allen Protokollen verstanden werden. Natürlich kann es oftmals vorkommen, dass manche Protokolle für ganz bestimmte Anwendungen entwickelt werden, wie es bei proprietären Systemen der Fall sein kann. Da ist es dann möglich, dass sich diese Protokolle über mehrere Schichten erstrecken und einzelne Aufgaben gleich in mehreren Schichten mehrfach ausgeführt werden.

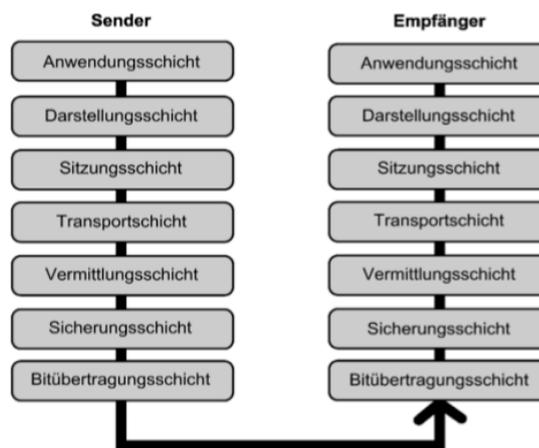


Abbildung 41 OSI-7-Schichtenmodell
(Kuzmowicz, 2015)

3.7.1 Bitübertragungsschicht (Schicht 1)

Die Bitübertragungsschicht oder Physical Layer ist verantwortlich für die Informationsübermittlung. Sie ist zuständig für die Übertragung der Bits und dient als physikalische und logische Schnittstelle zum Übertragungsweg. Wichtig zu erwähnen ist jedoch, dass das Übertragungsmedium selbst nicht in dieser Schicht definiert wird. Es werden vor allem die elektrischen und zeitlichen Spezifikationen in dieser Schicht standardisiert um so die Interkompatibilität zwischen unterschiedlichen Geräten zu gewährleisten. Laut Heyden ist die Signal-Charakteristik in Form von Frequenzmodulation ein Bestandteil dieser Standardisierung. (Heyden, 2012a)

Weiters erfolgt in dieser Schicht der Auf- bzw. Abbau der Verbindung und die binären Daten werden in ein für den Übertragungsweg kompatibles Format (z.B. elektrisch oder optisch) umgewandelt. Vorkommende Hardwarekomponenten die

in dieser Schicht als Schnittstelle dienen sind unter anderem Repeater, Hubs und Stecker. Einsetzbare Protokolle sind zum Beispiel RS232 oder RS422. (Kuzmowicz, 2015, S. 14)

3.7.2 Sicherungsschicht (Schicht 2)

Die Sicherungsschicht oder Data-Link-Layer hat als Aufgabe für eine fehlerfreie Übertragung zu sorgen und die Zugriffe auf den Übertragungsweg zu regulieren. Weitere Aufgabengebiete dieser Schicht sind die Fehlererkennung, Datenflusskontrolle, die Synchronisation oder die Kontrolle auf mögliche Übertragungswiederholungen. Sie hat dafür zu sorgen, dass eine zuverlässige und funktionierende Verbindung zwischen dem Endgerät und dem Übertragungsweg besteht. Der Bitdatenstrom wird hierzu in Blöcke, oder auch Frames genannt, unterteilt, um so Prüfsummen einzufügen. Der Grund besteht darin, dass mögliche Übertragungsfehler schnell erkannt und Maßnahmen zum erneuten Senden ergriffen werden können. Die physikalische Adressierung der Datenpakete findet unter anderem in dieser Schicht statt. (Heyden, 2012a; Kuzmowicz, 2015)

Für die Adressierung der Geräte innerhalb des Netzwerkes wird in dieser Schicht die MAC-Adresse (Media Access Control) verwendet. Bridges und Switches zählen in dieser Schicht zu den vorkommenden Hardwaregeräten.

3.7.3 Vermittlungsschicht (Schicht 3)

Die Vermittlungsschicht oder Network Layer hat als Hauptaufgabe das Routing des Datenpakets und die Datenflusskontrolle. Beim Routing wird hier erstmals die logische Adressierung der Endgeräte eingesetzt. Das Routing kann auch als Wegfinder vom Sender zum Empfänger betrachtet werden. Dabei gilt es die Kommunikation zwischen den Geräten sowohl zeitlich als auch logisch, unabhängig von der eingesetzten Topologie und dem Übertragungsweg zu steuern. Vorkommende Hardwarekomponenten in dieser Schicht sind zum Beispiel Router oder Layer-3-Switches und das am meist verwendete Protokoll ist das Internet Protokoll (IP).

3.7.4 Transportschicht (Schicht 4)

Die Transportschicht oder Transport Layer ist zuständig für die Host-to-Host Kommunikation und ist das Bindeglied zwischen den unteren und oberen Schichten. In dieser Schicht wird also eine Kommunikationsverbindung zwischen Ausgangspunkt und Endpunkt der Nachricht aufgebaut und überprüft, ob die

Datenpakete in der richtigen Reihenfolge und fehlerfrei übertragen wurden. Die hier verwendeten Protokolle sind TCP (Transport Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol) und RTP (Real-Time Transport Protocol). UDP und RTP sind die einzigen Protokolle die eine Echtzeitübertragung gewährleisten. (Kuzmowicz, 2015)

3.7.5 Sitzungsschicht (Schicht 5)

Die Sitzungsschicht oder Session Layer hat als Aufgabe die Prozesskommunikation zwischen zwei Systemen. Das bedeutet, dass sie die Verbindungen zwischen den Endsystemen organisiert. Um das durchführen zu können, wurden sogenannte Steuerungs- und Kontrollmechanismen eingebaut. Somit lassen sich die Verbindungen und der Datenaustausch steuern.

3.7.6 Darstellungsschicht (Schicht 6)

In der Darstellungsschicht oder Presentation Layer geht es um die Verschlüsselung und Kompression der Daten. Sie ist auch zuständig für die Umwandlung der Daten in verschiedene Codecs und Formate damit die Daten die von einer Anwendungsschicht gesendet werden, auch von der Empfangsseite gelesen werden können.

3.7.7 Anwendungsschicht (Schicht 7)

Die Anwendungsschicht oder Application Layer ist die letzte Schicht im OSI-7-Schichtenmodell und hat als Aufgabe die Dateneingabe, Datenausgabe und stellt die Verbindung zu den anderen unteren Schichten her. Sie ist weiters die Schnittstelle für die eigentlichen Anwendungen, Programme oder Funktionen.

3.8 IEEE 802

IEEE steht für Institute of Electrical and Electronics Engineers und ist zuständig für das Entwerfen von Standards und Techniken, die danach in Arbeitsgruppen weiterentwickelt werden. IEEE 802 ist solch eine Projektgruppe die zuständig ist für das Standardisieren von Protokollen und Übertragungstechniken in Local und Metropolitan Area Networks (LAN und MAN). Unter dieser Arbeitsnummer fallen Standards wie Ethernet (802.3), Wireless LAN (802.11) oder Bluetooth (802.15.1), um nur einige zu nennen. Alle Standards der 802-Projektgruppe arbeiten in der OSI-Schicht 1 (Bitübertragungsschicht) bzw. in der OSI-Schicht 2 (Sicherungsschicht). Die Sicherungsschicht ist wiederum nochmals unterteilt in

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

zwei Unterebenen. Den Logical-Link-Control (LLC), welcher Zuständig ist für die Übertragung und den Zugriff auf die logische Schnittstelle und den Medium-Access-Control-Layer (MAC), welcher für den Zugriff auf das Übertragungsmedium ist. Der MAC-Layer ist somit für eine reibungslose Übertragung der Daten verantwortlich.

2	802.1 Internet-Working	802.2 Logical Link Control				
		802.1 Media Access Control				
1		802.3 Ethernet	802.4 Token-Bus	802.5 Token-Ring	802.11 Wireless LAN	802.12 AnyLAN

Abbildung 42 IEEE 802 Einteilung

Nachfolgende Grafik soll ein paar der wichtigsten Standards und Arbeitsgruppen der IEEE 802 auflisten. Es muss aber erwähnt werden, dass diese Liste nicht vollständig ist.

802.1	Übersicht
802.1	Internet-Working
802.2	Logical Link Control (LLC)
802.3	Ethernet (10Base5) / CSMA/CD-Zugriffsverfahren
802.3i	10BaseT
802.3u	100BaseT
802.3z	Gigabit Ethernet
802.3ab	1000BaseT
802.3an	10 Gigabit Ethernet
802.4	Token-Bus-Zugriffsverfahren
802.5	Token-Ring-Zugriffsverfahren
802.11	Wireless LAN (WLAN) / Drahtlose Netze
802.14	Breitband-Cable-TV (CATV)
802.15.1	Wireless Personal Area Network (WPAN) - Bluetooth
802.15.3a	UWB - Ultra Wideband Wireless
802.16	Broadband Wireless Access (BWA / WMAN) - WiMAX
802.20	Mobile Broadband Wireless Access (MBWA) / Drahtlose Breitbandnetze

Abbildung 43 IEEE 802 Projekte

3.9 Zugriffsverfahren

Zugriffsverfahren regeln den Datenverkehr auf den jeweiligen Übertragungswegen. Dabei wird auf den Zugang zum Übertragungsmedium besonders geachtet. Es soll festlegen, wer, wann und in welcher Form Daten übertragen darf.

Datenpakete

Man unterscheidet Daten grundsätzlich zwischen visuelle Informationen wie zum Beispiel Bilder, E-Mails oder Dokumente und Audio- bzw. Video-Informationen. Dabei muss in Netzwerken die Möglichkeit bestehen diese Daten unterschiedlich zu priorisieren und zu übertragen. Die Daten werden dabei in kleine Einheiten zerlegt und getrennt voneinander übertragen. Diese kleinen Einheiten werden auch Pakete, Rahmen bzw. Frames genannt und man spricht weiters von einer Paketvermittlung.(Bauch, 2008)

Shared Media

Bei Shared Media verwenden alle beteiligten Geräte innerhalb des Netzwerks dasselbe Zugriffsverfahren und es existiert nur ein gemeinsames Übertragungsmedium. Bei der drahtlosen Übertragung wie zum Beispiel bei WLAN oder UMTS (im gleichen verwendeten Kanal) ist immer von Shared Media die Rede. Auch im LAN ist der Zugriff auf ein gemeinsames Medium möglich. Dabei haben sich aber CSMA/CD und CSMA/CA als unterschiedliche Verfahren etabliert. Netzwerke die als Knoten Switches verwenden und im Vollduplex betrieben werden, bilden kein Shared Media. (Schmidt, 2016)

Unicast / Multicast / Broadcast

Werden Daten direkt von einem Gerät zum anderen geschickt spricht man von Unicast. Werden die Informationen an mehrere gesendet ist von Multicast die Rede und sollten die Daten an alle Netzwerkteilnehmer übertragen werden spricht man von Broadcast. Dabei können aber schnell Probleme auftreten und somit die Übertragungsgeschwindigkeit beeinflussen. Sollten zum Beispiel in kürzester Zeit viele Broadcasts stattfinden, könnte somit im schlimmsten Fall kein Datenaustausch mehr stattfinden. (Schmidt, 2016)

3.9.1 CSMA/CD

Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection ist ein Zugriffsverfahren, welches für lokale Ethernet-Netzwerke eingesetzt wird. Da bei solchen Netzwerken sich alle Teilnehmer ein Übertragungsmedium teilen – in diesem Fall

das Kabel – muss darauf geachtet werden, dass der Datenverkehr geregelt ist damit es nicht zu einem Chaos bei der Datenübertragung kommt und somit Daten verloren oder beschädigt werden. Die Grundidee dabei ist das Prinzip „Listen-before-Talk“. Netzwerk-Teilnehmer können nicht gleichzeitig Daten senden und müssen immer, wie bei einem normalen Gespräch, warten bis der andere Teilnehmer fertig ist und zuhören und dann erst senden. Wer, wann zuerst senden darf, wird durch dieses Verfahren bestimmt.

Definition

Carrier Sens (CS) ist die Trägerzustandserkennung und sie regelt, dass vor einer Übertragung alle Teilnehmer das Medium überprüfen, ob es frei ist. Erst bei erfolgreicher Überprüfung können die Daten gesendet werden.

Multiple Access (MA) beschreibt, dass mehrere Geräte, die an das Netzwerk angeschlossen sind, sich ein Übertragungsmedium teilen. In diesem Fall ist das Medium der Netzwerkbus (Kabel).

Collision Detection (CD) ist zuständig für die Kollisionserkennung und gibt Regeln vor, wie vorgegangen werden muss sobald eine Kollision von Datenpaketen stattfindet.

Ablauf des CSMA/CD Verfahrens

Alle Stationen innerhalb des Netzwerkes prüfen ständig, ob der Bus frei ist oder nicht. Erkennt ein Teilnehmer, dass der Bus frei ist, darf gesendet werden. Während gesendet wird, wird zusätzlich dazu immer überprüft, ob das anliegende Signal am Bus mit dem zuvor gesendeten Signal übereinstimmt. Kommt es zu keiner Übereinstimmung, bedeutet das, dass es zu einer Kollision gekommen ist, da eine weitere Station Daten gesendet hat und es zu einer Überlagerung der Signale gekommen ist. Sobald eine Kollision erkannt wird, sendet die Station, die die Kollision als erstes erkannt hat, ein sogenanntes JAM-Signal aus. Somit wissen alle weiteren Stationen das eine Kollision aufgetreten ist und fangen nicht an zu senden. Der Sender muss danach eine zufällige Zeitdauer (Backoff) abwarten, um mit der erneuten Übertragung zu beginnen. Der Backoff muss eine zufällige Zeit sein damit es zu keiner weiteren Kollision kommt. Die Wahrscheinlichkeit, dass beide Teilnehmer danach auch wieder zur selben Zeit übertragen wollen ist somit sehr gering. Alle Übertragungsversuche werden dabei im Hintergrund gezählt. Die maximale Anzahl der Versuche liegt bei 16. Sollte dieser Wert erreicht werden, was unter normalen Umständen nicht der Fall sein kann, wird der Fehler an die nächsthöhere Netzwerkschicht

gemeldet und die ganze Übertragung wird somit endgültig abgebrochen. („CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection“, 2018)

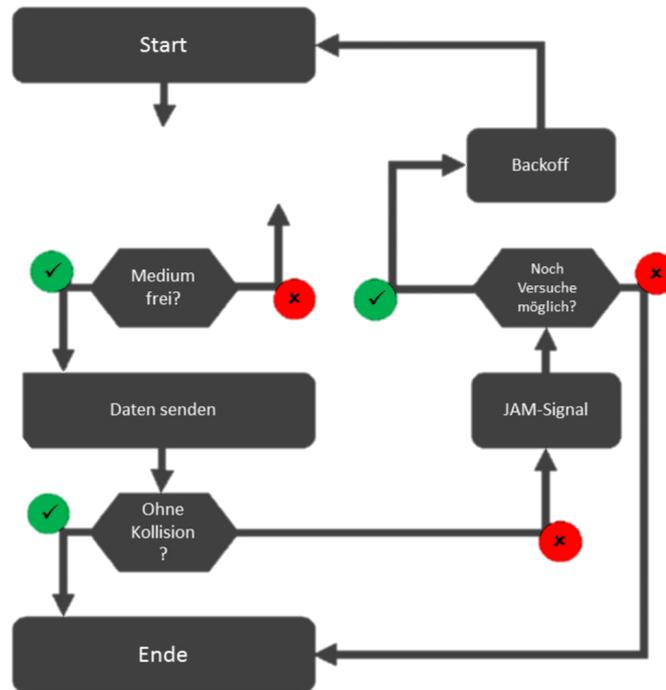


Abbildung 44 CSMA/CD Ablaufdiagramm

(Quelle: <https://www.ionos.at/digitalguide/server/knowhow/csma-cd-carrier-sense-multiple-access-collision-detection/>)

Kollisionen

Je mehr Stationen Zugriff auf das Übertragungsmedium haben, desto höher ist die mögliche Anzahl an Kollisionen. Kollisionen sind jedoch keine Seltenheit und gehören zum normalen Betrieb eines lokalen Netzwerkes. Sie sind aber nicht nur von der Anzahl an Teilnehmern abhängig, sondern auch von der Kabellänge. Werden lange Kabeln verwendet kann es vorkommen, dass ein Teilnehmer Daten schon sendet, aber ein anderer noch nicht bemerkt, dass gesendet wurde. Somit kommt es zu einer Kollision der Daten und zu Verzögerungen im Übertragungsweg. Es kann sogar dazu führen, dass nur noch 30 Prozent der eigentlichen Übertragungsgeschwindigkeit erreicht werden kann. („CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection“, 2018)

Kollisionsdomäne

Ein Netzwerk kann wie in Abbildung 45 in mehrere Segmente unterteilt werden. Durch das Verbinden der einzelnen Segmente durch zum Beispiel einen Repeater werden die einzelnen Segmente zu einer gemeinsamen, großen

Kollisionsdomäne zusammengefasst. Das bedeutet, dass sich innerhalb dieses großen Netzwerkes sich immer nur ein Signal befinden darf, welches gesendet wird. Wird gleichzeitig ein weiteres Signal von einer anderen Station gesendet so kommt es zu einer Kollision der Datenpakete. Eine Kollisionsdomäne ist also eine Gruppierung mehrerer Stationen, die sich das gleiche Übertragungsmedium teilen. Durch den Einsatz sogenannter Bridges können Kollisionsdomänen getrennt und verkleinert werden. Hubs bzw. Repeater können diese nicht trennen und dienen nur als Verbindungselemente.

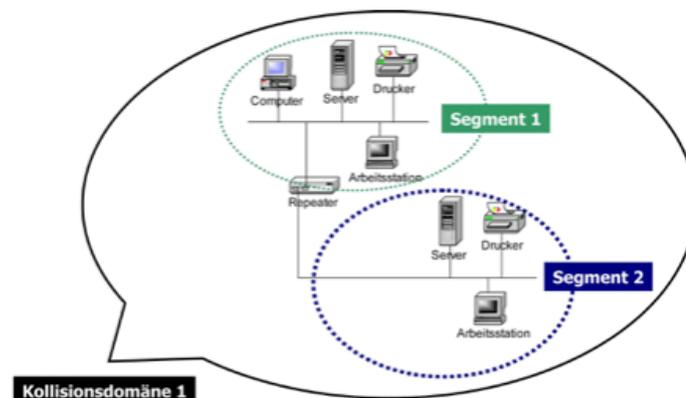


Abbildung 45 Darstellung einer Kollisionsdomäne

Eine mögliche Lösung Kollisionen zu verhindern ist es, kleinere Kollisionsdomänen zu bilden. Dafür muss jedoch das Netzwerk in sogenannte Teilnetze (Subnetze) aufgeteilt werden. Es kommen hierfür Geräte wie Switches oder Bridges zum Einsatz. Nachteil dieses Verfahrens ist es, dass der Empfangszeitpunkt eines Signals nicht festgelegt oder berechnet werden kann. Er ergibt sich laut Schmidt zufällig. Der Vorteil ist jedoch, dass rein theoretisch jederzeit eine Station senden kann und nicht auf ein spezielles Signal im Netzwerk warten muss wenn der Bus frei ist. (Schmidt, 2016, S. 50)

3.9.2 CSMA/CA

Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance wird als Zugriffsverfahren bei Funknetzen verwendet. Es handelt sich hierbei um eine Abänderung des CSMA/CD Verfahrens, da dieses nicht geeignet ist für drahtlose Übertragungsmedien. Das Hauptproblem hierbei ist das sogenannte Hidden-Station-Problem. Dieses Problem tritt auf, wenn zwei verschiedene Teilnehmer zu weit entfernt voneinander sind um sich gegenseitig wahrzunehmen und gleichzeitig Daten zu einem dritten Teilnehmer übertragen. Es kommt unweigerlich zu einer Kollision. Der Hauptunterschied zu CSMA/CD ist jedoch,

dass CSMA/CA versucht Kollisionen direkt zu vermeiden und nicht nur diese zu erkennen und regeln vorzugeben was zu tun ist, im Falle einer Kollision damit diese beim zweiten Versuch nicht mehr auftreten können.

Unterschied zu CSMA/CD

Wie bei CSMA/CD überwacht der Carrier Sense auch hier das Übertragungsmedium. In diesem Fall wird der Funkkanal überprüft, ob er frei ist und ob andere Teilnehmer - die in Reichweite und Sichtbar sind - gerade Daten übertragen. Vor einer Datenübertragung wird mittels des Netzbelegungsvektors (NAV), welcher für jedes Gerät ganz persönlich ist, vom Sendegerät an allen Teilnehmern eine Information ausgesendet wie lange die Übertragung dauern wird. Somit wissen alle übrigen Geräte wann sie wieder mit einer erneuten Überprüfung starten können. Sollte das Medium jedoch belegt sein, wird der zufällige Backoff eingeleitet. Somit wird direkt am Anfang schon mit einer zufälligen Zeitspanne gewartet, bis eine erneute Überprüfung stattfindet. Das ist einer der Hauptunterschiede zu CSMA/CD. Durch diese zufällige Wartezeit wird verhindert, dass alle Teilnehmer, die nicht senden oder empfangen, gleichzeitig wieder mit der Überprüfung und somit mit einer Datenübertragung starten können.

Der Schwerpunkt von CSMA/CA liegt, wie schon im Namen vorkommend, auf die Collision Avoidance. Dazu wird ein spezielles Verfahren eingesetzt welches genau das als Hauptaufgabe hat und zuständig für die zeitliche Gliederung ist. Die Distributed Coordination Function (DCF). Sie weist den Teilnehmern spezielle Zeitslots zu bevor sie mit der Übertragung beginnen können. Sollte das Medium frei sein, müssen die Teilnehmer zusätzlich für die Dauer des DIFS (DCF Interframe Space) das Netzwerk noch überwachen, um sicherzugehen, dass zum Zeitpunkt des Sendens keine Geräte in Reichweite auch senden. Wird diese Zeitspanne auch erfolgreich abgewartet wird nochmals ein zufälliger Backoff gestartet und erst dann kann die Datenübertragung beginnen. Durch die Frames Request to Send (RTS) und Clear to Send (CTS), welche eine spezielle Erweiterung ist und vor der Datenübertragung noch stattfinden kann, ist es möglich nochmals eine Überprüfung zu starten um somit absolut sicherzugehen. Vor der Datenübertragung sendet das Sendegerät dem Empfänger einen sogenannten RTS-Frame mit welchem er mitteilt, dass er eine Übertragung starten möchte und das Medium für eine gewisse Zeit belegt wird. Mit dem zurücksenden des CTS-Frames vom Empfangsgerät wird dem Sender mitgeteilt das die Übertragung starten kann und weiters wird auch allen anderen Netzwerkteilnehmern somit mitgeteilt, dass das Übertragungsmedium besetzt ist. Da in diesem Zeitraum alle weiteren Teilnehmer im Netzwerk inaktiv geschaltet

sind, ist es nicht möglich eine Kollision oder andere Störungen zu erkennen. Daher wird auf ein ACK-Frame (Bestätigungsframe) vom Empfangsgerät gewartet, welches mitteilt, dass alle Daten korrekt angekommen sind. Dieses wird aber erst nach der Dauer des SIFS (Short Interframe Space) gesendet. Das SIFS ist die Zeit, wie lange es dauert das Datenpaket zu verarbeiten. Sollte kein ACK-Frame ausgesendet werden, wird erneut mit der Datenübertragung begonnen. Jedoch muss hier nicht nochmals gewartet werden bis das Medium wieder frei ist, sondern es besteht ein Vorzugsrecht für die Sendestation. Somit ist es möglich, eine Störung frühzeitig zu erkennen bevor die eigentlichen Daten dann verloren gehen. („CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance“, 2018)

3.9.3 Halbduplex vs. Vollduplex

Man unterscheidet grundsätzlich in der Netzwerktechnik zwischen Halbduplex und Vollduplex. Duplex an sich beschreibt wie die Datenübermittlung im Netzwerk erfolgt. Bei Halbduplex kann zu einem Zeitpunkt nur in eine Richtung übertragen werden. Bei Vollduplex hingegen ist das Senden und Empfangen gleichzeitig möglich. In der Netzwerktechnik kommen noch Simplex und Dual-Simplex vor. Simplex lässt zu jedem Zeitpunkt nur eine Übertragungsrichtung zu. Entweder Senden oder Empfangen. Wie es zum Beispiel beim Rundfunk der Fall ist, wird dort immer nur gesendet, niemals empfangen. Dual-Simplex hingegen verhält sich wie Vollduplex jedoch mit dem Unterschied das zwei verschiedenen Übertragungswege notwendig sind. Betrachtet man Halbduplex und Vollduplex näher, stellt man fest, dass das Zugriffsverfahren CSMA/CD nur für Halbduplex Sinn macht. Da zu jedem Zeitpunkt immer nur in eine Richtung gesendet werden kann und ein gemeinsames Übertragungsmedium dabei eingesetzt wird, müssen Maßnahmen und Regeln getroffen werden um Kollisionen zu vermeiden. Hingegen ist bei Vollduplex der parallele Betrieb von Senden und Empfangen möglich und somit sind dort Kollisionen auszuschließen. Die Duplex-Art hängt von der verwendeten Kabelart ab. Bei veralteten Koaxialkabeln ist nur der Halbduplex-Betrieb möglich. Seit der Einführung von Twiste-Pair-Kabeln ist der Vollduplex-Einsatz möglich. Somit lässt sich sagen, dass CSMA/CD eher eine weniger wichtige Rolle mehr in der Praxis spielt. („CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection“, 2018)

3.10 Protokolle

Jede Kommunikation in einem Netzwerk erfolgt nach einem bestimmten Ablauf, welcher vom Netzwerkprotokoll definiert wird. Netzwerk-Protokolle sind eine Sammlung von Regeln, die bestimmen, wie die Kommunikation zwischen den Geräten ablaufen muss. Es wird über das Protokoll genau definiert wie die Kommunikation aufgebaut wird, über was sich die verbundenen Geräte im Netzwerk austauschen und wie die Verbindung zum Schluss wieder getrennt wird. Es werden somit nicht nur Informationsdaten übermittelt, sondern zusätzlich noch wichtige Protokoll-Informationen. Die Netzwerk-Kommunikation zwischen den Geräten ist nicht nur von einem Protokoll abhängig, sondern von mehreren. Sie lassen sich dementsprechend konkret den einzelnen OSI-Schichten zuordnen. Dabei wird jeder Schicht, die eine bestimmte Aufgabe hat, ein Protokoll zugeteilt und löst somit ein Teilproblem der Kommunikation. Dies ist notwendig damit das Netzwerk möglichst von mehreren Anwendungen bzw. Geräten gleichzeitig genutzt werden kann. Sender und Empfänger müssen daher mit dem gleichen Schichtenmodell arbeiten, um gemeinsam kommunizieren zu können.

Protokoll-Stack

Um eine Kommunikation zwischen den Netzwerkkomponenten herstellen zu können, müssen diese in einem sogenannten Protokoll-Stack sein. Da einzelne Protokolle immer nur Teilaufgaben bewerkstelligen können, werden mehrere zu einem sogenannten Protokoll-Stack bzw. Protokollfamilie zusammengefasst. Es ist auch möglich sogenannte Vermittlungsgeräte (Gateways) einzusetzen, die die Kommunikation zwischen den verschiedenen Stacks regeln.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Übertragungsprotokollen und Anwendungsprotokolle. Zu den Übertragungsprotokollen zählen unter anderem das Ethernet-Protokoll, IP, TCP, UDP. Unter den Anwendungsprotokollen lassen sich FTP, http, SMTP uva. nennen. Es soll nachfolgend ein Überblick über die am häufigsten eingesetzten Protokolle gegeben werden.

3.10.1 TCP/IP

Das Transmission Control Protocol/Internet Protocol ist eine Protokollfamilie und ist zuständig für die Übertragung und die Vermittlung der Datenpakete innerhalb eines dezentralen Netzwerkes. Häufigstes Einsatzgebiet ist im LAN oder im WAN. Zu den Hauptaufgaben zählen unter anderem

- die Logische Adressierung (IP)

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

- das Routing (IP)
- die Fehlerbehebung und die Flusssteuerung (TCP)
- der Application Support (TCP)
- die Namensauflösung (DNS)

TCP/IP geht von einer vierschichtigen Struktur aus, welche aber im direkten Zusammenhang mit dem OSI-Schichtenmodell ist. Dabei ist das Internet Protocol auf der Schicht 3 (Network Layer) und TCP auf Schicht 4 (Transport Layer) des OSI-Schichtenmodells angeordnet.

Der Zusammenhang zwischen diesem Protokoll und dem OSI-Schichten-Modell lässt sich in folgender Tabelle erkennen:

TCP/IP-Schicht	TCP/IP	OSI	OSI-Schicht
4	Anwendungsschicht	Application Layer	7
		Presentation Layer	6
		Session Layer	5
3	Transportschicht (TCP)	Transport Layer	4
2	Internetschicht (IP)	Network Layer	3
1	Netzwerk- /Linkschicht	Data Link Layer	2
		Physical Layer	1

Tabelle 6 Zusammenhang zwischen TCP/IP und OSI

Logische Adressierung

Bei der logischen Adressierung geht es darum, die Datenpakete den richtigen Empfängern zuzuordnen und zu übertragen. Dabei wird ein großes Netzwerk in sogenannte Segmente unterteilt. Das übernimmt bei TCP/IP das Internet Protocol. Bei kleinen, lokalen Netzwerken in dem sich alle Teilnehmer das gleiche Übertragungsmedium teilen, wie es zum Beispiel bei WLAN oder Ethernet der Fall ist, empfängt jeder Teilnehmer jedes Datenpaket. Dies ist bei wenigen Teilnehmern kein Problem, jedoch wird es zu einem, wenn tausende oder mehr Teilnehmer vorhanden sind. Daher muss eine physikalische

(Topologie) und eine logische (Adressierung) Strukturierung vorhanden sein, damit Datenpakete nur in das jeweilige Netz, in dem sie auch gehören, gesendet werden. Für die Adressierung kommen Verfahren wie zum Beispiel CIDR, Subnetting oder Netzklassen zum Einsatz. („TCP/IP“, 2019)

Routing

Beim Routing geht es darum, dass Datenpakete ihr Ziel über die einzelnen Netzwerkknoten erreichen. Es wird auch als eine Art Wegfindung beschrieben indem jedem Datenpaket bei jedem Netzknoten der nächste Netzknoten ermittelt und mitgeteilt wird. Somit können Datenpakete auch zu weit entfernten Empfängern gelangen, die möglicherweise in unbekannte Netzwerk-Segmente liegen. („TCP/IP“, 2019)

Fehlerbehebung und Flusststeuerung

Durch den Einsatz von TCP sind Sender und Empfänger immer in Kontakt, um mögliche Fehler bei der Datenübertragung schnell zu beheben. Sollte ein Fehler festgestellt werden, wird gleich mit einer erneuten Datenübertragung begonnen. Die Flusststeuerung dient dazu, die maximale Bandbreite und Geschwindigkeit einer Übertragung auszunutzen. („TCP/IP“, 2019)

Application Support

Alle einzelnen Protokolle werden beim Einsatz innerhalb eines Gerätes mittels einer einzelnen IP-Adresse angesprochen. Daher ist es notwendig eine zusätzliche Kennung zu haben, um direkt den einzelnen Dienst ansprechen zu können. Diese Portnummern befinden sich im TCP- oder UDP-Header und lassen sich auch in folgende Bereiche unterteilen:

- 0 bis 1023: Well-Known-Ports
- 1024 bis 49151: Registered Ports
- 49152 bis 65535: Dynamic/Private

Namensauflösung

Da auf Anwenderebene eher Namen als IP-Adressen eingesetzt werden, muss eine sogenannte Übersetzung stattfinden. Es muss zu jedem Namen eine IP-Adresse ermittelt werden.

Vorteile/Nachteile von TCP/IP

Eines der Hauptvorteile von TCP/IP ist, dass es ein weltweiter Standard ist und somit jede Anwendung in der Lage ist, Daten über jedes Netzwerk zu senden

bzw. zu empfangen. Kennt ein Anwender eine korrekte Adresse, kümmert sich TCP/IP um den Verbindungsaufbau, -abbau und um die Übertragung der Daten zum Zielgerät. Hierbei spielt der Übertragungsweg keine Rolle. IP hat dafür zu sorgen, dass das Datenpaket den Empfänger ordnungsgemäß erreicht und TCP übernimmt die Steuerung der Datenübertragung und ist zusätzlich dazu für die Zuordnung des Datenstroms zur jeweiligen Anwendung zuständig.

Nachteil von TCP/IP ist, dass es Netzneutral ist. Das bedeutet, dass jedes einzelne Datenpaket gleichbehandelt werden muss und somit keine Datenpakete priorisiert werden können. („TCP/IP“, 2019)

3.10.2 IP-Internet Protocol

Das Internet Protocol, oder kurz IP, hat als Hauptaufgabe die Vermittlung (Routing) von Datenpaketen von einem System zum anderen. Das heißt, dass jeder Netzwerk-Teilnehmer innerhalb des Netzwerkes erreichbar sein muss und somit eine eindeutige Adresse benötigt. Vergleichbar mit den Angaben zu einer Anschrift. Das Internet Protokoll arbeitet auf der dritten Schicht des OSI-Schichtenmodells und wird in IPv4 und IPv6 unterteilt.

Schicht	Dienste / Protokolle / Anwendungen			
Anwendung	http	IMAP	DNS	SNMP
Transport	TCP		UDP	
Internet	IP (IPv4/IPv6)			
Netzzugang	Ethernet, WLAN, ...			

Tabelle 7 Unterteilung von TCP-IP

Die heutzutage am meist eingesetzte Version ist noch immer IPv4. Sie hat eine Länge von 32 Bit und besteht grundsätzlich aus Nullen und Einsen zur besseren Maschinenlesbarkeit. Sie wird in jeweils 8 Bit große Segmente aufgeteilt und jeweils durch einen Punkt getrennt. Jedes einzelne Segment kann dabei einen Dezimalwert von 0 bis 255 annehmen und ist somit verständlicher. Durch die Länge der IPv4-Adresse ergeben sich $2^{32} = 4.294.967.296$ IP-Adressen. Aufgrund der vielen Endgeräte heutzutage existiert jedoch eine Adressknappheit. Aus diesem Grund wurde IPv6 entwickelt. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Versionen ist die Adresslänge und die Schreibweise. IPv6 hat eine Länge von 128 Bit und wird als Hexadezimalzahl dargestellt. Es bietet noch weitere Vorteile gegenüber der veralteten Version. Darunter zählen zum Beispiel

Autokonfiguration der IPv6 Adressen, eine Punkt-zu-Punkt Verschlüsselung, verbesserte Quality of Service-Dienste gegenüber IPv4 oder sogar echtes Audio- bzw. Videostreaming mittel Multicast. Jeder einzelnen Netzwerk-Schnittstelle muss bei Verwendung von TCP/IP eine eindeutige, logische IP-Adresse zugewiesen werden damit eine Kommunikation stattfinden kann. Sie ist nicht nur die Identifikationskennzahl des jeweiligen Hosts, sondern gibt auch an, in welchem Netz sich der jeweilige Host befindet.

MAC-Adresse

Zusätzlich dazu besitzt jedes Gerät noch eine eindeutige physikalische Hardware-Adresse (MAC-Adresse) der somit eine IP-Adresse zugeordnet wird. Sie ist 48-Bit lang und wird als Hexadezimalwert angegeben. Die MAC-Adresse ist weltweit einheitlich aufgebaut. Dabei geben die ersten drei Bytes eine Kennung über den Hersteller. Die restlichen drei Bytes sind jeweils Gerätespezifisch und werden vom Hersteller selbst angegeben.

IP-Adressen werden grundsätzlich unterteilt in:

- **Netzwerk-ID**
Dieses kennzeichnet das eigentliche Netzwerk.
- **Host-ID**
Hier kommt es zu einer eindeutigen IP-Vergabe für die jeweilige Schnittstelle.

Um den Übergang zwischen Netzwerk-ID und Host-ID zu erkennen, muss eine sogenannte Netzmaske angegeben werden. Dabei wird festgelegt wie groß ein solches Netzwerk-Segment sein darf.

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3
IP-Adresse	192.168.0.100	176.95.4.110	192.0.0.24
Netzmaske	255.0.0.0	255.255.0.0	255.255.255.0
Netz-ID	192	176.95	192.0.0.
Host-ID	.168.0.100	.4.110	.24

Tabelle 8 Beispiele für verschiedene Netzmasken

3.10.3 TCP – Transmission Control Protocol

Das Transmission Control Protocol ist ein verbindungsorientiertes Protokoll und hat als Ziel Datenverluste zu verhindern, das Aufteilen von einzelnen Datenströmen und die Zuordnung dieser Datenpaket zu den dazugehörigen Anwendungen. TCP übernimmt die Datenpakete von den jeweiligen Anwendungen, teilt diese dementsprechend auf, versieht diese mit einem Header und übergibt diese dann weiter an das Internet Protocol. Am Empfänger angekommen werden die Daten in die richtige Reihenfolge wieder gebracht, zusammengesetzt und zum Abschluss zur jeweiligen Anwendung übergeben. Die richtige Zuordnung zu den Anwendungen geschieht über die Port-Nummer.

Die wichtigsten Aufgaben und Funktionen von TCP werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Data Segmenting

Der Datenstrom, welcher von den Anwendungen kommt, muss vor der Übertragung in kleinere Datenpakete bzw. Segmente unterteilt werden und auf Empfangsseite wieder zusammengesetzt werden. Diese Funktion wird Segmentierung genannt.

Verbindungsmanagement

Dabei geht es hauptsächlich um den Verbindungsaufbau bzw. -abbau.

Fehlerbehandlung

Bei jeder Übertragung eines Datenpakets wird eine Bestätigung vom Empfänger an den Sender übermittelt. Sollte keine ankommen, wird das Datenpaket erneut übertragen. Es ist jedoch möglich, dass doppelte Datenpakete somit übertragen werden können, daher werden den TCP-Paketen eine fortlaufende Sequenznummer zugeteilt, die dazu dient die Reihenfolge der Datenpakete festzustellen und diese wieder richtig zuzuordnen.

Flusssteuerung

Da eine Verbindung zwischen den Geräten immer nur so schnell sein kann wie es die einzelnen Teilgeräte zulassen, ist die Flusssteuerung der Mechanismus welcher die Geschwindigkeit dementsprechend anpasst. Dabei wird auf die maximal mögliche Bandbreite und die Netzauslastung bei der Übertragung geachtet. Sie basiert maßgeblich auf den Empfangsbestätigungen der jeweiligen Empfangsgeräten. („TCP-Kommunikation“, 2019)

3.10.4 Weitere Protokolle

Neben den beiden Protokollen TCP und IP sind unter anderem auch FTP, SMTP, http, UDP und RTP in dieser Protokollfamilie vertreten.

UDP

UDP (User Datagram Protocol) ist für Audio- bzw. Video-Streaming nicht irrelevant. Es können damit schnellere Übertragungen als mit TCP realisiert werden, jedoch mit dem Nachteil, dass keine Übertragungssicherheit vorhanden ist. Da UDP keine Überprüfung durchführt, ob die Daten angekommen sind oder nicht, kann es vorkommen, dass Datenpakete verschickt aber nicht am Zielgerät ankommen. Es ist per UDP auch nicht möglich verlorene Datenpakete erneut anzufordern. Durch den Verzicht auf diese Überprüfungsprozedur wird jedoch Bandbreite eingespart und somit kommt es zu schnelleren Geschwindigkeiten die für Audio- bzw. Video-Streaming von Vorteil wären. (Schmidt, 2016, S. 92)

RTP

RTP (Realtime Transport Protocol) kann mit TCP und UDP verglichen werden. Es können bei diesem Transport Protocol Daten in Echtzeit durchgängig übertragen werden. RTP baut grundsätzlich auf UDP auf, um schnelle Übertragungsgeschwindigkeiten anbieten zu können, jedoch mit dem Unterschied, dass Paketverluste bis zu einem bestimmten Prozentsatz akzeptiert werden. Je nach Codec werden für Audio- bzw. Video-Daten 1 bis 20 Prozent Paketverluste toleriert. UDP hat keine Funktion, um solche Paketverluste überhaupt zu erkennen und bei TCP wird jedes einzelne verloren gegangene Paket nochmals übertragen. RTP ist somit ein wichtiges Protocol für die Audio-Video-Übertragung jedoch muss erwähnt werden, dass es kein Quality of Service anbietet.

3.11 Ethernet

Für die Umsetzung eines Netzwerkes im LAN werden heutzutage ausschließlich zwei Varianten eingesetzt. Ethernet oder WLAN. Somit wurden alle anderen LAN-Technologien wie Token-Ring oder ARCNET von Ethernet verdrängt. Der Hauptgedanke bei der Entwicklung von Ethernet war, das Verbinden mehrerer Computer über einen gemeinsamen Bus damit Daten ausgetauscht werden können. Dieser Datenaustausch erfolgt in Form sogenannter Datenrahmen (Frames). Ethernet legt weiters auch Protokolle oder Paketformate fest. Es werden in diesem Standard auch Kabeltypen und Stecker festgelegt.

Ethernet ist ein Standard welches von der IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) unter der Projektgruppe 802 entworfen wurde. Unter der genaueren Bezeichnung IEEE 802.3 wurden alle notwendigen Vorgaben für diesen Standard definiert und lassen sich wie folgt beschreiben. Ein Ethernet-Netzwerk hat als logischen Aufbau eine Bus-Topologie. Sollte UTP, STP oder Glasfaser im physikalischen Aufbau vorkommen, wird eine Stern-Topologie eingesetzt. Das gleiche gilt auch bei der Verwendung von Switchen. (Schmidt, 2016, S. 54)

Eines der größten Probleme bei der Verwendung von Ethernet-Netzwerken für Echtzeit-Anwendung ist, dass keine genau definierbare zeitliche Zustellung der Daten erfolgen kann aufgrund der Arbeitsweise von Ethernet. Laut Heyden gibt es keine Versicherung, dass Daten verlässlich und Zeitgenau übertragen werden. Es kann somit nicht garantiert werden wann genau die Daten beim Empfänger ankommen. Echtzeit-Audioanwendung haben laut Heyden bestimmte Voraussetzungen, die erfüllt werden müssen um Daten über Ethernet zu übertragen. Es muss demnach ein Puffer für die Zwischenspeicherung der Daten existieren und ein Mechanismus, der das erneute Übertragen von Paketen zulässt. Weiters muss das Netzwerk determinierbar sein, was so viel bedeutet, dass eine präzise Zeitinformation der Übertragung vorhanden sein muss.

Ethernet kommt in den beiden unteren Schichten des OSI-Schichtenmodells vor. Es wurden über die Jahre viele einzelne Erweiterungen dieses Standards veröffentlicht die sich aber hauptsächlich auf die physikalische Schicht bezogen. Darunter zählen unter anderem Fast-Ethernet, Gigabit-Ethernet, Full-Duplex oder Flow Control.

3.11.1 Strukturierte Verkabelung

Um Engstellen in einem Netzwerk zu verhindern, wurde die strukturierte Verkabelung als Standard eingeführt. Es werden hier Topologien und Kenndaten bezüglich der technischen Übertragung genau definiert und soll als Planungssicherheit dienen. Ein großer Vorteil hierbei ist, dass die Verkabelung anwendungsneutral ist. Somit können verschiedene Informationen (Audio, Video oder nur Daten) über dasselbe Übertragungsmedium geschickt werden. Weiters ist das Netzwerk durch die sternförmige Topologie ausfallsicher und erweiterbar. Man unterscheidet zwischen primären, sekundären und tertiären Bereich und wird anhand der Verkabelungsinfrastruktur eines Gebäudes unterteilt.

Die Primärverkabelung dient zur Verbindung zwischen Gebäudeverteilern eines Standortes und den Standortverteiler selbst. Hierbei werden hauptsächlich

3 Grundlagen der Netzwerktechnik

Lichtwellenleiter in Ring- oder Stern-Topologie eingesetzt um somit große Entfernungen zu überbrücken und hohe Datenraten zu erzielen. Weiters wird hierdurch eine redundante Verbindung benötigt um somit ausfallsicher zu sein.

Die Sekundärverkabelung dient zur Verkabelung zwischen den einzelnen Etagen eines Gebäudes. Entfernungen von 500m sollten hierbei nicht überschritten werden, um eine rasche Fehlersuche und Wartung zu ermöglichen. Weiters kommen auch hier Lichtwellenleiter zum Einsatz.

Bei der Tertiärverkabelung geht es um die Verkabelung zu den einzelnen Stationen. Hierbei werden die üblichen Twisted-Pair- oder bei Bedarf auch Glasfaserkabel eingesetzt. Als Topologie wird die Sterntopologie verwendet. Entfernungen auf dieser Ebenen sollten nicht über 90m für Twisted-Pair-Kabel sein.

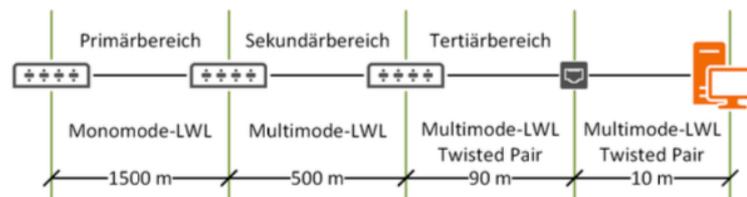


Abbildung 46 Strukturierte Verkabelung

3.11.2 Kabellängen

Im Laufe der Entwicklung von Ethernet entstanden immer neue Standards, die für die Einsatzgebiete notwendig waren. Somit wurden immer höhere Übertragungsraten erzielt und dementsprechend konnten auch längere Entfernung überbrückt werden. Folgende Tabellen geben einen Überblick der einzelnen Standards und der möglichen Entfernungen.

Ethernettyp	Übertragungsrate	Kabeltyp	Leitungslänge
10BASE-T	10 Mbit/s	Twisted- Pair (min. Cat3)	max. 100 m
100BASE-T	100 Mbit/s	Twisted- Pair (min. Cat5)	max. 100 m
100BASE-FX	100 Mbit/s	Multimode- Glasfaser	max. 400 m
1000BASE-T	1000 Mbit/s	Twisted- Pair (min. Cat5e)	max. 100 m
1000BASE-SX	1000 Mbit/s	Multimode- Glasfaser	max. 550 m
1000BASE-LX	1000 Mbit/s	Multi- und Monomode Glasfaser	max. 5 Km
10GBASE-SR	10 Gbit/s	Multimode- Glasfaser	max. 300 m
10GBASE-LR	10 Gbit/s	Monomode- Glasfaser	max. 10 Km

Tabelle 9 Kabellängen bei Ethernet-Verbindungen zwischen Stationen

3.11.3 Ethernet-Frame

Ethernet ist ein paketvermittelndes Netzwerk und hat einen standardisierten Aufbau. Als erstes werden 8 Byte für die Präambel gesendet, welche für die Synchronisation zwischen Sender- und Empfängertakt dient. Mit dem sogenannten Start Frame Delimiter (SFD) wird der eigentliche Beginn des Frames angezeigt. Diese 8 Byte zählen nicht zur Größenangabe eines Frames. Die nächsten 6 Byte dienen dazu die Empfangsadresse zu übertragen. Stellt ein Empfänger fest, dass es sich nicht um seine Adresse handelt, werden die Daten nicht angenommen. Es folgen danach wieder 6 Byte, in dem die Senderadresse übertragen wird, um zu wissen von wem die Daten kommen. Bei den nächsten 2 Byte handelt es sich um den Typ, der übertragen wird. Dabei wird mitgeteilt welches Kommunikationsprotokoll der Schicht 3 verwendet wird. Erst danach folgen die eigentlichen Nutzdaten. Sie haben eine Größe zwischen 46 und 1500 Bytes. Darunter fallen auch die Header der höheren Schichten. Das Ende des Ethernet-Frames wird mittels der 4 Byte großen Prüfsumme (CRC), oder auch Frame Check Sequence genannt, abgeschlossen. Diese Prüfsumme hat als Aufgabe Übertragungsfehler festzustellen. Dies geschieht anhand von Abbildern, die vor der Übertragung gemacht werden und die danach verglichen werden. Weiters kann es je nach verwendetem Protokoll in der Transportschicht vorkommen, dass Übertragungsbestätigungen gesendet werden. So kommt es bei TCP vor, dass erneute Übertragungsaufforderungen gesendet werden, um Lücken im Datenstrom zu schließen. Hingegen werden bei UDP diese Prüfdaten nicht ausgewertet.

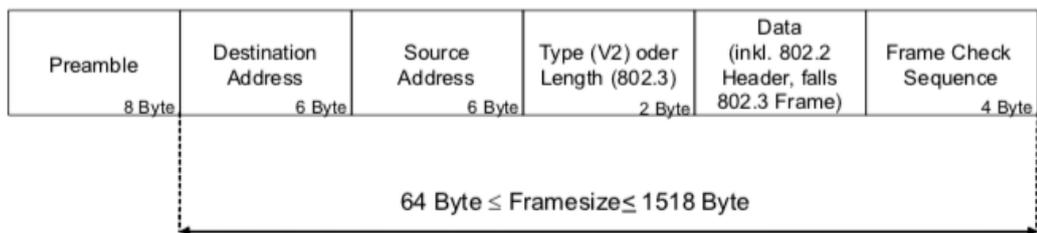


Abbildung 47 Aufbau eines Ethernet-Frames

Durch sogenannte Datenkapselung ist es möglich verschiedene Protokollpakete zu übertragen. So ist es zum Beispiel möglich nicht nur TCP/IP Pakete, sondern auch UDP oder RTP zu übertragen. (Metter & Bucher, 2007)

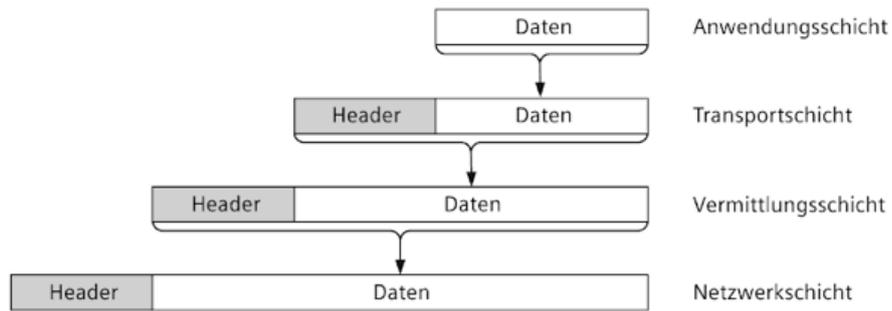


Abbildung 48 Übertragung der Daten mittels Datenkapselung

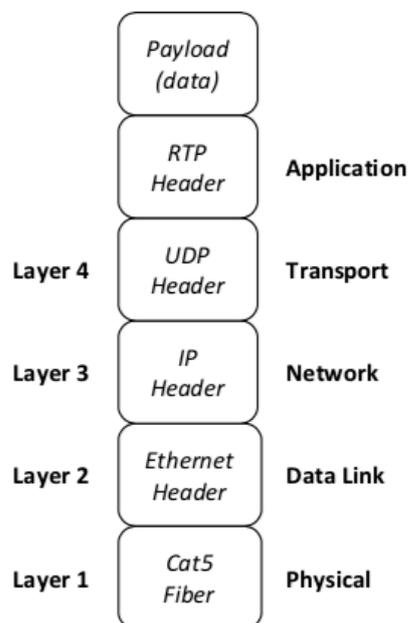


Abbildung 49 Datenkapselung am Beispiel des Schichtenmodells

Um eine mögliche Übertragung von Audiodaten mittels Protokollverkapselung in Ethernetframes darzustellen, soll folgende Grafik dienen. Der Payload eines Ethernetframes ist 1500 Byte groß oder Oktetten, wobei ein Oktett acht Bit groß ist. Es lässt sich somit leicht errechnen, dass mit drei Oktetten ein 24Bit Audiosignal übertragen werden kann.

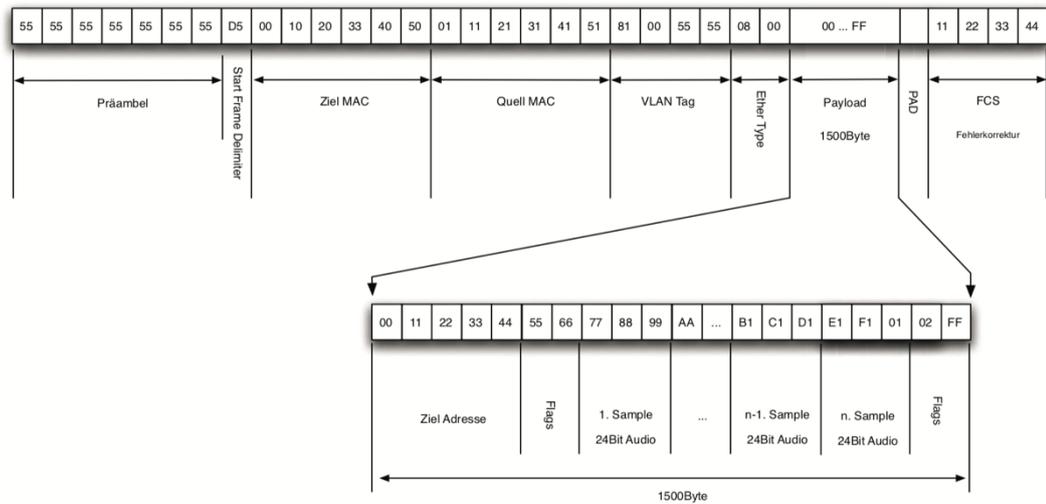


Abbildung 50 Protokollverkapselung eines Audioprotokolls in Ethernetframes

3.12 Kopplung von Netzwerken

3.12.1 Repeater und Hub (Schicht 1)

Repeater arbeiten auf Layer 1 des OSI-Schichtenmodells und dienen dazu die Übertragungsstrecke eines Netzwerkes zu erweitern. Es werden dabei die ankommenden Signale empfangen, aufbereitet und verstärkt weitergesendet. Repeater werden heutzutage dazu eingesetzt, um zu Beispiel WLAN Signale zu verstärken und somit das Netzwerkgebiet zu vergrößern. Sie übernehmen keine regulierenden Funktionen und sind für andere Teilnehmer im Netzwerk völlig transparent.

Hat ein Repeater mehrere Ports, so spricht man von einem Hub oder Multiport-Repeater. Ebenso wie Repeater arbeiten auch Hubs auf der ersten Schicht des OSI-Schichtenmodells und sind für alle Teilnehmer transparent. Er dient ausschließlich als Verteiler der Datenpakete indem er ankommende Datenpakete an alle anderen Ports weitersendet. Durch dieses Broadcast-Verfahren sind somit alle Ports und Hosts belegt und alle erhalten die Datenpakete obwohl sie nicht als Empfänger vorgesehen sind. Die angeschlossenen Teilnehmer teilen sich die gesamte Bandbreite, die zur Verfügung steht. Wird eine sternförmige Verbindung eingesetzt, so bestimmt der Backbone-Hub den maximalen Datendurchsatz. Hubs werden heutzutage fast ausschließlich durch Switches ersetzt.

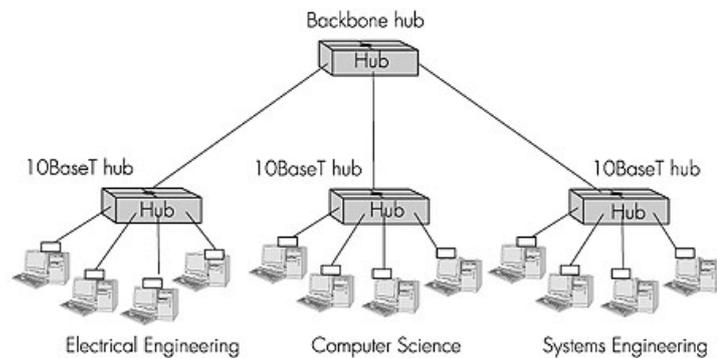


Abbildung 51 Verbindung mehrerer Hubs miteinander

3.12.2 Bridge (Schicht 2)

Eine Bridge teilt ein LAN in zwei Segmente auf und löst Probleme die durch das CSMA/CD-Verfahren verursacht werden. Sie arbeitet auf der zweiten Schicht des OSI-Schichtenmodells mit Ethernet-Frames und kann im Gegensatz zu Repeatern und Hubs mit unterschiedlichen Übertragungsraten bzw. Zugriffsverfahren umgehen. Anhand der MAC-Adressen der Empfänger, die in Adresstabellen gespeichert werden, können bei Bridges die Daten gezielt an den jeweiligen Teilnehmer gesendet werden und das Netzwerk wird somit nicht überlastet. Durch das ständige Mitlesen der Absenderadressen lernt die Bridge automatisch alle teilnehmenden Quell- oder Source-Adressen und speichert diese dementsprechend in den Adresstabellen ab. Sollte ein Datenpaket vorkommen, indem eine noch nicht eingetragene Adresse ist, da der Empfänger selbst noch nie ein Paket empfangen oder gesendet hat, wird das Datenpaket an alle Teilnehmer wie bei einem Hub gesendet. Dies hat jedoch den Nachteil sobald mehrere Bridges im Netzwerk vorhanden sind, da es in diesem Fall verschiedene „Redundante“ Wege gibt und somit die Datenpakete sich wie in einer Schleife bzw. Loop bewegen und das Netzwerk somit stilllegen. Durch das sogenannte Spanning-Tree-Protokoll kann das jedoch verhindert werden. Dieses Verfahren ist ein sogenanntes Schleifenunterdrückungsverfahren und legt eindeutige Wege fest. Somit werden redundante Verbindung blockiert und nur dann geöffnet, wenn ein anderer Weg ausfällt.

3.12.3 Switch (Schicht 2)

Ein Switch dient dazu mehrere Teilnehmer in einem Netzwerk zu verbinden. In einem Ethernet-Netzwerk mit Stern-Topologie dient ein Switch auch als Verteiler der Datenpakete. Ein Switch arbeitet normalerweise auf Layer 2 des OSI-Schichtenmodells. Einige Hochleistungs-Switche können jedoch auch auf Schicht

3 oder höher arbeiten. Es handelt sich hierbei um sogenannte Multilayer-Switches.

Switche funktionieren ähnlich wie Hubs oder Bridges. Der Unterschied ist jedoch, dass ein Switch eine direkte Verbindung zu einem angeschlossenen Teilnehmer schalten kann. Damit dies jedoch möglich ist, muss der Port des Empfängers bekannt sein. Sollte dies nicht der Fall sein, wird das Datenpaket als Broadcast an alle Ports gesendet und der Switch wartet auf die Antwortpakete der Empfänger und speichert dann die jeweiligen MAC-Adressen und die dazugehörigen Ports ab. Switche lassen sich nach folgenden Kriterien unterscheiden:

- Die Anzahl der MAC-Adressen für die Quell- und Zielports die gespeichert werden können
- Das Switching Verfahren
- Die Latenz der übertragenen Datenpakete

Da in einem Ethernet-Netzwerk durch das CSMA/CD-Verfahren Kollisionen entstehen können und diese den Netzwerk-Verkehr stark reduzieren können, ist es ratsam so viele Kollisionsdomänen wie möglich zu bilden. Durch das merken der einzelnen Ports, über welche die Hosts erreichbar sind und das gezielte weiterleiten der Datenpakete nur an diesem Port, erzeugt der Switch eine dedizierte Kollisionsdomäne zwischen Switch-Port und einen einzelnen Host.

Switching

Beim Switching geht es grundsätzlich darum, den richtigen Ausgang für die Datenpakete zu finden. Dabei wird ein Weg freigeschaltet auf Basis der Sender- und Empfänger-Adressen und der jeweiligen Ports an denen diese angeschlossen sind. Die MAC-Adressen von Sender und Empfänger werden gemeinsam mit den Port-Nummern des Switches in einer MAC-Tabelle (Forwarding Database) gespeichert. Der Vorteil dabei ist, dass somit die Datenpakete schneller und viel effizienter an den jeweiligen Port geleitet werden können, an dem auch der Empfänger angeschlossen ist. Es können dabei folgende Switching-Verfahren zum Einsatz kommen:

- Cut-Through
- Store-and-Forward
- Adaptive-Cut-Through
- Fragment-Free-Cut-Through

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Cut-Through	Sobald die Zieladresse erhalten wurde, wird das Datenpaket sofort weitergeleitet	Geringe Latenz zwischen Empfangen und Weiterleiten	Keine Fehlererkennung. Datenpakete werden immer weitergeleitet.
Store-and-Forward	Durch das Zwischenspeichern des Datenpakets in einem Puffer, wird es überprüft und bearbeitet. Danach wird es an den Ziel-Port weitergegeben.	Frühzeitige Fehlererkennung und Aussortierung fehlerhafter Datenpakete.	Erhöhte Latenz durch die Zwischenspeicherung. Abhängig von der Datenpaket-Größe.
Adaptive-Cut-Through	Eine Kombination aus Cut-Through und Store-and-Forward. Bei wenigen Kollisionen wird Cut-Through verwendet, ansonsten wird auf Store-and-Forward geschaltet.		
Fragment-Free-Cut-Through	In den meisten Fällen treten in den ersten 64 Byte eines Datenpakets Fehler bzw. Kollisionen auf. Daher werde bei diesem Verfahren zuerst nur die ersten 64 Byte empfangen und analysiert. Sobald diese fehlerfrei sind, werden die Datenpakete weitergeleitet.		

Tabelle 10 Unterschied der verschiedenen Switching-Verfahren

Zwischen dem Verarbeiten und Weiterleiten der einzelnen Ethernet-Frames entsteht eine Latenz die vom jeweiligen Switching-Verfahren abhängig. Beim Cut-Through-Verfahren wird die Zeit zwischen dem ersten empfangenen Bit und dem ersten weitergeleiteten Bit des Ethernet-Frames gemessen. Dieses Messverfahren nennt man auch FIFO (First In First Out). Beim Store-and-Forward-Verfahren wird hingegen das LIFO (Last In First Out) Messverfahren angewendet, bei dem die Zeit zwischen dem zuletzt empfangenen Bit und dem ersten ausgegebenen Bit gemessen wird. Darüber hinaus spielt auch die Leistung der Backplane eine sehr wichtige Rolle.

Bandbreite

Über der sogenannten Backplane werden die Daten in einem Switch übertragen. Sie dient als zentrale Verbindungsstelle aller Ports. Um alle angeschlossenen Netzwerk-Teilnehmer mit derselben Geschwindigkeit versorgen zu können, muss

eine ausreichende Bandbreite in der Backplane zur Verfügung stehen. Es gilt folgende Faustregel:

$$\text{Bandbreite (Mbit/s)} = \text{Anzahl der Ports} * \text{MBit/s}$$

Werden die Datenpakete mit Vollduplex übertragen, so muss das Ergebnis noch verdoppelt werden. Für einen einfachen 100 Mbit/s Switch mit 5 Ports ist somit eine Backplane-Bandbreite von 1000 Mbit/s notwendig damit alle Ports mit der selben Geschwindigkeit versorgt werden können. („Switch (Ethernet)“, o. J.)

3.12.4 Router (Schicht 3)

Router arbeiten auf der dritten Schicht des OSI-Schichtenmodells und verbinden mehrere Netzwerke mit verschiedenen Protokollen miteinander. Dabei werden Router oft dazu eingesetzt lokale Netzwerke mit anderen, größeren Netzwerken wie WAN oder MAN zu verbinden. Durch sogenannte Routing-Tabellen wird der Weg für ein Datenpaket bestimmt. Hier kommen IP-Adressen zum Einsatz und nicht so wie bei Switches MAC-Adressen. Die Aufgaben eines Routers sind sehr komplex, jedoch können sie wie folgt eingeteilt werden:

- Verfügbare Routen für die Datenpakete ermitteln.
- Unter Berücksichtigung von Kriterien wird die passendste Route ausgewählt.
- Das Herstellen einer physikalischen Verbindung zu anderen Netzwerken.
- Durch sogenanntes Fragmentieren werden die Datenpakete an die jeweilige Übertragungstechnik angepasst.

Große Unterschiede zu Switches sind jedoch nicht vorhanden und da immer mehr Switches leistungsfähiger werden und auch in Layer 3 arbeiten können, wird diese Grenze laut Heyden immer mehr verwischt. (Heyden, 2012a)

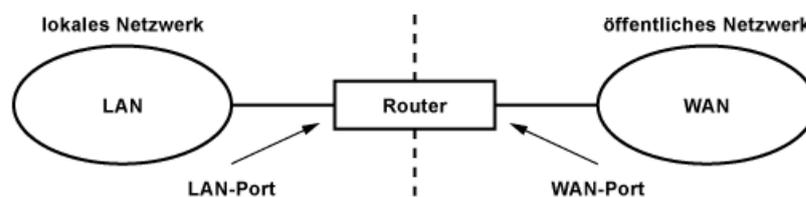


Abbildung 52 Einsatz eines Routers

(Quelle: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/1404181.htm>)

3.12.5 Gateway (Schicht 7)

Ein Gateway hat die Aufgabe Netzwerke mit unterschiedlichen Protokollen und Adressierungen zu verbinden die normalerweise zu einander inkompatibel wären. Mittels eines Gateways ist es somit möglich Datenpakete zu entpacken die bis auf OSI-Schicht 7 reichen und für das andere Netzwerk passend neu zu verpacken bis auf OSI-Schicht 1. Man kann daher einfach ausgedrückt sagen, dass ein Gateway ein Protokoll in ein anderes umwandelt. (Schmidt, 2016, S. 125)

3.12.6 Multifunktionsgeräte

Heutzutage werden oft sogenannte Multifunktionsgeräte eingesetzt die nicht nur eine Funktion übernehmen, sondern mehrere. So hat ein DSL Router nicht nur eine Router Funktion, sondern hat intern Funktionen wie Switch, Access Point, DNS-Server, DHCP-Server uvm.

4 Qualitätsmerkmale von Audio-Netzwerke

4.1 Fehlertoleranz und Ausfallsicherheit

Ausfallsicherheit ist eines der wichtigsten Qualitätsanforderungen an einem Netzwerk. Ethernet bietet anhand der integrierten Prüfsumme (CRC) einen Mechanismus Fehler zu erkennen jedoch nicht direkt zu lösen. So ist es jedoch möglich, dass durch Kabelbrüche, Wackelkontakte oder das versehentliche ausstecken einer Steckverbindung Übertragungen der Datenpakete unterbrochen werden. Daher ist es ratsam eine alternative Route zur Verfügung zu stellen, damit die Daten ungehindert übertragen werden können. Um diese Ausfallsicherheit zu gewährleisten, werden so genannte Redundanzkonzepte eingesetzt.

Trunking

Trunking ist die einfachste Möglichkeit ein Redundantes System aufzubauen. Es wird auch als Parallelschaltung bezeichnet. Dabei geht es darum, mehrere Leitungen für eine einzelne Verbindung parallel zu nutzen. Dieses Verfahren wurde unter der Norm IEEE 802.3ad standardisiert. Das Herzstück dieser Methode ist der Switch, welcher sich um das Aufteilen des Datenverkehrs kümmern sollte es zu einem Ausfall kommen. Laut Heyden reduziert sich jedoch dabei dementsprechend die Übertragungsrate. (Heyden, 2012a, S. 27)

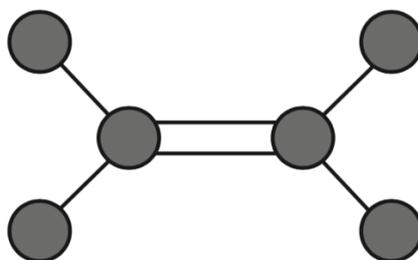


Abbildung 53 Trunking Redundanzkonzept

Ring

Die Ring-Topologie dient gleichzeitig als Redundanzkonzept, da das letzte Gerät wieder mit dem ersten Teilnehmer verbunden ist. Sollte eine Verbindung zwischen zwei Geräten ausfallen, so entsteht automatisch eine so genannte Daisy-Chain-Topologie, in der die Datenpakete trotzdem übertragen werden können. (Bakker, Cooper, & Kitagawa, 2014)

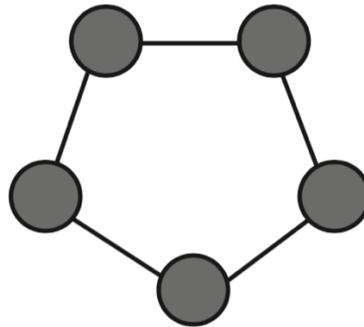


Abbildung 54 Ring Redundanzkonzept

Spanning Tree

Spanning-Tree wird bei Switches eingesetzt, die dieses Verfahren unterstützen. Es ist in der Norm IEEE 802.1w standardisiert und verhindert eine sogenannte Schleifenbildung. Durch parallele Verbindungen zwischen Switches können in Ethernet-Netzwerken doppelte Frames auftreten, die zu Fehlverhalten führen. Durch das gezielte sperren von Ports, wird nur ein logischer Weg für den Transport der Daten zur Verfügung gestellt. Sollte ein Problem auftreten so wird eine neue Route gesucht und die notwendigen Ports freigeschaltet und die restlichen wieder deaktiviert. (Schnabel, 2016a)

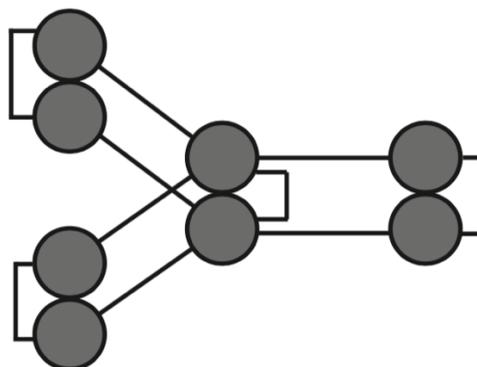


Abbildung 55 Spanning Tree Redundanzkonzept mit doppelten Switches

Vermaschung

Bei diesem Redundanzkonzept wird jeder Teilnehmer mit jedem verbunden. Somit wird eine höchstmögliche Ausfallsicherheit gewährleistet. Jedoch ist dieses Konzept sehr kostenintensiv und sehr zeitspielig. (Heyden, 2012a, S. 27)

4.2 Quality of Service

Bei Quality-of-Service geht es darum, die Netzwerk-Qualität zu beschreiben und Maßnahmen dafür zur Verfügung zu stellen. Typische Maßnahmen sind:

- Priosierung von Datenpakete
- Überdimensionierung des Netzwerkes durch z.B. mehr Bandbreite
- Bandbreiten-Reservierung für spezielle Anwendungen

Durch das OSI-Schichtenmodell ist es jedem Protokoll möglich, unabhängig voneinander auf den jeweiligen Schichten zu arbeiten. Bei TCP/IP wird dabei die Anwendungs- und Übertragungsebene voneinander getrennt und es findet keine Kommunikation dazwischen statt. Grundsätzlich ist das eine sinnvolle Vorgehensweise, jedoch werden bei der Übertragung von Audio-/Videodaten dadurch Übertragungsprobleme verursacht.

Priorisierung von Datenpakete

Da Standard-Netzwerke paketorientiert und nach dem Best-Effort-Prinzip arbeiten, werden alle Datenpakete gleich priorisiert weitergeleitet und können auch unterschiedlich schnell beim Empfänger ankommen. Bei normaler Datenübertragung von Dateien, wie E-Mails, ist es nicht relevant, ob die Daten ein paar Sekunden verspätet ankommen, da dies der Empfänger nicht bemerkt. Für Echtzeitanwendungen, wie Audio- bzw. Videoübertragung ist es jedoch sehr wohl wichtig, dass die Datenpakete ohne Verzögerungen und somit so schnell als möglich beim Empfänger ankommen. Geringe Bandbreite, Paketverluste oder Verzögerungen in der Übertragung haben großen Einfluss auf die Qualität der empfangenen Daten. Das kann sich durch Verzerrungen, Kratzen oder knackende Geräusche in der Sprachqualität oder durch ruckelnde oder pixelige Bilder bei der Videoübertragung widerspiegeln.

Laut Schnabel wird die Qualität eines Netzwerkes anhand ihrer Bandbreite, der Verzögerungszeit, die Anzahl der Paketverluste und Jitter beschrieben. Durch das Priorisieren und Einteilen in speziellen Dienstklassen wird versucht, wichtigere Datenpakete als erstes und nicht so zeitkritische Daten erst danach zu

übertragen. Dabei unterscheidet ein QoS-Netzwerk zwischen allen gleichzeitig aktiven Anwendungen. Alle Anwendungen werden einer sogenannten Verkehrsklasse zugeordnet. Ein Beispiel hierfür ist die Übertragung von Audiopakete über VoIP. Hier handelt es sich um eine Echtzeitanwendung die priorisiert übertragen werden muss. Zeitunkritische Pakete wie E-Mail oder Internetpakete werden, wenn nötig verworfen, um den zeitkritischen Paketen Platz zu machen. Dabei lassen sich Anwendungen in folgenden Klassen einteilen:

Klasse	Anwendung
1	Sprache
2	Video
3	VPN
4	WWW
5	Mail
6	Sonstiges

Tabelle 11 Classes of service im QoS

Grundsätzlich haben zwischengespeicherte Pakete in Switches immer oberste Priorität. Man unterscheidet zwei Methoden zur Prioritätsmarkierung von Datenpakete. Zum einen können die Prioritätswerte laut IEEE 802.1Q innerhalb des VLAN-Headers des Ethernetframes eingetragen werden. Dabei können diese Prioritäten nur lokal und von QoS-fähigen Switches ausgewertet und berücksichtigt werden. Oder zum anderen über das DiffServ-Verfahren welches die Prioritätswerte direkt in den IP-Header des Ethernetframes einbindet. Bei der letzten Methode ist es auch möglich die Priorisierung über das lokale Netzwerk hinaus zu übertragen.

Überdimensionierung bzw. Reservierung von Bandbreite

Eine typische Maßnahme für QoS war früher die Überdimensionierung der Bandbreite. Es wurde somit mehr Bandbreite zur Verfügung gestellt, als eigentlich von den Anwendungen gefordert wurde. Jedoch ist diese Methode nicht sehr effizient und erfordert mit der Zeit einen stetigen Bandbreiten-Wachstum. Eine weitere Maßnahme ist die Reservierung von Bandbreite für bestimmte Anwendungen. Dabei kann die Datenrate für einzelne Anwendungen auf einen fixen Wert festgelegt werden oder unterhalb der max. möglichen

Übertragungsrate, damit nach oben hin noch genügend Platz zur Verfügung bleibt.(Schnabel, 2016b, S. 250)

Paketverlust

Paketverluste bei der Übertragung zeitkritischer Anwendung können durch hohe Auslastungen bei Netzwerkknoten vorkommen. Dabei werden einzelne Pakete verworfen, die nicht weitergeleitet werden können. Paketverluste bei der Übertragung von Echtzeitanwendungen wie Audiostreaming führen zu abgehackten Signalen und Lückenbildungen. Durch das Zwischenspeichern der Signale in sogenannte Jitter-Buffer in Switches, kann dieser Fehler reduziert bzw. verhindert werden. Es werden alle Echtzeit-Datenpakete aufgenommen und erst danach gleichmäßig zusammen wiedergegeben. Somit können Laufzeitunterschiede und Paketverluste vermieden werden. Dabei muss durch spezielle Mechanismen aber gewährleistet werden, dass ein Switch nicht überlastet wird. Bei der Übertragung in Audionetzwerken können Paketverluste verhindert werden, da sie über spezielle Kontrollmechanismen verfügen. Es werden Datenstaus und mögliche Paketverluste erkannt und sofort die Anzahl der übertragenen Audiokanäle verringert und beschränkt. (Heyden, 2012a, S. 43)

4.3 Jitter, Wander und Latenz

Das Ziel bei der Entwicklung von digitalen Audiogeräten ist es, so gut als möglich transparentes Audio zu übertragen und zu reproduzieren. Jitter, Wander und die Latenz spielen dabei eine sehr wichtige Rolle. Sie haben direkten Einfluss auf die Klangqualität aber auch auf die Leistung eines Audionetzwerkes. Diese Qualitätsmerkmale sind umso bedeutender sobald ein System mit einem externen Taktgenerator synchronisiert werden muss, eine Reihe von Abtastraten unterstützen soll oder mehrere Geräte miteinander verbunden werden müssen. Sobald hohe Wiedergabetreue und der Erhalt der Details und Nuancen jedes Audiosignals erwartet wird, müssen diese Qualitätsparameter beachtet werden.

4.3.1 Jitter

Bei Jitter handelt es sich um Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Position eines Samplezeitpunktes. Damit eine Wellenform genau reproduziert werden kann, benötigt ein D/A-Wandler ein Taktsignal, welches mit dem Takt übereinstimmt, der für die Codierung verwendet wurde. Daher müssen nicht nur die Daten, sondern auch der Takt übertragen werden. (Heyden, 2012a) Zum Synchronisieren der Systeme können interne oder externe Taktgeneratoren

4 Qualitätsmerkmale von Audio-Netzwerke

eingesetzt werden. Das Ziel eines Taktgenerators ist es, ein möglichst jitterarmes Taktsignal zu liefern. Jedoch existieren in der realen Welt keine perfekten Taktgeneratoren und somit kommt es immer zu kleinen Abweichungen die Jitter genannt werden. Diese Zeitunterschiede werden in UI (Unit Intervals) oder Nanosekunden (ns) angegeben.

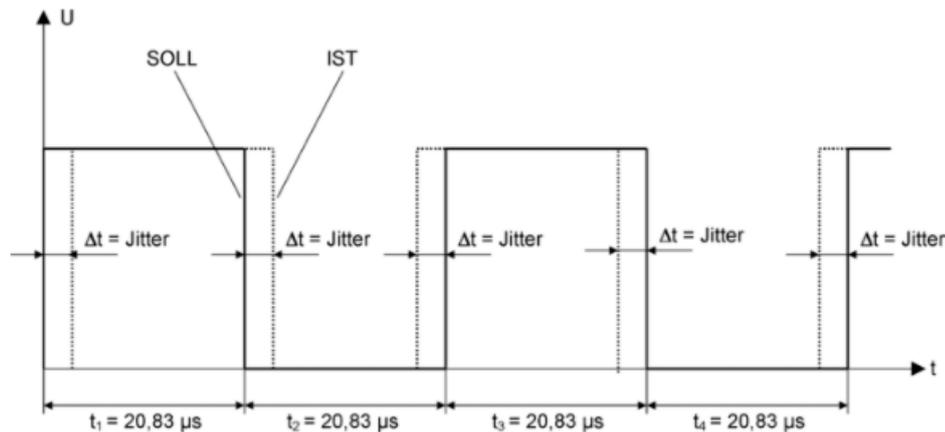


Abbildung 56 Referenz Taktgenerator im Vergleich zu einem Taktgenerator mit Jitter (Weinzierl & Verband Deutscher Tonmeister, 2008, S. 1010)

Jitter verursacht nicht nur Verzerrungen im Audiosignal, sondern kann auch das Grundrauschen erhöhen und bewirkt eine Verschlechterung der Stereoortung. Es beeinträchtigt direkt die Leistung eines Audio-Netzwerkes und kann im schlimmsten Fall zu einem vollständigen Synchronisationsverlust führen.

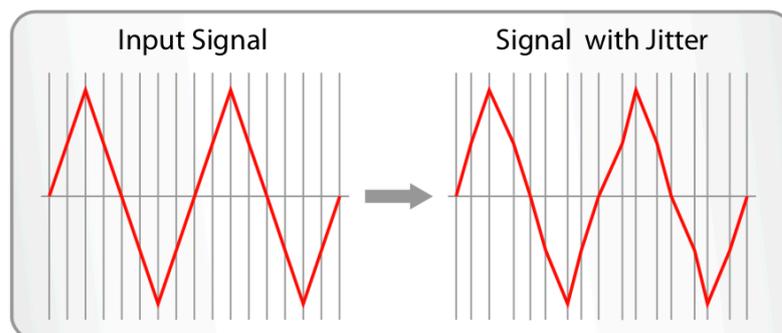


Abbildung 57 Auswirkungen von Jitter auf die Übertragung eines digitalen Signals (Aviom, 2009)

A/D- und D/A-Wandler sind abhängig von der sogenannten „Reference Clock“ um die digitalen Daten richtig interpretieren zu können. Ein nicht stabiler Takt sorgt für Änderungen in der Reproduktion der analogen Wellenform. Das Resultat daraus sind der Verlust an Details oder eine gewisse „harshness“ im Sound. Da bei digitalen Audionetzwerke mehrere Systeme miteinander

4 Qualitätsmerkmale von Audio-Netzwerke

verbunden werden, muss hierfür auch der Takt über das Netzwerk übertragen werden. Hier ist es insbesondere wichtig, dass das Taktsignal „de-jittered“ wird bevor es an interne D/A-Konverter weitergegeben und danach an das nächste System übertragen wird. (Aviom, 2009)

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Clockjitter und Signaljitter. Clockjitter ist das Resultat eines instabilen Taktgenerators. Signaljitter hingegen entsteht aufgrund Slavik durch ein ungeeignetes Übertragungsmedium. Wie in folgender Grafik ersichtlich, entstehen durch Jitter sogenannte Jitter-Seitenbänder.

$$R_j = 20 \log \left(\frac{J \omega_i}{4} \right)$$

R_j (in dB) gibt den Pegel der Seitenbänder an. J steht für die Spitzenamplitude und ω_i gibt die Audio-Signalfrequenz an.

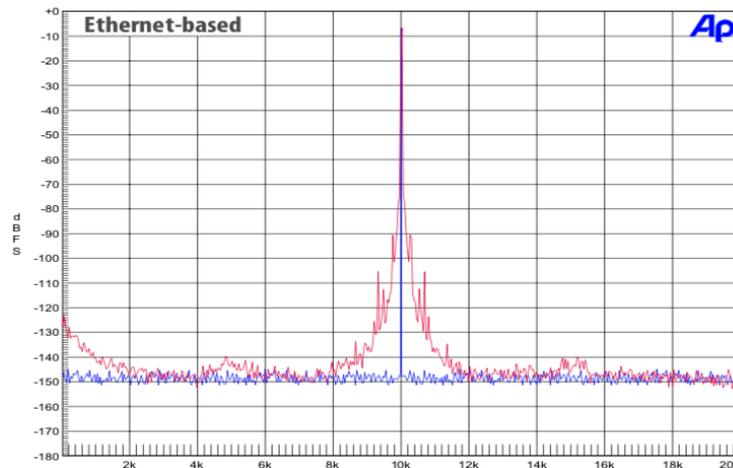


Abbildung 58 Vergleich zwischen Jitter-Signal (rotes Signal) und Ideal-Signal (blaues Signal). (Aviom, 2009)

Laut Slavik spielt das Hörempfinden des Menschen durch die Hörkurve oder Verdeckungseffekte eine wichtige Rolle für die Hörbarkeit von Jitter. Es ist weiters abhängig von der Jitterfrequenz und ist unter 250Hz deutlich weniger störend als bei Frequenzen oberhalb von 600Hz. Je nach Wortbreite eines Systems gibt es hierfür auch Toleranzbereiche für Jitter. Demnach ist für ein 16-Bit-System ein Jitter von 10ns noch in Ordnung. 24-Bit-Systeme hingegen müssen viel stabilere Taktsignale aufweisen. Bei solchen Systemen sind Jitterwerte zwischen 0,1 und 1ns tolerierbar. (Weinzierl & Verband Deutscher Tonmeister, 2008, S. 1011)

4 Qualitätsmerkmale von Audio-Netzwerke

Latenz verhältet es sich auch dementsprechend. Jedoch ist es wichtig zu erwähnen, dass auch andere Komponenten außerhalb des Netzwerkes Latenzzeiten hinzufügen können. Darunter zählen digitale Mischpulte, DSP-Prozessoren, AD- DA-Wandler oder Kodierungen. Laut Slavik haben AD-und DA-Wandlungen sowie die Sampleraten-Konvertierungen den größten Anteil an der Systemlatenz.

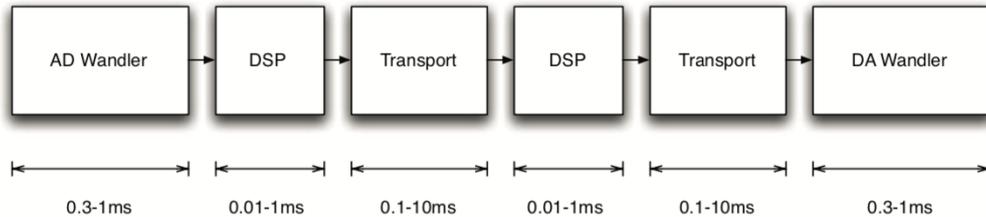


Abbildung 60 Latenzen in digitale Systeme

Weiters hat auch das Netzwerkkonzept einen Einfluss auf die Verzögerungszeit. Einfache Netzwerke, die auf Layer 1 oder Layer 2 arbeiten, haben kürzere Latenzen als Layer 3 Netze. Jedoch sind Latenzzeiten von mehr als einer Millisekunde in der Ankunftszeit des Audiosignals genauso inakzeptabel wie die durch Jitter verursachten Verzerrungen und Klangverfärbungen. (Aviom, 2009)

Da Latenzen grundsätzlich in Millisekunden angegeben werden soll folgende Tabelle dazu beitragen, eine Relation zwischen der mittleren Schallgeschwindigkeit in der Luft bei 20°C mit ca. 343 m/s und der Latenzzeit zu geben.

$$c_{Luft} = 331,5 + \frac{0,6\vartheta}{^{\circ}C} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Latenz (ms)	Distanz (m)	Distanz (m)	Latenz (ms)
1	0,343	0,33	0,97
2	0,686	0,67	1,94
3	1,029	1	2,92
4	1,372	2	5,83
5	1,715	3	8,75
10	3,43	100	291,55

Tabelle 12 Relation zwischen Entfernung und Latenz

Latenzwahrnehmung

Seit vielen Jahren werden Forschungen durchgeführt, um das Latenzempfinden besser zu verstehen. Lester und Boley haben 2007 eine Studie durchgeführt bei der festgestellt wurde, dass Latenzen am schnellsten beim In-Ear-Monitoring wahrgenommen werden. Insbesondere bei Sprache und Gesang. Bei Latenzen von 2ms sind es knapp nur noch 50% der Sänger bzw. Sprecher die das Monitoring als Gut empfinden. Ab ca. 4ms sagen die meisten Hörer, dass sie mit diesem Monitoring nicht mehr performen können. Hingegen sieht man laut Abbildung 61 das Keyboard-Spieler sowohl bei IEM als auch bei Wedges (Bühnenmonitore) viel „unempfindlicher“ gegen Latenzen sind als andere Instrumenten-Spieler. Was auch interessant zu bemerken ist, sind die großen Toleranzunterschiede zwischen IEM und Wedges. Man erkennt, dass Sänger bzw. Sprecher bei Verwendung von Wedges viel mehr vertragen als beim Einsatz von IEM. Dies hängt laut Slavik mit der besseren Lokalisierung mittels HRTF (Head Related Transfer Function) bei der Lautsprecherwiedergabe zusammen. (Lester & Boley, 2007; Slavik, 2017b, S. 26)

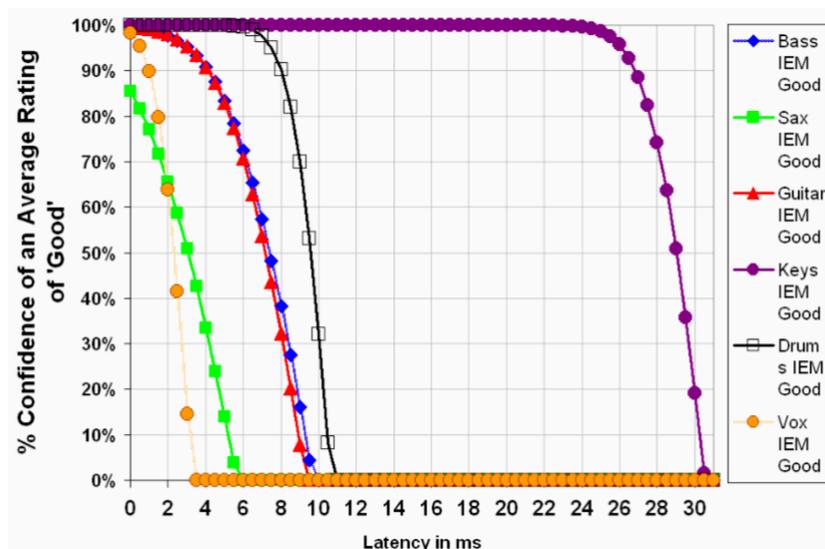


Abbildung 61 IEM Good Rating, All Instruments

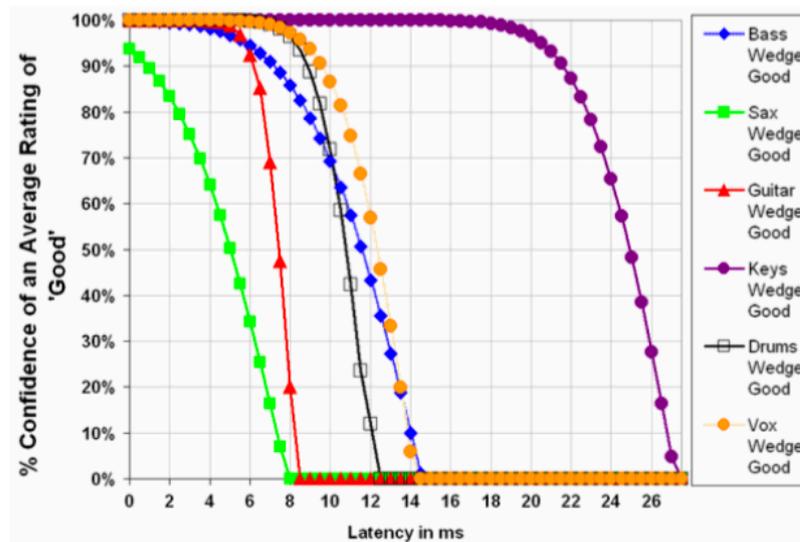


Abbildung 62 Wedge Good Rating, All Instruments

Laut Slavik ist die beste Abhilfe, um die Latenzen so gering als möglich zu halten, ein gut durchdachtes Verbindungskonzept. Dabei sollten möglichst wenige AD- und DA-Wandlungen vorkommen, da jede Wandlung eine Latenz hinzufügt. Weiters sollten dementsprechend auch wenige Switches im Netzwerk eingesetzt werden. Durch schnell arbeitende Mischpulte die möglichst keine Abtastratenwandler (SRC, Samplerate-Converter) einsetzen und durch den Einsatz von hohen Samplingfrequenzen lässt sich die Verzögerungszeit verringern. Je SRC reduziert sich die Latenz um etwa 1,5 bis 3ms. Ein Wechsel der Samplingfrequenz von 48kHz auf 96kHz halbiert laut Slavik die Latenz des Gesamtsystems. (Slavik, 2017b)

4.4 Clocking

Um Störung wie Knackser, Glitches oder Aussetzer in der Übertragung von Audiodaten zu vermeiden, benötigen alle verbundenen digitale Geräte einen gemeinsamen Takt, der möglichst stabil und genau ist. Das bedeutet, dass Schwankungen in der Zeitbasis wie Wander oder Jitter vermieden werden müssen. Laut Slavik muss ein solcher Takt beim Einsatz von einer nominalen Abtastrate von 48kHz oder 96kHz auf der zweiten Nachkommastelle genau sein. Um diese Ansprüche zu erfüllen werden daher Audio-Netzwerke und die verbundenen digitale Systeme mittels einer gemeinsamen, stabilen und genauen Taktzentrale verbunden. Fast alle Audio-Netzwerke verwenden heutzutage einen Taktgenerator der auf das Precision Time Protocol (PTP) nach IEEE 1588 bzw. IEC61588 beruht. Im Gegensatz zum Network Time Protocol (NTP), welches

4 Qualitätsmerkmale von Audio-Netzwerke

weltweit auf Zeitservern im Internet Verwendung findet, fokussiert sich PTP auf eine höhere Genauigkeit bzw. nur auf lokale Netzwerke. Mittels PTP wird eine hochgenaue Synchronität erzielt indem über das Netzwerk eine sogenannte „Time of Day“ übertragen wird. Dieses Netzwerkprotokoll unterscheidet sich von physischen Taktsignalen wie Blackburst oder Worldclock dadurch, dass es nur eine Zeit übermittelt, welche die lokalen Taktgeneratoren der Systeme dann folgen. Durch das Precision Time Protocol werden hochgenaue Informationen übertragen, wie die Latenz aller zwischengeschalteter Geräte wodurch sich die empfangenden Geräte genaue Zeiten errechnen können. In der Praxis fungieren FOH-Mischpulte meist als Taktmaster. Daher werden diese mit dem Worldclock der Taktzentrale verbunden. Die im digitalen Mischpult vorhandene Audio-Netzwerkkarte wandelt den Worldclock in PTP um und überträgt diesen somit ins Netzwerk. (Slavik, 2017b, S. 27)

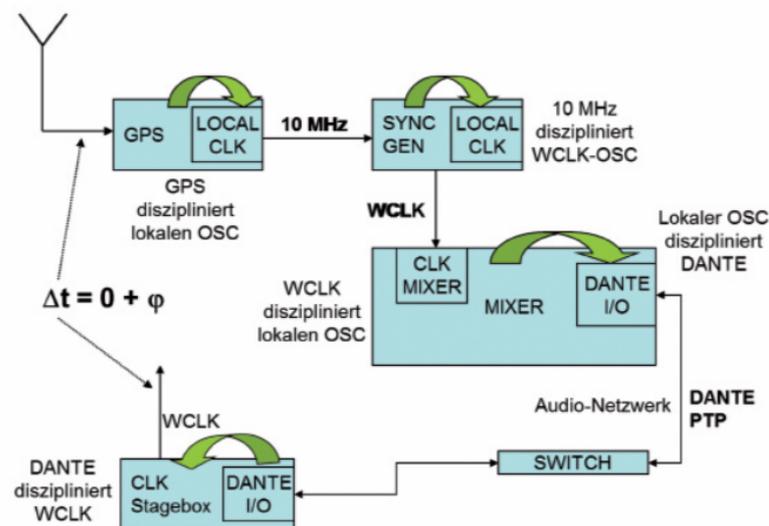


Abbildung 63 Prinzip einer Taktung in digitalen Audio-Netzwerken (Slavik, 2017b)

Weitere Qualitätsparameter für Netzwerke wären Availability, Delivery, MTBF (Mean Time Between Failure) und MTRS (Mean Time to Restore Service) auf die jedoch in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

5 Audio-Netzwerke

Durch die rasante Weiterentwicklung der Informationstechnologie (IT) in den letzten Jahrzehnten ist es heutzutage möglich diese Techniken auch für die digitale Audioübertragung einzusetzen und davon zu profitieren. Unterschiede zwischen generischen Daten und Daten die Audiosignale führen, gibt es prinzipiell keine, da Audiosignale als digitale Daten vorliegen. Nur die Anforderungen bezüglich der Übertragung selber ist für Audiosignale viel anspruchsvoller. Dies hat den Grund, dass nicht nur eine korrekte Übertragung der Daten hierfür genügt, sondern unter anderem auch der Echtzeitaspekt berücksichtigt werden muss. Methoden wie die Verkapselung der Daten in Protokolle und die Übertragung über abstrahierte Schichten haben sich in der Informationstechnik bewährt und werden demnach auch für digitale Audio-Netzwerke eingesetzt.

In dieser Arbeit sollen Audio-Netzwerke-Protokolle näher analysiert werden die auf Ethernet basieren. Grundsätzliche Unterschiede existieren in der verwendeten Netzwerkschicht. Jedoch ist es über alle Audio-Netzwerke möglich, digitale Signale verlustfrei und über weite Strecken zu übertragen. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Audio-over-Ethernet und Audio-over-IP. Jedes Protokoll hat ihre Vor- und Nachteile, die in folgenden Abschnitten analysiert werden.

5.1 Layer 1 Audio-Netzwerke

Laut Slavik sind Audio-Netzwerke, die auf Layer 1 arbeiten, extrem schnell. Sie können den Audiodatenstrom getaktet übertragen und alle verbundenen Geräte physisch synchronisieren. Hersteller verwenden proprietäre Protokolle zur Übertragung, jedoch kommen Ethernet-Hardware-Komponenten wie Stecker oder Kabel hierfür zum Einsatz. Layer 1 Audio-Netzwerke können nicht (oder nur sehr schwer) in bestehende IP-Netzwerke integriert werden, da sie keine IP-Adressierung beherrschen. Verbindungsgeräte wie Router können gar nicht und Switches oder Hubs nur beschränkt eingesetzt werden. Nachfolgend soll AES-50

im Detail analysiert und weitere noch bekannte Audionetze auf Layer 1-Basis beschrieben werden.

5.1.1 AES50

AES50 ist eine Norm, die von der Audio Engineering Society 2005 eingeführt wurde, um einen Standard für Audionetzwerke zu schaffen. Es handelt sich hierbei um einen offenen Standard welcher die bidirektionale Übertragung von digitalen multichannel Audiodaten über 100Mbit/s CAT 5/5e Kabel standardisiert hat. Die Technologie dahinter stammt von Sony Pro-Audio Labs, welche danach an Klark Teknik übergeben wurde. AES50 ist auch unter dem Namen SuperMAC bekannt. Die Weiterentwicklung davon heißt HyperMAC wobei der größte Unterschied im Linkspeed liegt, welcher von 100Mbit/s auf 1Gbit/s erhöht wurde. AES50 ist durch den Einsatz im weitverbreiteten digitalen Mischpult Behringer X32 oder Midas M32 und den dazugehörigen Stagboxen bekannt geworden. (Altrichter, 2014)

AES50 wird laut Hildebrand irrtümlicherweise oft als Netzwerk-Audioprotokoll bezeichnet. Jedoch handelt es sich bei diesem Protokoll nur um eine proprietäre Punkt-zu-Punkt-Verbindung, welche die Ethernet-Hardware-Technologie einsetzt. Es kann somit als eine Weiterentwicklung vom AES10/MADI Standard angesehen werden. Da als Schnittstelle und als Übertragungsmedium Ethernet Stecker und Netzkabel eingesetzt werden, ist es jedoch eine Audio-over-Ethernet-Technologie. Neben den eigentlichen Audiodaten werden auch Netzwerkdaten getunnelt übertragen. AES50 verwendet zur Adressierung der Geräte die MAC-Adresse wie es im Ethernet-Standard standardisiert ist. (Hildebrand, 2010)

Protokoll

Laut Walker ist AES50 ein Frame-Based Übertragungsprotokoll im Gegensatz zu anderen Audio-over-Ethernet Protokolle die paket-orientiert sind. Es wird nur der physikalische Layer der Ethernet Technologie eingesetzt, indem die Ethernet-Schnittstelle (RJ45) und das Netzkabel verwendet wird. Ethernet-paket-orientierte Protokolle zeichnen sich dadurch aus, dass komplexe Header-Informationen gesendet und decodiert werden müssen. AES50 verzichtet auf diesen komplexen Vorgang, da nur Audiodaten standardmäßig von Punkt-zu-Punkt übertragen werden. Ethernet Frames werden für die Übertragung der Daten verwendet, um somit die vorhandene Bandbreite effizienter ausnutzen zu können im Gegensatz zu IP-basierenden Systemen. Der Einsatz von herkömmlichen IT-Equipment wie Switches, Router oder Hubs ist nicht möglich,

jedoch existieren dedizierte Router oder ähnliche Geräte, um somit eine Netzwerkfunktionalität mit Routingfunktion zu erreichen. (Walker, 2011)

Error Detection and Correction

AES50 verwendet zwei Verfahren, um Fehler zu erkennen und zu korrigieren. Zum einen auf der Sendeseite, bei der eine CRC-Prüfsumme (Cyclic Redundancy Check) berechnet und mit dem entsprechenden Ethernet-Frame übertragen wird. Und zum anderen auf der Empfangsseite durch das Hamming-Code-Verfahren. Dadurch werden einzelne Bitfehler erkannt und behoben. Verbindungsfehler werden bei AES50 frühzeitig vom Empfänger erkannt während die Audiodaten noch perfekt übertragen werden. Diese können beispielsweise durch schlechte Kabel oder externe Interferenzen verursacht werden. (Walker, 2011)

Datenformate und Kanalanzahl

Grundsätzlich können maximal 48 Audiokanäle bidirektional mit einer Samplingfrequenz von 48kHz und einer Auflösung von 24Bit übertragen werden. Beim Einsatz von 96kHz werden die Samples auf mehrere Kanäle aufgeteilt. Somit halbiert sich die maximal mögliche Kanalanzahl und es können nur mehr 24 Kanäle übertragen werden. Neben dem herkömmlichen, verlustfreien PCM Audio können auch Daten im Bitstream Format übertragen werden welches auch als Direct Stream Digital (DSD) bekannt ist. Dieses Format unterstützt eine Samplingfrequenz von bis zu 1MHz bei einer Auflösung von 1 Bit. Es können daher über AES50 24 Kanäle bidirektional im DSD-Format übertragen werden. (Altrichter, 2014; Walker, 2011)

Verbindung und Synchronisierung

AES50 verwendet für die Audioübertragung vier Adernpaare der CAT5 / 5e Netzwerkkabel mit folgender Belegung:

Pin	Bezeichnung
1	Audio data transmit +
2	Audio data transmit -
3	Audio data receive +
4	Sync signal transmit +
5	Sync signal transmit -

6	Audio data receive -
7	Sync signal receive +
8	Sync signal receive -

Tabelle 13 AES50 Verbindung

Die Verwendung von getrennten Adernpaare für die Audio- und Taktübertragung sorgt dafür, dass der Takt zuverlässig, phasengenau und mit niedrigem Jitter zum Empfänger ankommt. AES50 fähige Systeme können entweder als Master (interner Takt) oder als Slave (externer Takt) fungieren. (Walker, 2011)

Latenz

Laut AES50-2005 Standard werden für dieses Protokoll extrem kurze Latenzzeiten von 3 Samples bei 48kHz garantiert. Dies würde in etwa 0,07ms entsprechen. (Walker, 2011)

Topologie

Normalerweise wird AES50 als Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufgebaut. Jedoch ist es durch spezielle sogenannte Cross-Point-Router möglich Audio-Netzwerke mit Stern-Topologie aufzubauen. Jedoch sind diese Router meist nur mit bestimmten Mischpulten kompatibel. Beispielsweise der DL461 Router in Verbindung mit dem Midas XL8 digital Mischpult. (Walker, 2011)

Redundanz

Laut Walker ist die Implementierung eines Redundanten Netzwerkes mit AES50 sehr leicht möglich. Durch den Einsatz von Fehlerkorrektur, Takt-Synchronisierungs- und Link-Status wird dem User die Verbindungsqualität angezeigt und es ist somit möglich eine manuelle oder automatische Verbindungsumstellung zu implementieren. Dies ist natürlich nur dann möglich wenn fähige Geräte eingesetzt werden. (Walker, 2011)

	AES50 (SuperMAC)	HyperMAC
Bandbreite	100 Mbit/s CAT5 / 5e (100m)	1 Gbit/s CAT5e / 6 (100m) 50/125µm multimode LWL (500m)
Channels	24 bidirectional Channels @ 96kHz 48 bidirectional Channels @ 48kHz	192 bidirectional Channels @ 96kHz 384 bidirectional Channels @ 48kHz
Latency per Link	6 Samples (62,50 µs) @ 96kHz 3 Samples (62,50 µs) @ 48kHz	4 Samples (41,66 µs) @ 96kHz 2 Samples (41,66 µs) @ 48kHz
Auxiliary Data Bandwidth	5 Mbit/s Ethernet auxiliary data channel	200 Mbit/s Ethernet auxiliary data channel

Tabelle 14 Vergleich zwischen AES50 (SuperMAC) und HyperMAC

5.1.2 Aviom A-Net

Auch A-Net basiert auf den physikalischen Layer von Ethernet und ist ein proprietäres Protokoll der Firma Aviom. Zur Datenübertragung werden Cat5e Kabel und RJ45 Stecker verwendet, jedoch ist es komplett inkompatibel zu höheren Layern. Es wurde so konzipiert, dass hohe Kabellängen und geringe Latenzen möglich sein sollen. Durch den Einsatz von Hubs anstatt von Switches, wird eine parallele Netzwerk-Topologie mit effizienterem Netzwerkbetrieb, höhere Datenraten und besserer Leistung erzielt. Weiters können durch den Verzicht der sogenannten Data-handling-Layer von Ethernet höhere Kabelwege erzielt werden. Entfernungen von 150m beim Einsatz von Cat-5e Kabeln sind hiermit möglich. Jedes A-Net Gerät dient dabei auch als Verstärker und es sind somit weiter 150m wieder möglich. Es wurden zwei Versionen von A-Net entwickelt die sich in ihrer Komplexität unterscheiden. Pro16 ist eine einfache Plug&Play Variante mit möglicher Erweiterung und findet vermehrt beim Personal Monitoring Einsatz. Pro64 ist die komplexere Variante und bietet mehr Features.

Es werden zum Beispiel mehr Sampleraten unterstützt. Beide Versionen sind aber untereinander kompatibel und unterstützen eine Auflösung von 24 Bit.

PRO64 A-NET SUPPORTED SAMPLE RATES			
Mode	Nominal	Min	Max
1x	44.1kHz	39.7kHz	52kHz
	48kHz		
2x	88.2kHz	79.4kHz	104kHz
	96kHz		
4x	176.4kHz	158.8kHz	208kHz
	192kHz		

Abbildung 64 Variable Sampleraten von A-Net

Synchronisierung

Jedes vorhandene Gerät im Netzwerk kann als Clock Master verwendet werden. Das System kann jedoch auch durch einen externen Taktgenerator betrieben werden. Der Vorteil von A-Net ist, dass es variable Sampleraten unterstützt ohne Sample Rate Converter. Somit können kleine Schwankungen nicht zu Verbindungsunterbrechung führen.

Topologie

A-Net kann als Daisy-Chain oder mit speziellen Hubs in Stern-Topologie betrieben werden.

Latenz

Laut Datenblatt sind Latenzen von 800µs von AD-Wandler zu DA-Wandler möglich. Es wird angegeben, dass die Übertragung über das Netzwerk innerhalb von 326µs erfolgt und jedes weitere angeschlossene Gerät eine Latenz von 2µs hinzufügt. Daher sollen beim Einsatz von 100 Geräten, Latenzen unter 1ms möglich sein.

Kanalanzahl

Die maximal mögliche Anzahl an Kanäle die Übertragen werden können sind 64.

5.1.3 Riedel RockNet

RockNet wurde 2004 entwickelt und wird in zwei Versionen angeboten, die sich grundsätzlich durch die maximale Anzahl an Kanäle und der möglichen

Abtastraten unterscheiden. Die RockNet 300 Serie ist dabei die professionellere Variante, die bis zu 160 Audiokanäle mit einer Auflösung von 24Bit und 48kHz übertragen kann. Durch die Reduktion der Kanäle können auch Abtastraten von bis zu 96kHz übertragen werden. Für die Übertragung an sich werden Cat5 Kabeln eingesetzt. Eine Übertragung über LWL ist optional auch möglich. Die RockNet 100 Serie hingegen kann nur auf die ersten 80 Audiokanäle zugreifen, die im Netzwerk übertragen werden und ihre Samplerate ist auf 48kHz fixiert. Beide Versionen sind aber untereinander kompatibel und können gleichzeitig eingesetzt werden. Durch den Einsatz von verschiedenen Ein- und Ausgabegeräten oder durch die Anbindung durch Interface-Karten für Soundcraft oder Yamaha Mischpulte wird das Riedel RockNet-Netzwerk aufgebaut. Dabei ist es jedoch auf maximal 99 Geräte limitiert. RockNet zeichnet sich darüber hinaus durch sein geringes Eigenrauschen und die minimalen Verzerrungen aus.

Die Adressierung und Kommunikation der RockNet Geräte erfolgt sobald diese miteinander verbunden sind. Da RockNet nicht auf Ethernet basiert, sondern nur den physikalischen Layer benützt werden Geräte ähnlich einer MAC-Adresse mit einer internen, nicht verwechselbaren Geräte-Adresse adressiert. Für die Übertragung der Daten werden zwei proprietäre Technologien eingesetzt. Lateral dient dazu, eine möglichst niedrige Laufzeit bei asynchroner Übertragung von Daten zu erzielen. Dabei soll es möglich sein, paketorientierte Daten wie TCP/IP und eine isochrone Übertragung in Echtzeit zu gewährleisten. Concrete wird zur Taktrückgewinnung und Jitterreduktion eingesetzt.

RockNet kann als Ringtopologie aufgebaut werden und bietet eine Geräte- und Netzwerk-Redundanz. RockNet 300 Geräte besitzen standardmäßig zwei Netzteile, die im Ernstfall automatisch umschalten. RockNet100 Geräte hingegen nur ein Netzteil, jedoch mit zwei IEC Buchsen die manuell geschaltet werden können. Durch die zwei RJ45 Anschlüsse an jedem RockNet Gerät, wird die redundante Audioübertragung sichergestellt. Sollte es zu einer Verbindungsunterbrechung kommen, werden die Daten in entgegengesetzter Richtung übertragen, da das Netzwerk im Ring aufgebaut ist. Die Neukonfiguration geschieht voll automatisch und im Hintergrund ohne hörbare Beeinträchtigungen. Mittels der Auto-Adressierung jeder RockNet Geräte und dieses Neukonfigurations-Mechanismus, wäre es zum Beispiel möglich im Live-Betrieb weitere RockNet-Geräte bei Bedarf hinzuzufügen.

Laut Hersteller beträgt die Latenz bei der Übertragung von 24Bit und 48kHz 850µs (inkl. AD- und DA-Wandlung). Sollten nur digitale Signale übertragen werden können kürzere Latenzen von bis zu 400µs erreicht werden.

5.2 Layer 2 Audio-Netzwerke

Layer 2 Audionetze sind auch vergleichsweise schnell und werden von vielen Herstellern mit proprietären Protokollen betrieben. Es können hardwaremäßig auch Switches eingesetzt und eingeschränkt in bestehende Netzwerkstrukturen eingebettet werden. Bei Layer 2 Netzwerke kommen vollständige Ethernet-Signale zum Einsatz. Eine Adressierung der einzelnen Geräte ist mithilfe der übertragenen Mac-Adresse möglich. Da Layer 2 Netzwerke zeitlich nicht deterministische Ethernet-Frames übertragen und sich keine Taktinformationen somit aus den übertragenen Daten ableiten lässt, wird zur Synchronisierung PTP mitübertragen.

5.2.1 Waves SoundGrid

SoundGrid ist ein Audio-over-Ethernet Protokoll, welches von Waves entwickelt wurde um Waves Plugins nicht nur im Studio, sondern auch im Live oder Broadcast Betrieb einsetzen zu können. Über dedizierte DSP Prozessoren, sogenannte SoundGrid Server, werden die verwendeten Plugins zwischengerechnet, um somit eine möglichst niedrige Latenz zu erreichen. Laut Michael Adams (North America Product Specialist bei Waves) ist das Ziel dieses Protokolls, die Übertragung von unkomprimierten, multi-channel Audiodaten mit möglichst geringer Latenz, das low latency monitoring und das gleichzeitige Plugin processing in Echtzeit. Zum Einsatz kommen hierfür Standard Intel CPU's und Gigabit Ethernet-Netzwerke.

Vernetzung und Topologie

Um ein SoundGrid Netzwerk aufzubauen, ist der Einsatz von dedizierten DSP Servern, kompatible Switche und I/O Geräte und eines Host Computers erforderlich. Durch den Einsatz von SoundGrid DSP Server (Impact Server, Extreme Server) werden die Audiodaten prozessiert und mit extrem geringer Latenz wieder übertragen. Der Einsatz von Gigabit-Switchen ermöglicht dabei das Verbinden mehrerer kompatiblen Geräte mittels Stern-Topologie.

Audio Processing

Das eigentliche Herzstück eines SoundGrid-Netzwerkes ist der SoundGrid Server, welcher für das Plugin Processing eingesetzt wird. Es handelt sich hierbei um dedizierte CPU's die auf einer Waves-customized Echtzeit-Version von Linux basieren. Und desweiteren ein SoundGrid Host, welcher ein standard Windows oder Mac Computer sein kann um die SoundGrid Host Application mit den GUI Funktionen bereit zu stellen.

Adressierung und Kanalanzahl

Die Adressierung der angeschlossenen Geräte erfolgt laut Altrichter mittels MAC-Adresse. SoundGrid unterstützt ein Feature welches „bundles-on-the-fly“ genannt wird. Dabei ist es möglich, dass ein Host Änderung im Routing im Live-Betrieb vornimmt ohne das Audio-Streaming zu unterbrechen. (Altrichter, 2014)

SoundGrid verwendet ein dediziertes EtherType und gewährleistet mittels Switch-Traffic-Priorisierung der Datenpakete (QoS), dass die eigentlichen Audiodaten nicht mit anderen Daten im Netzwerk kollidieren. Es ist nicht Bandbreiten limitiert. Soll jedoch die maximale Bandbreite eines Netzwerkes für die Audioübertragung verwendet werden, ist es ratsam ein separates Netzwerk für anderen Datenverkehr zu verwenden. Insgesamt können 256 Audiokanäle innerhalb des Netzwerkes übertragen werden. Im Live-Betrieb können jedoch über die LV1 Software nur 64 Kanäle gleichzeitig gemischt werden. (Altrichter, 2014; *Waves SoundGrid Audio-over-Ethernet Networking & Processing Platform*, 2010)

Redundanz und Synchronisierung

SoundGrid unterstützt DSP Server Redundanz. Über parallel, eingesetzte Netzwerke, wie sie in DiGiCo SD7 Mischpulten vorhanden sind, können sogenannte Fallback-Schemes für die Taktrückgewinnung und die Host Verbindung sichergestellt werden.

Mittel PTP werden die Synchronisierungspakete über Ethernet übertragen. Über ein einfaches SoundGrid Netzwerk lassen sich laut Hersteller mehrere, voneinander unabhängige Clock-Domains übertragen, die unterschiedliche Clocks verwenden. Mittels der Clock-Fallback-Scheme wird somit ein unterbrechungsfreier Audio-Stream gewährleistet. Sollte es jedoch zu einer Unterbrechung kommen, erfolgt eine erneute Verbindung innerhalb weniger Millisekunden. (*SoundGrid vs. AVB Comparison Table*, 2015)

Latenz und Übertragungsraten

Laut Hersteller sollen Latenzen von unter 1ms erreicht werden beim Einsatz von dedizierten DSP Servern. Sampleraten von 44.1kHz, 48kHz, 88.2kHz und 96kHz werden von SoundGrid unterstützt.

Datenstrom

Da vom Hersteller keine detaillierten Angaben über den Aufbau des Datenstroms zu finden sind, wurde eine eigene Analyse durchgeführt. Mittels der Software

Wireshark wurde die Übertragung abgehört und gespeichert. Angehängt wurde der Computer mit Wireshark dabei am Switch direkt wie Abbildung 65 zeigt.

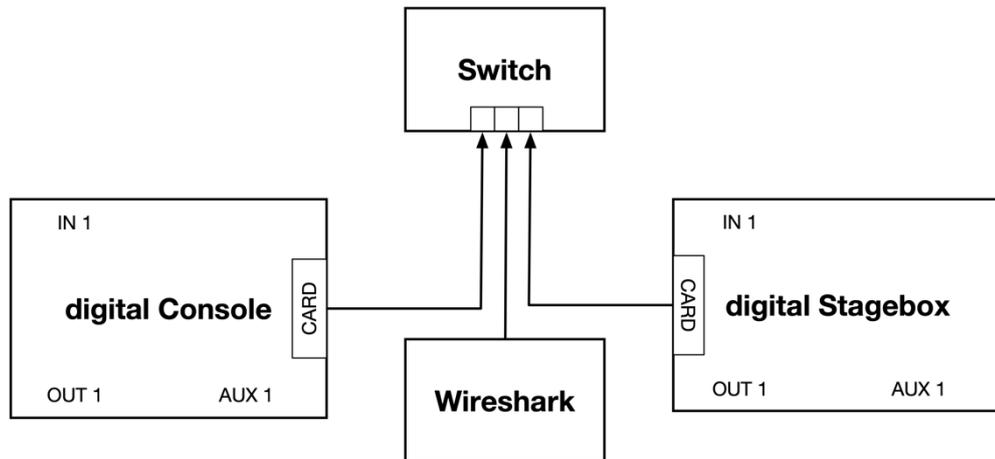


Abbildung 65 Blockschaltbild für die Datenstrom-Analyse von Waves SoundGrid

Nachfolgende Grafik ist eine detaillierte Anzeige eines abgehörten Waves SoundGrid Pakets. Dabei lässt sich erkennen, dass ein SoundGrid Paket 64 Byte groß ist und als Ethernet-Paket verkapselt und übertragen wird. Weiters lässt sich dadurch erkennen, dass Waves SoundGrid die Kommunikation zwischen den Sender und Empfänger mittels der MAC-Adressen der einzelnen Geräte herstellt. Die Übertragenen Daten werden dabei vom Sender als Broadcast an alle im Netzwerk befindlichen Geräte gesendet mittels der Adresse ff:ff:ff:ff:ff:ff . Die eigentlichen Nutzdaten eines Waves SoundGrid Pakets sind dabei 50 Byte groß. Somit sind die restlichen 14 Bytes für den Header reserviert. Da es sich bei diesem Protokoll um ein proprietäres Protokoll handelt, wird das auch bei dieser Analyse ersichtlich da unter Type: Unknown aufscheint. Somit lässt sich eine ganz exakte Analyse leider nicht durchführen. Jedoch konnte dadurch ein Einblick in den Verbindungsaufbau des Protokolls und mehr Informationen dazu gewonnen werden.

5 Audio-Netzwerke

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
4	0.099985	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
5	0.200001	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
12	0.300008	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
13	0.399993	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
16	0.499992	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
17	0.599989	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
20	0.699983	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II
21	0.799983	WavesAud_00:d5:ac	Broadcast	0x8908	64	Ethernet II


```

# Frame 48: 64 bytes on wire (512 bits), 64 bytes captured (512 bits) on interface 0
# Interface id: 0 (\Device\NPF_{FBB6EFF3-AF22-4B6A-BCF8-4F14B45DD59})
  Interface name: \Device\NPF_{FBB6EFF3-AF22-4B6A-BCF8-4F14B45DD59}
  Encapsulation type: Ethernet (1)
  Arrival Time: Apr 25, 2019 20:57:21.279668000 Mitteleuropäische Sommerzeit
  [Time shift for this packet: 0.000000000 seconds]
  Epoch Time: 1556218641.279668000 seconds
  [Time delta from previous captured frame: 0.084433000 seconds]
  [Time delta from previous displayed frame: 0.100000000 seconds]
  [Time since reference or first frame: 1.899984000 seconds]
  Frame Number: 48
  Frame Length: 64 bytes (512 bits)
  Capture Length: 64 bytes (512 bits)
  [Frame is marked: False]
  [Frame is ignored: False]
  [Protocols in frame: eth:ethertype:data]
  [Coloring Rule Name: Broadcast]
  [Coloring Rule String: eth[0] & 1]
# Ethernet II, Src: WavesAud_00:d5:ac (00:1c:d1:00:d5:ac), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
  # Destination: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
    Address: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
    ....1. .... = LG bit: Locally administered address (this is NOT the factory default)
    ....1 .... = IG bit: Group address (multicast/broadcast)
  # Source: WavesAud_00:d5:ac (00:1c:d1:00:d5:ac)
    Address: WavesAud_00:d5:ac (00:1c:d1:00:d5:ac)
    ....0. .... = LG bit: Globally unique address (factory default)
    ....0 .... = IG bit: Individual address (unicast)
  Type: Unknown (0x8908)
# Data (50 bytes)
  Data: 0105000001020900090001090000000000000000000002bf7...
  [Length: 50]

```

Abbildung 66 Datenstrom von Waves SoundGrid

5.2.2 EtherSound

EtherSound ist ein proprietäres Protokoll, welches von der Firma Digigram im Jahr 2002 entwickelt wurde. Es wurde entwickelt um digitalisierte Audio- und Steuerungsdaten über ein einfaches Ethernet LAN zu übertragen. ES-100 und ES-Giga wurden dabei veröffentlicht. Die Unterschiede zwischen den beiden Versionen liegt in ihrer Übertragungsgeschwindigkeit. Wie die Namen schon erahnen lassen ist ES-100 für Geschwindigkeiten bis 100Mbit/s und ES-Giga für bis zu 1Gbit/s ausgelegt. ES-Giga ist nicht abwärtskompatibel und ist auch nicht sehr verbreitet.

Protokoll

Da EtherSound auf Ethernet Technologie basiert, müssen für die Übertragung bestimmte Regeln eingehalten werden. Daten werden daher über definierte Frames mit einer Frequenz von 48khz übertragen. Somit können sich AD- und

5 Audio-Netzwerke

DA-Wandler jeweils am Beginn des Frames synchronisieren, um somit sehr geringes Jitter zu ermöglichen.

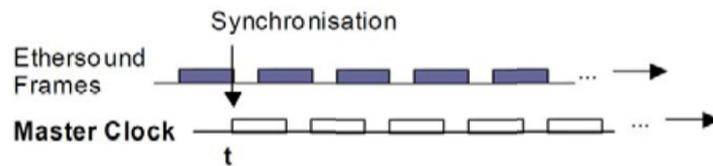


Abbildung 67 EtherSound Synchronisierung

Verpackt in den Ethernet-Frame werden auch die EtherSound Daten übertragen. Über den Ethersound-Header werden Informationen über die Versionsnummer des Protokolls, die Nutzdatenlänge, die Paketanzahl und wichtige Informationen zum Master Clock wie Frequenz und Inkrementalnummer übertragen. Das nachfolgende Command-Header dient dazu, Steuerbefehle oder Statusabfragen zu übertragen. Erst danach folgen die eigentlichen PCM-Audiodaten.

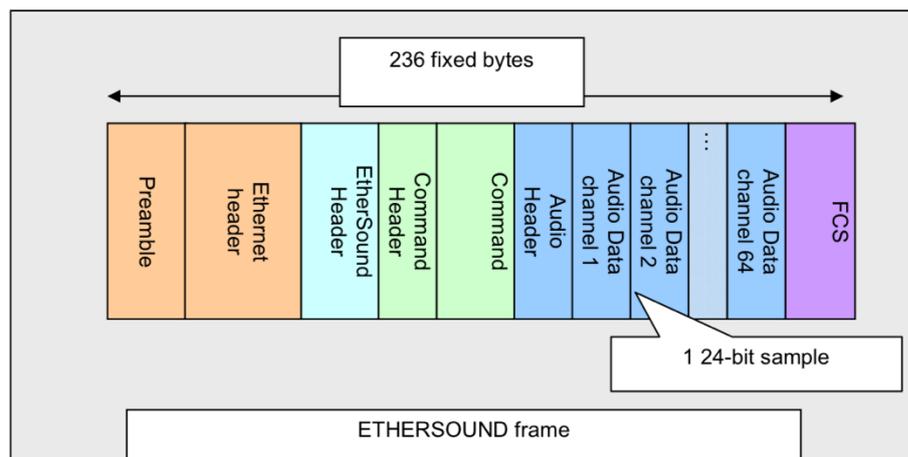


Abbildung 68 Aufbau eines EtherSound Frames

Datenformate

Wie in anderen Protokollen werden auch hier verlustfreie PCM-Audiodaten übertragen. Es unterstützt Audiosignale mit 24-Bit Auflösung und Sampleraten von 48kHz oder 96kHz. Darüber hinaus ist es mit ES-Giga möglich Sampleraten von 24kHz, 44.1kHz, 88.2kHz und 192kHz zu übertragen.

Kanalanzahl

Mittels ES-100 können bei 24Bit/48kHz maximal 64 Kanäle gleichzeitig übertragen werden. Laut Heyden ist es ein autarkes Netzwerk aber es können

auch andere Daten bis 384kbit/s getunnelt übertragen werden. Bei ES-Giga können natürlich mehr Kanäle übertragen werden da die Bandbreite hierfür viel höher ist. Es können maximal 256 Kanäle und andere Daten bis zu 100Mbit/s übertragen werden.

Terminologie

Im Kontext von EtherSound kommen folgende Begriffe vor, die eine wichtige Bedeutung haben.

Primary Master

Es ist die erste Netzwerk-Komponente, die in einem EtherSound Netzwerk auftritt. Hier werden die Audiodaten in den EtherSound-Frame geschrieben und der Takt generiert. Wird das Netzwerk über einen Computer gesteuert, wird dieser über ein gekreuztes Netzwerkkabel mit dem Input des Primary Masters verbunden. Der Output wird mit dem nächsten EtherSound-Gerät verbunden.

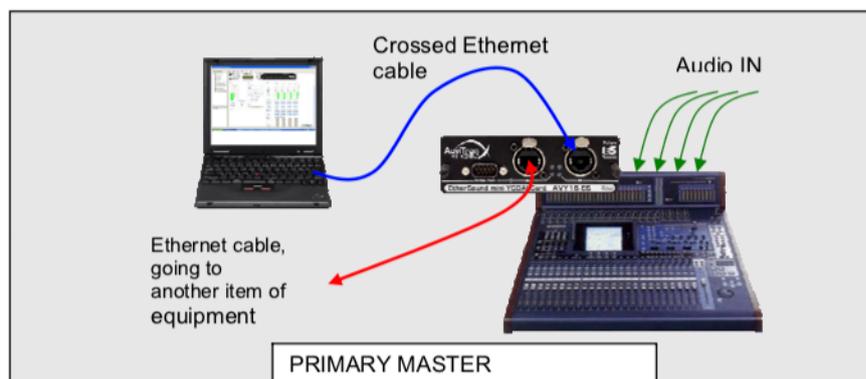


Abbildung 69 Primary Master EtherSound

Master

Hier handelt es sich um EtherSound-Geräte, die Audiodaten im EtherSound-Frame schreiben können. Es werden analoge oder digitale Audiosignale ins EtherSound-Format umgewandelt. Beispiele hierfür wären Mikrofon-Vorverstärker oder Input-Konverter.

Slave

Geräte die als Slave arbeiten, können nur Audiodaten lesen, die über das EtherSound-Netzwerk übertragen werden. Es konvertiert die übertragenen Daten vom EtherSound-Format in Audio Signale zurück (Analog, AES/EBU oder ADAT). Beispiele wären hierfür Verstärker oder Output-Konverter.

Master/Slave

Diese Netzwerkkomponenten können Audiodaten ins EtherSound-Frame schreiben bzw. davon lesen. Es handelt sich hierbei um Geräte wie Konsolen, Prozessoren, Effektgeräte usw.

Adressierung und Übertragung

EtherSound kann in unidirectional und bidirectional mode arbeiten. Dabei werden die Daten jeweils vom Primary Master zum Ende, also zum Upstream und dann wieder zurück zum Primary Master (Downstream) übertragen. Über die MAC-Adressen der einzelnen Geräte können diese angesprochen werden. Mittels spezieller Windows-Software lassen sich EtherSound-Netzwerke verwalten und konfigurieren.

Topologie und Redundanz

EtherSound-Netzwerke können in Daisy-Chain, Stern oder Ring aufgebaut werden. Beim Einsatz von Ring-Topologie wird wie beim Spanning Tree die Schleifenbildung durch den Primary-Master blockiert. Sollte ein Fehler auftreten, wird für eine Aufhebung der Blockierung gesorgt.

Latenz

Die Latenz ist laut Hersteller sehr kurz, fix und vorhersagbar. Daher werden folgende Werte angegeben.

Die Zeit, die ein Frame benötigt, um ein Gerät zu durchlaufen beträgt $1,4\mu\text{s}$. Diese Zeit ist kumulativ und kommt jedes Mal beim durchlaufen eines Gerätes vor.

Das Schreiben bzw. Lesen der Audiodaten vom bzw. zum EtherSound-Frame beträgt $125\mu\text{s}$. Diese Zeit wird nur einmal im Netzwerk gezählt.

Die Zeit, die benötigt wird um einen Layer 2 Switch zu durchlaufen, beträgt $21\mu\text{s}$.

Abbildung 68 zeigt eine mögliche Latenz Berechnung beim Einsatz von EtherSound und NEXO-Geräten. („EtherSound networks Overview“, o. J.)

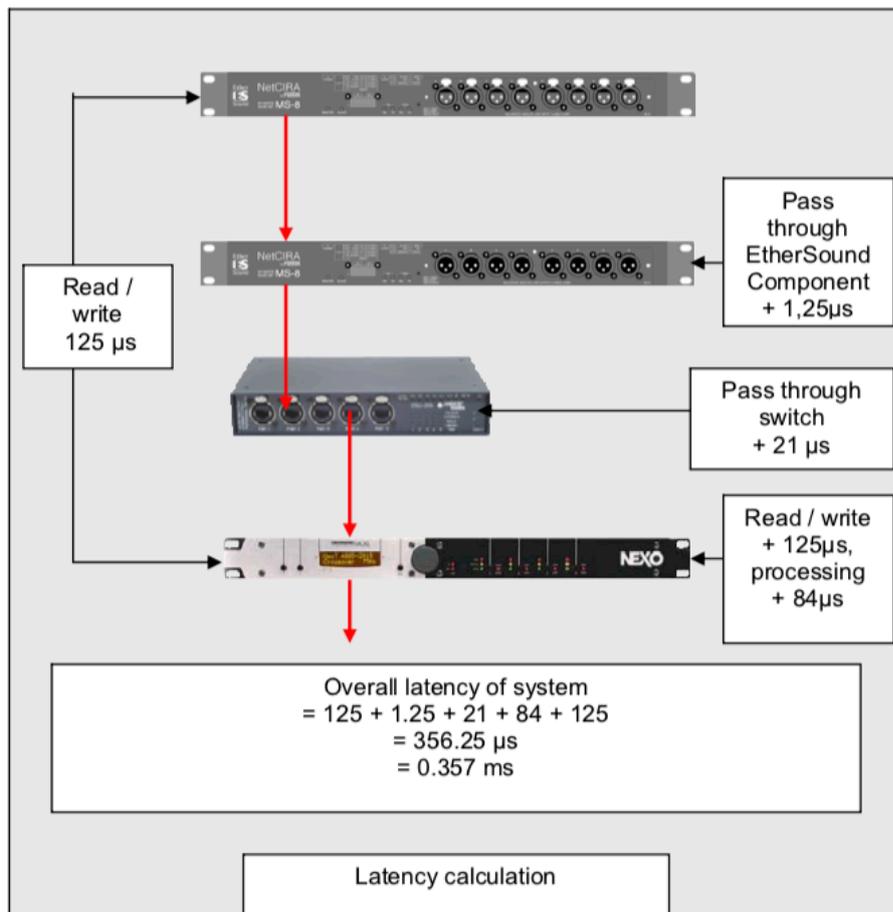


Abbildung 70 Latenz Berechnung EtherSound

5.2.3 CobraNet

CobraNet gilt als das erste ethernetbasierte Audionetzwerk welches 1996 präsentiert wurde. Es ist ein proprietäres Netzwerkprotokoll, welches in zwei Varianten betrieben werden kann. Zum einen die Repeater-Variante, welche Kollisionen direkt eliminiert und den vollen Zugriff auf die Bandbreite erlaubt und zum anderen die Switched-Ethernet Variante. Bei letzterer können Traffic-Daten von anderen Netzwerk-Geräten wie PC's im selben Netzwerk übertragen werden. Da Standard Ethernet-Pakete über 100Mbitt Fast-Ethernet-Netzwerke übertragen werden, kann herkömmliche Netzwerk Infrastruktur wie Hubs, Repeater, Switches und Netzwerkkabel verwendet werden. CobraNet bietet folgende zusätzlichen Features zu einem Standard Ethernet Netzwerk:

- Isochrone Audioübertragung
- Sample Clock Distribution
- Übertragung von Steuerungs und Monitoring Daten

Die Latenz über ein CobraNet Netzwerk beträgt laut Hersteller maximal 256 Samples (5,33ms), jedoch sind je nach Größe des Netzwerks verschiedene Konfigurationen möglich. Dabei sind Latenzen von 64 Samples (1,33ms) oder 128 Samples (2,33ms) noch möglich. Diese Verzögerung entsteht aufgrund des notwendigen Bufferings der Ethernet Pakete in CobraNet Sendern und Empfängern. Zusätzliche Delays werden durch AD- DA- und Sample-Rate-Konvertern hinzugefügt.

Laut Hersteller kann mittels CobraNet bei einer 20-Bit Audioübertragung eine Dynamic-Range von 122,16dB erreicht werden und bei einer 24-Bit Übertragung sogar ein Wert von 146,24dB. Die maximal mögliche übertragbare Kanalanzahl liegt bei 64 Channels mit 24Bit/48kHz. Weiters unterstützt CobraNet auch Samplingfrequenzen von 96kHz und Auflösungen von 16 und 20 Bit.

Zur Übertragung der Daten werden die Audiokanäle in sogenannten Bundles (Pakete) von bis zu acht Kanälen zusammengefasst. Jedes Bundle stellt dabei ein Ethernet-Paket dar, welches einmal pro isochronen Zyklus übertragen wird. Da das Payload Limit von Ethernet Paketen bei 1500 Bytes liegt, kann dieses nicht überschritten werden. Die Anzahl der Kanäle hängt auch von der verwendeten Auflösung ab. (*CobraNet Programmer's Reference*, 2006)

Da alle CobraNet Geräte mit zwei Schnittstellen ausgestattet sind, kann eine Schnittstelle zur Ausfallsicherheit verwendet werden. Sollte ein Fehler auftreten wird direkt zum sekundären Port umgeschaltet. CobraNet Netzwerke werden üblicherweise in einer Sterntopologie aufgebaut. Jedoch sind auch andere Topologien wie Ring oder andere möglich.

Alle verbundenen Geräte synchronisieren sich im Netzwerk zu einem sogenannten „Conductor“ welcher als Master zu verstehen ist. Dieser generiert einen Takt oder wird an einem externen Taktgenerator angeschlossen und sendet alle 1,33ms sogenannte Beat-Packets in das Netzwerk. Alle anderen Geräte synchronisieren ihre interne Clock anhand der Ankunftszeit des Beat-Packets. Sollte der Conductor ausfallen, wird innerhalb weniger Millisekunden ein anderes CobraNet-Gerät zum Conductor erteilt und übernimmt somit alle Synchronisierungsaufgaben. Laut Herstellerangaben liegt der Fehler der Taktgenauigkeit bei +/- ¼ Sample welches ca. 5µs bei 48kHz entspricht welches in Form von Wander zu erkennen ist. Jitter-Fehler werden laut Hersteller innerhalb von 1ns wieder korrigiert. (Rayburn, o. J.)

5.2.4 Roland Ethernet Audio Communication (REAC)

Roland Ethernet Audio Communication basiert auf den 100BASE-TX Ethernet Standard, ist jedoch ein proprietäres Protokoll. Es können über dieses Protokoll 40x40 Kanäle mit maximal 24Bit und 96kHz über ein einzelnes Cat5e Kabel übertragen werden. Zusätzlich zu den Audiodaten können noch Midi und Remote Control Daten übertragen werden, um zum Beispiel Mikrofonvorverstärker zu regeln. Laut Roland ist es ein „Plug&Play“ System ohne kompliziertem Konfigurationsaufwand oder Setup. Bei Vollauslastung der Audioübertragung sollen laut Hersteller Latenzen von 0,375ms auftreten. Durch die Verwendung von Hubs soll es möglich sein größere Netzwerke aufzubauen. Um für Ausfallsicherheit zu sorgen, kann die AUX-Schnittstelle an jedem REAC-Gerät verwendet werden. Sollte es zu einem Ausfall der Main-Schnittstelle kommen, wird umgehend auf den AUX-Anschluss umgeschaltet. Nicht Roland Geräte werden nur durch Konvertierung in MAD1 oder ähnliches unterstützt. (Bennet, 2009)

5.2.5 Weitere Layer 2 Netzwerke

Weitere Layer 2 Protokolle sind AES-51, dSnake oder auch AVB welches jedoch auch als Layer 3 Protokoll gelistet werden kann und demnach im folgenden Kapitel beschrieben wird.

5.3 Layer 3 Audio-Netzwerke

Audio-Netzwerke, die auf Layer 3 des OSI-Modells arbeiten, sind echte „Audio-over-IP“ Netzwerke. Sie können in bestehende IT-Netzwerke integriert werden und erfüllen alle Anforderungen, die von IP-Netze gefordert werden. Sie sind in der Übertragung komplexer als Layer 1 oder Layer 2 Netze und haben daher eine vergleichsweise höhere Latenz. Wie Layer 2 Netze, verwenden auch Layer 3 Audio-Netzwerke zur Synchronisierung das PT-Protokoll, da sich aus dem Bitstream der übertragenen Ethernet-Frames kein physischer Takt wie zum Beispiel Worldclock ableiten lässt.

5.3.1 Dante

Dante ist ein proprietäres Audionetzwerk-Protokoll welches digitale Audiodaten über herkömmliche Computernetzwerke übertragen kann. Da die Audiodaten mittels UDP/IP-Pakete übertragen werden, erscheinen Dante-Daten für Ethernet Switche oder IP-Router gleich wie andere Datenpakete. Alle verbundenen Geräte

5 Audio-Netzwerke

werden automatisch im Netzwerk erkannt und eine IP-Adresse mittels DHCP vergeben.

Kanalanzahl

Dante unterstützt 100Mbit/s und 1Gbit/s Ethernet Netzwerke.

Synchronisierung

Dante verwendet zur Taktübertragung das Precision Time Protocol anstatt des üblichen Time Division Multiplexing beim traditionellem digitalen Audiotransport. Da PTP für extrem zeitkritische Anwendungen konzipiert ist, kommt es für Dante natürlich in Frage. Es arbeitet nach dem Master/Slave Prinzip mit nur einem Master, der automatisch selektiert wird. Die Selektierung erfolgt nach bestimmten Fragen.

- Ist das Gerät als „Preferred Master“ markiert?
- Ist es an einem externen Takt angeschlossen?
- Hat das Dante Modul eine hohe Taktqualität?
- Ist die MAC-Adresse die niedrigste im Netzwerk?

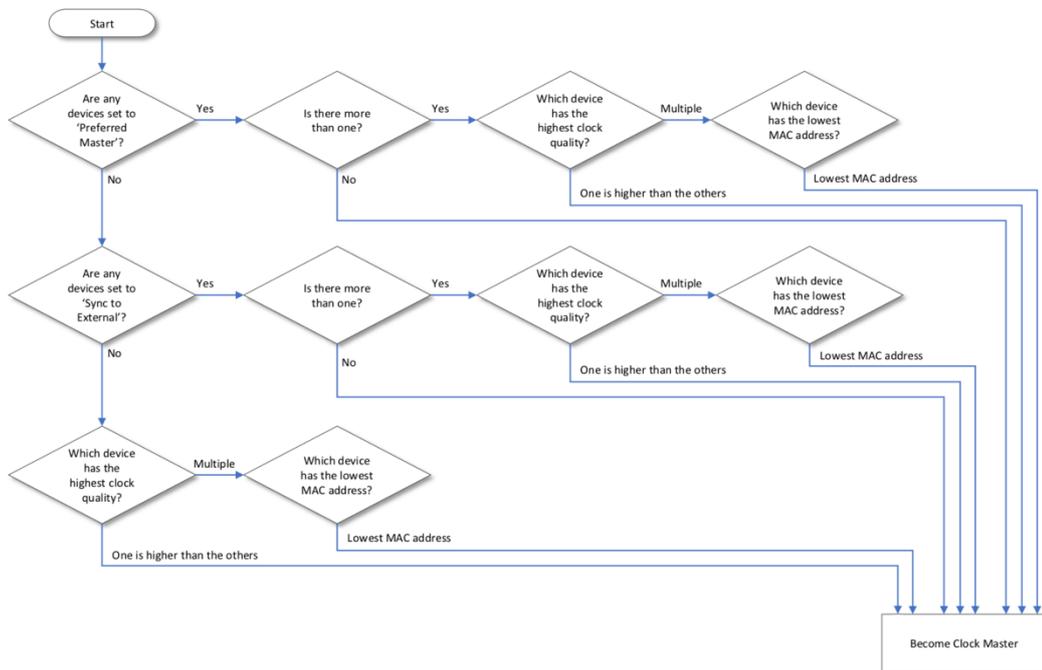


Abbildung 71 Master-Selektierung bei Dante

Nach dem Konfigurieren des Masters, sendet dieser ein Multicast-Synchronisierungspaket an alle Teilnehmer im Netzwerk, um diese zu

synchronisieren. Jeder Slave bestimmt dabei den Zeit-Offset welcher durch die Übertragung erzeugt wurde. Der Slave sendet dem Master eine „Delay Request“ Message, welcher mit einer „Delay Response“ Message antwortet. Anhand dessen stellt dann jeder Slave seine eigene Uhr perfekt auf die des Masters ein. Somit wird sichergestellt, dass alle Geräte perfekt synchron laufen. Der Sync wird danach jede Sekunde mehrmals überprüft. Sollte es zu einem Master-Clock-Ausfall kommen, rennen alle Slaves mit der internen Clock weiter, um keine Audiunterbrechung zu erzeugen. Automatisch wird dann im Hintergrund ein neuer Master selektiert und alle synchronisieren sich erneut. Dante zeichnet sich dadurch aus, dass die Synchronisierungstoleranz zwischen Dante-Geräten +/- 1µs garantiert wird. Das bedeutet, dass innerhalb 1/100 eines Samples die Synchronisierung wieder stabil läuft. Nachfolgende Grafik zeigt in Orange den erzeugten Takt eines externen Generators. Die linke Grafik zeigt einen Slave Mixer, welcher über CobraNet getaktet wird (Blau). Man erkennt, dass das Signal in Sync ist jedoch nicht in Phase. Die rechte Grafik zeigt einen Slave welcher über Dante synchronisiert wird. Auch bei Dante kommt es vor, dass das Signal abdriftet. Jedoch wird es innerhalb 0,1µs wieder time-aligned.

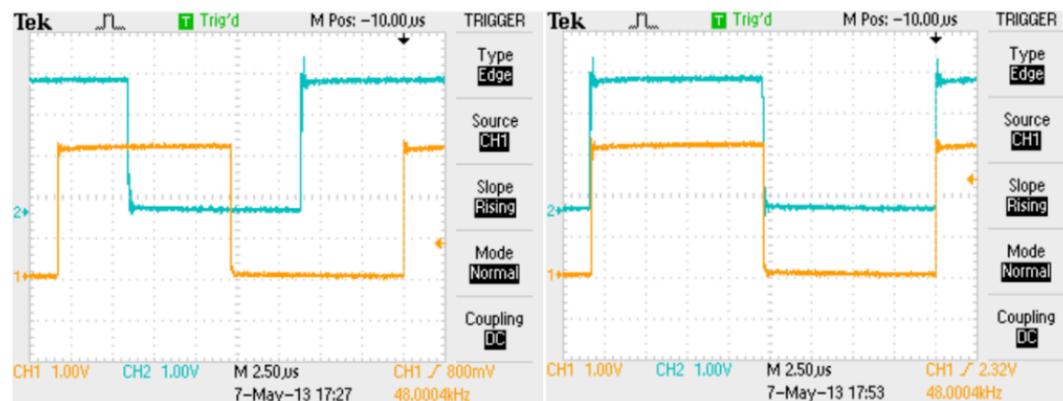


Abbildung 72 Synchronisierungs Drift zwischen CobraNet und Dante

Latenz

Die Latenz bei Dante ist von Anwendungsfall zu Anwendungsfall verschieden. Es können jedoch voreingestellte Latenzwerte in der Konfigurationssoftware ausgewählt werden. 0,25ms sollte beim Einsatz von einem Switch, 0,5ms beim Einsatz von fünf Switches und 1ms beim Einsatz von 10 Switches verwendet wird. Eine weitere Safety-Einstellung von 5ms sollte jedoch nur für Troubleshooting Zwecke verwendet werden. Darüber hinaus können in einem Dante-Netzwerk verschiedene Latenzeinstellung co-existieren. Sollte aus irgendeinem Grund die Latenz zu klein gewählt worden sein, ist das Resultat daraus stille.

Abstraten und Kanalanzahl

Dante-Geräte können mit Auflösungen von 16, 24 oder 32-bit und Sampleraten von 44,1kHz, 48kHz und 96kHz arbeiten. Es können verschiedene Bit-Auflösungen und Sampleraten parallel betrieben werden. Sendet ein 24-bit Gerät zu einem 32-bit Gerät Daten, werden am Ende des Datenstroms einfach acht „Null-Bits“ angehängt. Umgekehrt werden die letzten acht Bits einfach entfernt. Geräte mit unterschiedlichen Sampleraten können jedoch keine Daten untereinander austauschen. Bei Verwendung eines Gigabit Switches ist es möglich 512 Kanäle mit einer Samplerate von 48kHz und 24Bit bidirektional zu übertragen.

Quality of Service

Dante verwendet das DiffServ-Verfahren um die Qualität im Netzwerk zu ermöglichen. Von den 64 verschiedenen Typen die priorisiert werden können, verwendet Dante jedoch nur vier.

- #56: PTP (braucht die höchste Priorität)
- #46: Audiodaten (benötigt hohe Priorität)
- #8: diverse Dante Daten wie Steuerung & Monitoring (benötigt Medium Priorität)
- Alle anderen Werte haben „low priority“

QoS ist bei Dante nur dann erforderlich, wenn Dante Daten mit vielen anderen Datentypen übertragen werden sollen. Weiters sollte es eingesetzt werden beim Einsatz von hohem Multicast Traffic oder beim Einsatz von 100Mbit/s Geräte eingesetzt werden. Sollten bei einer Übertragung Audio-Dropouts auftreten, so kann QoS abhilfe schaffen.

Protokolle

Aufgrund des herstellerspezifischen Aufbaus von Dante ist es nicht einsehbar wie die Daten direkt übertragen werden. Darüber hinaus können jedoch die eingesetzten Protokolle PTP und UDP erwähnt werden.

Topologie und Redundanz

Da Dante-Geräte mittels Switches bzw. Router miteinander verbunden werden sind alle Topologien implementierbar. (Halpin, 2016)

Redundanzkonzepte wie Spanning Tree Protokoll (STP) oder Link-Aggregation kommen bei Dante zum Einsatz. Dies wird auch durch die zwei Schnittstellen ermöglicht, die jedes Dante fähige Gerät besitzt.

Datenstrom

Folgende Abbildung zeigt den analysierten Datenstrom von Dante. Abgehört wurde dieses Protokoll wie bei SoundGrid mittels der Software Wireshark. Die Analyse zeigt, dass die Übertragung der Daten bei Dante gezielt von Sender zu Empfänger gesendet werden mittels des UDP Protokolls auf IPv4-Basis. Die Größe eines Datenpakets ist hier 243 Bytes wobei der Payload 201 Byte groß ist.

```
Frame 223: 243 bytes on wire (1944 bits), 243 bytes captured (1944 bits)
  Arrival Time: Jul 13, 2011 16:24:01.592295000 westeuropäische Sommerzeit
  Epoch Time: 1310567041.592295000 seconds
  [Time delta from previous captured frame: 0.000362000 seconds]
  [Time delta from previous displayed frame: 0.000362000 seconds]
  [Time since reference or first frame: 3.504890000 seconds]
  Frame Number: 223
  Frame Length: 243 bytes (1944 bits)
  Capture Length: 243 bytes (1944 bits)
  [Frame is marked: False]
  [Frame is ignored: False]
  [Protocols in frame: eth:ip:udp:data]
  [Coloring rule Name: TTL low or unexpected]
  [Coloring rule String: ( ! ip.dst == 224.0.0.0/4 && ip.ttl < 5 && !pim) || (ip.dst == 224.0.0.0/24 && ip.ttl != 1)]
Ethernet II, Src: Audinate_03:04:84 (00:1d:c1:03:04:84), Dst: Audinate_03:01:9a (00:1d:c1:03:01:9a)
  Destination: Audinate_03:01:9a (00:1d:c1:03:01:9a)
    Address: Audinate_03:01:9a (00:1d:c1:03:01:9a)
      ....0. .... = IG bit: Individual address (unicast)
      ....0. .... = LG bit: Globally unique address (factory default)
  Source: Audinate_03:04:84 (00:1d:c1:03:04:84)
    Address: Audinate_03:04:84 (00:1d:c1:03:04:84)
      ....0. .... = IG bit: Individual address (unicast)
      ....0. .... = LG bit: Globally unique address (factory default)
  Type: IP (0x0800)
Internet Protocol Version 4, Src: 169.254.161.101 (169.254.161.101), Dst: 169.254.158.123 (169.254.158.123)
  Version: 4
  Header length: 20 bytes
  Differentiated Services Field: 0xb8 (DSCP 0x2e: Expedited Forwarding; ECN: 0x00: Not-ECT (Not ECN-Capable Transport))
    1011 10.. = Differentiated Services Codepoint: Expedited Forwarding (0x2e)
    ....00 = Explicit Congestion Notification: Not-ECT (Not ECN-Capable Transport) (0x00)
  Total Length: 229
  Identification: 0x0000 (0)
  Flags: 0x00
    0... .... = Reserved bit: Not set
    .0.. .... = Don't fragment: Not set
    ..0. .... = More fragments: Not set
  Fragment offset: 0
  Time to live: 1
  Protocol: UDP (17)
  Header checksum: 0x2473 [correct]
    [Good: True]
    [Bad: False]
  Source: 169.254.161.101 (169.254.161.101)
  Destination: 169.254.158.123 (169.254.158.123)
  User Datagram Protocol, Src Port: 61440 (61440), Dst Port: 14336 (14336)
  Source port: 61440 (61440)
  Destination port: 14336 (14336)
  Length: 209
  Checksum: 0x0000 (none)
    [Good Checksum: False]
    [Bad Checksum: False]
  Data (201 bytes)
    data: 020000cf8000068f202791800000000000000000033bb6...
    [Length: 201]
```

Abbildung 73 Dante Datenstrom Analyse (Heyden, 2012a)

5.3.2 Ravenna

Ravenna ist eine offene Technologie für die Echtzeitübertragung von Audio- und anderen Medieninhalten über IP-Netzwerke. Genau wie andere Layer 3 Netzwerke ist es von der vorhandenen Netzwerk Infrastruktur abhängig. Grundsätzlich kann gesagt werden, je leistungsfähiger das Netzwerk ist desto mehr Datenpakete können übertragen werden. Da es sich bei Ravenna um ein offenes Protokoll handelt, kann es ohne Lizenzierung frei implementiert und

verwendet werden. Es werden ausschließlich standardisierte Protokolle für die Datenübertragung verwendet.

Ravenna wurde eigentlich für den Broadcastbereich konzipiert, kann jedoch in allen anderen Bereichen genauso eingesetzt werden. Durch die Verwendung von PTP, jedoch Version 2, können Sample-genaue Synchronisierungen innerhalb von 25ns erreicht werden. Der Sync-Master wird dabei über GPS synchronisiert. Das hat den Vorteil, dass somit auch Vernetzungen im WAN möglich wären. Ein Ravenna-Netz aus Österreich kann somit mit einem Ravenna-Netz aus Deutschland auf Nanosekunden genau synchronisiert werden, da GPS weltweit verfügbar ist.

Verschiedene Datenformate und Media-Clocks können parallel im gleichen Netzwerk übertragen werden. Laut Hildebrand kommt keine En- und Dekodierung der Daten vor, somit werden alle möglichen Datenformate unterstützt und mit möglichst voller Signalbandbreite übertragen. Durch das verwenden des DiffServ-Verfahrens, wird eine zuverlässige Datenübertragung sichergestellt indem alle IP-Pakete, die zu Ravenna gehören, eine höhere Priorisierung erhalten. Für die eigentliche Datenübertragung wird RTP eingesetzt. Ravenna gleicht auftretende Latenzen bei den Empfängern aus, welche in der Steuerungssoftware eingestellt werden können.

Ravenna unterstützt den parallelen Betrieb von zwei Netzwerken. Durch den Anschluss über die jeweils zwei verfügbaren Netzwerk Interfaces an jedem Ravenna-fähigen Gerät, werden alle Datenpakete immer auf beiden Netzwerken gleichzeitig übertragen. Das Datenpaket, das rechtzeitig ankommt, wird dann zur weiteren Verarbeitung berücksichtigt. Somit wird auch im Falle eines Totalausfalls eines Netzwerkes immer sichergestellt, dass die Daten übertragen werden. Weiters muss in einem Ravenna Netzwerk der Sync-Master immer doppelt vorhanden sein. Laut IEEE 1588 Standard wird dabei immer der präziseste Master ausgehandelt. Im Extremfall kann jeder einzelne Node als Sync Master fungieren, um somit die Synchronität im Netzwerk aufrecht zu erhalten. (Hildebrand, 2010)

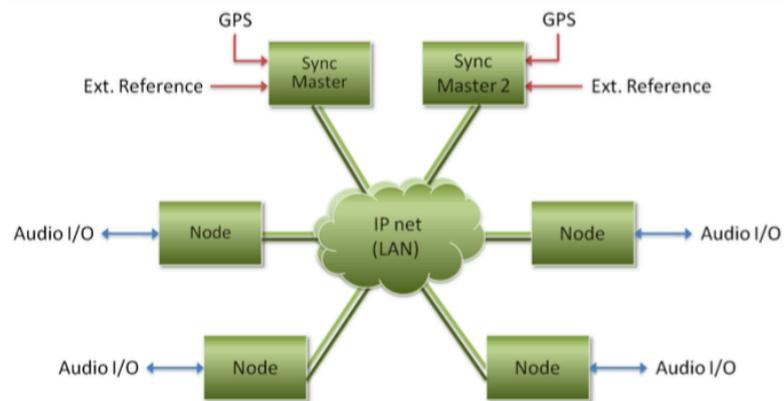


Abbildung 74 Prinzipieller redundanter Aufbau von Ravenna

Synchronisierung	IEEE 1588-2008
Netzwerk Transport	IPv4
Streaming Protokoll	RTP/UDP, Multicast, Unicast
Abtastraten	44,1kHz bis 192kHz (384kHz w/ DSD/DXD)
Kanalanzahl	512+ Kanäle / Stream
Latenz	<100µs

Abbildung 75 Ravenna Eigenschaften

5.3.3 Audio Video Bridging (AVB)

AVB wurde 2011 vom IEEE entwickelt und durch die AVnu Alliance promoted. Es wird durch die Normen IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qat, IEEE 802.1Qav und IEEE 802.1BA definiert. Es handelt sich hierbei um ein Set an Standards, die die Übertragung von Audio und Video Signalen innerhalb eines Ethernet-basierten-Netzwerkes festlegen soll. Der Hauptunterschied zu anderen Netzwerken ist, dass dieses nicht spezifisch nur für Audio entwickelt wurde. Es erlaubt auch die Übertragung von Video, Steuerdaten und herkömmliche IT-Daten. Deshalb beschränkt sich dieses Protokoll nicht nur auf die Audiobranche, sondern versucht zum Beispiel auch in der Automobilbranche Fuß zu fassen. Es handelt

sich um ein offenes Protokoll. Somit sind keine Lizenzen für den Einsatz dieses Standards notwendig.

AVB reserviert eine bestimmte Menge an Bandbreite für die Mediennutzung in einem Netzwerk. Somit sollen präzise Synchronisierungen, die Datenverwaltung der einzelnen Medienstreams, die sogenannte „Admission Control“ welche für die Steuerung der im System befindlichen Sender und Empfänger zuständig ist, und die Identifizierung vorhandener Geräte im AVB Netzwerk möglich sein. Dies wiederum sind Anforderungen für ein qualitativ hochwertiges Audiosystem.

Alle vorhandenen Geräte teilen sich eine Master Clock. Anhand der Norm IEEE 802.1AS wird die Zeitsynchronisation genau definiert. Alle 10ms werden dabei die Zeitstempeln aller Geräte untereinander verglichen und bei Bedarf korrigiert. Innerhalb von 2s muss das Netzwerk laut Standard stabilisiert sein. Ein maximales Jitter von $0,5\mu\text{s}$ wird auch vorgeschrieben und die Verwendung einer externen Taktquelle wird unterstützt.

Eine minimale Latenz wird laut Standard auf $250\mu\text{s}$ vorgegeben mit Samplingraten bis zu 192kHz und Auflösungen bis zu 32-bit floating point.

Eines der wichtigsten Unterschiede zu Dante ist, dass AVB dedizierte AVB-Switches benötigt wo hingegen Dante mit herkömmlichen Ethernet Netzwerk-Switches arbeiten kann.

5.4 Vergleich der Audio-Netzwerke

Name	Hersteller	Protokoll	OSI-Layer	minimale Latenz	Kanalanzahl	Switches	Topologie	Redundanz
A-Net	Aviom	Proprietär	1	< 800µs	64	Ja	Daisy Chain, Stern	Ja
AES50	MIDAS / Behringer	Proprietär	1	< 0,5ms	48	Nein	Point-to-Point	Ja
AVB	IEEE	IEEE1722	2/3	250µs	64	Nur AVB	Daisy Chain, Ring	Ja
CobraNet	Cirrus Logic		2	1,3ms	64	Ja	Stern	Ja
Dante	Audinate	RTP / UDP	3	< 0,25ms	512	Ja	Ethernet	Ja
EtherSound	Digigram	Ethernet	2	357µs	256	Ja	Reihe, Ring, Stern	ja, nur bei Ring

5 Audio-Netzwerke

Name	Hersteller	Protokoll	OSI-Layer	minimale Latenz	Kanalanzahl	Switches	Topologie	Redundanz
Livewire	Axia	Offen, RTP	3	<1ms	43	-	beliebig	-
REAC	Roland	Proprietär	2	375µs	40	JA	-	-
Rocknet	Riedel	Proprietär	1	850µs	160	Nein	Ring	Ja
REAC	Roland	Proprietär	2	< 0,5ms	40	Ja	Stern	Ja
Ravenna	ALC NetworX GmbH	RTP / UDP	3	< 100µs	> 800	Ja	-	Ja
Waves SoundGrid	DiGiCo/ Waves	Proprietär	2	< 1ms	256	Ja	Stern	Ja, nur Server

Tabelle 15 Vergleich verschiedener Audio-Netzwerke

5.5 AES67

AES67 ist ein Standard der Audio Engineering Society, die die Interoperabilität zwischen verschiedenen IP-basierten Audio Produkten herstellen will. Es handelt sich hierbei nicht um ein neues Protokoll, sondern viel mehr, um eine Auflistung der Anforderungen um eine Kommunikation unter den Systemen verschiedener Hersteller zu ermöglichen. Daten sollen somit Herstellerunabhängig innerhalb einer Netzwerkumgebung übertragbar sein. Der Standard beschreibt umfassende Empfehlungen in den Bereichen Synchronisierung, Taktidentifikation, Netzwerkübertragung, Encoding und Streaming, Session Description und Verbindungsmanagement. Der Einsatz von AES67 kompatiblen Geräten ermöglicht es verschiedene Geräte zu verbinden.

Die maximale Anzahl an Übertragbaren Kanälen ist von der Netzwerk Infrastruktur abhängig und wird nicht definiert. Jedoch kann gesagt werden, dass über ein Gigabit Netzwerk ca. 512 Audiokanäle mit 48kHz übertragbar sind. AES67 standardisiert den unkomprimierten Audiotransfer, da eine Kompression der Daten eine zusätzliche Latenz verursachen würde. Die Latenz an sich wird in dem Standard nicht explizit definiert, da die Latenz von zu vielen Faktoren abhängt. Jedoch werden hier low-latency Szenarien adressiert und somit von Latenzen unter 10ms ausgegangen.

Grundsätzlich beschreibt AES67 den Datentransport über OSI-Layer 3 (Network Layer) bzw. Layer 4 (Transport Layer). Niedrigere Layer werden hier nicht explizit behandelt. Zur Synchronisierung der einzelnen Geräte soll laut dem Standard das Precision Time Protocol eingesetzt werden. Mittels des Netzwerk-Layers wird spezifiziert, dass Datenpakete mittels IPv4 übertragen und IGMP unterstützen werden soll. Da für die Synchronisierung an sich Multicast verwendet wird, wird empfohlen, dass alle Geräte IGMPv2 unterstützen müssen. AES67 spezifiziert in diesem Standard weiters den Einsatz von QoS und weist darauf hin, dass das DiffServ-Verfahren eingesetzt werden soll. Hierbei werden mittels des DSCP Felds in jedem IP Paketheader die einzelnen Pakete entsprechend ihrer Traffic-Class markiert. Somit ist es im Netzwerk ersichtlich, welche Pakete priorisiert übertragen werden müssen. Laut dem Standard müssen zumindest die folgenden Klassen unterstützt werden.

5 Audio-Netzwerke

Class name	Traffic type	Default DiffServ class (DSCP decimal value)
Clock	IEEE 1588-2008 <i>Announce, Sync, Follow_Up, Delay_Req, Delay_Resp, Pdelay_Req, Pdelay_Resp</i> and <i>Pdelay_Resp_Follow_Up</i> packets	EF (46)
Media	RTP and RTCP media stream data	AF41 (34)
Best effort	IEEE 1588-2008 signaling and management messages. Discovery and connection management messages.	DF (0)

Abbildung 76 AES67 QoS Klassen und DiffServ

Mittels des Transport-Layers wird die End-to-End-Verbindung zwischen den Geräten beschrieben. Laut AES67 sollen demnach Geräte das Real-time Transport Protocol verwenden. Zur Übertragung dieses Protokolls soll UDP eingesetzt werden. Der maximale Payload der RTP Daten wird auf 1440 Byte beschränkt und die Verschlüsselte Übertragung, die über TLS möglich wäre, wird in diesem Standard nicht unterstützt. AES67 unterstützt 16- bzw. 24 bit Audiodaten und gibt an, dass alle Geräte 48kHz unterstützen müssen. Darüber hinaus sollten sie auch 44,1kHz und 96kHz unterstützen. (Audio Engineering Society, 2015)

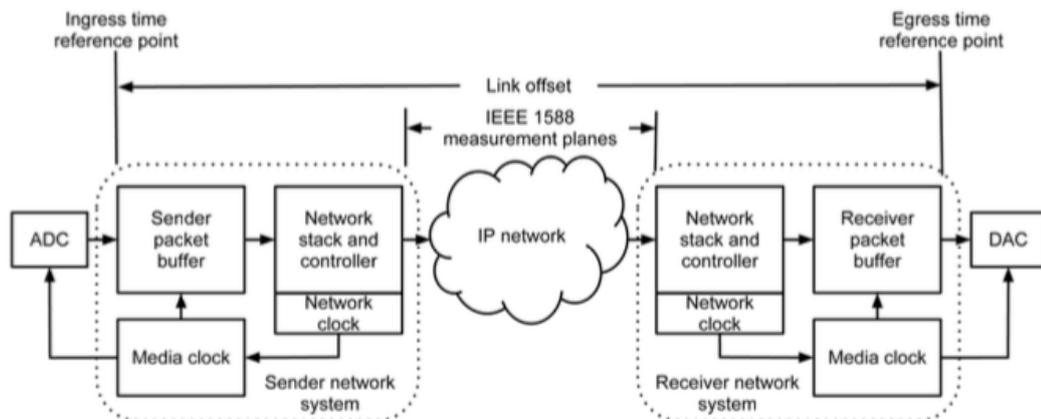


Abbildung 77 AES67 Link offset

Weiters beschreibt AES67 einen sogenannten Link offset, der die Latenz in einem Netzwerk angibt. Diese Zeit wird am Empfänger bestimmt und ist von verschiedenen Faktoren abhängig wie zum Beispiel auch die packet time. Mittels dieser Zeit und der Samplingrate kann die Anzahl der Samples pro Übertragung ermittelt werden. Anhand des Receivers packet bufferings soll das generierte Jitter absorbiert werden. (Audio Engineering Society, 2015)

5 Audio-Netzwerke

Der Unterschied zwischen AVB und AES67 liegt darin, dass AVB Verbesserungen definiert, die auf Layer 2 beheimatet sind. Wie zum Beispiel die Synchronisierung, Quality of Service und wie ein Overload an Media-Traffic verhindert werden kann. Spezifische AVB-fähige Ethernet Switches müssen hierfür eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu, konzentriert sich AES67 auf Layer 3 und kann mit herkömmlichen Standard Ethernet Switches arbeiten.

Mehr und mehr vorhandene Audio-Netzwerke entwickeln ihre Protokolle weiter damit sie mit den Vorgaben von AES67 kompatibel sind. In der Konfigurationssoftware von Dante ist es zum Beispiel jetzt schon möglich, den AES67 Mode zu aktivieren, um somit andere AES67-fähige Geräte im Netzwerk finden und einbinden zu können. Es kann somit gesagt werden, dass mit der Zeit höchstwahrscheinlich die meisten Hersteller von Stageboxen, Mischpulte und anderen Netzwerkrelevanten Geräte diesen Standard unterstützen werden und dem End-User es somit frei zur Auswahl steht, welche Geräte gekauft bzw. eingesetzt werden.

6 Messtechnische Untersuchung

Im folgenden Kapitel sollen durch messtechnische Untersuchungen Audio-Netzwerke analysiert und auftretende Latenzzeiten gemessen werden. Hersteller geben oft schmeichelhafte Angaben über die Protokolle und deren Latenzzeiten an oder es werden keine detaillierten Informationen preisgegeben wie es zu diesen Werten kommt. Weiters existieren derzeit keine direkten Vergleiche zwischen einzelnen Protokollen. Daher soll diese Untersuchung dazu beitragen, anhand eines einheitlichen Versuchsaufbaus, wertvolle und vergleichbare Informationen zwischen OSI-Layer 1, Layer 2 und Layer 3 Audio-Netzwerke zu erhalten.

Für diese quantitative Forschung wurde als Methode der Vergleich der einzelnen Netzwerke gewählt. Dadurch soll es ermöglicht werden, direkte Vergleichswerte zu erhalten und diese gegenüberstellen zu können. Weiters ist somit eine Überprüfung der Herstellerangaben in den Datenblättern möglich. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die erworbenen Ergebnisse sich explizit auf diesen Versuchsaufbau beziehen und die Resultate nicht generalisiert werden können.

Live Events, Recording Studios oder im Broadcast Bereich, überall können Audio-Netzwerke dazu beitragen Audiosignale effizient über ein Netzkabel zu übertragen. Je nach Anwendung ist jedoch mit Latenzen zu rechnen. Insbesondere wenn digitale Mischpulte auch zum Einsatz kommen. Mit sogenannten Expansion Cards können diese in die jeweiligen Netzwerke eingebunden werden. Je nach Hersteller sind die Mischpulte schon ab Werk mit Schnittstellen für Netzwerk-Protokolle versehen, jedoch ist die Erweiterung durch weitere Steckkarten möglich. Da an der FH St. Pölten das digitale Mischpult Behringer X32 vorhanden ist, soll dieses die Basis dieser experimentellen Untersuchung bilden. Die Hersteller Midas und Behringer arbeiten mit dem proprietären Protokoll AES50 (Layer 1) und besitzen demnach die notwendigen Schnittstellen an den Mischpulten ab Werk. Durch den Einsatz von Erweiterungskarten ist es möglich die Mischpulte auch in ein Waves SoundGrid (Layer 2) oder Dante (Layer 3) Netz einzubinden. Daher sollen diese drei Netzwerke untersucht werden.

6.1 Forschungsfrage und Hypothese

Forschungsfrage

Welche Latenzunterschiede kommen zwischen OSI-Layer 1, Layer 2 bzw. Layer 3 Audio-Netzwerke vor?

Hypothese

Je höher die eingesetzte OSI-Layer Schicht bei der Übertragung in Audio-Netzwerke, desto länger dauert der Datentransport.

6.2 Allgemeiner Messaufbau

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und die Forschungsfrage beantworten zu können, wurde zuerst folgendes allgemeines Messszenario entwickelt. Ein Signal Generator generiert einen Impuls oder ein Rauschsignal. Das generierte Signal wird auf zwei Channels gesplittet wobei ein Kanal als Referenzsignal dient und direkt an das Recording Gerät angeschlossen wird. Der zweite Channel wird über das Test System geschickt und an einem zweiten Kanal desselben Aufnahmeegeräts verbunden.

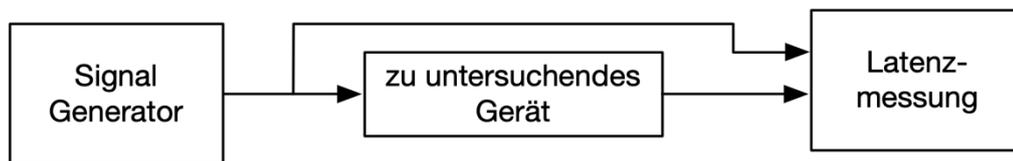


Abbildung 78 Allgemeiner Messaufbau

Am Ende der Messkette werden die zwei Signale mittels einer Software verglichen und die Zeitdifferenz ermittelt. So lässt sich der genaue Latenzunterschied feststellen.

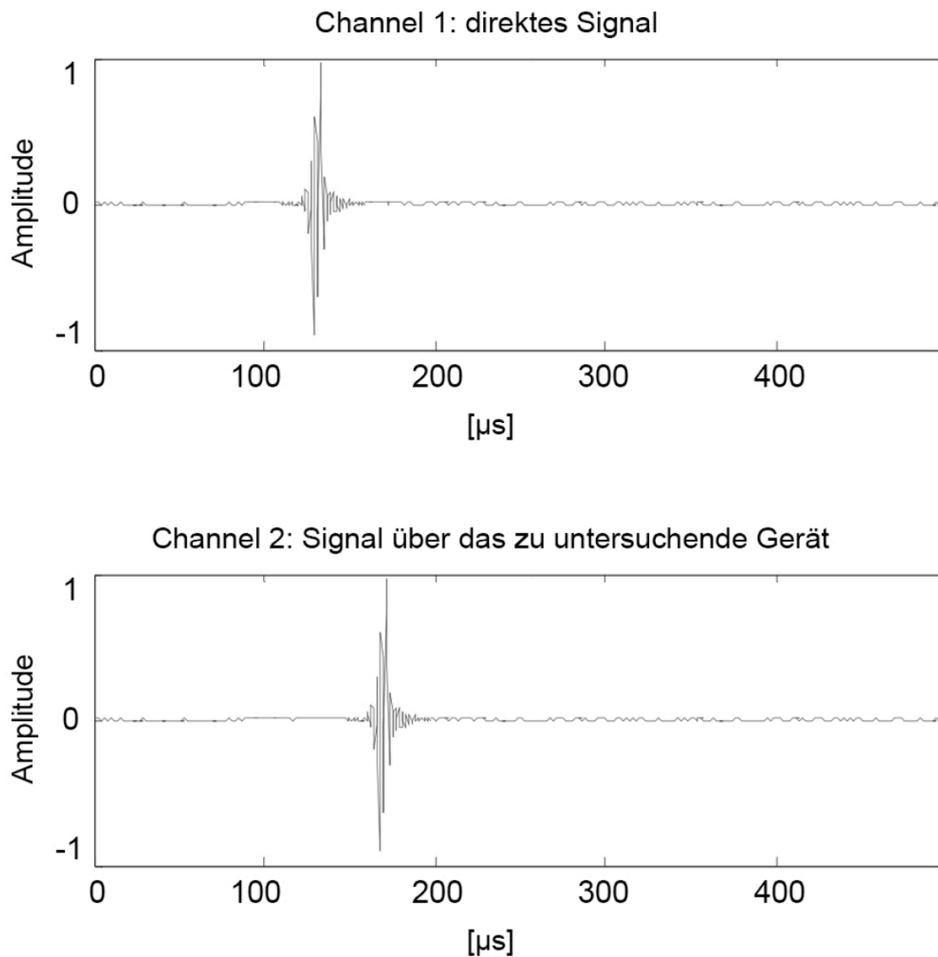


Abbildung 79 Latenzmessung mittels der angeschlossenen Signale

Für alle Messungen wurde folgendes Grundsetup eingesetzt. Als Signalgenerator wurde ein Macbook Pro mit der Software Smaart v8 verwendet. Dabei wurde es so konfiguriert, dass es am Focusrite Audio Interface auf beiden Ausgängen ein rosa Rauschen sendet. Um das direkte Signal als Referenzsignal zu erhalten wurde es vom Ausgang 2 wieder zurück geschliffen in den Eingang 2 des Interfaces. Der andere Ausgang mit demselben Rauschsignal wird dabei an das zu untersuchende Gerät angeschlossen und der Ausgang an den Eingang 1 des Focusrite Interfaces. Somit kann dann in Smaart mittels der „Find Delay“ Funktion die Latenz zwischen den beiden Input-Signalen des Focusrite Interfaces ermittelt werden.

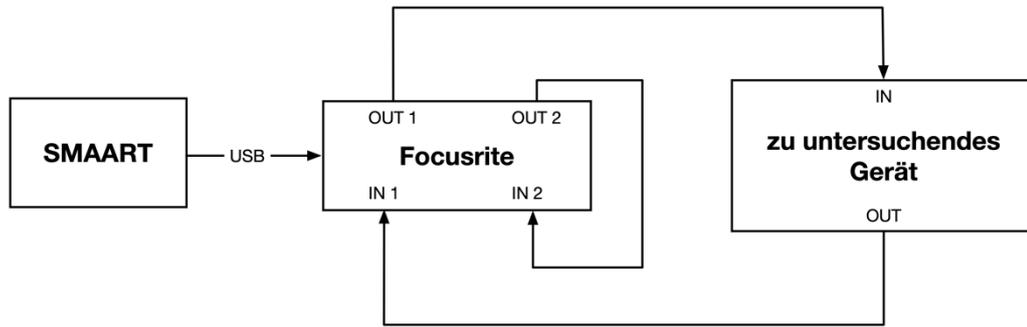


Abbildung 80 Allgemeiner Messaufbau mit verwendeter Technik

Die zu untersuchenden Protokolle werden grundsätzlich im Live-Betrieb eingesetzt. Deswegen werden für den Versuchsaufbau auch digitale Mischpulte und Stageboxen eingesetzt, um somit einen realen Bezug herzustellen.

6.2.1 Konfiguration Smart

Mittels der I-O Configuration in Smart müssen zuerst die Inputs und Outputs definiert werden wie in nachfolgender Grafik ersichtlich.

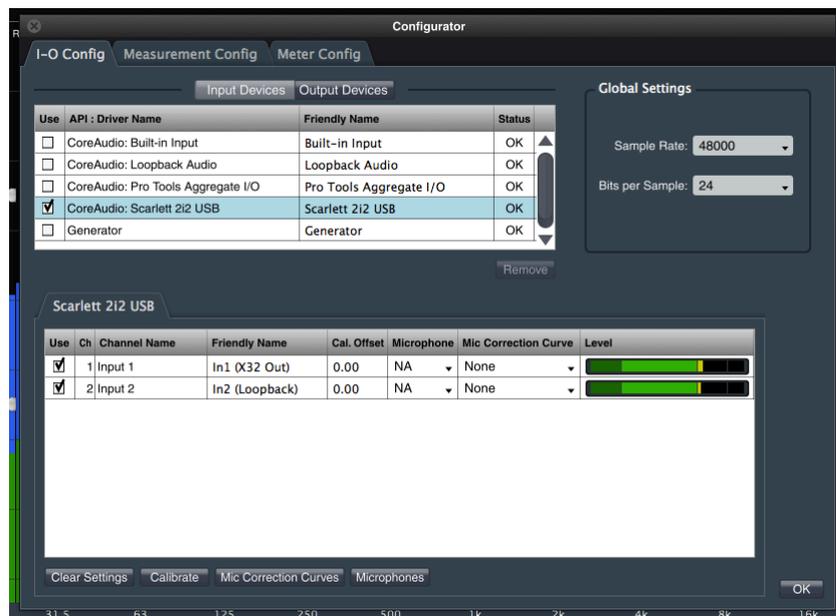


Abbildung 81 I-O Config Smart

Als Globale Settings werden in Smart die Sampleraten 48kHz und 24 Bit ausgewählt. Da nachfolgende Messung jeweils in 48kHz und 44,1kHz durchgeführt werden, müssen diese auch hier immer geändert werden damit alle Systeme gleich eingestellt sind.

6 Messtechnische Untersuchung



Abbildung 82 Signal Generator Smart

Die Konfiguration des Signal Generators sollte wie in Abbildung 82 vorgenommen werden. Dabei ist wichtig, dass das generierte rosa Rauschen auf beiden Ausgängen geht. Dies lässt sich mittels des AUX Weges in Smart realisieren. Sobald die Signale in der Spectrum Ansicht sichtbar sind sollten die beiden Signale so gut wie möglich auf den gleichen Pegel eingepegelt werden, um somit Messfehler zu vermeiden. Eine Latenzmessung ist in Smart nur in der Transfer-Function-Ansicht möglich. Dazu muss ein neues „TF-Measurement“ angelegt werden. Als Referenzsignal muss dabei das Loopback Signal welches vom Ausgang 2 kommt ausgewählt werden und als Measurement Kanal den Input 1 des Focusrite Interfaces.

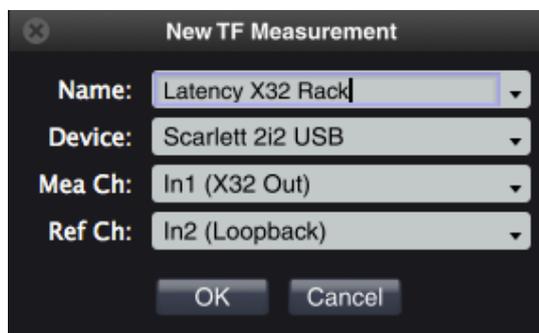


Abbildung 83 TF Measurement Settings in Smart

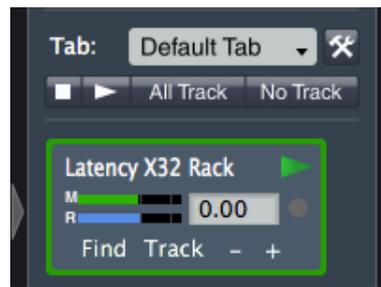


Abbildung 84 Settings Latenzmessung Smart

Sobald alle Einstellungen durchgeführt wurden, müssen die Signale „gestartet“ werden mittels des Play-Buttons. Danach kann die Latenzmessung mittels der „Find“ Funktion gestartet werden.

6.3 Latenzmessung Mischpult

Da jedes Mischpult Verzögerungen durch verschiedene Faktoren verursacht, muss die digitale Konsole selbst auch einer Messung unterzogen werden. Es wird hier ermittelt, wie hoch die Verzögerungszeit bei der AD- / DA-Wandlung oder beim Einsatz von verschiedenen DSP Effekten ist. Somit kann für die nachfolgende Messung der Netzwerk-Latenz diese Zeit subtrahiert werden.

6.3.1 Messaufbau

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, ist hier das zu untersuchende Gerät das digitale Mischpult Behringer X32. Dabei wird das generierte Rauschsignal an den Input der Konsole und der Ausgang wieder zurück an das Audio-Interface angeschlossen.

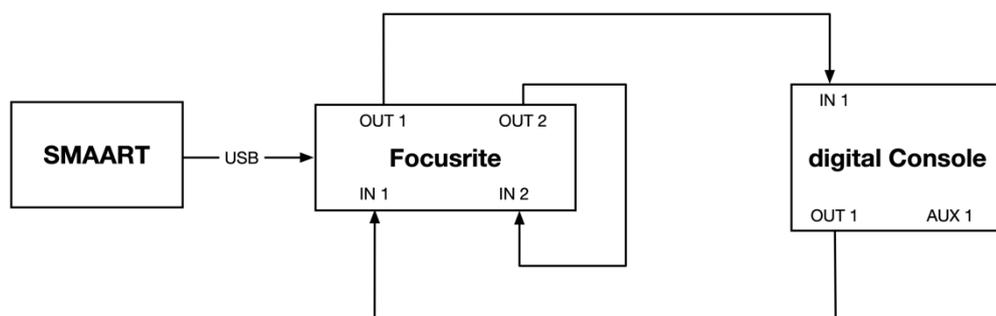


Abbildung 85 Messaufbau für die Latenzmessung der digitalen Mischpulte

Laut Herstellerangaben soll dieses Mischpult eine Input to Output Latency von unter 1ms besitzen. Dieser Wert und andere Variablen sollen in nachfolgender Messung überprüft werden und genaue Werte liefern. (Behringer, 2012)

6.3.2 Variablen

Alle Messungen werden mit 44,1kHz und 48kHz gemessen. Um gültige Resultate zu erhalten werden jeweils folgende Messungen durchgeführt.

- Messung ohne DSP
Dabei wird das Signal direkt nach dem I/O Patch und vor dem DSP Patch abgegriffen und zum Ausgang geroutet. Laut Blockschaltbild sind dann nur noch die AD- und DA-Wandler in dieser Signalkette vorhanden die eine Verzögerung verursachen könnten.
 - XLR Input zu XLR Output
 - AUX Input zu XLR Output
- Messung mit DSP
Hier wird das Signal über den DSP Patch und den danach folgenden Verarbeitungsgliedern geschickt. Es werden verschiedene Messungen durchgeführt, um herauszufinden wie hoch die Latenz des DSP ist und ob verschiedene Glieder in der Verarbeitungskette andere Latenzen verursachen. Folgende Messungen wurden durchgeführt:
 - XLR Input zu XLR Output
 - XLR Input über Gate, Dyn, EQ zu XLR Output
 - XLR Input zu AUX Output
 - XLR Input über Gate, Dyn, EQ zu AUX Output
 - AUX Input zu XLR Output
 - AUX Input zu AUX Output
 - XLR Input über Bus zu Main LR
 - XLR Input über Bus über Matrix zu Main LR
- Delay Kompensation Messung
Es soll getestet werden, ob eine Delay Kompensation bei den Ausgängen durchgeführt wird.

6.3.3 Blockschaltbild

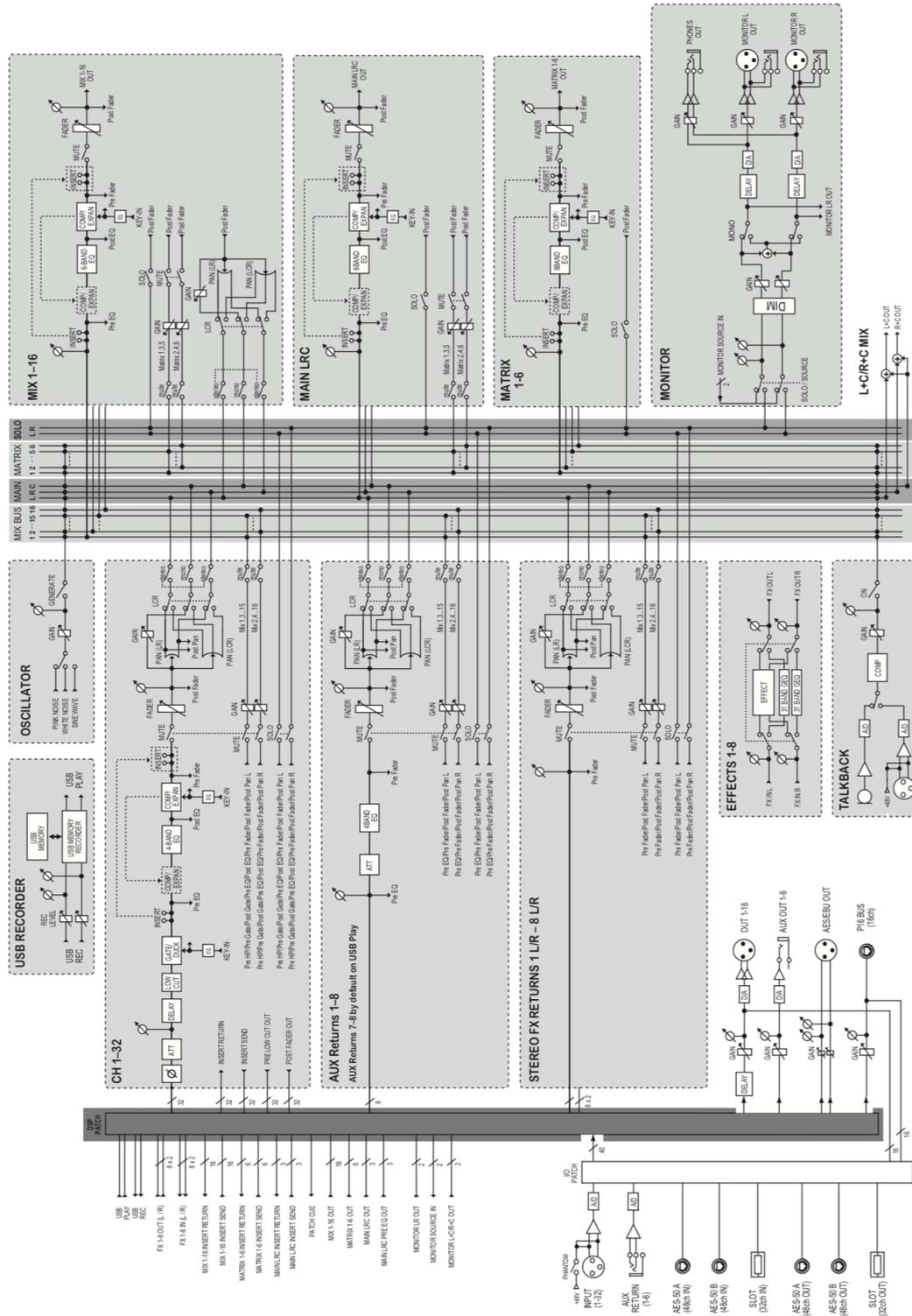


Abbildung 86 Blockschaltbild Behringer X32

6.3.4 Messverfahren und Ergebnisse

Zuallererst muss auf dem Mischpult ein Factory Reset durchgeführt werden, damit keine gespeicherten oder modifizierten Settings die Messung falsifizieren können. Weiters wird die Synchronisation auf Intern und die Samplerate je nach Messung auf 44,1kHz bzw. 48kHz gesetzt.

Messung ohne DSP

Routing:

- Home -> Local 1-8
- XLR Out -> wie in Tabelle beschrieben

Messung	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	Routing
XLR In -> XLR Out	0,50	0,54	XLR Out -> Local 1-4
AUX In -> XLR Out	0,52	0,58	XLR Out -> AUX In 1-6/TB

Tabelle 16 Latenzmessung X32 ohne DSP

Da bei dieser Messung das Input Signal direkt am XLR Ausgang gelegt wird und somit den DSP überspringt, können hier nur diese zwei Messungen durchgeführt werden. Eine Messung wie AUX In -> AUX Out oder XLR IN zu AUX Out ohne DSP ist, wie am Blockschaltbild ersichtlich, leider nicht möglich. Hierfür ist keine Routing-Option verfügbar.

Messung mit DSP

Routing:

- Home -> Local 1-8
- XLR Out -> Out 1-4

Bei diesen Messungen wird das Input Signal, welches auf Ch1 oder Aux1 anliegt an den MainLR Bus entweder direkt oder zuerst über einen weiteren Bus oder Matrix gesendet. Im Channel Config Tab wurde unter dem Menüpunkt Main Out jeweils die Funktion LR – Main Stereo gesetzt. Um für alle Messungen die gleichen Settings zu verwenden wurde der standardmäßig eingestellte Analoge Output 15 für die Messung verwendet.

Messung	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz
XLR In -> XLR Out	0,83	0,90
XLR In -> Gate -> Dyn -> EQ -> XLR Out	0,83	0,90
XLR In -> AUX Out	0,83	0,90
XLR In -> Gate -> Dyn -> EQ -> AUX Out	0,83	0,90
AUX In -> XLR Out	0,85	0,94
AUX In -> AUX Out	0,85	0,94
XLR In -> Bus1 -> MainLR	0,83	0,90
XLR In -> Bus1 -> MainLR -> Matrix1	0,83	0,90

Tabelle 17 X32 Messung mit DSP

Delay Compensation Messung

Wenn ein Signal auf zwei Bussen gesendet wird und diese unterschiedlich bearbeitet werden, entstehen unterschiedliche Latenzen. Um diese auszugleichen besitzen manche Mischpulte solche Delay Compensation Maßnahmen, die die Latenz zwischen den Bussen feststellen und auf allen Ausgängen einstellen. Somit liegen die zwei Signale Phasengleich an den Ausgängen und es kommt nicht zu sogenannten Kammfiltereffekten. (Midas Klark Technik, 2010)

Um herauszufinden ob dieser Latenzausgleich zwischen den Bussen beim X32 vorhanden ist, wurde folgender Test durchgeführt.

Ein generiertes Signal wurde auf Channel 1 und Channel 2 gelegt. Channel 1 wurde wie gehabt direkt auf MainLR geroutet. Channel 2 hingegen wurde zuerst auf Bus1 geschickt welcher erst dann auf MainLR gesendet wird. Die Verzögerungszeit intern beträgt hier 0ms. Jedoch wird keine Delay Compensation vorgenommen sobald ein Insert auf den Bus 1 oder den jeweiligen Channels gelegt wird. Dann kommen die jeweiligen Insert Delays vor. Somit lässt sich sagen, dass das Behringer X32 keine Delay Compensation durchführt und es beim Parallel Processing zu Kammfiltereffekten kommen kann.

Effects Rack Latency

Das X32 besitzt 8 Effektslots von den die ersten 4 als Side-Chain oder Inserts und die anderen 4 nur als Inserts verwendet werden können. Folgende Tabelle soll die Latenzen zeigen, die die einzelnen Effekte verursachen sobald sie als Insert auf einen Channel oder Bus eingesetzt werden.

Effekt	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz
Dual GEQ	0,67	0,79
Stereo GEQ	0,67	0,79
Dual Tru EQ	0,67	0,79
Stereo Tru EQ	0,67	0,79
Dual DeEsser	0,67	0,79
Stereo DeEsser	0,67	0,79
Stereo Xtec EQ1	0,69	0,83
Dual Xtec EQ1	0,69	0,83
Stereo Xtec EQ5	0,69	0,83
Dual Xtec EQ5	0,67	0,79
Wave Designer	1,42	1,54
Stereo Precision Limiter	1,75	1,88
Fair Comp	0,67	0,79
M/S Fair Comp	0,67	0,79
Dual Fair Comp	0,67	0,79
Leisure Comp	0,67	0,79
Dual Leisure Comp	0,67	0,79
Ultimo Comp	0,67	0,79
Dual Ultimo Comp	0,67	0,79

6 Messtechnische Untersuchung

Dual Enhancer	0,67	0,79
Stereo Enhancer	0,67	0,79
Dual Exciter	0,90	1,02
Stereo Exciter	0,90	1,02
Stereo Imager	0,67	0,79
Edison EX1+	0,67	0,79
Sound Maxer	0,67	0,73
Dual GuitarAmp	0,69	0,75
Stereo GuitarAmp	0,69	0,75
Dual Tube Stage	0,69	0,81
Stereo Tube Stage	0,67	0,73
Stereo Phaser	0,67	0,77
Mood Filter	0,67	0,73
Tremolo Panner	0,67	0,73
Suboctaver	0,67	0,73

Tabelle 18 X32 Effects Rack Latency

6.3.5 Fazit

Anhand der gemessenen Werte lässt sich nun sehr gut erkennen, dass die reine AD- / DA-Wandlung dieses Mischpultes 0,5ms bei 48kHz beträgt. Die Gesamtzeit die das Behringer X32 benötigt um das analoge Signal zu digitalisieren, es intern mit Dynamics, EQ zu verarbeiten, es weiter in Bussen oder Matrizen zu schicken und auch hier das Signal mit Dynamics und EQ weiter zu bearbeiten, anschließend wieder vom digitalen ins analoge zu konvertieren und das Signal somit an die PA zu senden dauert nur 0,83ms. Es kann gesagt werden, dass die einzelnen Sektionen wie Gate, Compressor, EQ keine zusätzlichen Verzögerungen verursachen, sondern ein standardmäßig festgelegter Wert von 0,33ms bei 48kHz vorkommt. Auch beim Einsatz von Insert Effekten auf einzelnen Channels oder Bussen lässt sich ein beachtlich niedriger Wert erreichen. So würde beim Einsatz des Wave Designers als Insert auf ein Snare

Channel die Gesamtzeit bis das Signal am Main Out anliegt $0,83\text{ms} + 1,42\text{ms} = 2,25\text{ms}$ bei 48kHz betragen. Das Behringer X32 liefert demzufolge wirklich Low-Latency Werte und kann mit anderen renommierten Herstellern wie Soundcraft, Yamaha oder Allen&Heath auf jeden Fall konkurrieren.

6.4 Latenzmessung der Netzwerk-Protokolle

6.4.1 Messaufbau

Wie auch im vorherigen Messszenario wird auch hier dasselbe Setup eingesetzt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die Erweiterung des Setups mittels einer digitalen Stagebox und den jeweiligen Erweiterungskarten ermöglichen die Messung der Latenzen über das Netzwerkprotokoll. Als Stagebox wurde das Behringer X32 Rack eingesetzt, da hier der Einsatz von Expansion Cards möglich ist im Gegensatz zu der Stagebox S16 welche nur AES50 unterstützt.

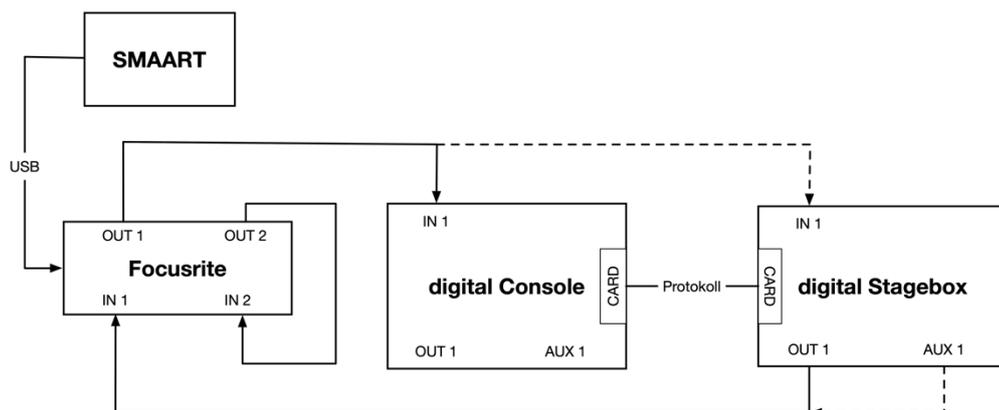


Abbildung 87 Messaufbau für die Latenzmessung der Netzwerkprotokolle

Es wurden zwei Szenarien mit jeweils zwei Messungen hierfür entwickelt. Bei Variante 1.1 und 1.2 wird das generierte Signal direkt am X32 angeschlossen. Gemessen wird hier die Round-Trip-Zeit, die das Signal benötigt, um am FOH Mischpult verarbeitet und am Ausgang der Stagebox dann wieder abgegriffen zu werden. Variante 2.1 und 2.2 kommt in der Praxis üblicherweise vor. Hier wird das Signal an der Stagebox angeschlossen, über das Netzwerkprotokoll zur FOH Konsole geschickt, verarbeitet und wieder zurück an den Ausgang der Stagebox gesendet. Der Vergleich zwischen den beiden Szenarien soll dazu dienen, exakte Werte zu erhalten und zu erkennen, ob andere nicht identifizierte Faktoren noch vorkommen.

6.4.2 Grenzen dieser Untersuchung

Das Behringer X32 bzw. X32 Rack ist derzeit nur mit den Netzwerkprotokollen AES50, Dante und Waves SoundGrid kompatibel, da für diese auch die notwendigen Expansion Cards erhältlich sind. Daher können auch nur diese Netzwerke in dieser Messung untersucht werden.

6.4.3 Variablen

Anhand der Ergebnisse aus Kapitel 6.3.2 werden hier nur die relevantesten und sich unterscheidenden Messvariablen weiter untersucht. Da herausgefunden wurde, dass Unterschiede zwischen XLR IN/OUT und AUX IN/OUT vorhanden sind, sollen diese Variablen in allen Messungen berücksichtigt werden. Alle anderen Variablen sind entweder nicht konfigurierbar oder anhand der gewonnenen Erkenntnisse nicht relevant für diese Messung.

XLR In -> XLR Out	44,1 / 48 kHz	Ohne / Mit DSP
AUX In -> XLR Out	44,1 / 48 kHz	Ohne / Mit DSP

6.4.4 AES50

6.4.4.1 Messaufbau

AES50 unterstützt grundsätzlich nur eine Point-to-Point-Verbindung da es auf Layer 1 basiert. Daher stimmt der Messaufbau in Abbildung 87 mit dem für diese Messung notwendigen Aufbau überein. Es wurde weiters vor der eigentlichen Messung ein Test durchgeführt, ob Unterschiede zwischen X32 Rack und der Behringer S16 Stagebox vorhanden sind. Dazu wurde anhand einer XLR In -> XLR Out Messung festgestellt, dass keine Latenzunterschiede vorhanden sind.

6.4.4.2 Routing

X32 In -> Stagebox Out

Folgende Routing-Einstellungen am X32 und X32 Rack wurden vorgenommen:

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> Local 1-8	XLR Out -> AES50A 1-4 / 5-8
AES50A -> Local 1-8 bzw. AuxIn 1-6	

Tabelle 19 AES50 Messung ohne DSP (Variante 1.1)

Da am X32 Rack das Lokale Signal des X32 über AES50 direkt wieder abgegriffen wird, ist es somit möglich den DSP Patch zu umgehen.

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> Local 1-8	XLR Out -> AES50A 1-4 / 5-8
AES50A -> Out 9-16	

Tabelle 20 AES50 Messung mit DSP (Variante 1.2)

Das Signal wird hier über den DSP geschickt. Mittels der Channel/Aux Fader wird das Signal direkt an den MainLR Bus gesendet. Das Output Signal liegt dementsprechend am Rack am Ausgang 7 und 8.

Stagebox In -> X32 Processing ->Stagebox Out

Für dieses Szenario sind folgende Routing-Einstellungen notwendig:

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> AES50A 1-8	Home -> Local 1-8
AES50A -> AES50A 1-8	AES50A -> Local 1-8 bzw. AuxIn 1-6
	XLR Out -> AES50A 1-4 / 5-8

Tabelle 21 AES50 Messung ohne DSP (Variante 2.1)

Das am X32 Rack angeschlossene Signal wird am Ch1 über AES50A zum X32 übertragen und liegt dort dementsprechend auf Ch1 an. Dieses Signal wird bei diesem Setup direkt zurück übertragen ohne weiteres Processing und liegt an Out1 der Stagebox.

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> AES50A 1-8	Home -> Local 1-8
AES50A -> Out 9-16	AES50A -> Local 1-8 bzw. AuxIn 1-6
	XLR Out -> AES50A 1-4 / 5-8

Tabelle 22 AES50 Messung mit DSP (Variante 2.2)

Das Signal wird über den Masterfader gesendet und über AES50A an die Stagebox übertragen. Es liegt an Out 7 und 8.

6.4.4.3 Ergebnisse

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> AES50A -> X32 Rack XLR Out	0,60	0,65	1.1
X32 AUX IN -> AES50A -> X32 Rack XLR Out	0,62	0,69	
X32 Rack XLR In -> AES50 -> X32 Rack XLR Out	0,71	0,75	2.1
X32 Rack AUX In -> AES50 -> X32 Rack XLR Out	0,73	0,79	

Tabelle 23 AES50 Messergebnisse ohne DSP

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> AES50A -> X32 Rack XLR Out	0,94	1,02	1.2
X32 AUX IN -> AES50A -> X32 Rack XLR Out	0,96	1,04	
X32 Rack XLR In -> AES50 -> X32 Rack XLR Out	1,02	1,12	2.2
X32 Rack AUX In -> AES50 -> X32 Rack XLR Out	1,06	1,17	

Tabelle 24 AES50 Messergebnisse mit DSP

6.4.5 Waves SoundGrid

SoundGrid unterstützt keine direkte Point-to-Point-Verbindung wie AES50. Daher ist der Einsatz eines Switches notwendig. Hierfür wurde ein 8-Port Netgear GS108PE Gigabit Switch mit QoS Funktion eingesetzt. Grundsätzlich wird SoundGrid nicht dazu verwendet, um nur Mischpulte mit Stageboxen zu verbinden. Der eigentliche Zweck ist es mittels der Software Waves Multirack Waves Plugins im Live- oder Broadcast-Betrieb einzusetzen. Für diese Messung wurde jedoch nur der Audiotransport ohne Plugin Processing mittels Waves Multirack untersucht, um auch dieses Protokoll mit den anderen Protokollen vergleichen zu können. Um das Behringer X32 und X32 Rack in das Netzwerk einbinden zu können, wurden jeweils die X-WSG Expansion Cards eingebaut.

6.4.5.1 Messaufbau

Neben den notwendigen Switch ist auch noch die Software SoundGrid Studio notwendig, um das Netzwerk zu konfigurieren. Die Verkabelung sieht wie folgt aus:

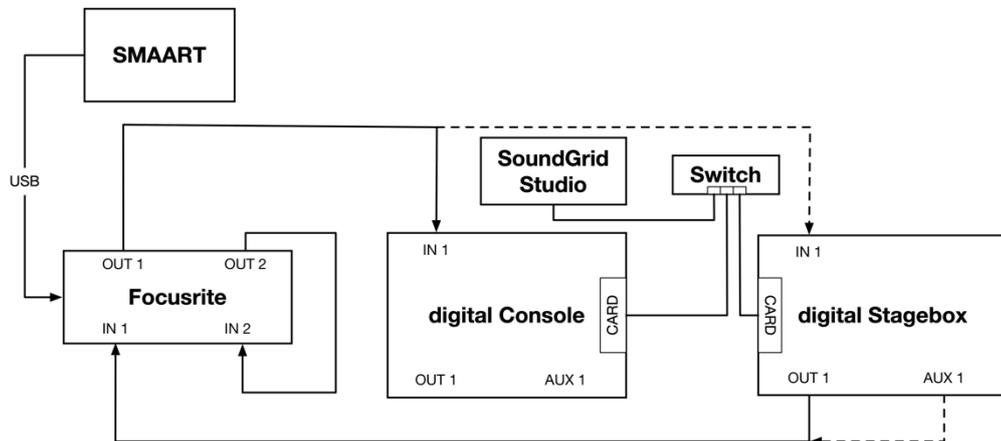


Abbildung 88 Waves SoundGrid Messaufbau

6.4.5.2 Routing

Um das Routing für SoundGrid zu konfigurieren müssen in SoundGrid Studio im Patch-Tab alle notwendigen Signale miteinander verknüpft werden. Dies sieht wie folgt aus:

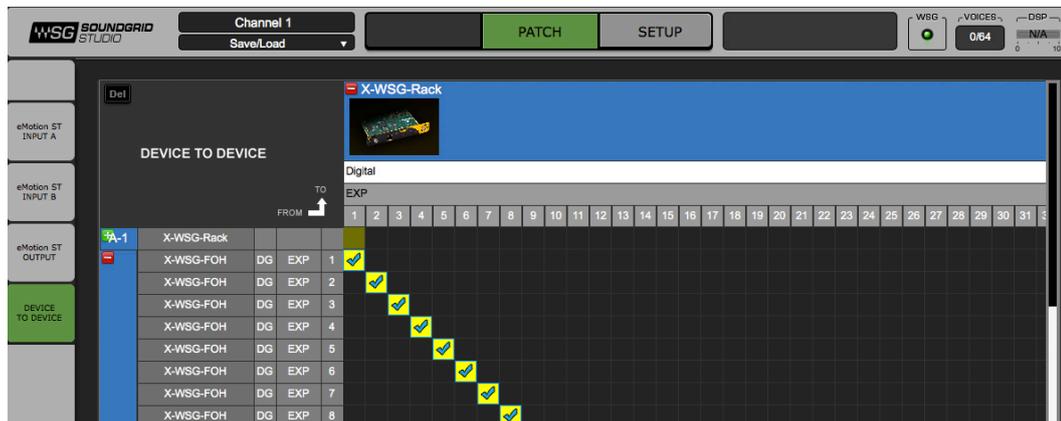


Abbildung 89 Waves SoundGrid Studio Patch

Im Gegensatz zu AES50 wird für SoundGrid das Routing am X32/X32 Rack im Card Out-Tab vorgenommen werden.

X32 In -> Stagebox Out

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> Local 1-8	XLR Out -> Card 1-4 / 5-8
Card Out -> Local 1-8 bzw. AuxIn 1-6	

Tabelle 25 Waves SoundGrid Messung ohne DSP (Variante 1.1)

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> Local 1-8	XLR Out -> Card 1-4 / 5-8
Card Out -> Out 9-16	

Tabelle 26 Waves SoundGrid Messung mit DSP (Variante 1.2)

Stagebox In -> X32 Processing ->Stagebox Out

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> Card 1-8	Home -> Local 1-8
Card Out -> Card 1-8	Card Out -> Local 1-8 bzw. AuxIn 1-6
	XLR Out -> Card 1-4 / 5-8

Tabelle 27 AES50 Messung ohne DSP (Variante 2.1)

Routing X32	Routing X32 Rack
Home -> Card 1-8	Home -> Local 1-8
Card Out -> Out 9-16	Card Out -> Local 1-8 bzw. AuxIn 1-6
	XLR Out -> Card 1-4 / 5-8

Tabelle 28 AES50 Messung mit DSP (Variante 2.2)

6.4.5.3 Ergebnisse

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> WSG -> X32 Rack XLR Out	1,33	1,46	1.1
X32 AUX IN -> WSG -> X32 Rack XLR Out	1,35	1,50	
X32 Rack XLR In -> WSG -> X32 Rack XLR Out	2,21	2,40	2.1
X32 Rack AUX In -> WSG -> X32 Rack XLR Out	2,23	2,44	

Tabelle 29 Waves SoundGrid Messergebnisse ohne DSP

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> WSG -> X32 Rack XLR Out	1,67	1,83	1.2
X32 AUX IN -> WSG -> X32 Rack XLR Out	1,69	1,87	
X32 Rack XLR In -> WSG -> X32 Rack XLR Out	2,54	2,77	2.2
X32 Rack AUX In -> WSG -> X32 Rack XLR Out	2,56	2,81	

Tabelle 30 Waves SoundGrid Messergebnisse mit DSP

6.4.6 Dante

Da Dante auf Layer 3 basiert, unterstützt es dementsprechend auch Switches. Jedoch kann nach der Konfiguration auch eine Point-to-Point Verbindung hergestellt werden, da die konfigurierten Erweiterungskarten die Einstellungen intern speichern. Für dieses Protokoll wurden daher beide Messungen durchgeführt. Einmal mit Switch und einmal ohne, um den Einfluss des Switches auch analysieren zu können. Die Konfiguration des Netzwerkes erfolgt mittels der Software Dante Controller. Für die Einbindung der Mischpulte in das Dante Netzwerk wurden jeweils die Klark Teknik DN32 Dante Expansion Cards montiert.

6.4.6.1 Messaufbau

Der Messaufbau für die Messung ohne Switch ist gleich dem von AES50 (Abbildung 87). Beim Einsatz des Switches ist das Setup gleich dem von Waves SoundGrid nur das Dante Controller die Konfigurationssoftware ist.

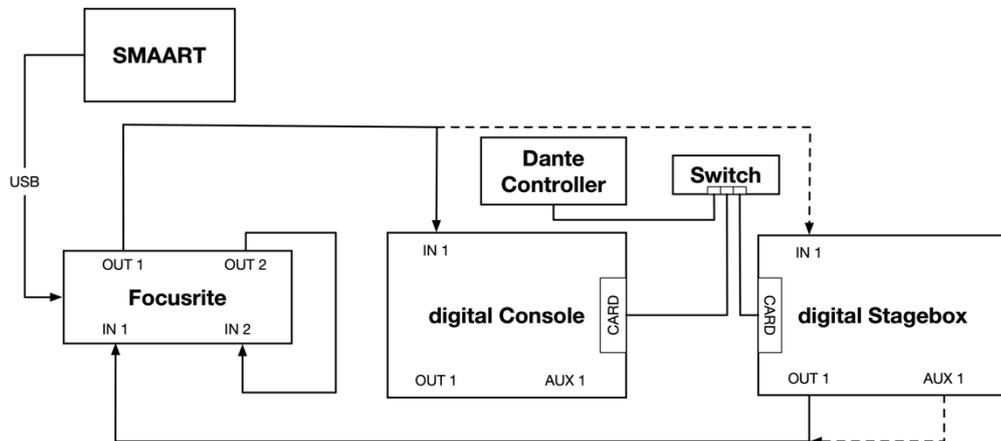


Abbildung 90 Dante Messaufbau

6.4.6.2 Routing

Nach dem Start der Dante Controller Software erscheinen alle angeschlossenen Geräte unter dem Routing-Tab. Hier müssen alle Verbindungen zwischen FOH -> Stagebox und Stagebox -> FOH gesetzt werden. Unter dem Tab „Device Config“ können weitere Einstellungen vorgenommen werden wie zum Beispiel Samplerate oder vorkonfigurierte Latenz. Da Dante fünf Latenzeinstellungen vorgibt wurden alle Messungen mit allen Einstellungsmöglichkeiten durchgeführt. Das Routing am X32 bzw. X32 Rack ist wie bei Waves SoundGrid und wird im Kapitel 6.4.5.2 beschrieben.

6 Messtechnische Untersuchung

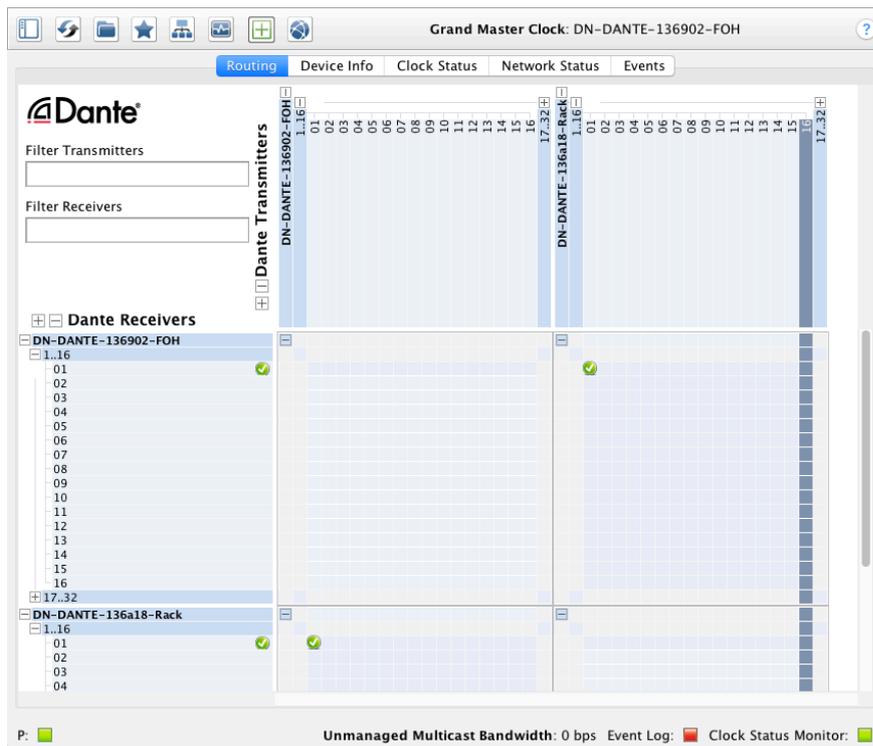


Abbildung 91 Dante Routing Beispiel

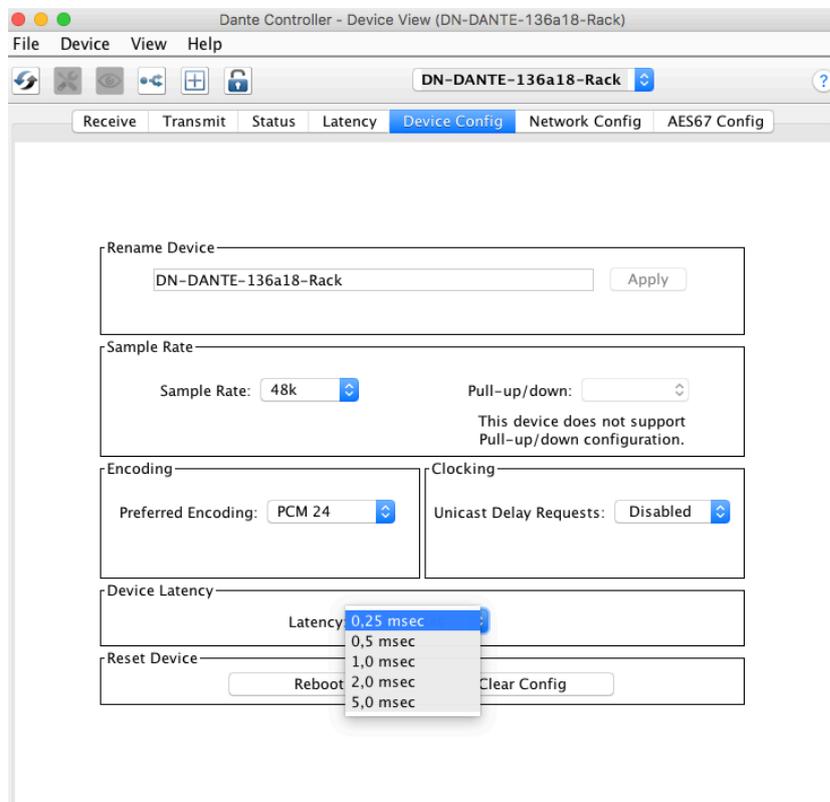


Abbildung 92 Dante Device Config

6.4.6.3 Ergebnisse

Der Einsatz des Switches hat für die Messungen keine Veränderung gebracht. Dieselben Messwerte wurden aufgezeichnet.

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	0,81	0,88	1.1
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	0,83	0,92	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,15	1,21	2.1
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,17	1,25	

Tabelle 31 Dante Messergebnisse ohne DSP und 0,25ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,15	1,23	1.2
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,17	1,27	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,48	1,56	2.2
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,50	1,60	

Tabelle 32 Dante Messergebnisse mit DSP und 0,25ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,06	1,12	1.1
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,08	1,16	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,65	1,71	2.1
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,67	1,75	

Tabelle 33 Dante Messergebnisse ohne DSP und 0,5ms Latency Setting

6 Messtechnische Untersuchung

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,40	1,48	1.2
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,42	1,52	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,98	2,06	2.2
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,00	2,10	

Tabelle 34 Dante Messergebnisse mit DSP und 0,5ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,56	1,62	1.1
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,58	1,66	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,65	2,71	2.1
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,67	2,75	

Tabelle 35 Dante Messergebnisse ohne DSP und 1,0ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,90	1,98	1.2
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	1,92	2,02	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,98	3,06	2.2
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	3,00	3,10	

Tabelle 36 Dante Messergebnisse mit DSP und 1,0ms Latency Setting

6 Messtechnische Untersuchung

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,56	2,62	1.1
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,58	2,64	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	4,65	4,69	2.1
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	4,67	4,53	

Tabelle 37 Dante Messergebnisse ohne DSP und 2,0ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,90	2,98	1.2
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	2,92	3,02	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	4,98	5,06	2.2
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	5,00	5,10	

Tabelle 38 Dante Messergebnisse mit DSP und 2,0ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	5,56	5,62	1.1
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	5,58	5,66	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	10,65	10,73	2.1
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	10,67	10,77	

Tabelle 39 Dante Messergebnisse ohne DSP und 5,0ms Latency Setting

	Latenz [ms] / 48kHz	Latenz [ms] / 44,1kHz	
X32 XLR IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	5,90	6,00	1.2
X32 AUX IN -> Dante -> X32 Rack XLR Out	5,92	6,04	
X32 Rack XLR In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	10,98	11,08	2.2
X32 Rack AUX In -> Dante -> X32 Rack XLR Out	11,00	11,12	

Tabelle 40 Dante Messergebnisse mit DSP und 5,0ms Latency Setting

6.5 Evaluierung und Interpretation

Mittels der Untersuchung des Mischpultes konnte die Latenz ermittelt werden, die das Behringer X32 bzw. das X32 Rack verursacht. Mit Hilfe des Blockschaltbildes konnte genau festgestellt werden welches Routing zur minimalsten Latenz führt. Mit den richtigen Einstellungen konnte somit die Latenz für die reine AD- / DA-Wandlung ermittelt werden. Die Ergebnisse sind beachtlich niedrig mit 0,50ms / 48kHz bzw. 0,54ms / 44,1kHz. Auch beim Einsatz des DSP's besticht das Mischpult mit einer niedrigen Eigenlatenz von nur 0,83ms bei 48kHz und 0,90ms bei 44,1kHz. Die reine DSP Zeit beträgt demnach nur 0,33ms beim Einsatz von den internen Dynamics, EQ, Gate natürlich ohne den Insert-Effekten. Es wurde festgestellt, dass die AD-/DA-Wandlung über die AUX-Wege (AUX-In zu XLR- oder AUX-Out) konstant 20µs/48kHz bzw. 40µs/44,1kHz bei allen durchgeführten Messungen dauert. Demnach werden die Latenzunterschiede der einzelnen Protokolle mit der Messvariable XLR In -> XLR Out verglichen, da diese auch den größten Praxisbezug bieten. Mittels einer Differenzrechnung lässt sich nun die genaue Latenz der einzelnen Netzwerkprotokolle berechnen.

$$Latenz_{Protokoll} = Latenz_{Gemessen} - Latenz_{Mischpult}$$

	AES50		Waves SoundGrid		Dante	
	Ohne DSP	Mit DSP	Ohne DSP	Mit DSP	Ohne DSP	Mit DSP
Variante 1	0,10 ms	0,11 ms	0,83 ms	0,84	0,31 ms	0,32 ms
Variante 2	0,21 ms	0,19 ms	1,71 ms	1,71 ms	0,65 ms	0,65 ms

Tabelle 41 Tatsächliche Latenzzeit der Netzwerkübertragung bei 48kHz

6 Messtechnische Untersuchung

Da bei Dante mehrere Latenzeinstellungen einstellbar sind, wurde bei diesem Vergleich die minimalste Einstellung mit 0,25ms berücksichtigt. Die minimalen Schwankungen zwischen den Werten ohne DSP/mit DSP lassen sich wahrscheinlich auf kleine Taktschwankungen zurückführen. Dies konnte jedoch nicht genauer analysiert werden. Die Mittelwertbildung dieser Ergebnisse wird in folgender Grafik dargestellt.

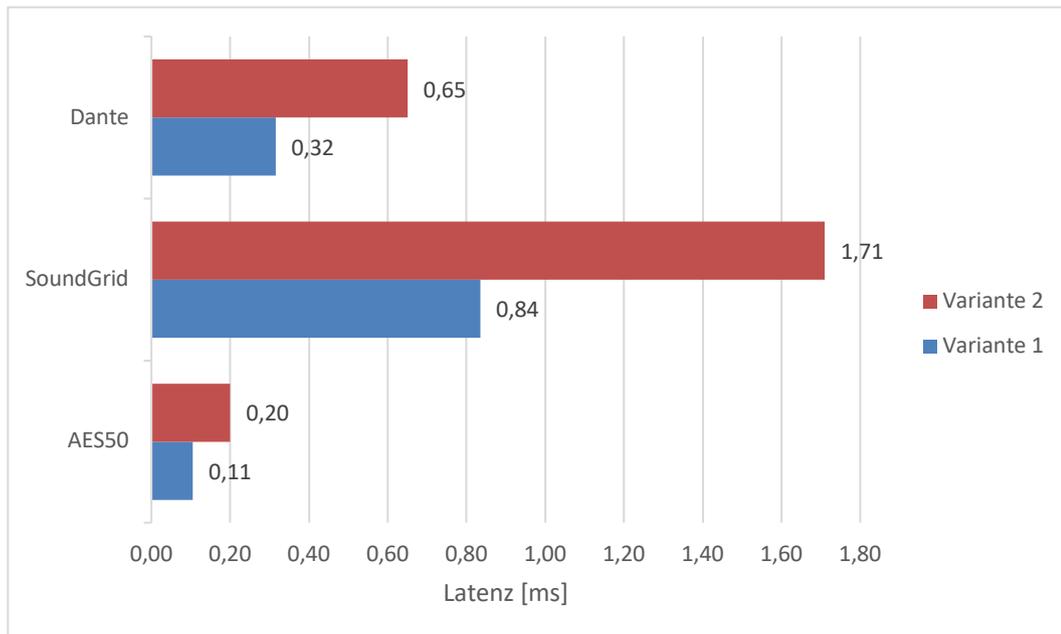


Abbildung 93 Latenzzeiten der Netzwerkprotokolle bei 48kHz

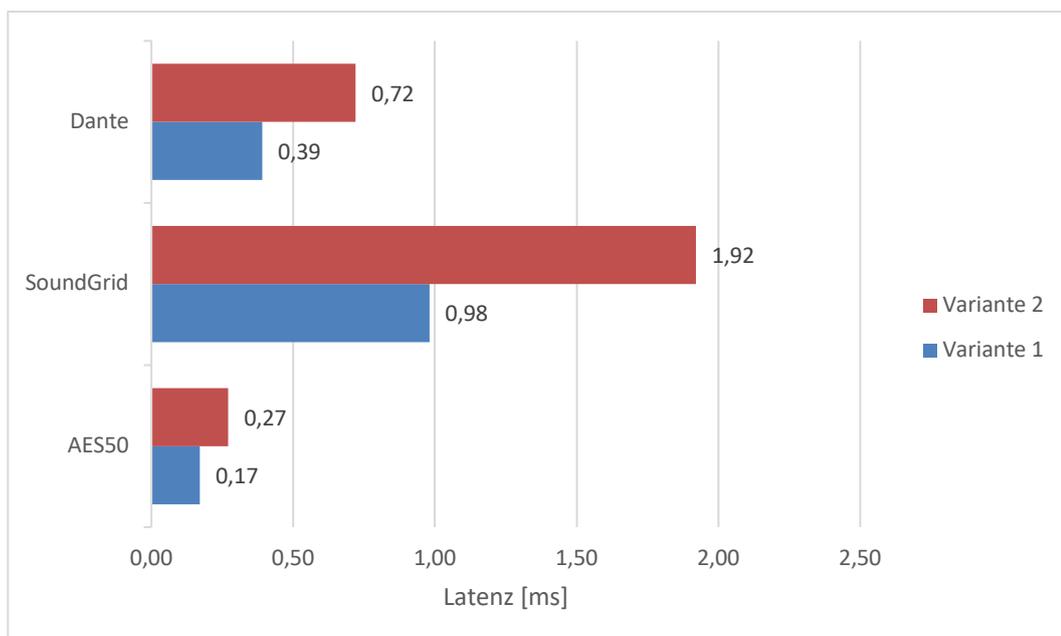


Abbildung 94 Latenzzeiten der Netzwerkprotokolle bei 44,1kHz

6 Messtechnische Untersuchung

Es lässt sich gut erkennen, dass bei Variante 2 die Latenzzeit fast doppelt so hoch ist. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei Variante 1 die Audiopakete nur in eine Richtung (vom X32 zur Stagebox) übertragen werden. Bei Variante 2 hingegen werden die Pakete von der Stagebox einmal hin zum FOH und dann wieder retour transportiert. Gut erkennbar ist auch der Latenzunterschied bei der Verwendung verschiedener Samplerates. Man erkennt deutlich, je höher die Samplerate, desto niedriger die Latenz.

Die durchgeführte Messvariante 2 hat den besten Praxisbezug. Deshalb können in folgender Grafik auch die Latenzen der einzelnen Protokolle verglichen werden. Wie auch viele behaupten, ist AES50 das schnellste Protokoll. Dies lässt sich auf die Point-to-Point Verbindung auf Layer 1 zurückschließen. Eine genaue Datenstrom-Analyse war leider nicht möglich da keine Switches oder Hubs unterstützt werden. Beachtlich ist jedoch, dass Dante schneller als SoundGrid ist. Obwohl SoundGrid auf Layer 2 beheimatet ist, ist das Layer 3 Protokoll Dante um 1,06ms schneller. Der langsamere Transport über SoundGrid könnte aufgrund der Verkapselung in das Ethernet-Paket sein.

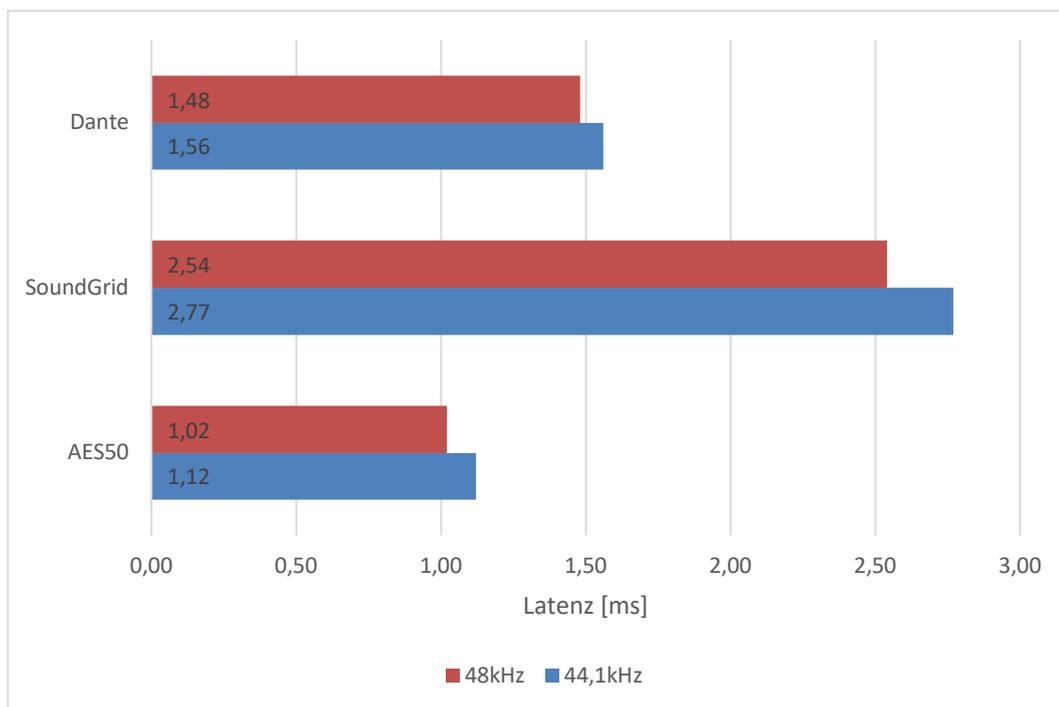


Abbildung 95 Latenzzeiten der Netzwerke mittels Variante 2

7 Fazit

Dieses Kapitel dient dazu, um die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenzufassen und auf die Erkenntnisse der Untersuchung hinzuweisen. Mit Hilfe der messtechnischen Untersuchung konnten die Latenzunterschiede zwischen OSI-Layer 1, Layer 2 und Layer 3 Audio-Netzwerke gemessen und verglichen werden. Es wurden darüber hinaus nicht nur wertvolle Erkenntnisse zu den Latenzen einzelner Protokolle, sondern auch interessante Informationen zum Datenstrom gewonnen. Wie es Slavik schon behauptet hat, ist in dieser Untersuchung das Layer 1 Netzwerk AES50 das schnellste gewesen. Mit einer reinen Netzwerkübertragungslatenz von ca. 0,10ms ist das ein beachtlicher Wert. Bemerkenswert ist jedoch, dass ein Layer 3 Netzwerk, welches per UDP auf IPv4 Basis seine Datenpakete verkapselt schneller ist als ein Layer 2 Netzwerk. Obwohl es Latenzunterschiede zwischen den Netzwerkprotokollen gibt, kann man nicht behaupten, dass dadurch AES50 das beste Protokoll sei. Es ist das schnellste, jedoch ist es nicht so flexibel und erweiterbar wie Dante oder SoundGrid oder andere Protokolle. Je nach Anwendungsfall muss hier gut abgeklärt werden, welche Features notwendig sind. Mit Dante als Layer 3 Protokoll ist man aber auf jeden Fall auf der sicheren Seite im Sinne von Zukunftssicherheit im Bereich Live-Sound bzw. Fixinstallation. Laut einer Studie von RH Consulting ist Dante das „Go-To“ Netzwerk für viele Audioingenieure. 80% der Befragten wählten Dante als „das Audio-Netzwerk für non-networkers“ aus, aufgrund der einfachen Handhabung. Im Gegensatz dazu wählten nur 6% Ravenna, 4% EtherSound, 7% AVB und 3% Cobranet aus. (Hemming, 2017) Weiters kann gesagt werden, dass mittels AES67 ein wichtiger Schritt in Richtung Interkompatibilität zwischen den Protokollen vorgenommen wurde. Jedoch beschreibt es nur Richtlinie, die dazu führen sollen, dass verschiedene Protokolle untereinander Audiodaten übertragen können. Weiters spielt natürlich die Latenz für die Musiker insbesondere eine sehr wichtige Rolle. Anhand der gewonnenen Messergebnisse kann jedoch beruhigt gesagt werden, dass all diese drei Protokolle im Normalfall keine negativen Auswirkungen auf die Performance der Musiker haben können aufgrund ihrer niedrigen Latenzen. Da SoundGrid mittels Plugin-Inserts in Multitrack eine deutliche höhere Latenz erreichen kann, muss dieser spezielle Einsatz dann gut durchdacht werden. So wäre es möglich, dass der Einsatz eines SoundGrid Netzwerkes für In-Ear

Monitoring Zwecke zu hohe Latenzen verursacht und somit der Musiker auf der Bühne diese Verzögerungszeit wahrnimmt. Jedoch ist das laut Lester & Boley von Musiker zu Musiker unterschiedlich.

Audio-Netzwerke werden immer mehr zum Einsatz kommen, deshalb soll diese Arbeit einen Einblick in diese Materie liefern und dabei helfen die notwendigen Netzwerk-Basics zu lernen. Aufgrund der begrenzten Anzahl für Expansion Cards konnten hier nur AES50, SoundGrid und Dante analysiert werden. Jedoch wäre es denkbar in einer weiteren Arbeit auch andere Netzwerkprotokolle zu untersuchen und zu vergleichen. Aufgrund von technischen Limitierungen ist es derzeit noch nicht möglich Dante über WiFi zu übertragen. Interessant jedoch wäre die Untersuchung der neu entwickelten In-Ear Lösung von Audiofusionsystems.com. Mittels ihrer Software ist es möglich bis zu 16 Kanäle im Low-Latency-Betrieb über ein lokales 5GHz WiFi Netz zu mehreren iOS Device gleichzeitig zu übertragen. Die Analyse der technischen Umsetzung könnte dabei helfen herauszufinden, welche Änderungen vorgenommen werden müssen damit auch Audio-Netzwerkprotokolle ihre Daten über WiFi zuverlässig übertragen können.

Literaturverzeichnis

Altrichter, T. (2014). *Ethernet-basierte lokale Audionetzwerke im Vergleich hinsichtlich ihrer Technologie und Anwendungsmöglichkeiten* (HFF Konrad Wolf). Abgerufen von https://opus4.kobv.de/opus4-filmuniversitaet/files/178/BA_4905_Altrichter_EthernetAudionetzwerke_Weblayout.pdf

Audio Engineering Society. (2015, September 21). *AES standard for audio applications of networks - High-performance streaming audio-over-IP interoperability*. Audio Engineering Society, Inc.

Aviom. (2009). *Managing Jitter, Wander, and Latency in Digital Audio Networks*.

Bakker, R., Cooper, A., & Kitagawa, A. (2014). *Einführung in die Audiovernetzung*. Abgerufen von http://download.yamaha.com/api/asset/file/?language=en&site=countrysite-master.prod.wsys.yamaha.com&asset_id=47401

Bauch, R. (2008). *Netzwerke Grundlagen*.

Behringer. (2012, Oktober 30). *Digital Mixer X32*. Behringer.

Bennet, S. (2009, Dezember 7). *Digital Network & Transmission Protocols*. Abgerufen von https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/Digital_Network_and_Transmission_Protocols_dec_09.pdf

Bouillot, N., Cooperstock, J. R., Floros, A., Fonseca, N., Foss, R., Goodman, M., ... Zanghieri, U. (2009, Juni 4). *Best Practices in Network Audio*. Technical Committee on Network Audio Systems.

CobraNet Programmer's Reference. (2006, Februar). Abgerufen von https://d3uzseaevmutz1.cloudfront.net/pubs/manual/CobraNet_Programmer_Manual_PM25.pdf

CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. (2018, April 26). Abgerufen 15. Februar 2019, von 1&1 Digitalguide website: <https://www.ionos.at/digitalguide/server/knowhow/csmaca-carrier-sense-multiple-access-with-collision-avoidance/>

CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection. (2018, April 26). Abgerufen 15. Februar 2019, von 1&1 Digitalguide website:

<https://www.ionos.at/digitalguide/server/knowhow/csmacd-carrier-sense-multiple-access-collision-detection/>

Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., & Wöhr, M. (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik* (8., überarbeitete und erweiterte Auflage). Berlin: De Gruyter Saur.

EtherSound networks Overview. (o. J.). Nexo. Abgerufen von https://www.gtaust.com/downloads/nexo/Nexo_Ethersound_Overview.pdf

Halpin, L. (2016). *Deploying Dante Networks in Live Events*. 33.

Hemming, R. (2017, Februar). *Audio Networking Horse Race 2017*. Abgerufen von <https://www.audinate.com/sites/default/files/PDF/audio-networking-trends-2017-feb-roland-hemming-pres.pdf>

Hempel, T. (o. J.). Schichtenmodelle. Abgerufen 27. Juli 2018, von <https://tinohempel.de/info/info/netze/osi.htm>

Heyden, M. (2012a). *Untersuchung von Qualitätsparametern ethernetbasierter Audionetzwerke*. Abgerufen von <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2016110211376>

Heyden, M. (2012b). *Untersuchung von Qualitätsparametern ethernetbasierter Audionetzwerke*. Abgerufen von <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2016110211376>

Hildebrand, A. (2010, November). *Networked Audio: Aktuelle Entwicklungen & Technologische Perspektiven für den Broadcast- Markt*. Abgerufen von https://www.ravenna-network.com/app/download/11950417123/TMT-2010_Manuskript-Hildebrand-DB5.pdf?t=1516788339

Köhre, T. (2005). *Wireless LAN: das kabellose Netzwerk ; 10 maßgeschneiderte Workshops*. München: Markt-+ -Technik-Verl.

Kuzmowicz, R. (2015). *Ein Tutorial für Anwender von RAVENNA- / AES67-Netzwerken*. Hochschule Mittweida.

Lerch, A., & Weinzierl, S. (2008a). Digitale Audiotechnik: Grundlagen. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik*. Springer.

Lerch, A., & Weinzierl, S. (2008b). Kapitel 14 - Digitale Audiotechnik: Grundlagen. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik*. Springer.

Lester, M., & Boley, J. (2007, Oktober 5). *The Effects of Latency on Live Sound Monitoring*.

Lipinski, K. (2014, Jänner 21). S/N (Signal-Rausch-Verhältnis). Abgerufen 13.

- April 2018, von S/N (Signal-Rausch-Verhältnis) website:
<https://www.itwissen.info/Signal-Rausch-Verhaeltnis-S-N-signal-to-noise-ratio-SNR.html>
- Metter, M., & Bucher, R. (2007). *Industrial Ethernet in der Automatisierungstechnik: Planung und Einsatz von Ethernet-LAN-Techniken im Umfeld von SIMATIC-Produkten* (2., überarb und erw. Aufl). Erlangen: Publicis Corp. Publ.
- Midas Klark Technik. (2010, September). *PRO Series Live Audio Systems - Owner's Manual*. Abgerufen von
<https://www.manualslib.com/manual/648241/Midas-Pro-Series.html>
- Nocker, R. (2004). *Digitale Kommunikationssysteme 1: Grundlagen der Basisband-Übertragungstechnik*. Abgerufen von
<http://link.springer.com/openurl?genre=book&isbn=978-3-528-03976-9>
- Rayburn, R. (o. J.). Bundle Assignments in CobraNet Systems | CobraNet HOME. Abgerufen 7. April 2019, von
https://www.cobranet.info/support/design/bundle_assignments
- Schmidt, K. (2016). *Netzwerke Grundlagen: mit HERDT BuchPlus*.
- Schnabel, P. (2016a). *Netzwerktechnik-Fibel: Grundlagen Netzwerktechnik ; Übertragungstechnik ; TCP/IP ; Anwendungen und Dienste ; Netzwerk-Sicherheit* (4. Aufl). Ludwigsburg.
- Schnabel, P. (2016b). *Netzwerktechnik-Fibel: Grundlagen, Übertragungssysteme, TCP/IP, Dienste ...*
- Schnabel, P. (o. J.-a). FireWire / IEEE 1394 / i.Link. Abgerufen 9. Jänner 2019, von <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/com/0808111.htm>
- Schnabel, P. (o. J.-b). Twisted-Pair-Kabel (UTP / FTP / STP). Abgerufen 11. Oktober 2018, von Twisted-Pair-Kabel (UTP / FTP / STP) website:
<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0603191.htm>
- Schnabel, P. (o. J.-c). Übertragungsmedium. Abgerufen 11. Oktober 2018, von Lichtwellenleiter (LWL/Glasfaser) website: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0211192.htm>
- Slavik, K. M. (2017a). *Grundlagen und Fakten zu Audio-Netzwerken*.
- Slavik, K. M. (2017b). *Grundlagen und Fakten zu Audio-Netzwerken*. vdt(4).
- SoundGrid vs. AVB Comparison Table*. (2015). 2.
- Stotz, D. (2011). *Computergestützte Audio- und Videotechnik: Multimediatechnik*

in der Anwendung (2. Aufl). Berlin: Springer.

Switch (Ethernet). (o. J.). Abgerufen 13. März 2019, von <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0811021.htm>

TCP/IP. (2019, Februar 19). Abgerufen 19. Februar 2019, von <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0606251.htm>

TCP-Kommunikation. (2019). Abgerufen 27. Februar 2019, von <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/2009211.htm>

Walker, A. (2011, Juli). *AES50 - Applications in Live Concert Sound*. Abgerufen von http://www.aes-media.org/sections/uk/Conf2011/Presentation_PDFs/07%20-%20AI%20Walker%20-%20Applications%20in%20Live%20Convert%20Sound.pdf

Watkinson, J. (2001). *The art of digital audio* (3rd ed). Oxford ; Boston: Focal Press.

Waves SoundGrid Audio-over-Ethernet Networking & Processing Platform. (2010, Oktober 5). Abgerufen von <https://www.fullcompass.com/common/files/12568-WhitePaper.pdf>

Weinzierl, S., & Verband Deutscher Tonmeister (Hrsg.). (2008). *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer.

Werwein, M., & Schick, M. (2008). Wandler, Prozessoren, Systemarchitektur. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik*. Springer.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Das Wort "Ich" als zeit- und wertekontinuierliches Signal (Links) und als zeit- und wertediskretes Signal (Rechts) dargestellt. (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 6)	3
Abbildung 2 Kontinuierliche und diskrete Signale (Watkinson, 2001, S. 218)	4
Abbildung 3 Notwendige Schritte für eine A/D-Wandlung	5
Abbildung 4 Analoges Signal mit diskreten Abtastwerten (Kuzmowicz, 2015, S. 7)	5
Abbildung 5 Aufbau einer Sample and Hold Schaltung (Stotz, 2011, S. 41)	6
Abbildung 6 Sample and Hold Darstellung	6
Abbildung 7 Links: Bsp. für Spiegelfrequenzen innerhalb der Bandbreite des Originalsignals; Rechts: kein Aliasing-Effekt durch Tiefpassfilterung (Werwein & Schick, 2008, S. 887)	7
Abbildung 8 Abtastung mit normaler Abtastrate (oben) und mit doppelter (unten)	8
Abbildung 9 Beispiel für eine Quantisierungskennlinie mit 8 Stufen (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 668)	9
Abbildung 10 Links: Originalsignal; Rechts: Quantisiertes Signal mit einer Auflösung von 4 Bit (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 792)	10
Abbildung 11 Quantisierungsfehler plus/minus einer halben Stufe (Heyden, 2012a, S. 9)	11
Abbildung 12 Beschreibung des Quantisierungsfehlers $q(n)$ (Lerch & Weinzierl, 2008b, S. 791)	11
Abbildung 13 Vergleich Störabstand zu Quantisierungsstufen (Heyden, 2012a, S. 10)	12
Abbildung 14 Codierung Blockschaltbild	13
Abbildung 15 Links: Spiegelung des Nutzsinal-Spektrums nach der D/A Wandlung. Rechts: Ausgangssignal nach der Tiefpassfilterung (Werwein & Schick, 2008, S. 887)	15

Abbildung 16 notwendige Schritte um ein Signal fehlerfrei zu rekonstruieren (Lerch & Weinzierl, 2008a, S. 790).....	16
Abbildung 17 Darstellung einer Bus-Topologie.....	20
Abbildung 18 Darstellung einer Ster-Topologie	21
Abbildung 19 Darstellung einer Ring-Topologie	22
Abbildung 20 Darstellung Stern-Bus-Netz	23
Abbildung 21 Darstellung Stern-Stern-Netz.....	23
Abbildung 22 Darstellung Baum-Netz.....	24
Abbildung 23 Darstellung Maschennetz	24
Abbildung 24 U/UTP	26
Abbildung 25 S/UTP	26
Abbildung 26 F/UTP.....	26
Abbildung 27 U/FTP.....	26
Abbildung 28 S/FTP.....	27
Abbildung 29 SF/FTP.....	27
Abbildung 30 Aufbau eines LWL.....	29
Abbildung 31 Prinzip eines Lichtwellenleiter.....	30
Abbildung 32 Aufbau eines Monomode-Glasfaserkabels.....	31
Abbildung 33 Aufbau einer Multimode-Glasfaser mit Stufenindex.....	32
Abbildung 34 Aufbau einer Multimode-Glasfaser mit Gradientenindex	32
Abbildung 35 Lichtwellenleiter Klassifizierung Quelle: https://www.black-box.at/at-at/page/35551/Ressourcen/Technische-Ressourcen/Produkt-Ubersichten/Auswahlhilfe-fur-Glasfaserkabel	33
Abbildung 36 RJ45 Stecker (Rechts) + EtherCon-Stecker (Links)	39
Abbildung 37 Belegung nach Standard T568A.....	40
Abbildung 38 Belegung nach Standard T568B.....	40
Abbildung 39 Unterschiedliche LWL-Stecker Quelle: http://www.haedrich.de/faktendaten_lwlstecker.htm (aufgerufen am 22.01.19).....	43

Abbildung 40 DoD-Schichtenmodell	45
Abbildung 41 OSI-7-Schichtenmodell (Kuzmowicz, 2015)	47
Abbildung 42 IEEE 802 Einteilung	50
Abbildung 43 IEEE 802 Projekte.....	50
Abbildung 44 CSMA/CD Ablaufdiagramm (Quelle: https://www.ionos.at/digitalguide/server/knowhow/csmacd-carrier-sense- multiple-access-collision-detection/)	53
Abbildung 45 Darstellung einer Kollisionsdomäne.....	54
Abbildung 46 Strukturierte Verkabelung	65
Abbildung 47 Aufbau eines Ethernet-Frames	66
Abbildung 48 Übertragung der Daten mittels Datenkapselung.....	67
Abbildung 49 Datenkapselung am Beispiel des Schichtenmodells	67
Abbildung 50 Protokollverkapselung eines Audioprotokolls in Ethernetframes...68	
Abbildung 51 Verbindung mehrerer Hubs miteinander.....	69
Abbildung 52 Einsatz eines Routers (Quelle: https://www.elektronik- kompendium.de/sites/net/1404181.htm).....	72
Abbildung 53 Trunking Redundanzkonzept.....	74
Abbildung 54 Ring Redundanzkonzept.....	75
Abbildung 55 Spanning Tree Redundanzkonzept mit doppelten Switches	75
Abbildung 56 Referenz Taktgenerator im Vergleich zu einem Taktgenerator mit Jitter (Weinzierl & Verband Deutscher Tonmeister, 2008, S. 1010).....	79
Abbildung 57 Auswirkungen von Jitter auf die Übertragung eines digitalen Signals (Aviom, 2009).....	79
Abbildung 58 Vergleich zwischen Jitter-Signal (rotes Signal) und Ideal-Signal (blaues Signal). (Aviom, 2009)	80
Abbildung 59 Auswirkungen durch das weitergeben von Jitter (Aviom, 2009)....	81
Abbildung 60 Latenzen in digitale Systeme	82
Abbildung 61 IEM Good Rating, All Instruments.....	83
Abbildung 62 Wedge Good Rating, All Instruments.....	84

Abbildung 63 Prinzip einer Taktung in digitalen Audio-Netzwerken (Slavik, 2017b)	85
Abbildung 64 Variable Sampleraten von A-Net	91
Abbildung 65 Blockschaltbild für die Datenstrom-Analyse von Waves SoundGrid	95
Abbildung 66 Datenstrom von Waves SoundGrid	96
Abbildung 67 EtherSound Synchronisierung	97
Abbildung 68 Aufbau eines EtherSound Frames	97
Abbildung 69 Primary Master EtherSound	98
Abbildung 70 Latenz Berechnung EtherSound	100
Abbildung 71 Master-Selektierung bei Dante	103
Abbildung 72 Synchronisierungs Drift zwischen CobraNet und Dante	104
Abbildung 73 Dante Datenstrom Analyse (Heyden, 2012a)	106
Abbildung 74 Prinzipieller redundanter Aufbau von Ravenna	108
Abbildung 75 Ravenna Eigenschaften	108
Abbildung 76 AES67 QoS Klassen und DiffServ	113
Abbildung 77 AES67 Link offset	113
Abbildung 78 Allgemeiner Messaufbau	116
Abbildung 79 Latenzmessung mittels der angeschlossenen Signale	117
Abbildung 80 Allgemeiner Messaufbau mit verwendeter Technik	118
Abbildung 81 I-O Config Smaart	118
Abbildung 82 Signal Generator Smaart	119
Abbildung 83 TF Measurement Settings in Smaart	119
Abbildung 84 Settings Latenzmessung Smaart	120
Abbildung 85 Messaufbau für die Latenzmessung der digitalen Mischpulte	120
Abbildung 86 Blockschaltbild Behringer X32	122
Abbildung 87 Messaufbau für die Latenzmessung der Netzwerkprotokolle	127
Abbildung 88 Waves SoundGrid Messaufbau	131

Abbildung 89 Waves SoundGrid Studio Patch	131
Abbildung 90 Dante Messaufbau.....	134
Abbildung 91 Dante Routing Beispiel	135
Abbildung 92 Dante Device Config.....	135
Abbildung 93 Latenzzeiten der Netzwerkprotokolle bei 48kHz.....	140
Abbildung 94 Latenzzeiten der Netzwerkprotokolle bei 44,1kHz.....	140
Abbildung 95 Latenzzeiten der Netzwerke mittels Variante 2.....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der Klassen und Kategorien von Twisted Pair-Kabel (Schnabel, o. J.-b)	28
Tabelle 2 WLAN Standards	36
Tabelle 3 Verschiedene RJ Stecker und ihre Einsatzgebiete	39
Tabelle 4 FireWire Übertragungsgeschwindigkeiten	42
Tabelle 5 Gegenüberstellung diverser Schnittstellen.....	44
Tabelle 6 Zusammenhang zwischen TCP/IP und OSI.....	58
Tabelle 7 Unterteilung von TCP-IP	60
Tabelle 8 Beispiele für verschiedene Netzmasken.....	61
Tabelle 9 Kabellängen bei Ethernet-Verbindungen zwischen Stationen	65
Tabelle 10 Unterschied der verschiedenen Switching-Verfahren	71
Tabelle 11 Classes of service im QoS.....	77
Tabelle 12 Relation zwischen Entfernung und Latenz.....	82
Tabelle 13 AES50 Verbindung.....	89
Tabelle 14 Vergleich zwischen AES50 (SuperMAC) und HyperMAC.....	90
Tabelle 16 Vergleich verschiedener Audio-Netzwerke	111
Tabelle 17 Latenzmessung X32 ohne DSP	123
Tabelle 18 X32 Messung mit DSP	124
Tabelle 19 X32 Effects Rack Latency.....	126
Tabelle 20 AES50 Messung ohne DSP (Variante 1.1).....	128
Tabelle 21 AES50 Messung mit DSP (Variante 1.2)	129
Tabelle 22 AES50 Messung ohne DSP (Variante 2.1).....	129
Tabelle 23 AES50 Messung mit DSP (Variante 2.2)	129
Tabelle 24 AES50 Messergebnisse ohne DSP	130

Tabelle 25 AES50 Messergebnisse mit DSP.....	130
Tabelle 26 Waves SoundGrid Messung ohne DSP (Variante 1.1)	132
Tabelle 27 Waves SoundGrid Messung mit DSP (Variante 1.2)	132
Tabelle 28 AES50 Messung ohne DSP (Variante 2.1)	132
Tabelle 29 AES50 Messung mit DSP (Variante 2.2)	132
Tabelle 30 Waves SoundGrid Messergebnisse ohne DSP	133
Tabelle 31 Waves SoundGrid Messergebnisse mit DSP.....	133
Tabelle 32 Dante Messergebnisse ohne DSP und 0,25ms Latency Setting	136
Tabelle 33 Dante Messergebnisse mit DSP und 0,25ms Latency Setting.....	136
Tabelle 34 Dante Messergebnisse ohne DSP und 0,5ms Latency Setting	136
Tabelle 35 Dante Messergebnisse mit DSP und 0,5ms Latency Setting.....	137
Tabelle 36 Dante Messergebnisse ohne DSP und 1,0ms Latency Setting	137
Tabelle 37 Dante Messergebnisse mit DSP und 1,0ms Latency Setting.....	137
Tabelle 38 Dante Messergebnisse ohne DSP und 2,0ms Latency Setting	138
Tabelle 39 Dante Messergebnisse mit DSP und 2,0ms Latency Setting.....	138
Tabelle 40 Dante Messergebnisse ohne DSP und 5,0ms Latency Setting	138
Tabelle 41 Dante Messergebnisse mit DSP und 5,0ms Latency Setting.....	139
Tabelle 42 Tatsächliche Latenzzeit der Netzwerkübertragung bei 48kHz.....	139