

MASTERARBEIT

Silent Concert -

Konzeption und Umsetzung eines 3D-Kopfhörer-Konzerts



Studiengang Audiovisuelle Medien

Hochschule der Medien

Masterarbeit

im Studiengang Audiovisuelle Medien

Silent Concert - Konzeption und Umsetzung eines 3D-Kopfhörer-Konzerts

Vorgelegt von Maria Härtwig und Dominik Stuhler

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 10. Juli 2018

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Engineering.

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Boris Michalski

Praxisbetreuer: Tobias Raunigk

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichern wir, Maria Härtwig und Dominik Stuhler, ehrenwörtlich, dass wir die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Silent Concert - Konzeption und Umsetzung eines 3D-Kophörer-Konzert" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

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

Stuttgart, den 09. Juli 2018

Stuttgart, den 09. Juli 2018

Maria Härtwig

Dominik Stuhler

Kurzfassung

Silent Discos sind Tanzveranstaltungen, bei denen auf eine Beschallungsanlage verzichtet und dafür jeder Gast mit einem Funkkopfhörer ausgestattet wird. Da dieses Konzept zahlreiche Vorteile mit sich bringt, erfreut es sich immer größer werdender Beliebtheit. Auch eine Erweiterung auf den Live-Musik-Bereich ist immer häufiger zu erleben. Wegen der Benutzung von Kopfhörern bietet sich die Möglichkeit der binauralen Wiedergabe an, was zu einem natürlicheren Klangerlebnis führen und kreativ genutzt werden kann.

Diese Arbeit untersucht anhand einer praktischen Umsetzung, wie ein binaurales Kopfhörer-Konzert durchgeführt werden kann. Dabei wird beschrieben, welche Anforderungen und Schwierigkeiten auftreten und welche Optionen es gibt. Im Fokus stehen dabei die Erläuterung von Zusammenhängen technischer, physikalischer und kreativer Art. Es wurde ein Ansatz entwickelt, wie eine 3D-Mischung durch eine Kombination aus Hard- und Software entstehen kann, bei dem die Bedienung mittels digitalem Mischpult im Mittelpunkt steht.

Das Konzert fand am 13.04.2018 im ClubCANN, Stuttgart, mit den Bands Matija und Bitte Benimm Dich statt.

Abstract

Silent Discos are dance events at which wireless headphones are used instead of a PA system. Because this concept has many advantages, it is gaining more and more in popularity and even live concerts make use of this system. Additionally, since headphones are being used, there is the option of integrating binaural sound, which allows for a more natural and creative sound experience.

On the basis of a practical production this thesis examines how a binaural headphone concert can be executed and describes the requirements, problems that can occur and the available options. The focus is on the explanation of technical, physical and creative circumstances. An approach to create a 3D mix using a combination of hard- and software, with a digital mixer as the centerpiece, was developed.

The Silent Concert with the bands Matija and Bitte Benimm Dich was held at ClubCANN, Stuttgart, on April 13, 2018.

Danksagung

Wir möchten uns ganz besonders bei nachfolgenden Sponsoren und Firmen für die großzügige Unterstützung bedanken:

Silent Events, KLANG:technologies, Kemper Amps, Allen&Heath, ClubCANN, Yetiplanet, MIPRO, Crystal Sound, Lofelt, Thomann

Unser herzlicher Dank gilt unserem Praxisbetreuer Tobias Raunigk, der uns stets mit Rat und Tat (und Technik) zur Seite stand! Rock on!

Zusätzlich wollen wir unseren Helfern für ihr großartiges Engagement danken:

Darko Veric, Ingo Gebhardt, Matthias Landenberger, Justen Deifel, Timo Plewnia, Jan Bieletzki, Yannick Weber, Ianik Beitzel, Philipp Burkhardt, Alex Keck, Alex Slolav, Prof. Oliver Curdt

Ein besonderer Dank geht auch an die Bands - ihr habt gerockt!

Matija

Matt Kovac

Jan Salgovic

Johann Blake

Sami Salman

Quirin Kirchleitner (Management)

Bitte Benimm Dich

Benedikt Vogler

Tilo Ehmann

Gerry Slade

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Danksagung	VI
1. Einleitung	1
2. Silent Disco	3
2.1. Vergleich von Lautsprecher- und Kopfhörerwiedergabe	3
2.2. Tiefe Frequenzen	5
2.3. Geschichte	5
2.4. Silent Concert	6
3. Besonderheiten und Schwierigkeiten eines Silent Concerts	7
3.1. Reduktion/Vermeidung von Bühnenschall - „Silent Stage“	7
3.2. E-Gitarren	7
3.2.1. Silencer / Load-Box	8
3.2.2. Ampsimulation	8
3.3. Kemper Profiling Amp	9
3.4. Schlagzeug	14
3.5. Ambience Mics	14
4. Räumliches Hören	16
4.1. Psychoakustische Parameter	16
4.1.1. Interaurale Laufzeitdifferenzen	18
4.1.2. Interaurale Pegeldifferenzen	19
4.1.3. Entfernungslokalisation	21
4.1.4. Im-Kopf-Lokalisation	22
4.2. Auditive Wahrnehmung	23
5. 3D Audio	28
5.1. Funktionsprinzipien	29
5.1.1. Vector Base Amplitude Panning	29
5.1.2. Ambisonics	31
5.1.3. Wellenfeldsynthese	33
5.2. 3D-Audio Wiedergabeformate	38
5.2.1. Auro 3D	38
5.2.2. Dolby Atmos	39

5.2.3. Iosono	41
6. Binaurale Technik	42
6.1. Funktionsweise	42
6.1.1. HRTF - Head Related Transfer Function	42
6.1.2. BRIR - Binaural Room Impulse Response	44
6.1.3. Binaurale Raumsynthese	44
6.1.4. Kunstkopfstereofonie	48
6.1.5. Messung kopfbezogener Impulsantworten	50
6.1.6. Diffus-und Freifeldentzerrung von Kopfhörern	52
6.2. Überblick aktueller Binauraltechnologien	57
6.2.1. KLANG:technologies GmbH	57
6.2.2. Ambeo Orbit.....	62
6.2.3. Cingo	64
6.2.4. Spatial Audio Designer	65
7. Ethernet-basierte Audionetzwerke	67
7.1. Grundlagen der Netzwerktechnologie digitaler Audiodaten	69
7.1.1. Hardware	69
7.1.2. Das OSI-Referenzmodell	69
7.1.3. Grundlagen der Datenstruktur	71
7.1.4. Netzwerkinfrastruktur	72
7.2. Audinate Dante	74
8. Vorbereitung des binauralen Kopfhörerkonzertes	78
8.1. Musikalische Auswahlkriterien	78
8.2. Die Wahl der Veranstaltungsstätte	80
8.3. Vorproduktion	82
8.3.1. Probe mit Matija	83
8.3.2. Mischpult	83
8.3.3. Drumset	84
8.3.4. Gitarren & Synthesizer	85
8.3.5. Elody	85
8.3.6. KLANG:fabrik	87
8.3.7. Schlussfolgerungen	88
8.3.1. Probe mit Bitte Benimm Dich	90
8.3.1. Funkkopfhörer „Neon Lights“ und stationäre Sender	90
8.4. Finanzierung	92
8.4.1. Vorkalkulation	92
8.4.2. Sponsoren	93

8.4.1. Kostenaufstellung	94
8.5. Kommunikation und Vermarktung	96
9. Mischung	98
9.1. Mischen in Stereo	98
9.2. Mischen in Surround.....	103
9.3. PA-Mix vs Studio-Mix.....	106
9.4. Mischen mit Kopfhörern	107
9.5. Subwoofer	108
9.6. Sonderfall Kopfhörer-Konzert.....	109
9.7. Static Binaural Mixing - Grundlagen.....	110
9.7.1. Wiedergabe	112
9.7.2. Probleme beim binauralen Mischen	112
9.8. Static Binaural Mixing am Beispiel „Justify Your Love“ von Matija	114
10. Umsetzung des Silent Concerts	123
10.1. Technisches Setup	123
10.2. Timetable & Ablauf.....	125
10.3. Technische Gegebenheiten.....	126
10.4. GLD-80 als MIDI-Controller der KLANG:app	126
10.5. Alternatives Setup	132
10.6. Monitoring	133
10.7. Live-Mischung von Bitte Benimm Dich.....	135
10.8. Live-Mischung von Matija.....	137
11. Fazit und Ausblick.....	140
Quellenangaben	141
Abbildungsverzeichnis	148
Angabe des Verfassers	152

Glossar

ADAT	Alexis Digital Audio Tape - digitale Schnittstelle zum Übertragen von Audiosignalen
CAT 5, CAT 6, CAT 7	Leistungsklassen von Netzkabeln
Cocktailparty-Effekt	Der Cocktailparty-Effekt beschreibt die Fähigkeit sich in einer geräuschintensiven Umgebung auf eine bestimmte Schallquelle zu fokussieren und die irrelevanten Geräuschanteile auszublenden [5].
DAW	Digital Audio Workstation - computergestütztes System für Tonaufnahmen, Musikproduktionen, Abmischungen und Mastering
dB	Dezibel - logarithmische Verhältnissgröße zur Angabe von Pegel und Pegeldifferenzen
distal	lat. <i>distare</i> ‚entfernt sein‘ - vom Körperzentrum entfernt
distinkt	klar und deutlich/abgegrenzt
FOH	Front Of House, Tonmischplatz bei Live-Konzerten
Hz	Hertz - physikalische Einheitsgröße für die Frequenz (Schwingungsanzahl pro Zeitspanne) Sie gibt die Anzahl sich wiederholender Vorgänge pro Sekunde in einem periodischen Signal an.
I/O	Abk.: Input/Output - Eingang/Ausgang
kBit	Kilobit = 1000 Bit - Größenordnung von Datenübertragungsraten

kHz	Kilohertz, 1000 Hertz
LFE	Low Frequency Effects, Effektkanal für Bassinhalte bei Surroundmischungen
MBit	Megabit = 1000 kBit - Größenordnung von Datenübertragungsraten
MAC-Adresse	Media-Access-Control-Adresse - Hardware-Adresse, die als eindeutige Identifikation eines Netzwerksegments dient
MADI	Multi Channel Audio Digital Interface - digitale Schnittstelle zum Übertragen von mehrkanaligen Audiosignalen
PA	Public Address, Beschallungsanlage
Panning	Verteilung von Audiospuren im Stereo-Panorama
proximal	lat. <i>proximus</i> ‚nächster‘ - zum Körperzentrum hin - Dieses Schallereignis wird am Trommelfell unter Berücksichtigung der kopfbezogene Übertragungsfunktion registriert
sequentiell	aufeinanderfolgende Schallereignisse - horizontale Gruppierung
simultan	gleichzeitige Schallereignisse, vertikale Gruppierung
spatial	lat. <i>spatium</i> ‚Raum‘ - räumlich
Sweet Spot	Optimale Abhörposition bei Beschallung mit Lautsprechern in einem Stereodreieck

1. Einleitung

Die Bässe dröhnen, die Höhen schmerzen und am nächsten Tag dieses schrecklich laute Fiepen in den Ohren - ein ganz normaler Club-Besuch eben und keine Seltenheit für einen begeisterten Nachtschwärmer. Da muss man wohl durch, meint man. Nicht mehr, wie wir jetzt wissen.

Immer beliebter werden Veranstaltungen wie „Silent Discos“, bei welchen der Zuhörer musikalisch mit Kopfhörern beschallt wird, nicht zuletzt um Ruhestörungen bei Veranstaltungen im Freien zu vermeiden. In den letzten Jahren wurde dieses System um eine ausschlaggebende Komponente erweitert. Auch Live-Konzerte finden immer mehr mit der Beschallung über Kopfhörer statt. Dabei kann mittels Binauraltechnologie ein natürliches, dreidimensionales Klangerlebnis realisiert werden, ohne dabei spürbare Latenzen zu verursachen. Zahlreiche Vorteile bietet diese Methode nicht nur für ruheliebende Nachbarn einer Konzerthalle. Auch das Publikum selbst profitiert davon. Durch die Möglichkeit der individuellen Lautstärkeanpassung kann jedem Zuhörer eine ihm angenehme Beschallung gewährleistet werden. Zudem garantiert diese Technologie einen ausgeglichenen Musik-Mix für alle Zuhörer, sodass auch Tontechniker keine Probleme mehr haben, den Sweet Spot möglichst groß zu halten. Wie aufwendig ist dabei die Anschaffung der Technik? Welche neuen Systeme sind dafür notwendig und was verändert sich bei der Arbeit als Tontechniker? Wie natürlich und angenehm empfindet das Publikum die neue Hörerfahrung? Ist das Konzept „3D-Kopfhörerkonzert“ für kommerzielle Veranstaltungen überhaupt tragbar? Mit dieser Arbeit soll diesen Fragen nachgegangen werden. Dafür wurde ein binaurales Kopfhörerkonzert mit zwei Bands organisiert, welches im (semi-)kommerziellen Rahmen in einer Konzerthalle, dem ClubCANN in Stuttgart, stattfand. Der Einsatz neuester Technologien ermöglichte ein Echtzeit-Rendering dreidimensionaler Inhalte. Neben Herausforderungen der Setup-Konfiguration standen auch betriebswirtschaftliche Aspekte im Vordergrund, um die Umsetzung in einem kommerziellen Rahmen stattfinden zu lassen. Alle Grundlagen zum Verständnis dieser Bereiche soll in

vorliegender Arbeit erörtert werden. Im zweiten Teil wird die Versuchsvorbereitung und Umsetzung mit allen Schwierigkeiten und Lösungsansätzen beschrieben, sodass die Vorgehensweise der Umsetzung eines Silent Concerts nachvollzogen werden kann.

2. Silent Disco

Als „Silent Disco“ (auch „Kopfhörer-Disco“ oder „Silent Rave“ genannt) wird eine Veranstaltung bezeichnet, bei der die Teilnehmer zu Musik tanzen, die nicht mittels einer Beschallungsanlage, sondern über Kopfhörer übertragen wird. In der Regel handelt es sich dabei um kabellose Kopfhörer, in die ein Funkempfänger eingebaut ist. Alternativ gibt es auch portable Funkempfänger, in die der Partygast eigene Kopfhörer einstecken kann. Wer keinen Kopfhörer trägt, hört keine Musik, sodass der Eindruck von in Stille tanzenden Menschen entsteht.

2.1. Vergleich von Lautsprecher- und Kopfhörerwiedergabe

Die Kopfhörerwiedergabe im Allgemeinen bringt gegenüber der Lautsprecherwiedergabe einige Vorteile mit sich: Man ist vollständig unabhängig von der Raumakustik des Abhörraums, sodass eine einheitliche Abhörsituation überall geschaffen werden kann. Durch die Nähe der Membran zum Ohr kann eine hohe Lautstärke erzeugt werden, ohne Unbeteiligte zu stören, was auch eine hohe Dynamik ermöglicht. Insgesamt wird das Hörerlebnis über Kopfhörer als besonders intensiv empfunden. Aufgrund der geringen zu bewegendenden Massen der Membran lässt sich eine hohe Impulstreue vergleichsweise einfach realisieren.¹

Trotz der vielen Vorteile ist die Verwendung von Kopfhörern zur Kontrolle von Aufnahmen und zum Mischen im professionellen Tonstudiobereich eher unüblich. Die Ausnahme bilden für Lautsprecherwiedergabe ungeeignete Raumsituationen, beispielsweise bei Außenaufnahmen oder einer lärmerfüllten Umgebung. Die Gründe liegen in einer Reihe von Nachteilen, welche die professionelle Arbeit erheblich einschränken:

Während bei (zweikanaliger) Wiedergabe die Lokalisation vor dem Zuhörer stattfindet, d.h. im Lautsprecher bzw. zwischen zwei Lautsprechern als Phantom-

¹ Vgl. Dickreiter, S. 211

schallquelle, kommt es bei Kopfhörerwiedergabe zur „Im-Kopf-Lokalisation“. Ein Mono- oder Stereomittensignal wird dabei in der Mitte des Kopfes wahrgenommen, bzw. seitlich verschoben bei Intensitäts- oder Laufzeitdifferenzen. „Bei reiner Intensitätsstereofonie und Kopfhörerwiedergabe werden die Seitenschallquellen unnatürlich dicht an den beiden Ohren gehört“.² Eine Beurteilung von Stereobasis und Räumlichkeit ist deshalb nur bedingt möglich.

Das Fehlen des räumlichen Bezugs kann als Vorteil gesehen werden, allerdings entspricht es nicht unseren natürlichen Hörgewohnheiten. Durch die Anordnung der Schallquellen auf einem Winkel von ± 90 Grad direkt auf der Ohrmuschel, werden Stereoproduktionen, die für eine Lautsprecherabhörsituation mit einem Öffnungswinkel von ± 30 Grad ausgerichtet sind, unnatürlich breit dargestellt. Als lästig kann sich das Tragen des Kopfbügels und die Kopfbezogenheit des Klangbildes erweisen, also das Mitwandern der Schallquellen bei Kopfbewegungen.

Eine Kopfhörerbeschallung bei Veranstaltungen bietet gegenüber der herkömmlichen Beschallung durch Lautsprecher den großen Vorteil, dass die Lärmbelästigung Außenstehender durch Musik entfällt. Daher sind Kopfhörerveranstaltungen besonders bei Freiluftfestivals beliebt, um Musikbeschallung auch zu späterer Stunde zu ermöglichen.

Weitere Vorteile sind die individuelle Einstellmöglichkeit der Abhörlautstärke und die Unabhängigkeit des Klangs vom Aufenthaltsort. Außerdem ist es möglich, dem Zuhörer auf verschiedenen Kanälen verschiedene Signalquellen zu liefern, sodass dieser sich zum Beispiel zwischen den Mixen dreier DJs entscheiden kann.

Pro Stereokanal wird ein Sender benötigt. In Deutschland senden diese typischerweise auf dem genehmigungsfreien UHF-Band zwischen 863 - 865 MHz. Dabei ist eine Reichweite von bis zu 100 Metern zu erwarten und es können theoretisch mehrere tausend Kopfhörer verbunden werden.

² Dickreiter, S. 211

2.2. Tiefe Frequenzen

Ein vermeintlicher Nachteil solcher Kopfhörerübertragungssysteme ist die unzulängliche Basswiedergabe. Bässe, also Frequenzen zwischen 16 und 150 Hz werden vom Menschen nicht nur über die Ohren, sondern mit dem ganzen Körper wahrgenommen - das „Spüren“ des Basses ist ein integraler Bestandteil eines Discobesuchs. Sofern keine Subwoofer oder „Bass-Shaker“ eingesetzt werden, die Vibrationen ohne Schalldruck spürbar machen, ist fehlender Körperschall unumgänglich. Entgegengehalten werden kann jedoch, dass so gerade die Intensität und Klarheit des Stereo-Kopfhörersounds umso mehr zu genießen sind.

2.3. Geschichte

Erstmals Bezug zu einer Tanzveranstaltung, bei der die Gäste Kopfhörer tragen, nimmt der finnische Science-Fiction-Film „Ruusujen Aika“ aus dem Jahr 1969.³ Erste Silent Discos wurden in den 1990er-Jahren von Öko-Aktivisten durchgeführt, die zum Wohle der wilden Tierwelt die Lärmbelastung minimieren wollten.⁴ Größere Bekanntheit erreichte das Konzept im Jahr 2005, als bei den Glastonbury und Bonnaroo Festivals (zwei der größten Festivals in Großbritannien bzw. den USA) Silent Discos stattfanden. Heute ist es bei Musikfestivals nicht unüblich, zu späterer Stunde Silent Discos zu veranstalten. Doch dank zahlreicher Firmen, die das entsprechende Equipment zum Mieten anbieten, erfreut sich das Prinzip auch Beliebtheit bei Privatveranstaltungen.

In den letzten Jahren wurde es üblich, auf zwei bis drei Kanälen Streams verschiedener DJs anzubieten. Der Hörer kann dabei an seinem Kopfhörer wählen, was er hören möchte. Häufig leuchten die Kopfhörer dann in einer entsprechenden Farbe, sodass jeder erkennen kann, was der andere hört. Das führt einerseits zu

³ Vgl. Johnston [Stand: 03.07.2018]

⁴ Vgl. Stern [Stand: 03.07.2018]

einer Art Wettstreit zwischen den DJs, da jeder möchte, dass die meisten seinen Mix hören. Andererseits wird dadurch möglich, dass Menschen auf der Tanzfläche miteinander tanzen, die verschiedene Musikrichtungen hören. Bei Privatveranstaltungen, wie etwa Hochzeiten, können so auch verschiedene Musikrichtungen für verschiedene Generationen angeboten werden.

2.4. Silent Concert

Ein Silent Concert, oder auch Kopfhörer-Konzert, ist eine Weiterentwicklung der Silent Disco. Hierbei wird Livemusik statt von verschiedenen Medien abgespielter Musik übertragen. Die nach Aussage der Band weltweit ersten Kopfhörerkonzerte spielten 1999 die amerikanische Psychedelic-Rockband The Flaming Lips. Dabei wurden den Zuschauern kleine Kompaktradios und ein paar kostengünstiger Kopfhörer ausgehändigt. Das Ziel war dabei ausdrücklich nicht, die übliche Lautsprecherbeschallung zu ersetzen, sondern zu ergänzen. So wurden Panoramafahrten möglich und der Gesang konnte klarer gehört werden, ohne dass die Basswahrnehmung beeinträchtigt wurde.⁵ Da die Besucher die Radios sehr laut aufdrehen mussten, um mit der PA-Beschallung mitzuhalten, stellte dies jedoch eine enorme Belastung für das Gehör des Publikums dar.

Im Gegensatz zu Silent Discos steht hierbei weniger die Individualität, die durch die Wahlfreiheit der Musik gegeben ist, sondern das Kollektiv im Vordergrund, da alle Gäste dieselbe Musik hören.

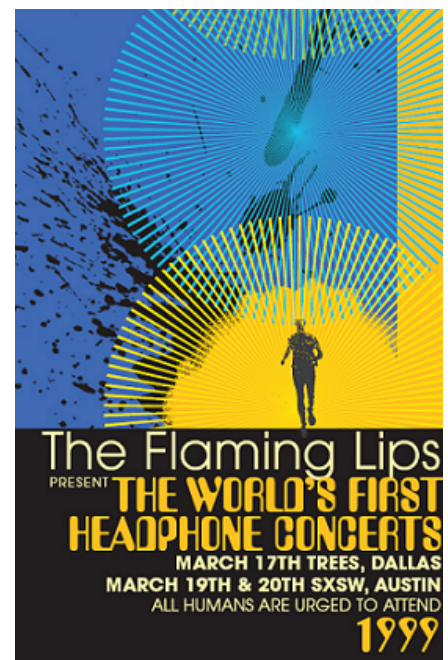


Abb. 1: Kopfhörerkonzert-
Plakat der "Flaming Lips" von
1999

⁵ Vgl. Chun [Stand: 03.07.2018]

3. Besonderheiten und Schwierigkeiten eines Silent Concerts

3.1. Reduktion/Vermeidung von Bühnenschall - „Silent Stage“

Während bei einer klassischen Silent Disco vom DJ kein Lärm produziert wird, ist das bei einem Live-Konzert einer Band anders. Schlagzeug und Gitarrenverstärker sorgen für einen beträchtlichen Schallpegel auf der Bühne, den natürlich auch das Publikum hört. Grundsätzlich ist es möglich, das typische Rockband-Setup unverändert auf der Bühne spielen zu lassen und die Lautsprecherbeschallung durch Kopfhörer zu ersetzen. Doch dabei wird das Prinzip, eine möglichst leise Veranstaltung durchzuführen, grundlegend verletzt. Wer die Kopfhörer abnimmt, hört einen verwaschenen Bandmix und das bei kleineren Venues in einer gehörigen Lautstärke. Auch Anwohner und andere potenzielle Opfer von Lärmbelästigung bleiben so kaum verschont.

Das Konzept, die Bühne so leise wie möglich zu gestalten, heißt „Silent Stage“. Das Ziel des seit etwa 20 Jahren bekannten Prinzips war der ursprüngliche Gedanke, die Ohren der Musiker zu schonen - In-Ear-Monitoring war zu dieser Zeit für die wenigsten Musiker erschwinglich. Heute zählt In-Ear-Monitoring (IEM) schon fast zum Standard im professionellen Live-Monitoring und ein an den Gehörgang angepasstes IEM-System erreicht eine Außengeräuschreduktion von 25-30 dB.⁶

3.2. E-Gitarren

Jeder E-Gitarrist stellt den für sich am besten geeigneten Sound an seinem Verstärker ein und möchte, dass seine Gitarre im Mix möglichst genauso klingt. Deswegen ist es übliche Praxis, den Lautsprecher, der an den Verstärker

⁶ KLANG:technologies: KLANG BRINGS NATURAL MONITOR SOUND TO SILENT STAGE [Stand: 03.07.2018]

angeschlossen ist, per Mikrofon abzunehmen. Oftmals verwenden Gitarristen Röhrenverstärker, da diese einen speziellen Klang haben. Leider haben diese die Eigenschaft, erst ab einer gewissen Lautstärke so zu klingen, wie der Musiker sich das vorstellt. Daher ist es nicht möglich, einfach den Verstärker leiser zu drehen und weiterhin per Mikrofon oder gar die Gitarre direkt (ohne Verstärker) abzunehmen, da der Verstärker einen enorm wichtigen Bestandteil des Sounds ausmacht. Es gibt aber zwei Methoden, den gewünschten Sound ohne Lautsprecher auf der Bühne zu erzeugen.

3.2.1. Silencer / Load-Box

Ein Silencer ist ein Gerät, dass zwischen den Lautsprecherausgang des Gitarrenverstärkers und den Eingang des Lautsprechers angeschlossen wird und in erster Linie dafür gedacht ist, den Pegel, der aus dem Lautsprecher kommt, zu reduzieren. Man kann diese Geräte aber auch zur „Lautsprecher-Simulation“ nutzen, d.h. das verstärkte Signal mit Line-Pegel abgreifen. In diesem Fall werden die Geräte auch häufig als Load-Box bezeichnet. Je nach Gerät sind dabei unterschiedliche Simulationsmuster verfügbar, sodass man eventuell seinen eigenen Lautsprecher als Simulation finden kann. Dieses Verfahren bietet zufriedenstellende Ergebnisse, doch der Sound unterscheidet sich mitunter stark von dem des mikrofonierten Lautsprechers.

3.2.2. Ampsimulation

Eine andere Variante ist die Simulation des Verstärkers mit oder ohne Lautsprecher. Ampsimulationen gibt es in den unterschiedlichsten Formen: Als Boden-Effektgerät, in Rackform oder in rein digitaler Form als Software auf dem Rechner. Die Qualität und die Vielfalt der einstellbaren Sounds variieren stark von Modell zu Modell.

Manche Gitarristen arbeiten ausschließlich mit Ampsimulationen, da diese neben dem heutzutage sehr guten Sound auch noch die Vorteile eines geringen Gewichts und geringem Platzbedarfs bieten. Insbesondere wenn man seinen Sound von Grund auf mit Ampsimulationen erstellt, kann dies eine sehr komfortable Lösung sein. Gitarristen jedoch, die ihren Sound nur mit ihrem eigenen Röhrenverstärker kreieren können, sind mit einfacheren Ampsimulationen oft unzufrieden. Abhilfe können hier spezielle Modelling Amps schaffen. Herkömmliche Varianten sind digitale Verstärker, die mittels Computertechnik verschiedene bekannte Verstärkermodelle nachahmen. Es gibt jedoch auch Modelle, die in der Lage sind, einen spezifischen Gitarrenverstärker inklusive aller Einstellungen zu simulieren, wie der Kemper Profiling Amp, der im Folgenden beschrieben wird.

3.3. Kemper Profiling Amp

Der Kemper Profiling Amp ist ein digitaler Modelling-Gitarrenverstärker und Effektprozessor, dessen Ziel es ist, verschiedene Gitarrenverstärker zu emulieren. Die Besonderheit gegenüber anderen Modelling-Amps ist die realitätsnahe Nachbildung jedes beliebigen Gitarrenverstärkers und Kombination mit einem Lautsprecher. Das sogenannte Kemper-„Profiling“-Verfahren macht das möglich.

Die Klangerzeugung eines Musikinstruments erfolgt in der Regel durch das Zusammenwirken eines Resonators, einer Anregung und einem Resonanzkörper bzw. Schallwandler. Mit der Anregung wird Anregungsenergie in das Instrument eingegeben, zum Beispiel durch den Bogen einer Geige oder das Mundstück einer Posaune. Die Resonatoren, wie etwa die Saiten einer Geige oder die variable Luftsäule einer Posaune, bestimmen die Grundfrequenz einzelner Töne. Die vom Instrument bereitgestellte Schwingungsenergie wird letztlich vom Schallwandler bzw. Resonanzkörper in Schallenergie transformiert, wobei dessen Geometrie und die verwendeten Materialien die akustischen Eigenschaften bestimmen und optimalerweise ein möglichst hoher Wirkungsgrad erzielt wird. Der Korpus einer

Geige oder der Trichter einer Posaune sind Beispiele für solche Resonanzkörper. Bei einem Gitarrenverstärker ist der Lautsprecher der Schallwandler.

Die wahrgenommene Qualität eines Musikinstruments wird wesentlich durch den vom Resonanzkörper beeinflussten Klangcharakter geprägt.

Der individuelle Klangcharakter eines Musikinstruments wird durch die sogenannten Formanten geprägt. Formanten sind die Konzentration akustischer Energie, also schmalbandige Anhebungen, in fixen Frequenzbereichen unabhängig vom Grundton. Da das menschliche Ohr sehr sensibel auf diese Formanten reagiert, fällt es auch Laien leicht, verschiedene Musikinstrumente am Klang zu erkennen.

Es wird also deutlich, dass das Klangbild eines Schallwandlers bzw. Resonanzkörpers anhand einer Vielzahl physikalischer Parameter definiert wird, sodass sich das Nachbilden eines exakt vorgegebenen Klangprofils sich als äußerst aufwendig erweist.

Besonders behandelt werden müssen elektrische Saiteninstrumente, im vorliegenden Fall elektrische Gitarren. Dabei werden die Schwingungen der Saiten von Tonabnehmern in elektrische Signale umgewandelt. Ein Gitarrenvorverstärker verstärkt diese Signale, die durch einen speziellen Lautsprecher in Schall umgewandelt werden. Die Kombination aus Gitarrenvorverstärker und -lautsprecher ist normalerweise nicht linear, sondern darauf abgestimmt, einen charakteristischen Klang zu formen. Die Wahl des Gitarrenverstärkers und -lautsprechers wird vom Gitarristen getroffen, um den Klang zu beeinflussen. Insbesondere wird häufig von einer Übersteuerung des Vorverstärkers Gebrauch gemacht, um einen verzerrten Klang zu erzielen. Die Abnahme des Gitarrensigs als Aufnahme bzw. Verstärkung über ein PA-System erfolgt daher üblicherweise durch ein Mikrofon, das sehr nah an die Membran des Lautsprechers platziert wird, was jedoch zu zusätzlichen Klangverfärbungen führt. Den originalen und ursprünglichen Klang der Kombination Gitarre-Gitarrenverstärker-Lautsprecher hört also nur der Instrumentalist selbst. Aufgrund ihrer Klangcharakteristik werden häufig Gitarrenverstärker auf Röhrenbasis gewählt, welche sich durch ihr hohes Gewicht und hohe Anfälligkeit als eher unpraktisch für Live-Konzerte, insbesondere Tourneen erweisen.

Beim Kemper Profiling Amp wird die Nachbildung eines exakten Verstärkerprofils dadurch ermöglicht, dass „der Schallwandler [...] mit einem einstellbaren Schwingungsprofil versehen [ist], bei dem mindestens ein Profilparameter durch ein Referenzprofil eines Referenzinstrumentes definiert ist“⁷.

Die Abnahme des Referenzmodells, das sogenannte „Profiling“, erfolgt durch die Messung verschiedener Impulsantworten und der Erstellung entsprechender Schwingungsprofile. Das Eigenprofil des Profiling Amps wird dann durch die Kombination der Schwingungsprofile und dazwischen geschalteten „trivialen Nichtlinearitäten“⁸ erzeugt. Spielt der Gitarrist nun auf dem Profiling Amp mit dem erstellten Profil und wird ihm das Signal via Monitorbox zur Verfügung gestellt, so hört er das Signal seines mikrofonierten Gitarrenverstärkerlautsprechers. Auch wenn dieser Klangeindruck auf Aufnahmen und bei Beschallungssituationen der primär vorherrschende ist, entspricht er doch nicht dem direkten Klang des Gitarrenlautsprechers, den der Gitarrist gewohnt ist. Durch ein von Kemper patentiertes Verfahren soll der erzeugte Klang eher dem Klang des Gitarrenlautsprechers entsprechen. Dafür wird „aus der Impulsantwort mittels Fourier-Transformation ein komplexer Frequenzgang bestimmt“⁹, welcher in Amplituden- und Phasengang zerlegt wird. Der Amplitudengang wird nun tiefpassgefiltert und anschließend mit dem (unveränderten) Phasengang zu einem modifizierten komplexem Frequenzgang kombiniert. Die letztlich mittels inverser Fourier-Transformation erzeugte modifizierte Impulsantwort erlaubt dem digitalen Klangwandler einen eher gewohnten Klang eines analogen Gitarrenverstärkers zu entsprechen. Veranschaulicht wird dies durch Betrachtung der **Abb. 2.2**, sie zeigt eine logarithmische Darstellung einer beispielhaften Impulsantwort (**Abb. 2.1**) eines digitalen Klangwandlers entsprechenden Amplitudengangs. Sichtbar wird eine starke und mit zunehmender Frequenz dichter werdende Welligkeit, die als störend wahrgenommen werden kann und aufgrund der Vielzahl von Einzelresonanzen auch

⁷ Deutsches Patent- und Markenamt (2008), S.1

⁸ Deutsches Patent- und Markenamt (2017), Absatz 0015

⁹ Deutsches Patent- und Markenamt (2017), Absatz 0020

mit Equalizern kaum reduziert werden kann.¹⁰ **Abb. 2.3** zeigt den Amplitudengang nach dem digitalen Tiefpassfilter. Deutlich wird, dass die Welligkeit insbesondere bei Frequenzen ab 4 kHz deutlich gemildert wird, während tiefere Frequenzen, die den wesentlichen Klangcharakter des Instruments ausmachen, viel weniger beeinflusst werden.¹¹

Das Ergebnis ist kaum mehr vom Original-Verstärker zu unterscheiden. Der Sound, gepaart mit unzähligen Einstellmöglichkeiten und der Mobilität machen den Kemper Amp zu einer Alternative für alle Studio- und Live-Gitarristen und zur ersten Wahl für das vorliegende Silent Concert. Denn neben einer sehr guten Klangqualität ist besonders wichtig, dass sich für die Gitarristen keine all zu großen Veränderungen im Spielgefühl und Handhabung ergeben.

¹⁰ Vgl. Deutsches Patent- und Markenamt (2017), Absatz 0046

¹¹ Vgl. ebd., Absatz 0047

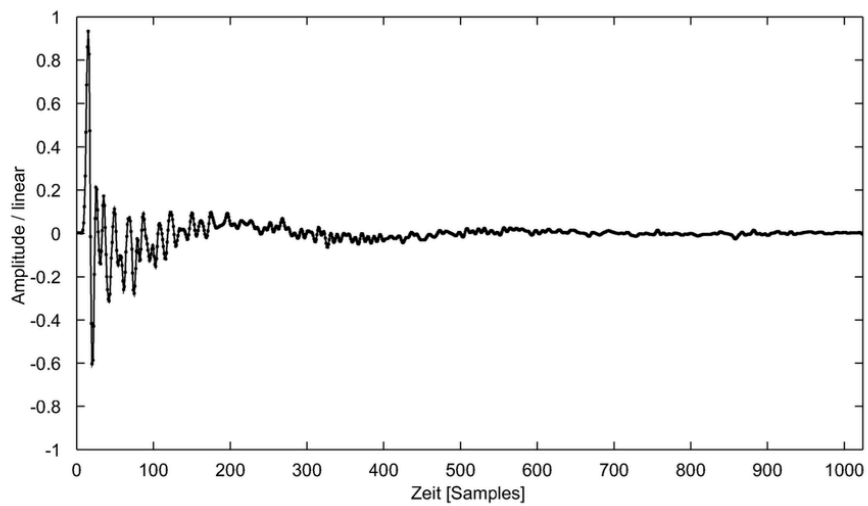


Abb. 2.1:
Beispielhafte
Impulsantwort
eines digitalen
Klangwandlers

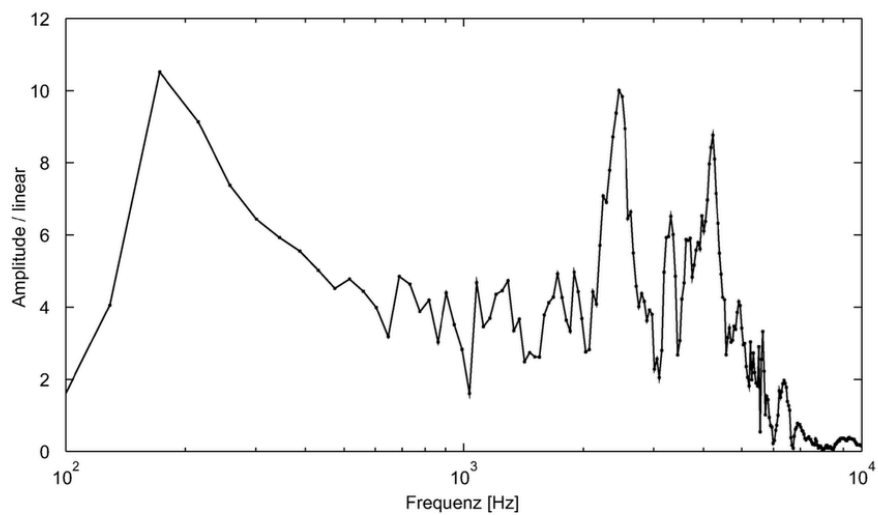


Abb. 2.2:
Logarithmische
Darstellung des der
Impulsantwort
entsprechenden
Amplitudengangs

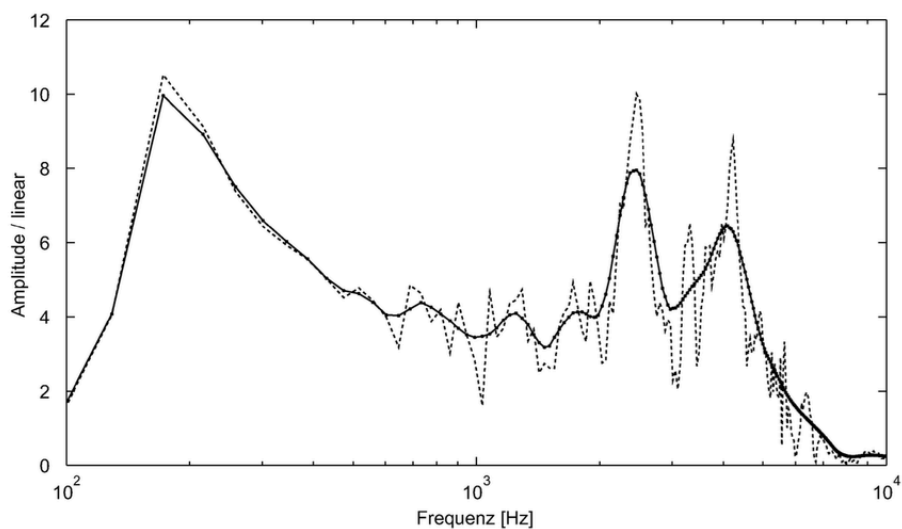


Abb. 2.3:
Amplitudengang
nach digitaler
Tiefpassfilterung

3.4. Schlagzeug

Ein akustisches Schlagzeug erreicht sehr hohe Schalldruckpegel und auch hier stellt ein „leiseres“ Spielen keine Option dar, da so die Trommeln und Becken eine andere Klangcharakteristik bekommen, als beim Spiel in forte. Hier hilft nur das Ersetzen der akustischen Klangkörper durch eine elektronische Alternative.

Günstige E-Drumsets bieten Gummipads als Trommellersatz, die mit einem Piezoabnehmer versehen sind, der ein MIDI-Signal sendet und so das Abspielen eines Samples am Computer auslöst. Diese stellen jedoch keine vernünftige Alternative zu einem akustischen Drumset dar, da sich das Spielgefühl zu stark unterscheidet. Eine bessere Möglichkeit sind sogenannte Meshheads, also besonders leise Felle, die auf einen speziellen Kessel aufgezogen werden, in dem sich die Piezoabnehmer befinden. Diese bieten ein kaum verändertes Spielgefühl gegenüber normalen Schlagzeugfellen. Außerdem ist es möglich mit Meshheads ein akustische Schlagzeug „umzubauen“ und so in ein elektronisches zu verwandeln. Dafür werden Triggerclips an den Meshfellen angebracht. Für die Becken werden typischerweise E-Drumbecken verwendet, die ähnlich den Gummipads aufgebaut sind.

3.5. Ambience Mics

Was In-Ear-Monitoring-Systeme auszeichnet ist die starke Außengeräuschisolation, die üblicherweise eine Absenkung von 18-24 dB, manchmal auch bis zu 37 dB erreicht. Damit verlieren die Musiker aber auch ein Stück weit das Gefühl für das Publikum, da dessen Reaktionen kaum noch gehört werden. Viele Monitormischer verwenden deshalb typischerweise zwei bis drei Ambience Mics, die die Reaktionen des Publikums einfangen sollen und nur auf die Monitore der Künstler gemischt werden. Im Optimalfall ist für den Musiker auch die Lokalisation auf dem Monitor richtig gegeben und die Ambience Mics werden zwischen den Songs lauter gefahren als während eines Songs, um den Instrumentenmix nicht zu „verwaschen“.

Beim Silent Concert ist auch das Publikum selbst von dieser Isolation betroffen. Um das Gefühl der Isoliertheit zu überwinden, ist auch das Mischen von Ambience Mics auf den Publikumsmix nötig. Die besondere Schwierigkeit bei einem binauralen Mix ist hierbei, das Gefühl für den Raum, in dem man sich befindet herzustellen. Es wäre zum Beispiel sehr merkwürdig, wenn man sich sehr nah an einem dieser Mikrofone rechts an der Bühne befindet und sich selbst von links hören würde. Umso wichtiger ist es also, bei der Mikrofonierung des Publikums darauf zu achten, dass nicht einzelne Spots besonders hervorgehoben sind und die Lokalisation eher grob stattfindet. Statt wie üblich die Ambience Mics vorne links und rechts an der Bühne anzubringen, bietet es sich beispielsweise an, vier Mikrofone mit Nierencharakteristik (statt wie oft Richtrohrencharakteristik) von der Decke hängen zu lassen und damit quasi einen „Surround“-Mix für das Publikum zu generieren.

4. Räumliches Hören

Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit den grundlegenden Merkmalen des räumlichen Hörens in Bezug auf psychoakustische Faktoren und neurologisch bedingte Fähigkeiten zur auditiven Wahrnehmung.

4.1. Psychoakustische Parameter

Die Richtungslokalisation einer Schallquelle ist innerhalb des auditiven Raumes (im Bereich des Wahrnehmbaren) sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene möglich. Dieser auditive Raum kann mit Hilfe eines dreidimensionalen Koordinatensystems beschrieben werden. Der *Azimut* gibt den Winkel auf horizontaler Ebene an, als *Elevation* wird der Winkel in vertikaler Richtung bezeichnet. Die *Entfernung* misst die Differenz zwischen Schallquelle und Zuhörer.

Abbildung 4 stellt die drei Dimensionen in einem kopfbezogenen Koordinatensystem dar.¹²

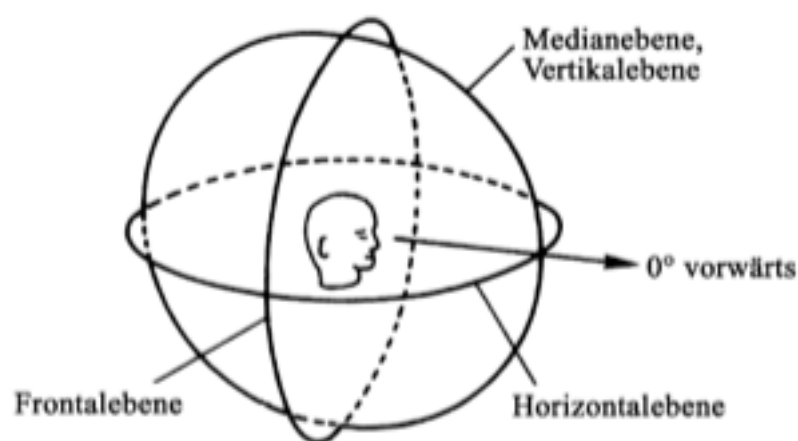


Abb. 3: Kopfbezogenes Koordinatensystem

¹² Vgl. Steckmann, S. 53

Die Grundlage für die Schallquellenlokalisierung bildet der Vergleich der an beiden Ohren eintreffenden Signale. Aus diesen Werten werden interaurale Laufzeit- und Pegeldifferenzen ermittelt, die dann zur Berechnung der Schallquellenposition verwendet werden.¹³ Für die Lokalisation in horizontaler Ebene werden die an beiden Ohren eintreffenden Signale auf Laufzeitdifferenzen und frequenzabhängige Pegelunterschiede geprüft. Auf der Medianebene wird die spektrale Veränderung analysiert und daraus der Erhebungswinkel der Schallquelle zu beiden Ohren analysiert. Auch bei der Vorn-Hinten-Ortung werden spektrale Merkmale genutzt. Die Lokalisation in der Frontalebene gelingt analog zur horizontalen Lokalisation durch Ermittlung der Laufzeit- und Pegelunterschieden zu beiden Ohren.¹⁴

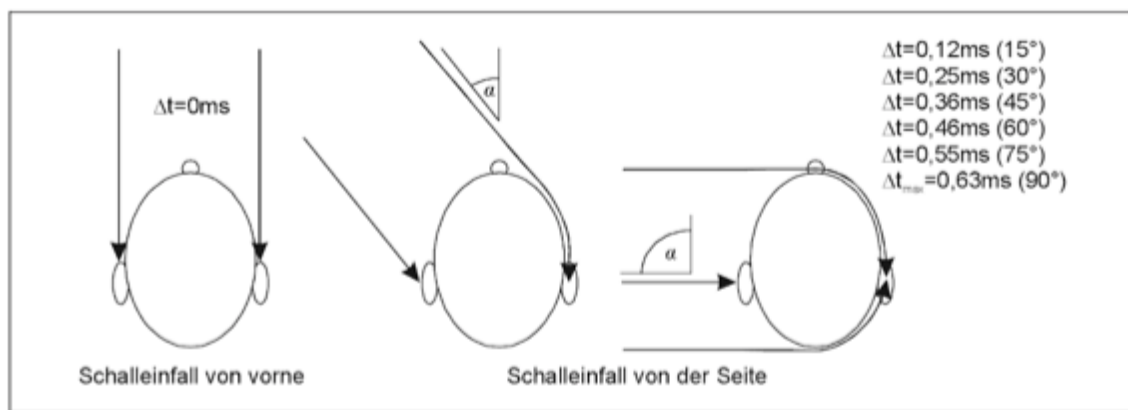


Abb. 4: Interaurale Laufzeitdifferenz mit verschiedenen Laufzeitunterschieden vom rechten zum linken Ohr (Δt)

Da die horizontale Ortung für den Menschen aus evolutionärer Perspektive mehr von Bedeutung war, ist diese Richtungslokalisierung wesentlich genauer ausgeprägt, als die der vertikalen Ebene.¹⁵

¹³ Vgl. Steckmann, S. 53

¹⁴ Vgl. Dickreiter, S. 128

¹⁵ Vgl. Guski, S. 273

4.1.1. Interaurale Laufzeitdifferenzen

Die Intensität des Schalldrucks ist auf beiden Ohren dann gleich, wenn sich eine Schallquelle äquidistant, also im gleichen Abstand zu beiden Ohren, befindet. Weicht die Schallquelle von diesem Mittelpunkt ab, so ergibt sich eine Entfernungsdifferenz des Signals zu beiden Ohren. Je größer die Abweichung der Entfernung ist, desto höher ist der Laufzeitunterschied des eintreffenden Schallereignisses zu beiden Ohren.¹⁶ Besonders von Bedeutung ist dabei das Gesetz der ersten Wellenfront. Das zuerst eintreffende Schallereignis bestimmt selbst dann noch den Richtungseindruck, wenn der Schallpegel später eintreffender Schallanteile (Reflexionen) bis 10 dB über dem des Direktschalls liegt und Laufzeitdifferenzen von 5-30 ms vorhanden sind.¹⁷

Das menschliche Ohr ist in der Lage Laufzeitunterschiede von bis zu 10 µs wahrzunehmen, ab ca. 30 µs kann jedoch erst eine neue Schallquellenposition bestimmt werden. Somit ist eine Lokalisationsunschärfe von 2 bis 3 Grad festzustellen. Den längsten Weg muss der Schall bei seitlichem Schalleinfall (90 Grad vom Blickwinkel versetzt) zurücklegen. Hier beträgt die maximalste Laufzeitdifferenz 630 µs. Da der Schall sowohl den vorderen Umweg (der Stirn entlang), als auch den hinteren Umweg (am Hinterkopf entlang) nutzt, kann es hier zu Ungenauigkeiten kommen, welche eine zielgenaue Lokalisation beeinträchtigt. Die Lokalisationsschärfe liegt hier nur bei 12 bis 18 Grad.¹⁸

Bei parallelem Schalleinfall gilt für den interauralen Laufzeitunterschied näherungsweise folgender Zusammenhang:

$$\Delta t = \frac{d \cdot \pi}{c} \cdot \frac{\alpha}{360^\circ}$$

¹⁶ Vgl. Friesecke, S. 134/135

¹⁷ Vgl. Dickreiter, S. 131

¹⁸ Vgl. Friesecke, S. 134f

Der interaurale Laufzeitunterschied Δt zwischen rechtem und linkem Ohr in Sekunden ergibt sich aus folgenden Komponenten: Dem Ohrabstand d in Metern, der Schallgeschwindigkeit c in Luft (344 m/s) und dem Einfallswinkel α der Schallquelle in Grad.¹⁹

Sowohl der Schwingungsverlauf als auch die Einhüllende der Schwingung geben Aufschluss darüber, welchen Umfang die zeitliche Differenz des Signals zu beiden Ohren besitzt. Für Frequenzen unterhalb von 800 Hertz (Abk. Hz) kann das Gehör anhand des Schwingungsverlaufes Informationen über Zeit- und Phasendifferenzen entnehmen. In höheren Frequenzbereichen, etwa über 1600 Hz, gibt nur noch der Vergleich der Hüllkurven an beiden Ohren Aufschluss über die zeitlichen Unterschiede. Je breitbandiger und impulshaltiger ein Schallereignis ist, umso genauer fällt die Lokalisation einer Schallquelle aus. Besonders natürliche Schallquellen, wie akustische Instrumente und Sprache, besitzen diese Eigenschaften und können dadurch im Gegensatz zu Sinussignalen wesentlich einfacher geortet werden.²⁰

4.1.2. Interaurale Pegeldifferenzen

Ist ein Ohr von einer Schallquelle abgewandt, so befindet es sich im Schallschatten. Grund dafür ist die Dämmung des Kopfes, die für eintreffende Schallwellen ein Hindernis darstellt. Der Kopf sorgt schließlich für einen verminderten Schalldruckpegel des im Schallschatten befindlichen Ohres.²¹

Die Schallabsorption des Kopfes ist dabei frequenzabhängig. Schallwellen unterhalb einer Frequenz von 300 Hz können sich um den Kopf herum beugen. Mit steigender

¹⁹ Vgl. Friesecke, S. 134

²⁰ Vgl. Dickreiter, S. 129

²¹ Vgl. Friesecke, S. 135

Frequenz nehmen auch die Pegelunterschiede der an beiden Ohren anliegenden Signale zu.²²

Die folgende Abbildung (**Abb. 5**) verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Einfallswinkel des Schalls und den daraus resultierenden Intensitätsunterschieden zwischen beiden Ohren. Je tiefer das Frequenzspektrum reicht, desto geringer wird der Unterschied der an beiden Ohren anliegenden Pegel. Bei einer Frequenz von 10 kHz kommt es dagegen bei einer seitlichen Schallquellenposition zu einem Intensitätsunterschied von 20 Dezibel (Abk. dB).²³

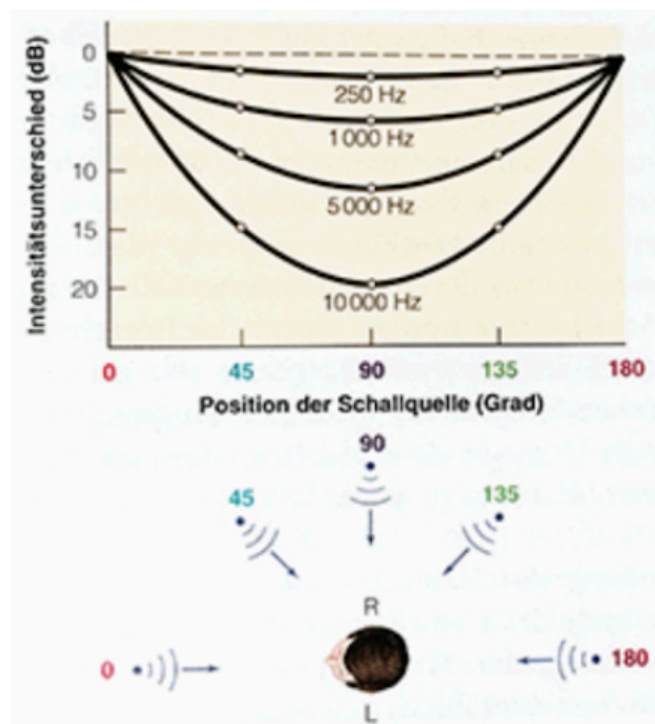


Abb. 5: Interaurale Pegeldifferenz unterschiedlicher Frequenzen bei verschiedenen Schalleinfallswinkeln

²² Vgl. Dickreiter, S. 130

²³ Vgl. Steckmann, S. 53

Eine weitere Komponente erleichtert die Ortung einer Schallquelle. Durch die Ohrmuscheln werden zusätzlich hohe Frequenzanteile gebündelt und ergeben je nach Einfallswinkel der Schallanteile einen Intensitätsunterschied. Es verändert sich also das Frequenzspektrum in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Schalls und gibt somit Aufschluss darüber, wo sich eine Schallquelle befindet.²⁴ Da die Form der Ohrmuscheln individuell variiert, besitzt jeder Mensch eine andere kopfbezogene Transferfunktion, die den Zusammenhang zwischen Frequenzspektrum und Einfallswinkel beschreibt.²⁵

4.1.3. Entfernungslokalisation

Zur Ortung einer Schallquelle ist neben den Pegel- und Laufzeitdifferenzen auch die Analyse der Entfernung von Schallquelle zum Empfänger von Bedeutung. In einer reflexionsfreien Umgebung, wie sie nur im Freien vorkommt, sind drei physikalische Eigenschaften für die Distanzwahrnehmung relevant. Mit zunehmender Entfernung verliert die Lautstärke einer Schallquelle an Intensität. Allgemein gilt im freien Schallfeld bei kugelförmiger Abstrahlung einer Schallquelle eine Pegelabnahme um 6 dB je Entfernungsverdopplung. Mit steigender Frequenz kommt es zunehmend zu einer gerichteten Schallausbreitung, die eine geringere Pegelabnahme je Entfernungsverdopplung hervorruft. Da eine Schallquelle meist verschiedene Frequenzkomponenten enthält, kommt es neben der Pegelverminderung zusätzlich noch zu einer Klangfarbenänderung. Tiefe Frequenzanteile werden mit wachsender Entfernung stärker pegelreduziert als Bestandteile mit steigender Frequenz. Verstärkt wird dieser Effekt zusätzlich durch den Umstand, dass unser Gehör mit abnehmendem Pegel tiefen Frequenzen unempfindlicher gegenüber ist. Diese Eigenschaft ist den Kurven gleicher Lautstärke zu entnehmen.²⁶ In reflektierenden

²⁴ Vgl. Dickreiter, S. 131

²⁵ Vgl. Steckmann, S. 54

²⁶ Vgl. Dickreiter, S. 132

Umgebungen, wie es Räume darstellen, wird das Verhältnis der Zeit- und Pegelunterschiede von Direktschall und den Schallwellen der Erstreflexion analysiert. Um so näher die Schallquelle am Empfänger ist, desto größer der Pegel des Direktschalls. Vergrößert sich hingegen der Abstand der Schallquelle zum Empfänger, desto geringer sind dessen Pegelintensitäten, während der Pegel des diffusen Schalls konstant bleibt. Daneben beeinflussen auch Informationen wie Raumvolumen und Nachhallzeit das Verhältnis von Direkt- und Diffusschall, weshalb auch Kenntnisse der akustischen Raumeigenschaften und Hörerfahrungen bei der Beurteilung einer Entfernungswahrnehmung in geschlossenen Räumen notwendig sind.²⁷ In reflexionsarmen Umgebungen ist es die Lautstärke des Direktschalls, welche die wichtigste auditive Information zur Schallortung enthält.²⁸

4.1.4. Im-Kopf-Lokalisation

Eine Im-Kopf-Lokalisation tritt typischerweise bei der Wiedergabe eines Signals über Kopfhörer auf. Dabei wertet das Gehör das eintreffende Schallereignis aus und vergleicht es mit bereits gespeicherten Reizmustern. Wenn dem Gehör dabei ungewohnte Ohrsignale vorliegen, kommt es zu Unstimmigkeiten in der Lokalisation. Dem auditiven System fehlen die bei natürlichen Schallquellen existierenden Schallinformationen zur Schallquellenlokalisierung, was zu einer im-Kopf-Lokalisation führt. Klangfarbenänderungen, die in der Natur bedingt durch den Winkel des eintreffenden Signals auftreten, fehlen hierbei als unterstützender Parameter zur Ortung der Schallquelle.²⁹ Die Folge sind Unstimmigkeiten in der Tiefenstaffelung von Schallereignissen und Komplikationen in der Ortung der Horizontal- und Medianebene. Panoramajustierungen werden unnatürlich wahrgenommen, da bei Abstrahlung eines Signals ausschließlich über den rechten

²⁷ Vgl. Dickreiter, S. 133

²⁸ Vgl. Guski, S. 276

²⁹ Vgl. Dickreiter, S. 134

Kanal bei Kopfhörerwiedergabe der Schalleindruck lediglich im rechten Ohr eintrifft. Bei Lautsprecherwiedergabe hingegen gelangen auch Direktschallanteile und Reflexionen an das „nicht betroffene“ Ohr.³⁰ Werden die für eine dreidimensionale Schallquellenlokalisation benötigten auditiven Informationen mit dem Kunstkopfverfahren (siehe Kapitel 6.1.4 *Kunstkopfstereofonie*) o.ä. ergänzend reproduziert, findet die Ortung des Schallereignisses außerhalb des Kopfes statt.³¹

4.2. Auditive Wahrnehmung

Das Wort Wahrnehmung beschreibt eine Tätigkeit, bei der wir kontinuierlich Informationen aus unserer umliegenden Umwelt aufnehmen und verarbeiten. Damit repräsentiert dieser Vorgang zwei Prozesse. Den der Informationsaufnahme, welcher durch die außerhalb unseres Körpers stattfindenden physikalischen Kriterien gekennzeichnet ist. Die für diese Arbeit relevanten Parameter wurden im Kapitel 4.1 *Psychoakustische Parameter* beschrieben. Der zweite Vorgang beschreibt die Informationsverarbeitung, deren Grundsätze sich mit den internen Vorgängen des Nervensystems auseinandersetzt.³² Das Aufnehmen von Schallwellen führt erst in Verbindung mit der Interpretation der Signale durch das Gehirn zu der Wahrnehmung eines akustischen Ereignisses. Gemeint ist damit die Fähigkeit, Muster zwischen Klängen zu entdecken und einzelne akustische Signale aus einer Geräuschkulisse herauszuhören. Dieser Zusammenhang gilt nicht nur für melodische Ereignisse, sondern ist gleichermaßen bedeutsam für einfache Alltagsgeräusche. Auch hier treten akustische Muster auf, die vom Gehirn analysiert und verarbeitet werden müssen. Die Grundlage für die Informationsverarbeitung ist die Konditionierung unserer Sinnes- und Nervenzellen, die bereits weit vor der Geburt stattfindet. Bevor es also zu der Einordnung und bewussten Wahrnehmung akustischer Reize kommen kann, müssen einige synaptischen Verbindungen

³⁰ Vgl. Friesecke, S. 135

³¹ Vgl. Dickreiter, S. 134

³² Vgl. Guski, S. 1f

zwischen den Zellen zusammenwachsen. Sie tragen die Funktion der Weiterleitung von Reizen zur Schaltzentrale im Gehirn. Bestimmt werden die synaptischen Verknüpfungen zum einen durch die Erbanlage, zum andern auch durch die Häufigkeit der Benutzung. Je nach Vorerfahrung werden unterschiedliche neuronale Verbindungen aufgebaut. Das führt zu einer individuell unterschiedlichen Ausprägung der für die Reizverarbeitung zuständigen Hirnareale. Untersuchungen haben ergeben, dass Musiker im Vergleich zu Nichtmusikern einen vergrößerten Bereich des auditiven Zentrums aufweisen.³³ Für das Einordnen und Bewerten der modalen Attribute sind zudem erlernte Erfahrungswerte erforderlich, mit welchen die eintreffenden akustischen Reizinformationen verglichen werden. Dieser Lernprozess ist ein langwieriger Vorgang und kann im Durchschnitt bis zur Schwelle des Erwachsenseins andauern. Die eintreffenden Reizinformationen werden mit den erlernten Erfahrungswerten verglichen und können anhand des Abgleiches eingeordnet und interpretiert werden. Die Interpretation und Bewertung ungewohnter oder neuer Schallereignisse werden durch bereits vorhandene Hörmuster durchgeführt. „So kann derselbe akustische Reiz bei verschiedenen Menschen unterschiedliche Areale aktivieren, je nach emotionaler Bewertung des Reizes.“³⁴ Da eine akustische Umgebung in den meisten Fällen aus einer Fülle an akustischen Informationen besteht, bedarf es eines weiteren ausgeklügelten Systems, welches die Sortierung relevanter von irrelevanten Informationen ermöglicht. Dieser Vorgang wird als selektive Reizverarbeitung bezeichnet und ist nachfolgend dargestellt.³⁵

Selektive Reizverarbeitung

Aus einer Gruppe zusammenspielender Instrumente können wir ein bestimmtes Instrument heraushören. Wir schaffen es ebenso, auf einer Party mit mehreren

³³ Eska, S. 50 bis 68

³⁴ Eska, S. 61f

³⁵ Vgl. ebd. S. 50 bis 68

verschiedenen Schallereignissen unsere Aufmerksamkeit nur auf unseren Gesprächspartner zu fokussieren. Dieser Effekt wird als Cocktailparty-Phänomen bezeichnet.³⁶

Die Selektive Reizverarbeitung beschreibt die Fähigkeit, aus einer auditiven Szenerie, also vielen eintreffenden Schallwellen, ein Schallereignis zu identifizieren. Eine auditive Szene beschreibt die Summe aller akustischen Ereignisse wie Geräusche, Musik und gleichzeitige Gespräche und bildet eine undifferenzierte Geräuschkulisse, die nicht bewusst wahrgenommen wird. Trotz Überlagerung der im Ohr eintreffenden Schallwellen ist es dem Menschen möglich, distinkte Schallereignisse wahrzunehmen.³⁷

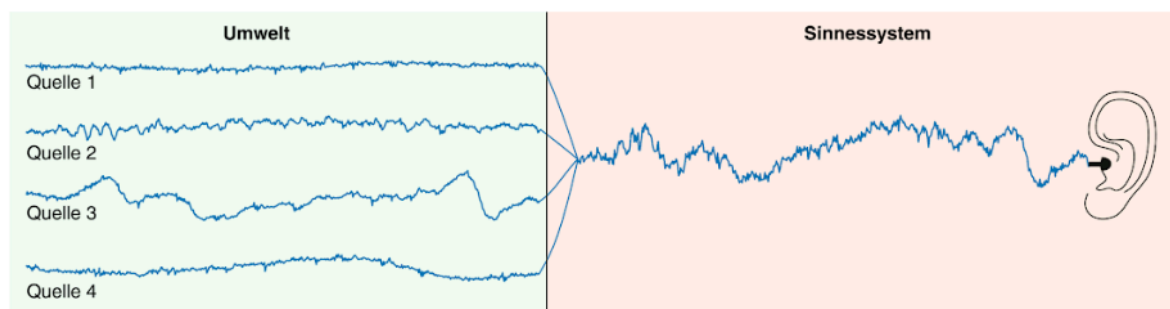


Abb. 6: Schematische Darstellung der Überlagerung von vier zeitgleich aktiven Schallereignissen (links) am Eingang des Sinnessystems. Die Schallanteile werden nach Aufsummieren (rechts) durch den Prozess der auditiven Szenenanalyse in die Ursprungssignale zerlegt

Dafür wird jedes eintreffende Signal stetig nach seiner Struktur analysiert. Akustische Merkmale werden als zusammengehörig identifiziert oder voneinander separiert. Dieser Prozess wird Auditive Szenenanalyse oder Wahrnehmungsorganisation (engl.: perceptual organization) genannt und bedient sich einiger Regelmäßigkeiten, deren Forschungsansatz Bregman mit seinen Untersuchungen 1990 als einer der ersten

³⁶ Vgl. Hagendorf, S. 134

³⁷ Vgl. Hagendorf, S. 134

Wissenschaftler ergründete. In seiner Theorie wird zwischen zwei Grundprinzipien unterschieden. Entweder wird die Gruppierung eintreffender Schallanteile anhand simultaner Eigenschaften durchgeführt oder es wird auf Grund von sequentiellen Merkmalen eine Selektion festgestellt.³⁸

Für simultan auftretende Signale nutzt das auditive System zur Gruppierung oder Trennung der Schallanteile fünf Reizparametern. Neben dem Prinzip der Harmonizität (gemeinsame Grundfrequenz), der kohärenten Amplituden- oder Frequenzmodulationen und der Klangfarbe (spektrale Form), gibt es zudem auch noch zwei weitere Parameter, die für die Selektion von Geräuschkomponenten genutzt werden.³⁹ Als zusammengehörig empfunden werden Schallanteile, deren Ursprung am selben Ort vermutet wird (Prinzip der Nähe). Für die Lokalisation einer Schallquelle werden die in Kapitel 4.1 *Psychoakustische Parameter* beschriebenen Methoden verwendet. Eine fünfte Methode bedient sich dem Zeitverhältnis akustischer Signale, also dem gemeinsamen Ein- und Aussetzen, denn unterschiedliche Schallquellen treten selten synchron auf. Nach diesem Prinzip können sogar Signale mit gleicher Frequenz unterschieden werden, da sie in den meisten Fällen zu verschiedenen Zeitpunkten beginnen oder enden.⁴⁰ Die Einordnung sequentieller, also aufeinanderfolgender Signale können anhand eines zentralen Konzeptes von Bregman und Campbell beschrieben werden und wird durch ihr Experiment (1971) deutlich.⁴¹

³⁸ Vgl. Weinzierl, S. 72

³⁹ Vgl. Weinzierl, S. 72

⁴⁰ Vgl. Guski, S. 263ff

⁴¹ Vgl. Weinzierl, S. 72

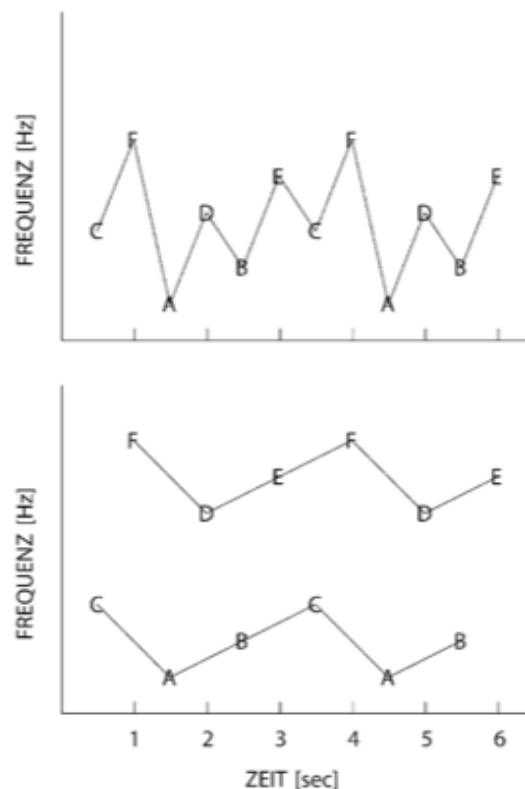


Abb. 7: Bei geringem Frequenzabstand wird die Tonreihenfolge als eine verbundene Tonsequenz (Melodie) wahrgenommen (oben), bei einem großen Frequenzabstand separiert das auditive System die Tonreihenfolge in zwei unverbundene Melodien (unten)

Hierbei wurde den Versuchspersonen eine anhaltende Folge mit sechs Tönen unterschiedlicher Frequenz präsentiert. Die Hälfte der Töne befanden sich im oberen, die andere Hälfte im unteren Frequenzspektrum und wurden alternierend abgespielt, sodass einem Ton mit hoher Frequenz ein Ton mit tiefer Frequenz folgte. Die Probanden waren dann in der Lage, die korrekte Reihenfolge der Töne wahrzunehmen, wenn der spektrale Abstand zwischen den Tönen gering war. Bei Vergrößerung des spektralen Abstandes wurden die dargebotenen Tonfolgen ab einem bestimmten Punkt als zwei separate Tonfolgen wahrgenommen. Bregman und Campbell führten dazu den Begriff „*auditory stream segregation*“ ein. Die Probanden konnten eine Zusammengehörigkeit, also die Tonreihenfolge innerhalb eines „Streams“ angeben. Über einen differenten Frequenzbereich war die chronologische Sortierung der Töne aber nicht mehr möglich.⁴²

⁴² Vgl. Weinzierl, S. 72f

5. 3D Audio

Die Fähigkeit binaural, also zweiohrig zu Hören hilft uns, Klangquellen zu Lokalisieren und einzelne Signale aus einer Vielzahl von Geräuschen herauszufiltern. Das Phänomen des selektiven Hörens wird als Cocktailparty-Effekt bezeichnet und wird im Kapitel 4.2.1 *Selektive Reizverarbeitung* näher beleuchtet.⁴³ Die akustischen Eigenschaften eines Raumes spielen eine wesentliche Rolle bei der Darbietung von Sprache oder Musik. Die Simulation eines imaginären Raumes stellt daher die Basis für viele Verfahren der virtuellen Akustik dar. Anhand von rechnerischen Methoden müssen zunächst die dreidimensionalen Eigenschaften eines Raumes, in der sich eine virtuelle Schallquelle befinden soll, ermittelt und anschließend spatial reproduziert werden. Es existieren verschiedenen Ansätze deren gemeinsames Ziel die dreidimensionale Wiedergabe eines Schallereignisses ist. Während sich das Vector Base Amplitude Panning (VBAP) mit dem Phänomen der Summenlokalisierung auseinandersetzt, beschäftigen sich Verfahren wie Ambisonics oder die Wellenfeldsynthese mit einer Synthese von Schallfeldern in einem vorhandenen Raumvolumen.⁴⁴ Alle Verfahren dienen der klanglichen Reproduktion dreidimensionaler Schallereignisse und werden nachfolgend vorgestellt.

⁴³ Vgl. Fels [Stand 12.05.2018]

⁴⁴ Vgl. Weinzierl, S. 671

5.1. Funktionsprinzipien

5.1.1. Vector Base Amplitude Panning

Das Verfahren des Vector Base Amplitude Panning wurde 1997 von Pulkki eingeführt und kann als eine Erweiterung des traditionellen stereofonen Panorama Potentiometers, dem sogenannten Pan Pot gesehen werden. Während das vergleichbare stereofone Verfahren Signalpegel eines Lautsprecherpaares berechnet, wird das Vector Base Amplitude Panning um eine Ebene ergänzt. Hier stehen Signalpegel eines Lautsprechertripel zur Verfügung. Beide Vorgehensweisen beruhen auf dem Prinzip der Summenlokalisierung und erzeugen in Abhängigkeit des gewünschten Abbildungswinkels eine Phantomschallquelle. Als Grundlage der Berechnung dient ein akustisches Modell, welches auf den psychoakustischen Eigenschaften der Schallausbreitung am Kopf beruht.

Aus den Verstärkungsfaktoren g_1 und g_2 benachbarter Lautsprecher und dem Winkel der Lautsprechermitte kann die Position der Phantomschallquelle bestimmt werden. Zur mathematischen Berechnung dient folgender Zusammenhang:

$$\frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2}$$

Dabei ist der Winkel θ die Abweichung im Bezug auf die Lautsprecherbasis (θ_0). Da dieser Ausdruck ein Verhältnis der Leistungsfaktoren beider Lautsprecher beschreibt, kann durch zusätzliche Normierung eine konstante Lautheit der zwischen den Lautsprechern befindlichen Phantomschallquelle gewährleistet werden.

$$g_1^2 + g_2^2 = 1$$

Die Leistungssumme beider Signale ist damit trotz diffuser Schallumgebungen auf eine konstante Summenlautheit festgelegt. Beide Gleichungen bilden ein

Gleichungssystem zur Berechnung der Leistungsfaktoren g_1 und g_2 anhand des gewünschten Abbildungswinkels θ , was unter den Voraussetzungen $\theta_0 \neq 0^\circ$ und $\theta_0 \neq 90^\circ$ eindeutig lösbar ist.⁴⁵

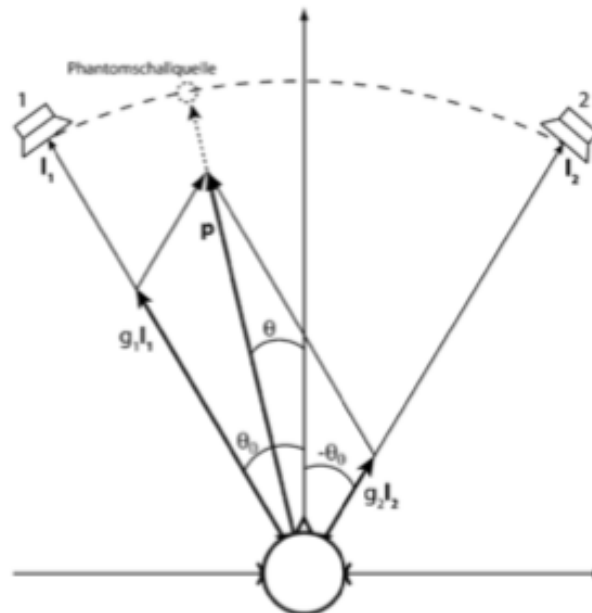


Abb. 8: Verstärkungsfaktoren g_1 und g_2 , Abbildungswinkel der Phantomschallquelle θ und Versatzwinkel θ_0

Der zur Phantomschallquelle gerichtete Vector $\vec{p}$ kann durch Linearkombination aus beiden Einheitsvektoren (den Lautsprechern gerichteten Vektoren) l_1 und l_2 konstruiert werden. Den Ergebnisvektor $\vec{p}$ erhält man rechnerisch aus der Vektoraddition aller zu den Lautsprechern weisenden Vektoren. Diese Methode lässt sich also auch um eine Dimension erweitern, indem dreidimensionale Vektoren als Vektorbasis und die dazugehörige 3 x 3-Matrix verwendet werden.⁴⁶

⁴⁵ Vgl. Weinzierl, S. 658

⁴⁶ Ebd., S. 659

5.1.2. Ambisonics

Ambisonics ist ein Verfahren, welches 1970 im Wesentlichen von dem britischen Mathematiker Michael Gerzon entwickelt wurde und für das im Gegensatz zu kanalbasierten Übertragungsverfahren keine vorgeschriebene Anzahl an Lautsprechern vorgegeben ist. Die Genauigkeit der dreidimensionalen Darstellung eines Klangbildes hängt von der Anzahl der verwendeten Übertragungskanäle ab und ist damit beliebig regulierbar.

Das Ambisonics-Verfahren beruht auf dem Prinzip der Zerlegung des Schallfeldes in Kugelflächenfunktionen (*spherical harmonics*). Es besagt, dass sich jedes Schallfeld $p(r)$ als Überlagerung von radial gewichteten sphärischen Harmonischen der Ordnung m mit den sphärischen Besselfunktionen $j_m(kr)$ und einem Phasenfaktor i^m darstellen lässt - ähnlich der Darstellung eines periodischen Signals durch Überlagerung von Sinusfunktionen unterschiedlicher Amplitude und Phase. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$p(r) = \sum_{m=0}^{\infty} i^m j_m(kr) \sum_{0 \leq n \leq m, \sigma = \pm 1} B_{mn}^{\sigma} Y_{mn}^{\sigma}(\phi, \delta)$$

Diese winkelabhängigen Funktionen beschreiben dabei die Richtung des eintreffenden Schalls. Die Reproduktion eines Schallfeldes geschieht durch die Übertragung der Komponenten B_{mn}^{σ} einer Fourier-Bessel-Reihe. In der ersten Ordnung der Ambisonics-Technologie werden die ersten Komponenten der Fourier-Bessel-Reihe als W, X, Z und Y bezeichnet.⁴⁷

⁴⁷ Vgl. Weinzierl, S. 662

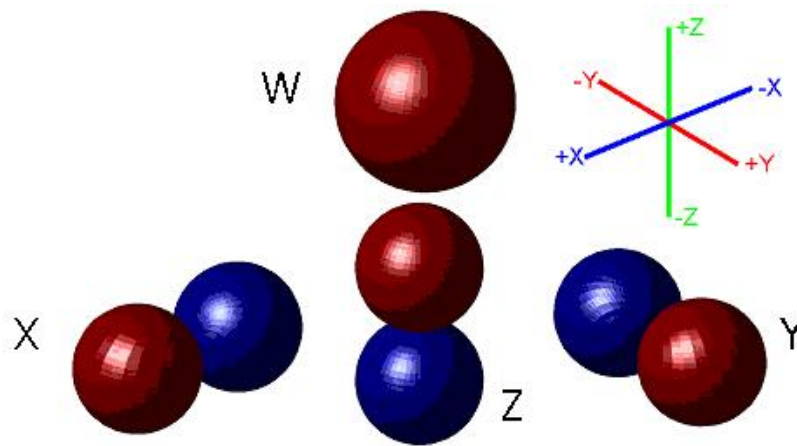


Abb. 9: Ambisonics 1. Ordnung mit den vier Kanälen W, X, Y, Z - der In-Phase Anteil ist rot gekennzeichnet

Sie beschreiben die vier Kanäle der ersten Ordnung und werden als B-Format bezeichnet, in welchem ein dreidimensionales Schallfeld vierkanalig kodiert wird. Die Gewinnung dieser Komponenten ist der Prozess der Schallfeld-Enkodierung und kann für reale Schallfelder mit Hilfe eines 4 tetraedrisch angeordneten Nierenmikrofon, das sogenannte Soundfield-Mikrofon umgesetzt werden.⁴⁸ Virtuelle Schallfelder werden anhand eines Schallfeld-Modells enkodiert.⁴⁹ Je nach Lautsprecherkonfiguration werden die Übertragungskanäle bei der Wiedergabe dekodiert.⁵⁰ High Order Ambisonics (HOA) beschreibt die Reproduktion eines Schallfeldes höherer Ordnung. Umso mehr Komponenten der Fourier-Bessel-Reihe übertragen werden, desto genauer ist die Synthese des Schallfeldes. Anders ausgedrückt, je höher die Ordnung der Kugelflächenfunktionen, desto genauer beschreiben sie das Schallfeld.⁵¹

⁴⁸ Vgl. Kronlachner, S. 13 [Stand 01.07.2018]

⁴⁹ Vgl. Weinzierl, S. 662

⁵⁰ Vgl. ebd., S. 663

⁵¹ Vgl. ebd., S. 662

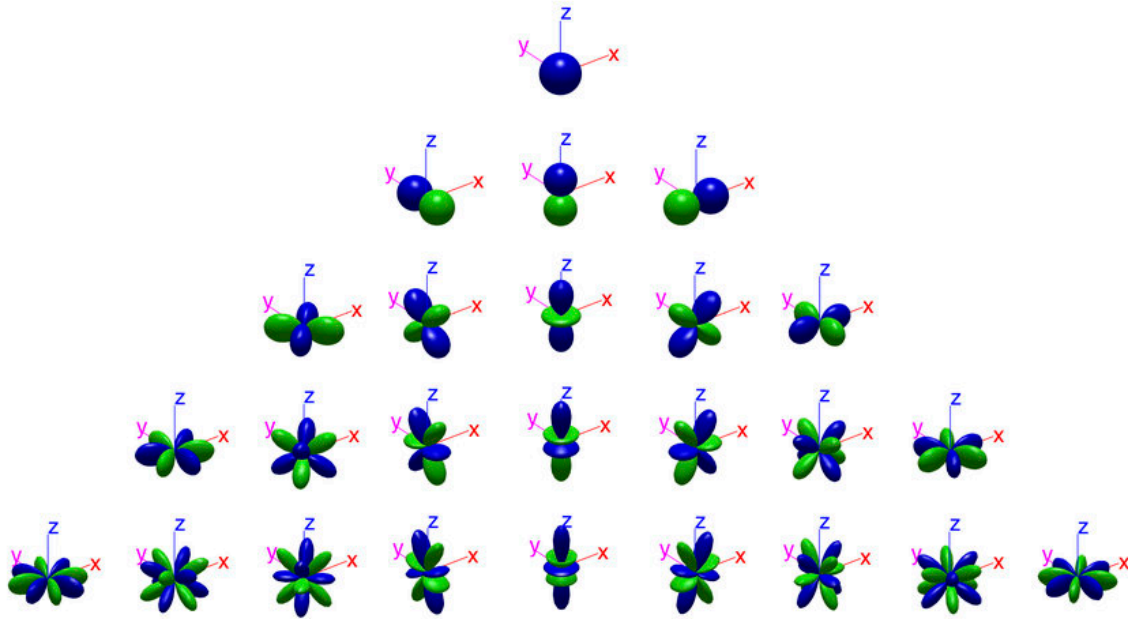


Abb. 10: Sphärische Harmonische der High Order Ambisonics -Technologie

5.1.3. Wellenfeldsynthese

Bei dem Verfahren der Wellenfeldsynthese wird ein akustischer Raum mit virtuellen Schallquellen synthetisiert und können ortsstabil und realistisch positioniert und geortet werden. Im Gegensatz zu dem Prinzip der Erzeugung einer Phantom-schallquelle, bei dem ein Schallereignis nur innerhalb der Linien zwischen den Lautsprechern positioniert werden kann, ist die Platzierung einer Schallwelle auch außerhalb der Lautsprecheranordnung möglich.⁵² Eine optimalen Hörzone ist durch die endliche Lautsprecheranzahl begrenzt, aber dennoch nicht auf einen einzigen Ort (Sweet Spot) beschränkt.

Die Grundlage der Wellenfeldsynthese basiert auf dem physikalischen Huygens-Fresnel-Prinzip, welches von den Physikern Christiaan Huygens und Augustin-Jean-Fresnel erstmals beschrieben wurde. Danach kann jede Wellenfront als

⁵² Vgl. Dickreiter, S. 352

Überlagerung von Elementarwellen betrachtet werden. Jeder Punkt einer Wellenfront stellt dabei den Ausgangspunkt einer sich kugelförmig ausbreitenden Elementar- oder Sekundärwelle dar. Die sich weiter ausbreitende Wellenfront ist durch die äußere Einhüllende der Elementarwellen gegeben.⁵³ Daraus folgt die These, dass der Schalldruck jedes Punktes in einer Fläche oder einem Volumen dann bestimmt werden kann, wenn Schalldruck und Schallschnelle in jedem Punkt der determinierenden Oberfläche einer Fläche oder eines Volumens bekannt ist. So kann jedes Schallfeld theoretisch mit unendlich vielen Lautsprechern rekonstruiert werden.⁵⁴

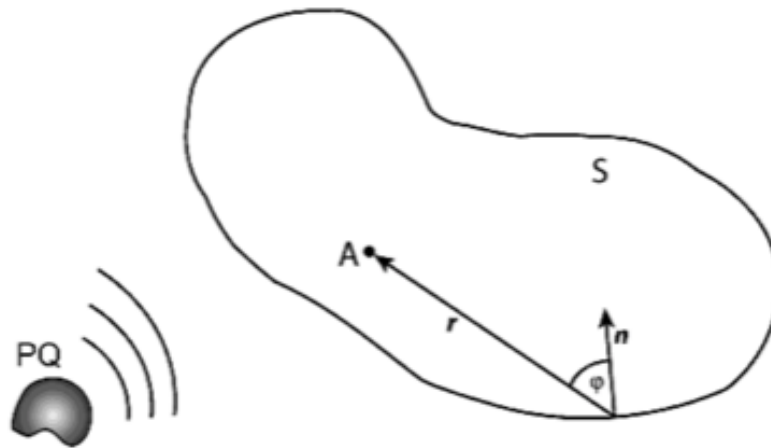


Abb. 11: Der Schalldruck der Primärquelle PQ kann am Hörerplatz A dann eindeutig bestimmt werden, wenn an jedem Punkt der Umgrenzung S Schalldruck und Schallschnelle bekannt sind

Da aus praktischer Sicht die Bestückung mit unendlich dicht angeordneten Monopolen und Dipolen zur Schallerzeugung nicht möglich ist, wurde das Prinzip der Wellenfeldsynthese Anfang der neunziger Jahre von De Vries an der TU Delft weiterentwickelt. Dabei wurde das Prinzip beschränkt auf die Anordnung realer Lautsprecher monopolförmiger Richtcharakteristik auf nur einer Ebene, die eine

⁵³ Vgl. Weinzierl, S. 665

⁵⁴ Vgl. Dickreiter, S. 355

unendlich dicht angeordnete Lautsprecheranordnung durch ein Lautsprecherarray mit diskreten Abständen annähert.⁵⁵

Die praktische Vorgehensweise der Schallquellenreproduktion findet in zwei Schritten statt. Alle aufgenommen Signale werden ohne Raumanteil übertragen. Die Ermittlung der räumlichen Eigenschaften findet mithilfe einer Raumimpulsantwort statt und wird als Rauminformation gespeichert. Die Übertragung der Gestaltinformation eines Signals findet also getrennt von der Übertragung des Raumanteils statt und wird daher objektorientierte Übertragung genannt. Damit ist es möglich, das gleiche Schallereignis in einen anderen Raum zu versetzen. Das Quellsignal wird mit einer beliebigen Raumimpulsantwort durch den mathematischen Prozess der Faltung verrechnet und den Lautsprecherkanälen zugeführt, sodass die ursprünglichen Rauminformationen vollständig zurückgewonnen werden können. Dieser Vorgang wird in nachfolgender **Abb. 12** verdeutlicht.⁵⁶

⁵⁵ Vgl. Weinzierl, S. 667f

⁵⁶ Vgl. Dickreiter, S. 354f

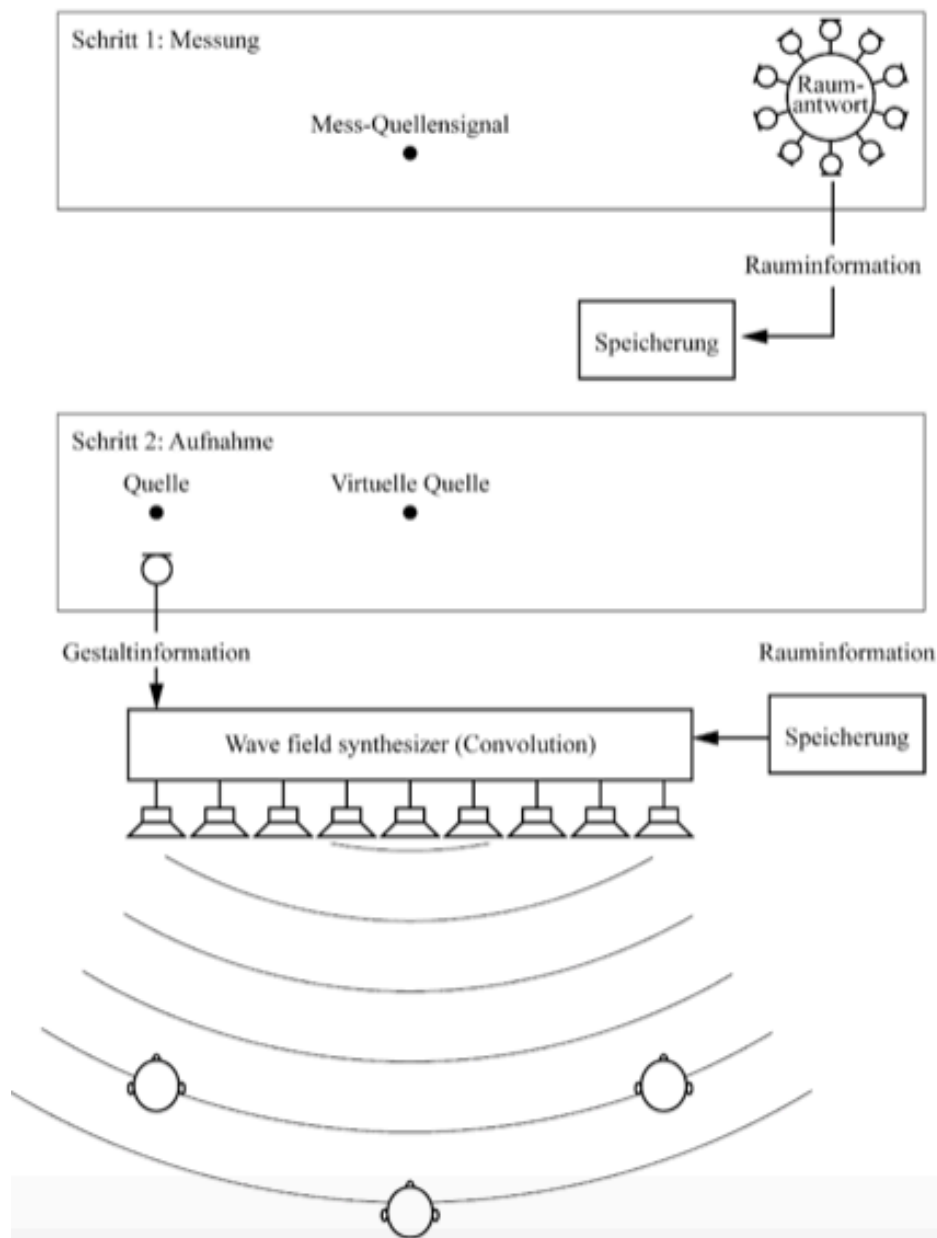


Abb. 12: Prinzip der Wellenfeldsynthese - Die Reproduktion in zwei Schritten

Es existieren bereits praktische Umsetzungen des Prinzips in verschiedensten Veranstaltungsstätten. Durch jüngste Entwicklungen ist die Erweiterung der Wellenfeldsynthese auf einen 3-Ebenen Prinzip bereits möglich, wie etwa im Opernhaus Zürich.⁵⁷

⁵⁷ Vgl. Bangert, [Stand 01.07.2018]

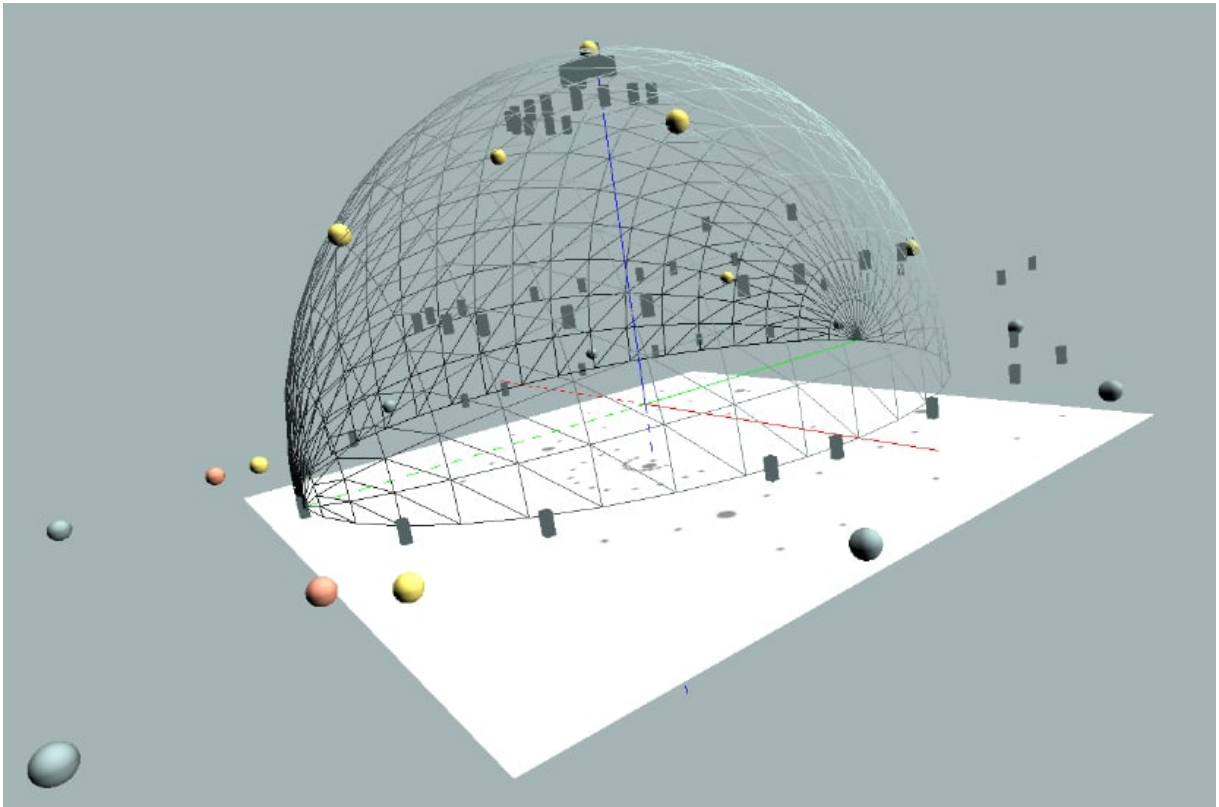


Abb. 13: SpatialSound Wave System in Verbindung mit dem Prinzip der Wellenfeldsynthese im Opernhaus Zürich

In Kombination mit einer vom Fraunhofer IDMT entwickelten Softwarelösung, dem *SpatialSound Wave System*, ist hier eine richtungsgerechte Wiedergabe verschiedener Schallquellen im Raum möglich.⁵⁸ Dabei sind die theoretischen Möglichkeiten nur mit Einschränkungen realisierbar, wodurch diese Technologie Anreiz für weiterführende Forschungen gibt.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Bangert, [Stand 01.07.2018]

⁵⁹ Vgl. Dickreiter, S. 356

5.2. 3D-Audio Wiedergabeformate

Es gibt mehrere Formate zur Lautsprecherwiedergabe von 3D-Audio-Inhalten, die sich der in Kapitel 5.1 *Funktionsprinzipien* genannten Methoden bedienen. Es wird unterschieden zwischen kanal- und objektbasierten Formaten. Kanalbasiert bedeutet, dass jede Spur einem oder mehreren physikalischen Ausgängen (also Lautsprechern) zugeordnet ist. Hierbei ist keine Dekodierung bei der Wiedergabe nötig, die Vorgaben zur Lautsprecheraufstellung des Formats (5.1, 7.1 etc.) müssen jedoch eingehalten werden, um eine korrekte Wiedergabe zu gewährleisten. Vorteilhaft ist hierbei das relativ unkomplizierte und kostengünstige Wiedergabesetup, von Nachteil die Unflexibilität. Bei objektbasierten Formaten hingegen wird die Position eines Elements im Raum in Metadaten geschrieben, die dann bei der Wiedergabe dekodiert werden müssen. Dabei erfolgt eine Anpassung an das im Raum vorhandene Lautsprechersetup, da der Dekoder die genaue Position aller Lautsprecher kennt, was eine flexible Lautsprecheraufstellung erlaubt. Jedoch ist dies mit aufwändiger Implementierung, Enkodierung und Dekodierung verbunden. Im Folgenden sollen die drei wichtigsten Formate vorgestellt werden.

5.2.1. Auro 3D

Auro 3D ist ein 2006 vorgestelltes, vollständig kanalbasiertes Format, das von der belgischen Firma Auro Technologies vertrieben wird. Es gibt unterschiedliche, kompatible Lautsprecher-Setups, die sich darin auszeichnen, dass ein gegebenes 5.1- bzw. 7.1-Surround-Setup durch eine Höherebene erweitert wird. Die Höherebene besteht aus mindestens vier Lautsprechern, die direkt oberhalb der L/R/LS/RS-Lautsprecher angebracht werden. Das kleinste Setup ist demnach Auro 9.1, bestehend aus der Medianebene mit fünf Lautsprechern (L/C/R/LS/RS), vier Höhenlautsprechern (HL/HR/HLS/HRS) und einem LFE und ist für Heim-

anwendungen gedacht. Optional ist dabei der „Voice of God“- oder auch Top-Kanal: Ein einzelner Deckenlautsprecher direkt über der Abhörposition.

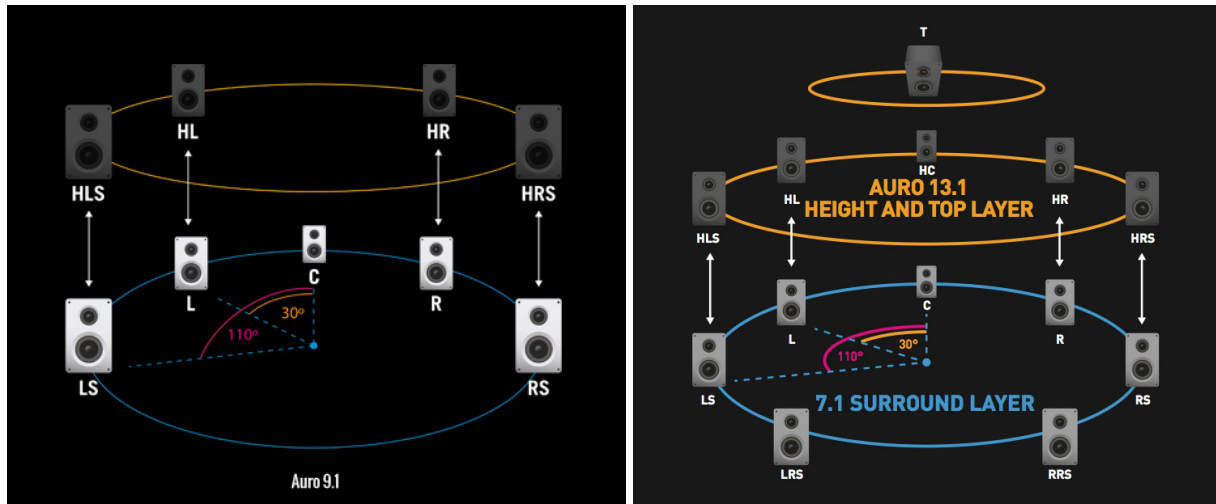


Abb. 14: Auro 9.1 (links) und Auro 13.1

In Kinos kommen größere Setups wie Auro 13.1 zum Einsatz, was einem 7.1 mit fünf Höhenkanälen und einem Top-Kanal entspricht.⁶⁰ Jedem Ausgangskanal wird dabei meist nicht einer, sondern ein Array von mehreren Lautsprechern zugeordnet.

5.2.2. Dolby Atmos

Dolby Atmos erweitert ebenfalls ein 5.1 bzw. 7.1-Setup um eine Höherebene, allerdings bestehend aus mindestens zwei Deckenlautsprechern. Die Besonderheit von Dolby Atmos ist die Kombination aus einem kanalbasierten 9.1 „Bed“ und bis zu 118 Audio-Objekten. Die Bed-Kanäle sind festen individuellen Lautsprechern oder Arrays zugeordnet. Die Position der Audio-Objekte wird in Metadaten gespeichert, die in Echtzeit gemäß der physischen Position der Lautsprecher bei der Wiedergabe gerendert werden. So wird sichergestellt, dass sich egal bei welcher Lautsprecherkonfiguration die Objekte gleich verhalten. Der *Dolby Atmos Cinema*

⁶⁰ Vgl. Auro Technologies [Stand: 19.06.2018]

Processor unterstützt dabei bis zu 64 Output-Kanäle. Ein Vorteil ist die Anpassung der Wiedergabe an das vorhandene System. So ist es möglich, Punktschallquellen aus einem einzigen Lautsprecher wiederzugeben, um die Lokalisationsschärfe zu erhöhen, oder auch Hintergrundatmos durch Arrays diffuser wiederzugeben. Ebenfalls vorteilhaft ist die vollständige Abwärtskompatibilität von Dolby-Atmos-Mischungen auf 7.1- und 5.1-Systeme. Das kleinstmögliche Setup ist ein 5.1.2, das größtmögliche 29.4.18.⁶¹

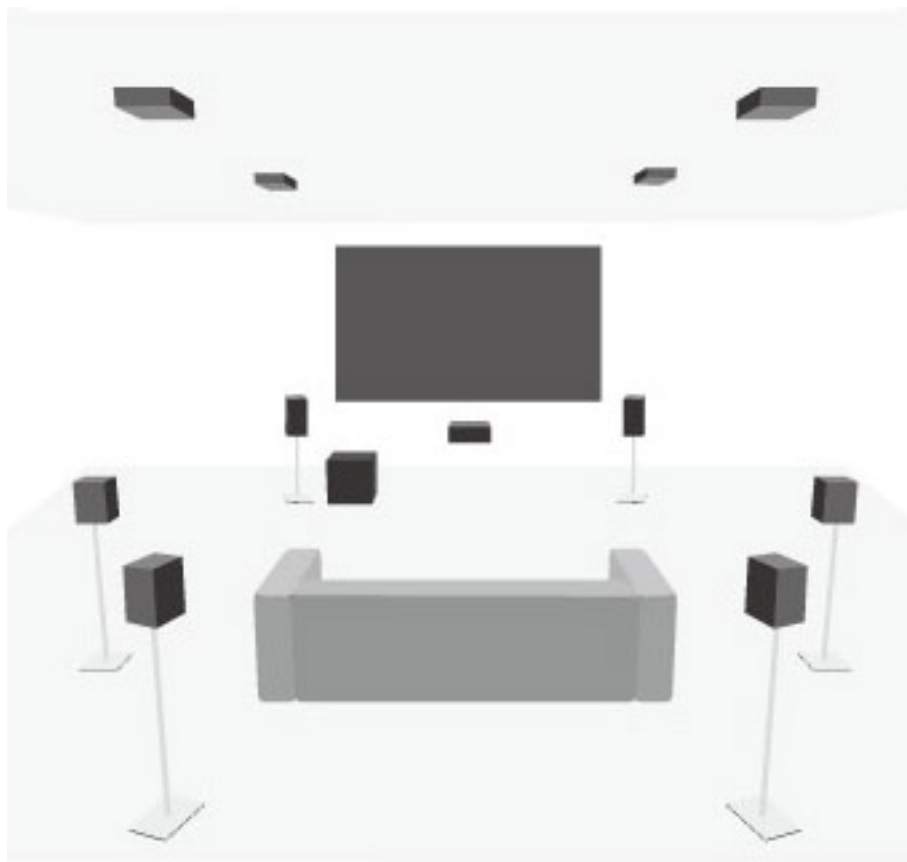


Abb. 15: 7.1.4 mit vier Deckenlautsprechern

⁶¹ Vgl. Dolby Laboratories, S. 4-7

5.2.3. Iosono

Iosono ist ein System basierend auf der Wellenfeldsynthese. Es kennt keine Obergrenze bei der Anzahl der Wiedergabekanäle. Üblicherweise werden Kinomischungen mit 64 Quellkanälen angefertigt, die bei der Wiedergabe vom Kinoprozessor für bis zu 128 Lautsprecher gerendert werden. Im Gegensatz zu Auro 3D und Dolby Atmos, die das 3D-Feld als Halbkugel ab Ohrhöhe betrachten (es gibt keine Lautsprecher unterhalb der Ohrebene), kann Iosono einen tatsächlich vollständig dreidimensionalen Soundtrack wiedergeben, wenn ein dementsprechender Lautsprecher-Setup vorhanden ist. Durch die verwendete Wellenfeldsynthese ergeben sich große Sweet Spots und eine besonders genaue und vom Abhörplatz unabhängige Lokalisation der Schallquelle. Iosono ist komplett objektbasiert, doch durch entsprechende Zuweisung können auch kanalbasierte Verfahren wiedergegeben werden.⁶²

⁶² Vgl. Dickreiter, S. 972

6. Binaurale Technik

Die Binauraltechnik befasst sich auch mit der Wiedergabe und Erzeugung des binauralen Hörens, sie verfolgt aber einen hörerzentrierten Ansatz, bei welchem beide Ohrsignale für eine korrekte Synthese verwendet werden.⁶³ Das naturgetreue Abbilden der an beiden Ohren eintreffenden Signale stellt dabei den Schwerpunkt der Binauraltechnik dar. Für die virtuelle akustische Szenendarstellung wird das Empfangen und Verarbeiten des eintreffenden Signals durch das auditorische System als Grundlage genutzt. Das Ziel der Binauraltechnik ist die möglichst naturgetreue künstliche Erzeugung akustischer Szenen am menschlichen Ohr unter Berücksichtigung individueller Höreigenschaften. Diese Eigenschaften werden in einer kopfbezogenen Übertragungsfunktion beschrieben und im nächsten Absatz näher beleuchtet.⁶⁴

6.1. Funktionsweise

6.1.1. HRTF - Head Related Transfer Function

Das auditive System besitzt eine in Richtung, Entfernung und Frequenz abhängige Richtcharakteristik.⁶⁵ Durch den Einfluss von Oberkörper (Torso), Kopf, Schulter und der Ohrmuschel (pinnae) treten eine Reihe von linearen Verzerrungen auf, deren Parameter in der kopfbezogenen Außenohrübertragungsfunktion, der HRTF (Head-Related Transfer Function), beschrieben werden.⁶⁶ Die Außenohrübertragungsfunktion beschreibt ausschließlich die akustische Wirkung der geometrischen Einflüsse in reflexionsarmen Räumen, wodurch die typische Länge einer HRTF bei

⁶³ Vgl. Weinzierl, S. 671

⁶⁴ Vgl. Fels [Stand 12.05.2018]

⁶⁵ Vgl. Weinzierl, S. 89/90

⁶⁶ Vgl. ebd. S. 586

wenigen Millisekunden liegt.⁶⁷ Die linearen Verzerrungen äußern sich in Form von Resonanzen, Reflexionen und Streuung des Schalls, sowie durch Beugung und Interferenzen. Die durch Geometrie der Ohrmuschel bedingten physikalischen Phänomene führen zu einer richtungsabhängigen Filterung. Man unterscheidet zwischen dem distalen Schallreiz, also dem von der Schallquelle ausgehenden, und dem am Trommelfell wahrgenommenen proximalen Reiz.⁶⁸ Der Zusammenhang zwischen der Einfallsrichtung des von der Schallquelle ausgehenden Signals und dem durch die linearen Verzerrungen veränderte proximalen Reiz lässt sich durch verschiedene Verfahren, wie Mikrofonaufnahmen im Ohrkanal (siehe 6.1.5 *Messung kopfbezogener Impulsantworten*), geeigneten Kunstkopfaufnahmen (siehe 6.1.4 *Kunstkopfstereofonie*) oder durch eine skizzierte binaurale Synthese (siehe 6.1.3 *Binaurale Synthese*) bestimmen. Mathematisch kann das Prinzip der richtungsabhängigen Filterung durch den Vergleich des distalen mit dem proximalen Spektrum berechnet werden. Dieses als Differenz in Dezibel ausgedrückte Verhältnis stellt die Außenohrübertragungsfunktion dar.⁶⁹ Allgemein wird bei einer Übertragungsfunktionen ein Ausgangssignal in Abhängigkeit vom Eingangssignal im Spektralbereich dargestellt. Eine Impulsantwort dagegen beschreibt diese Funktion im Zeitbereich und wird Head-Related-Impulse-Response (kurz HRIR) genannt.⁷⁰ Obwohl jeder Mensch auf Grund seiner individuellen Körperstatur eine eigene, personenbezogene Übertragungsfunktion besitzt, ist er dennoch in der Lage, mit einer generalisierten Außenohrübertragungsfunktion eines Kunstkopfes räumlich zu hören. Dennoch erhöht eine individuelle Anpassung der binauralen Übertragungsfunktion die Plausibilität der Wiedergabe. Bei einer generalisierten Außenohrübertragungsfunktion können dennoch Probleme in der Lokalisierung der Schallquelle auftreten. Besonders die vertikale Ebene ist bei der Ortung in einer virtuellen auditiven Szenerie betroffen, was sich in einer Vorne-Hinten-Vertauschung

⁶⁷ Vgl. Weinzierl, S. 673

⁶⁸ Vgl. Hellbrück, S. 151

⁶⁹ Vgl. ebd., S. 152

⁷⁰ Vgl. Grasser, S. 9, [Stand 17.05.2018]

äußern kann.⁷¹ Gleichzeitig wurde festgestellt, dass ein Hörer in der Lage ist, sich auf das Hören mit einem fremden Kopf einzustellen. Hier ist also ein Lerneffekt zu beobachten.

6.1.2. BRIR - Binaural Room Impulse Response

Eine Impulsantwort, die neben den geometrisch bedingten Verzerrungseigenschaften zusätzliche akustische Rauminformationen enthält, wird *Binaural Room Impulse Response* (kurz BRIR) genannt. Darin sind die spezifischen Reflexionsmuster des Quell- und Empfängerpunktes enthalten, wodurch die Rauminformationen synthetisch nachgebildet werden können. Eine binaurale Raumimpulsantwort besitzt mindestens die Länge der Nachhallzeit T_{60} des akustisch wirksamen Raumes, wodurch die Berechnung des Ausgangssignals erheblich steigen kann. Die mithilfe der BRIR gewonnenen Ohrsignale vermitteln bei Kopfhörerwiedergabe einen Raumeindruck, wodurch verschiedenste Räume virtuell rekonstruiert werden können.⁷²

6.1.3. Binaurale Raumsynthese

Als *binaurale Raumsynthese* (kurz BRS) wird das Verfahren bezeichnet, in welchem die aus der HRTF oder BRIR gewonnenen Werte auf beliebige Signale angewandt werden, um sie über Kopfhörer dreidimensional wiederzugeben.⁷³ Eine Raumimpulsantwort gilt dabei nur für eine Kopfausrichtung, sodass der synthetisierte Raum bei Rotation des Kopfes mitrotiert. Um dieses Problem auszugleichen, werden bereits Aufnahmen mit rotierendem Kunstkopf durchgeführt, deren Ergebnisse mit einer Rasterung von 1 Grad in einer Datenbank festgehalten

⁷¹ Vgl. Laumann, S. 12 [Stand 18.05.2018]

⁷² Vgl. Weinzierl, S. 673

⁷³ Vgl. Hellbrück, S. 152

werden.⁷⁴ Das entspricht der Auflösung, in der das auditive System bei der Ortung in Horizontalebene die geringste Lokalisationsunschärfe besitzt.⁷⁵ Mit einem Headtracking-System kann die aktuelle Position des Kopfes bestimmt und mithilfe eines BRS-Prozessors auf den Filtersatz passender Raumimpulsantworten zugegriffen werden.⁷⁶

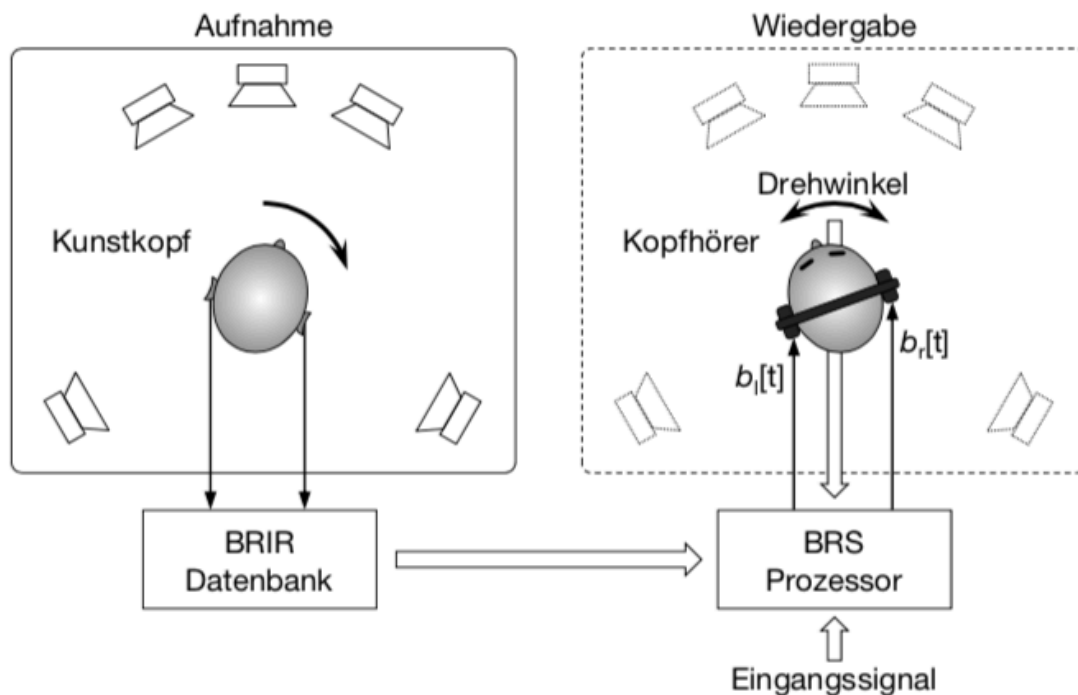


Abb. 16: Prinzip der Binauralen Synthese: Links die Messung verschiedener BRIR mit einem drehbaren Kunstkopf, rechts: abhängig vom Drehwinkel des Kopfes werden die passenden Raumimpulsantworten ausgelesen

Die virtuelle Nachbildung der Referenzsituation kann bei jedem beliebigen Eingangssignal erfolgen.⁷⁷

⁷⁴ Vgl. Dickreiter, S. 362

⁷⁵ Vgl. Laumann, S. 17 [Stand 18.05.2018]

⁷⁶ Vgl. Dickreiter, S. 362

⁷⁷ Vgl. Laumann, S. 16 [Stand 18.05.2018]

Die dynamische Binauralsynthese ermöglicht die Simulation mehrerer Schallquellen und ist in der Lage, Kopfdrehungen während der Wiedergabe auszugleichen.⁷⁸ Dem Verfahren der Auralisation, also der virtuellen Darbietung auditiver Szenarien, liegt die Tatsache zu Grunde, dass eine Schallübertragung von der Schallquelle bis zum Trommelfell ein nahezu lineares, zeitinvariantes System darstellt.⁷⁹ Der Zeitbereich dieser Synthese ist vollständig durch seine Impulsantwort $h(t)$ beschrieben, also die Reaktion auf einen unendlich kurzen Diracimpuls. Die Faltung des Eingangssignals $x(t)$ mit der Impulsantwort $h(t)$ ergibt das Ausgangssignal $y(t)$. Dieser Ansatz wird in folgendem mathematischen Ausdruck festgehalten:

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

Der Frequenzbereich wird in der Übertragungsfunktion $H(f)$ abgebildet. Wird das Eingangssignal in den Spektralbereich transformiert, so kann das Ausgangssignal $Y(f)$ durch Multiplikation des Eingangssignals $X(f)$ mit der Übertragungsfunktion $H(f)$ gewonnen werden. Der mathematische Ausdruck für diesen Zusammenhang lautet:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

Anschließend wird das Ausgangssignal $Y(f)$ in den Zeitbereich rücktransformiert. Ist die Impulsantwort oder Übertragungsfunktion eines Systems bekannt, so lassen sich dessen Eigenschaften durch Faltung mit der Impulsantwort virtuell nachbilden. Dieser Zusammenhang gilt auch für Räume, sodass mittels gemessener Impulsantwort eine Synthese der vorhandenen akustischen Umgebungssituation stattfinden kann.⁸⁰

⁷⁸ Vgl. Laumann, S. 16f [Stand 18.05.2018]

⁷⁹ Vgl. Weinzierl, S. 672

⁸⁰ Vgl. Laumann, S. 8, [Stand 18.05.2018]

Die Außenohrübertragungsfunktion ergibt sich aus dem Verhältnis der an beiden Ohren anliegenden proximalen Frequenzkomponenten und einem Referenzwert im Schallfeld. Daraus ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:⁸¹

$$HRTF(f, r, \alpha, \epsilon) = \left[\frac{P_l(f)}{P_r(f)} \right] \cdot \frac{1}{P_{ref}(f, r_0, \alpha_0, \epsilon_0)}$$

Schematisch wird das Prinzip der binauralen Synthese in nachfolgender Abbildung (**Abb. 17**) dargestellt:

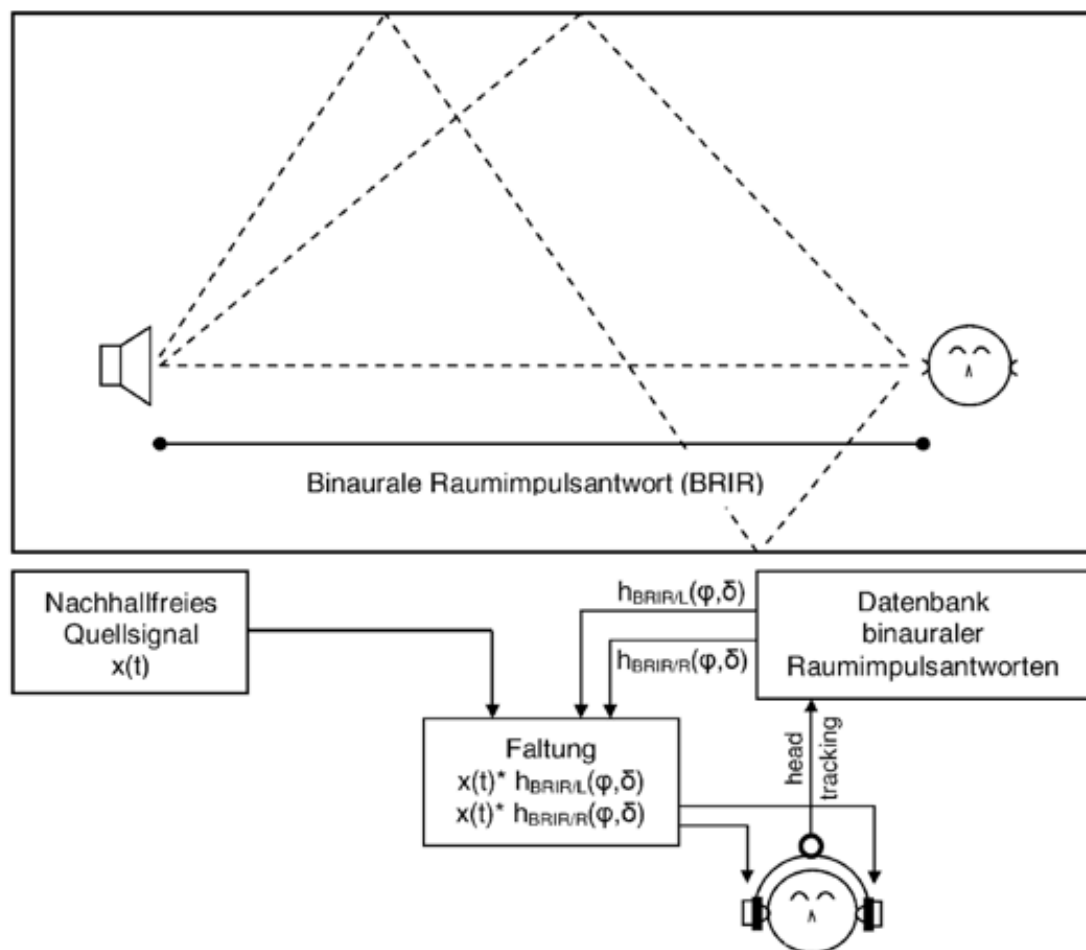


Abb. 17: Binaurale Synthese: Faltung eines nachhallfreien Quellsignals mit zwei zuvor simulierten binauralen Raumimpulsantworten

⁸¹ Vgl. Laumann, S. 9, [Stand 18.05.2018]

Trotz dieses einfachen theoretischen Prinzips können in der Praxis Schwierigkeiten auftreten, die die korrekte virtuelle Nachbildung der auditiven Szenerie beeinflussen können. Dabei ist nicht nur die im Kapitel 6.1.1 *Head Related Transfer Function* erwähnte Tatsache, dass eine kopfbezogene Impulsantwort von der Geometrie jedes Menschen abhängig ist, zu erwähnen, sondern auch der daraus resultierende Einfluss. Messmikrofone und Wiedergabesysteme können zusätzlich unerwünschte Störfaktoren im Ergebnis implizieren. Zudem beeinflusst ein weiterer Faktor das Ergebnis: Die auditive Wahrnehmung ist stets abhängig von anderen sensorischen Informationen, wie zum Beispiel der visuellen Wahrnehmung. Diese ist analog zur auditiven Wahrnehmung sehr individuell und durch verschiedene Komponenten beeinflusst.⁸²

6.1.4. Kunstkopfstereofonie

Eine binaurale Aufnahme wandelt den im Ohrkanal eintreffenden Schall. Dabei werden Druckempfänger-Kapseln entweder direkt in den Ohrkanal eines Zuhörers oder in den Gehörgang eines dem Menschen nachgebildeten Kunstkopfes platziert. Die daraus gewonnene Außenohrübertragungsfunktion beinhaltet alle Richtungsinformationen des eintreffenden Schallereignis unter Berücksichtigung der Wirkung unserer Kopfanatomie.⁸³ Das Kunstkopfverfahren nimmt das Schallfeld an der Position in einem Aufnahmeraum auf, an welcher die beiden Ohren eines Hörers gelegen wären. Akustische Merkmale wie die Richtcharakteristik, Pegel- und Laufzeitdifferenzen sind den menschlichen Gegebenheiten angepasst. Anstelle der Trommelfelle sind bei einem Kunstkopf Mikrofone eingesetzt. **Abb. 18** zeigt einen Kunstkopf der Firma Neumann (KU 100).

⁸² Vgl. Weinzierl, S. 672

⁸³ Vgl. ebd., S. 586

Auf Grund individueller Unterschiede kann mit einer Kunstkopfaufnahme und anschließender Kopfhörerwiedergabe nur annähernd die Abhörumsituation reproduziert werden.⁸⁴ Dennoch gewährleistet die Kunstkopfstereofonie im Vergleich zu anderen Aufnahmeverfahren eine natürlichere Nachbildung der Abhörsituation. Für die Lautsprecherwiedergabe ist dieses Verfahren aber ungeeignet, was die Verwendung im Rundfunk und in der Musikindustrie untauglich macht.⁸⁵ Die ersten Experimente mit einem Kunstkopf wurden bereits in den 1930er Jahren durchgeführt. Weitere Versuche wurden 1970 mit dem Kunstkopf KU 80 der Firma Neumann realisiert.⁸⁶ In Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Kunstkopfverfahren im Vergleich zur Aufnahme im Gehörgang einer Person gehäuft zur Richtungsinversion (vorne/hinten-Vertauschung) und zu einer Fehlwahrnehmung der Entfernung führt. Schallereignisse wurden hierbei oft sehr nah oder sogar im Kopf lokalisiert.⁸⁷ Abweichungen in der Nachbildung der Klangfarbe führten zusätzlich zu erheblichen Einschränkungen. Erst mit der nachfolgenden Serie, dem Kunstkopf KU 81 von Neumann oder vergleichbaren Kunstköpfen, wurden diese Mängel in den 80er Jahren weitestgehend kompensiert. Eine Überarbeitung der durchschnittlichen Kopfmaße und der Ohr- und Kopfform führten zu einer Verbesserung der originalgetreuen Signalnachbildung.⁸⁸ Zudem wurde mit der zweiten Kunstkopfgeneration der Übergang von der Freifeldentzerrung zur Diffusfeldentzerrung die Kompatibilität der Lautsprecherwiedergabe gewährleistet. Der Kunstkopf der Firma Neumann KU 100 ist die dritte und aktuellste Generation und wurde neben einigen schaltungstechnischen Verbesserungen auch im Hinblick auf akustische Merkmale nochmals überarbeitet.⁸⁹

⁸⁴ Vgl. Dickreiter, S. 345

⁸⁵ Vgl. Laumann, S. 11, [Stand 18.05.2018]

⁸⁶ Vgl. Dickreiter, S. 345

⁸⁷ Vgl. Laumann, S. 11, [Stand 18.05.2018]

⁸⁸ Vgl. Dickreiter, S. 346

⁸⁹ Vgl. Georg Neumann GmbH, S. 3



Abb. 18: Kunstkopf KU 100 (Neumann)

Obwohl auch Korpus und Schulter nachweislich einen zwar geringeren, aber dennoch vorhandenen Einfluss auf die HRTF haben, werden bei vielen Kunstkopfsystemen nur Kopf und Ohrmuschel (Pinna) nachgebildet. Der Frequenzgang der Außenohrübertragungsfunktion wird durch die Schulter bei bestimmten Frequenzen mit ± 5 dB und durch den Torso mit etwa ± 3 dB beeinflusst. Die Plausibilität binauraler Aufnahmen kann dadurch beeinträchtigt werden.⁹⁰

6.1.5. Messung kopfbezogener Impulsantworten

Neben verschiedenen Versuchen, binaurale Aufnahmen mit einem Kunstkopf zu realisieren, wurden analog einige Versuche mit Sonden- und Miniaturmikrofonen direkt im Ohrkanal eines Hörenden bewerkstelligt. Die aus diesem Verfahren gewonnene Übertragungsfunktion berechnet sich aus der Systemantwort, also einer kopfbezogenen Impulsantwort, auf ein geeignetes Anregungssignal. In umfangreichen Versuchen wurden unter Betrachtung der Beträge aller gemessenen Außenohrübertragungsfunktionen interindividuelle Abweichungen festgestellt. Der

⁹⁰ Vgl. Weinzierl, S. 586

Funktionsverlauf verhielt sich zwar annähernd einheitlich, oberhalb von 7 kHz kam es jedoch zu abweichenden Amplitudengängen. Unterschiede der Außenohrübertragungsfunktion treten nicht nur bei unterschiedlichen Testpersonen auf, sondern auch bei beiden Ohren eines einzelnen Hörers. Bei symmetrischer Anordnung einer Schallquelle in vertikaler Ebene liefern Messungen an beiden Ohren eine leicht voneinander divergierende Übertragungsfunktion.⁹¹ Nicht nur interindividuelle Unterschiede charakterisieren eine kopfbezogene Impulsantwort, sondern auch der Messpunkt im Ohrkanal spielt eine wesentliche Rolle bei der Konvergenz verschiedener Übertragungsfunktionen. Der Aufnahmepunkt im Ohrkanal ist besonders oberhalb der Frequenz von 1 kHz für den Verlauf einer HRTF bedeutsam.⁹² Dabei stehen wie in nachfolgender Abbildung (**Abb. 19**) drei Verfahren zur Betrachtung. Gemessen an zwölf Testpersonen sind die überlagerten Übertragungsfunktionen an drei Messpunkten abgebildet.

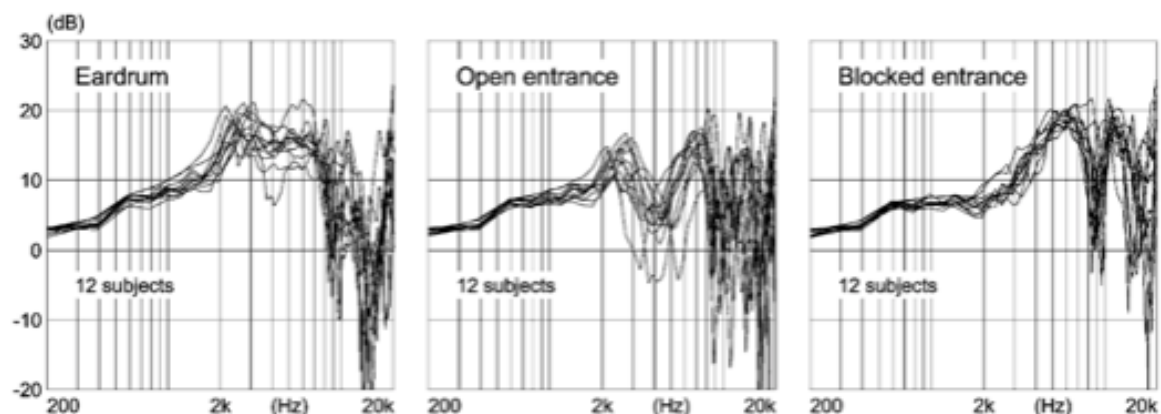


Abb. 19: Messung Außenohrübertragungsfunktion von zwölf Personen an drei verschiedenen Messpunkten: Vor dem Trommelfell (links), am offenen Eingang zum Ohrkanal (Mitte), geblockter Eingang zum Ohrkanal (Rechts)

Dabei wird in der linken Grafik die Abhörposition vor dem Trommelfell genutzt, in der mittleren Abbildung mit offenem Eingang und in der rechten Grafik mit

⁹¹ Vgl. Laumann, S. 12, [Stand 18.05.2018]

⁹² Vgl. Weinzierl, S. 586

geblocktem Eingang zum Ohrkanal gemessen. Bei Betrachtung aller drei Grafiken fällt auf, dass die Approximation aller gemessenen Übertragungsfunktionen unter Berücksichtigung dieser drei Messverfahren bei Messung mit geblocktem Gehöreingang am feinsten ausfällt. Die individuellen Abweichungen sind hier am geringsten, wodurch sich diese Messmethode als sehr günstig erweist. Alle relevanten Richtungsinformationen sind an diesem Messpunkt in der gewonnenen Außenohrübertragungsfunktion bereits enthalten. Lediglich eine in der Übertragungsfunktion enthaltene, aber von der Einfallsrichtung unabhängige spektrale Veränderung, ist zu beobachten, die aber durch eine richtungsunabhängige Entzerrung kompensiert werden kann.⁹³

6.1.6. Diffus-und Freifeldentzerrung von Kopfhörern

Die Wiedergabe künstlich oder natürlich aufgenommener Ohrsignale erfolgt in der Binauraltechnik über Kopfhörer. Ein großer Vorteil dieses Wiedergabemediums stellt die Unabhängigkeit der gegebenen Raumakustik dar. Mangelnde Schalldämmung oder unerwünschte Störgeräusche innerhalb des Abhörortes können somit vermieden oder zumindest vermindert werden. Ein zusätzlicher Vorteil bietet die identische Abhörbedingung für mehrere Hörer gleichzeitig, da die Wiedergabe unabhängig von einem Sweet Spot ist. Zusätzlich wird jedem Ohr definiert ein eigener Schallwandler zugeordnet, sodass Einflüsse eines Signals auf das jeweils andere Ohr (Übersprechen) vernachlässigt werden können. Eine klare Kanaltrennung kann hier also ohne großen Aufwand gewährleistet werden. Diese Bedingung ist bei einer Lautsprecherwiedergabe nicht gegeben. Dennoch können auch bei Wiedergabe über Kopfhörer Beeinträchtigungen auftreten. Da die elektroakustischen Wandler direkt am Ohr sitzen, kann es unter bestimmten Umständen zu einer fehlerhaften Im-Kopf-Lokalisation kommen. Zudem wird bei diesem Wiedergabemedium die Kopfbewegung nicht in das Klangbild integriert, wodurch

⁹³ Vgl. Weinzierl, S. 587

das Klangbild eine Kopfbezogenheit besitzt. Dieser Umstand kann aber mit einem entsprechenden Headtrackingsystem kompensiert werden.⁹⁴ Auch bei der Kopfhörerwiedergabe kommt es zu individuellen Ungleichmäßigkeiten der Kopfhörerübertragungsfunktionen, die bedingt durch die Vielfältigkeit und Unterschiedlichkeit aller Kopfhörerexemplare auftreten. Abweichungen treten auch auf, wenn die Sitzposition einer Kopfhörermuschel verändert wird. Für eine annähernd naturgetreue Abbildung des aufgenommenen Schallereignisses ist demnach eine spezifische Kalibrierung für Testperson und Kopfhörer notwendig.⁹⁵

Schallabschattung und Beugung, die bei der Signalwiedergabe über Lautsprecher an Ohr und Kopf der Testpersonen stattfindet, bilden Voraussetzungen, die bei der Kopfhörerwiedergabe nicht gelten. Abhängig von der Einfallsrichtung des Ohrsignals kommt es zu einem frequenzabhängigen Schalldruckpegel, der in der oben erläuterten Außenohrübertragungsfunktion beschrieben wird. Diese Merkmale werden mit der Wiedergabe über Kopfhörer aber zunächst unterdrückt. Um annähernd gleiche Bedingungen beider Wiedergabesysteme zu schaffen, werden Kopfhörer frei- oder diffusfeldentzerrt, d.h. es kommt zu einer für die Lautsprecherwiedergabe typischen Frequenzgang-Anpassung.⁹⁶ Entscheidend ist, welche Schallfeldsituation dabei als Referenz genutzt wird. Die Freifeldentzerrung eines Kopfhörers nutzt als Referenzwert die Übertragungsfunktion einer Schallquelle im freien Feld. Die Außenohrübertragungsfunktion beinhaltet bei einer Freifeldentzerrung aber lediglich eine einzige frontale Beschallungssituation mit 0 Grad Azimut und 0 Grad Elevation. Diese Art der Entzerrung eignet sich daher besonders gut für Aufnahmen, deren Schallquellen frontal positioniert sind. Mit Entwicklung der Binauraltechnik wird die Freifeldentzerrung von Kopfhörern Anfang der Achtziger Jahre als ungeeignet eingestuft, wodurch der Diffusfeldentzerrung nun mehr Beachtung geschenkt wird. Für eine annähernd naturgetreue Darbietung

⁹⁴ Vgl. Dickreiter, S. 349

⁹⁵ Vgl. Laumann, S. 14, [Stand 18.05.2018]

⁹⁶ Vgl. Laumann, S. 14, [Stand 18.05.2018]

binauraler Schallereignisse werden in der HRTF einer Diffusfeldentzerrung verschiedene Schallquellenpositionen berücksichtigt. Eine Annäherung ergibt sich durch Messungen einer Vielzahl von Schalleinfallsrichtungen. Freifeldentzernte Kopfhörer würden nur bei einer definierten Schalleinfallsrichtung (Idealfall: 0 Grad Azimut und 0 Grad Elevation) einen optimalen Frequenzverlauf besitzen. Alle weiteren Schalleinfallsrichtungen führen zu einem fehlerhaften Frequenzgang, sodass eine annähernd naturgetreue Darbietung eines spatialen Signals nicht gewährleistet wäre. Werden bei der Diffusfeldentzerrung mehrere Schalleinfallswinkel berücksichtigt und durch Mittelung auf einen Durchschnittswert gebracht, ist das Ergebnis einer naturgetreuen Wiedergabe binauraler Signale zufriedenstellender, aber dennoch für keine Einfallsrichtung optimal.

Theile (1986) sieht die Diffusfeldentzerrung als Standard vor und begründet diesen Ansatz wie folgt. Als Grundlage seiner Annahme dient das Assoziationsmodell, welches die Verarbeitung akustischer Reize nach zwei Kriterien beurteilt. Die Lokalisation einer Schallquelle durch Reflexionen an Ohr, Pinna, Kopf und Oberkörper wird in der Ortsassoziationsstufe beschrieben. In der Gestaltassoziationsstufe werden alle anderen Eigenschaften, wie die Klangfarbe des Signals, beschrieben. Beide Prozesse finden nacheinander statt und bilden gemeinsam das Hörereignis, welches zur eigentlichen auditiven Wahrnehmung führt.⁹⁷

„Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf die beiden voneinander unabhängigen, stets paarweise auftretenden Schallquelleneigenschaften ‚Ort‘ und ‚Signal‘. Demzufolge sind im Modell die auftretenden Hörereignisse zurückzuführen auf die Wirkung einer ortsbestimmenden und einer gestaltbestimmenden Verarbeitungsstufe.“

Theile 1981, S. 159

⁹⁷ Vgl. Theile, S. 23 - 30 [Stand: 20.06.2018]

Die Ortsassoziationsstufe sorgt also zunächst als Entzerrung für spektrale Veränderungen im Signal, jedoch noch nicht für die Wahrnehmung der Klangfarbe. Diese wird erst in der zweiten Stufe, der Gestaltassoziation verarbeitet. Wird ein Kopfhörer bei der Wiedergabe eines akustischen Ereignisses nicht entzerrt, fehlen natürliche Verfärbungen durch Reflexion an Kopf, Ohr und Oberkörper, sodass eine kopfhörertypische Im-Kopf-Lokalisation stattfindet. Die Ortsassoziation findet also nicht statt. Allerdings stellt die Gestaltassoziationsstufe eine Klangfarbenveränderung durch Verzerrungen des Kopfhörerfrequenzgangs fest, was zu einem Missverhältnis der korrekten Signalwahrnehmung führt. Hier wird deutlich, wie bedeutungsvoll die Kopfhörerentzerrung auf die korrekte Darbietung des Originalsignals wirkt. Wird nun ein Kopfhörer freifeldentzerrt, so argumentiert Theile, stünde die Analyse der Ortsassoziationsstufe, die sich hier nur an den auditiven Informationen einer einzigen, spezifischen Richtung orientiert, in einem Konflikt mit der darauffolgenden Gestaltassoziationsstufe. Das bedeutet, dass ein Referenzwert in Verbindung mit interauralen Differenzen üblicher Stereoaufnahmen kein schlüssiges Hörereignis im Wahrnehmungsprozess hervorbringen würde. Theile begründet damit die Notwendigkeit einer Mittelung durch Referenzwerte verschiedener Richtungen, also einer Diffusfeldentzerrung.⁹⁸

Unterschiede beider Entzerrungsprinzipien werden bei grafischer Gegenüberstellung ersichtlich. Im Vergleich von Frei- und Diffusfeldentzerrung ergeben sich frequenzabhängige Pegelunterschiede, die in folgender Abbildung (**Abb. 20**) grafisch dargestellt werden.

In der Abbildung deutlich zu erkennen ist eine im Bereich von 2 bis 5 KHz herausstechende Pegelerhöhung in der hier blau gekennzeichneten Freifeld-Übertragungsfunktion. Die Diffusfeld-Übertragungsfunktion hingegen besitzt eine Pegelspitze im Bereich von 8 bis 10 kHz. Orientiert an dem optimal verlaufenden

⁹⁸ Vgl. Schärer, S. 17 [Stand: 10.05.2018]

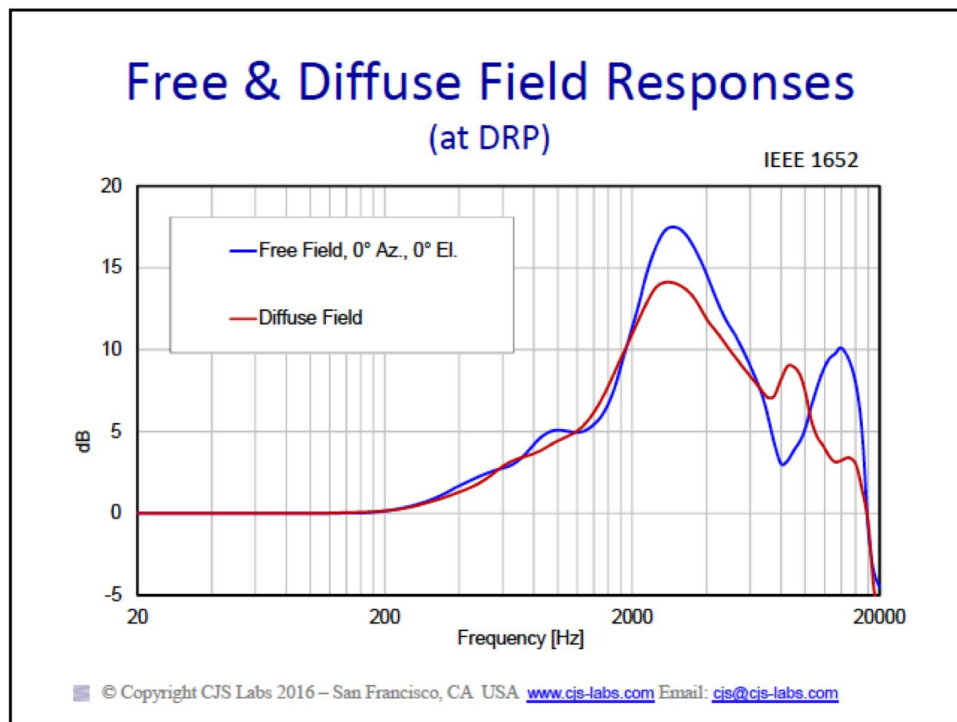


Abb. 20: Freifeld-HRTF (blaue Kurve) mit frontaler Schalleinfallsrichtung (0° Azimut, 0° Elevation), Diffusfeld-HRTF (rote Kurve) mit Berücksichtigung verschiedener Schalleinfallsrichtungen

Frequenzgang der HRTF im Freifeld (blau) fällt eine Abweichung der HRTF im Diffusfeld (rot) auf.

Da sich die Werte einer diffusfeldentzerrten HRTF durch Mittelung ergeben, gehen Phasenbezüge größtenteils verloren, sodass es hierbei zu einem fehlerbehafteten Frequenzgang kommt. Eine Kopfhörer-Entzerrung kann also nur für eine Schalleinfallsrichtung ideal erfolgen.⁹⁹ In-Ear-Kopfhörer erweisen sich bei der Wiedergabe eines spatialen Signals als eher ungeeignet.¹⁰⁰

⁹⁹ Vgl. Schröder [Stand: 05.06.2018]

¹⁰⁰ Vgl. Laumann, S. 14 [Stand 18.05.2018]

6.2. Überblick aktueller Binauraltechnologien

Zur Zeit existieren vier nennenswerte Systeme, die die Technologien binauraler Audiowiedergabe anwenderseitig zugänglich machen. Der Vorzug dieser Systeme ist je nach Anwendungsgebiet und Forschungsstand zu betrachten. Zur Feststellung eines qualifizierten Systems für die Umsetzung eines binauralen Kopfhörerkonzertes ist eine Übersicht der Kerninhalte obligatorisch.

6.2.1. KLANG:technologies GmbH

Die KLANG:technologies GmbH aus Aachen ist ein im Januar 2014 gegründetes Unternehmen, dessen Technologie dreidimensionalen Sound über herkömmliche Kopfhörer in Echtzeit ermöglicht. Das Unternehmen ist aus dem Institut für technische Akustik der RWTH Aachen hervorgegangen. Zu den Gründern der KLANG:technologies GmbH zählen Roman Scharrer, Robin Müller, Benedikt Krechel und Dr. Pascal Dietrich. Bereits im Juni 2014 etablierte sich das Unternehmen mithilfe der ersten Finanzierungsrunde mit einer dreidimensionalen In-Ear-Monitoring-Lösung in Verbindung mit einer interaktiven Applikation zur Bedienung des Systems.¹⁰¹ In-Ear-Systeme gewinnen im Live-Bereich in den letzten Jahren immer mehr an Beliebtheit, nicht zuletzt um das Sounderlebnis der Musiker auf der Bühne zu optimieren. Auf diese Weise ist ein individueller Mix für jeden Musiker realisierbar, ohne das Störeinflüsse wie Übersprechen oder Rückkopplungen das Klangerlebnis reduzieren. Die bereits beschriebenen Konflikte, die bei der Nutzung von Kopfhörersystemen für das menschliche Ohr auftreten, werden durch Reproduktion fehlender Schallinformationen relativiert.¹⁰² Die Technik der binauralen Tonaufnahme ermöglicht zunächst eine dreidimensionale Wiedergabe der bereits in der Vergangenheit aufgenommenen Signale. Ingenieure der RWTH Aachen erweiterten mit der KLANG:technologie eine virtuelle dreidimensionale

¹⁰¹ Vgl. VC-Magazin [Stand: 07.07.2016]

¹⁰² Latta, [Stand: 09.05.2018]

Signalwiedergabe in Echtzeit.¹⁰³ In-Ear-Monitoring Systeme wurden bereits von unterschiedlichen Herstellern entwickelt. Da Systeme, wie Aviom „A-16“, Hear Technologies „Hearback“ oder DBX „PBX 16“ für den Bühnensektor zu sperrig sind, wird im Live-Betrieb vermehrt die kompakte Hard- und Softwarelösung der KLANG:technologies genutzt. Besonders an dieser Technologie ist die Signalwiedergabe dreidimensionaler Klangereignisse. Damit können die Klangelemente klar voneinander getrennt und weiträumig positioniert werden, was zu einem transparenteren und natürlicheren Klangerlebnis führt.¹⁰⁴

„Das 3D KLANG System eröffnet eine neue Welt der In-Ears. Endlich eine Lösung, die mehr Raum und Definition für meinen persönlichen Mix bietet. (...) Der 3D Sound sollte Standard für alle Monitoring Systeme und von PA Firmen auf der ganzen Welt genutzt werden!“¹⁰⁵

Franck Van Der Heijden - Musical Director bei David Garrett

Die Produkte

Die KLANG:technologies GmbH hat derzeit einige Produkte im Repertoire, die sich in Funktionsumfang und Anwendungsprofil unterscheiden. Um die Auswahl der in dem praktischen Teil der Arbeit verwendeten System nachvollziehen zu können, gibt der folgende Abschnitt eine grobe Übersicht der dafür relevanten Komponenten.

KLANG:vier

Das KLANG:vier System repräsentiert das kleine Format der dreidimensionalen In-Ear-Monitoring-Technologie des Unternehmens. Mit dieser Hardware-Lösung

¹⁰³ Vgl. KLANG:technologies GmbH: ÜBER KLANG:TECHNOLOGIES [Stand: 09.05.2018]

¹⁰⁴ Latta, [Stand: 09.05.2018]

¹⁰⁵ KLANG:technologies GmbH: ÜBER KLANG:TECHNOLOGIES [Stand: 09.05.2018]

können fünf individuelle Monitor-Mischungen zeitgleich realisiert werden. Die Nutzung kabelgebundener In-Ear-Kopfhörer ist durch die an der Vorderseite angebrachten 1/4" Stereo-Kopfhörer-Ausgänge möglich. Zudem können über den DB-25 Anschluss auf der Rückseite des Gerätes ebenso Funkstrecken zum Einsatz kommen, sodass ein kabelloses In-Ear-Monitoring System zum Einsatz kommen kann. Alle fünf individuellen Mischungen liegen am Dante-Ausgang auf der Rückseite an.¹⁰⁶

KLANG:fabrik

Die KLANG:fabrik ist eine Erweiterung des KLANG:vier Systems und stellt das Herzstück des Unternehmens dar. Da diese Hardware für die Durchführung eines binauralen Kopfhörerkonzertes von besonderer Relevanz ist, wird im Nachfolgenden ausführlich auf den Funktionsumfang eingegangen.

Um die Kompatibilität zu aktuellsten Mischpulten und Stageboxen zu gewährleisten, verfügt das System über eine große Anzahl flexibler Audioschnittstellen wie MADI, Dante und ADAT. Über eine XLR-Steckverbindung werden alle 3D-Mixe an die Funkstrecken und Kopfhörerverstärker weitergeleitet und gelangen so schließlich an das Ohr jedes Musikers. Laut Hersteller ist bei der Signalübertragung auf Grund des Einsatzes von leistungsfähigen Hochleistungs-Signalprozessoren keine Latenz hörbar.¹⁰⁷ Die folgende Abbildung (**Abb. 21**) illustriert schematisch den Aufbau von Vorder- und Rückseite des KLANG:fabrik-Systems.

¹⁰⁶ Vgl. KLANG:technologies GmbH: *3D IN-EAR MIXING FÜR 5 MUSIKER* [Stand: 10.05.2018]

¹⁰⁷ Vgl. KLANG:technologies GmbH: *3D IN-EAR MIXING FÜR 8 MUSIKER* [Stand: 10.05.2018]

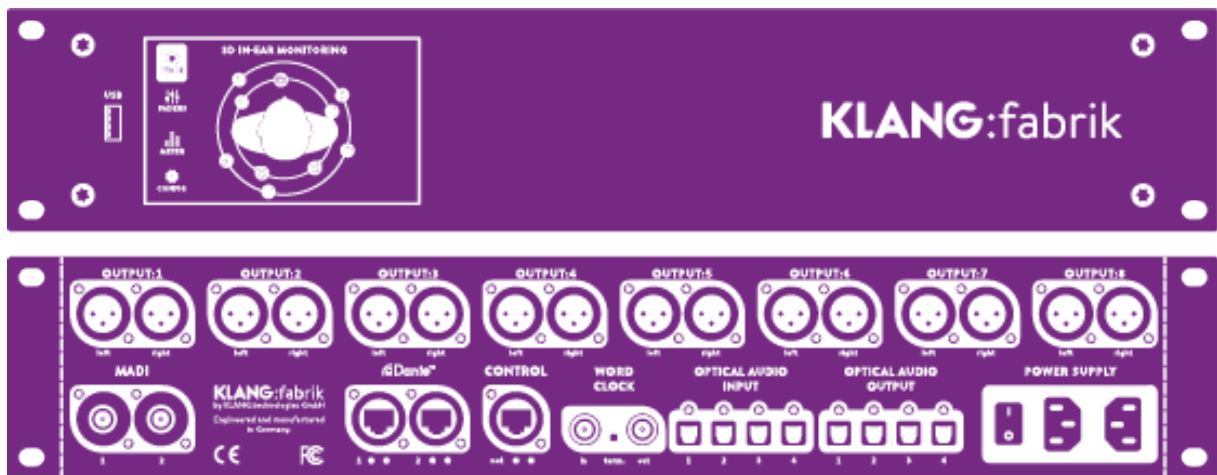


Abb. 21: Vorder- und Rückansicht der In-Ear-Monitoring-Lösung „KLANG:fabrik“

Die Vorderseite des Gerätes ist mit einem Bildschirm versehen, welcher mit Touchscreen bedient werden kann. Zusätzlich ist hier noch ein USB-Eingang vorzufinden. Auf der Rückseite befinden sich neben dem Stromanschluss 16 XLR-Eingänge, welche das Ausgeben von acht Stereo-Signalen, also acht 3D-Monitormischungen, möglich macht. Auf der Rückseite sind zudem zwei Dante-Schnittstellen und jeweils vier digitale optische ADAT Ein- und Ausgänge vorzufinden, wodurch die Audiosignale entweder über ein Dante-Netzwerk, oder digital über ADAT eingespeist werden können. Um die Synchronität aller digital angeschlossenen Systeme zu gewährleisten, steht zusätzlich ein Wordclock-Ein- und Ausgang zur Verfügung. Eine MADI-Schnittstelle erweitert die Kompatibilität zu einer Vielzahl von Digitalpulten.¹⁰⁸

KLANG:app

Die interaktive Software mit dem Produktionsnamen KLANG:app dient zur Steuerung der Monitorlösungen KLANG:vier und KLANG:fabrik und wird für verschiedene Plattformen, wie iOS und Android, sowie für die Betriebssysteme Mac

¹⁰⁸ Latta, [Stand: 09.05.2018]

und Windows zur Verfügung gestellt. Mit ihr können alle Instrumente individuell und dreidimensional verteilt werden. Die Kommunikation erfolgt über ein WLAN-Router oder über ein am Control-Port der Hardware angehängten Computer. Die Kombination aus Soft- und Hardware des Monitorsystems ermöglicht den vollen Funktionsumfang dieser Hardware-Komponente.

Das Interface der Applikation verfügt über verschiedene Ansichten, welche die Benutzung laut Herstellerangaben auch ohne große Vorkenntnisse gewährleistet. Mit einer am linken Bildschirmrand befindlichen, vertikalen Menüleiste kann zwischen den Menüpunkten „Stage“, „Faders“, „Meter“, und „Config“ gewechselt werden. Das Benennen und Einfärben eingehender Kanäle und Zusammenfassen von Gruppen kann im Menüpunkt „Config“ vorgenommen werden. „Meter“ zeigt die Pegelausschläge in Bargraphen aller Eingangs- und Ausgangskanäle in Echtzeit an. Die Mischung kann in dem Menüpunkt „Faders“ kontrolliert werden. Hier steht eine simple Mischpult-Ansicht mit Mute- und Solo-Funktion zur Verfügung. Der Pegel jedes Kanals kann in 0.5 dB-Schritten erhöht oder verringert werden. Mit dem obersten Menüpunkt „Stage“ können alle Einzelkanäle in drei Ebenen um den Kopf positioniert werden. Dafür stehen zwei Ansichten zur Verfügung. Eine, welche die Verteilung der Elemente auf Höherebene zulässt und eine, wie in **Abb. 22** dargestellt, in Form eines illustrierten Kopfes.¹⁰⁹

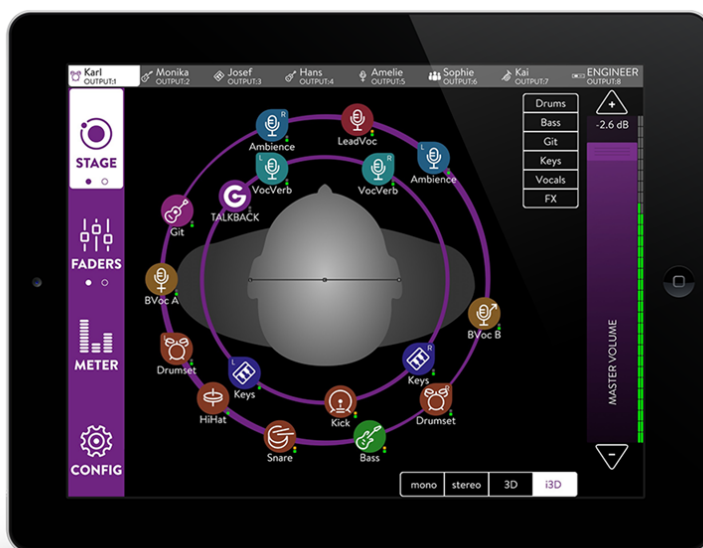


Abb. 22: Interface der KLANG:app Applikation, hier: Menüpunkt „Stage“ zur Positionierung der Einzelkanäle in drei Ebenen

¹⁰⁹ Latta, [Stand: 09.05.2018]

6.2.2. Ambeo Orbit

Das Unternehmen Sennheiser entwickelte Ende des Jahres 2017 ein kostenloses Software Plug-In, welches das statische Mischen immersiver, binauraler Inhalte ermöglicht, also ohne Berücksichtigung von Kopfbewegungen. Dazu nutzt das Plug-In als Referenz für binaurale Aufnahmen den Kunstkopf KU100 der Firma Neumann. Laut Hersteller lassen sich mittels hochqualifizierter HRTF-Filter Mono- oder Stereoquellen im 3D-Klangfeld positionieren. Es ist als AAX, VST, VST3 oder AU Plug-In für die Betriebssysteme macOS und Windows verfügbar und muss nach Download auf der Herstellerseite auf dem Rechner installiert werden. In der grafischen Oberfläche des Plug-Ins (**Abb. 23**) kann die Positionierung der Audiosignale nun in drei Ebenen erfolgen. Dafür stehen Regler zur Verfügung, mit denen sich der Grad der Elevation, also der vertikalen Ebene, der Winkel des Azimuts (horizontale Ebene) und Parameter zum Bestimmen der Raumakustik (Entfernung des Objektes) einstellen lassen. Neben den ortsgebundenen Kriterien kann die Klangfarbe und die Entfernung (Breite) zweier Klangobjekte angegeben werden.



Abb. 23: Benutzeroberfläche des Ambeo Orbit Plug-In

Die Vorgehensweise des binauralen Mischen mit Ambeo Orbit ist ähnlich der einer DAW Session mit Stereoinhalten. Der Import aller Audiosignale erfolgt auf separaten Spuren. Neben aufgenommenen Monosignalen können auch Stereosignale integriert werden, die beispielsweise mit einem Kunstkopf im Vorfeld aufgezeichnet wurden. Werden die einzelnen Komponenten des Stereosignals im Stereopanorama hart rechts und hart links positioniert, so ergibt sich eine spatiale Raumillusion bereits ohne Zuführen des Ambeo Orbit Plug-In. Alle vorhandenen Monosignale müssen zum dreidimensionalen Positionieren das Plug-In durchlaufen. Alle Mono-Outputs werden von Ambeo Orbit in Stereo-Outputs konvertiert, die wie ein Kunstkopf-Stereosignal hart links und hart rechts positioniert werden müssen. Laut Herstellerangaben wird das Platzieren des Ambeo Orbit Plug-Ins an das Ende der Signalkette, also als letzten Insert empfohlen. Die Stereo-Summe aller binauralisierten Audiosignale steht als dreidimensionale auditive Szene für die Kopfhörerwiedergabe zur Verfügung. Der übliche binaurale Signalfloss mit der Ambeo Orbit Technologie ist in Abbildung **(Abb. 24)** dargestellt.¹¹⁰

¹¹⁰ Sennheiser electronic GmbH, S. 10 - 17 [Stand: 13.06.2018]

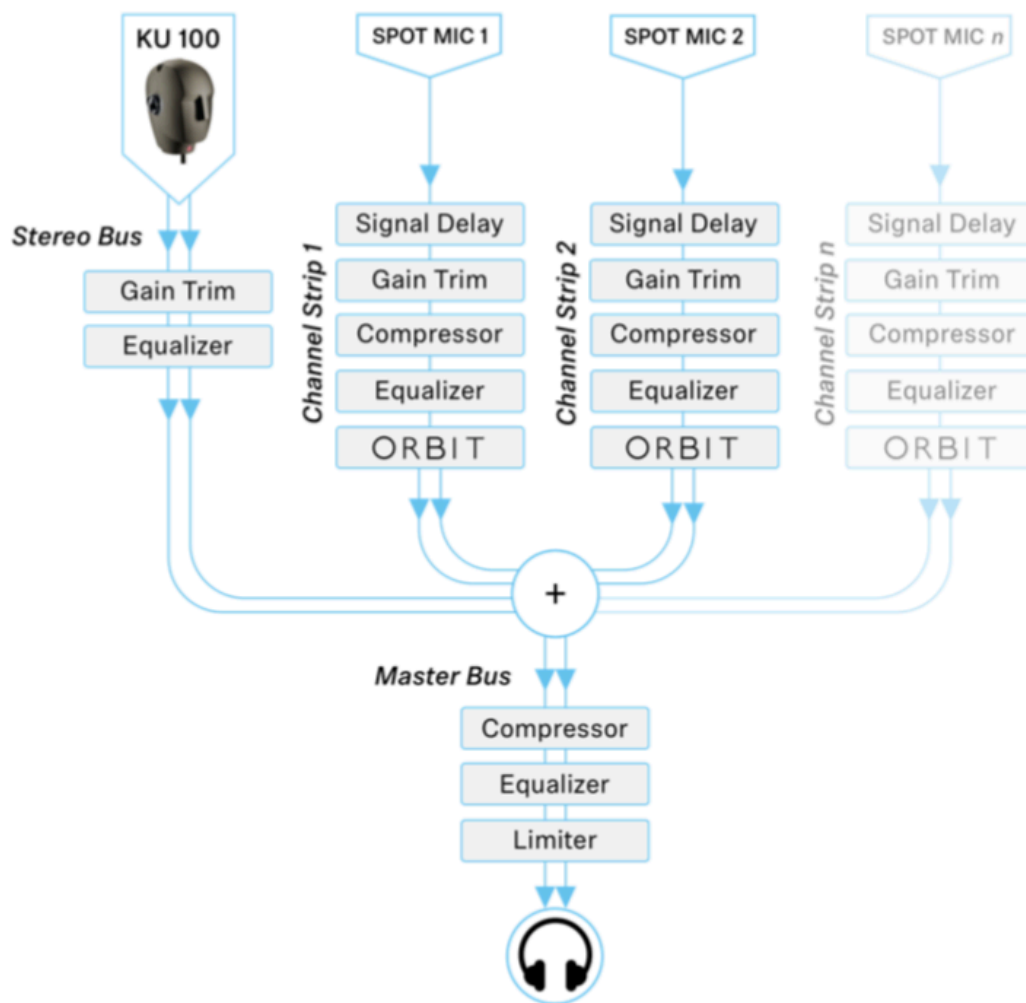


Abb. 24: Signalfluss von Audiosignalen in einer DAW mit Ambeo Orbit Binauraltechnologie

6.2.3. Cingo

Cingo ist eine von Fraunhofer (Institut für Integrierte Schaltungen IIS) entwickelte Technologie, die nicht nur die Wiedergabe von Stereo- und 5.1 Surround-Audioinhalten auf Kopfhörern ermöglicht, sondern auch die virtuelle Nachbildung dreidimensionaler Inhalte zulässt. Die Cingo-Technologie ist eine gebrauchsfertige Software-Implementierung für Hersteller von mobilen Endgeräten und für den mobilen Sektor in den Bereichen Film, Spiele und andere VR-Umgebungen ausgelegt. Die unterstützten Formate sind unter anderem 5.1, 9.1 und 11.1. Zusätzlich bietet die Cingo-Technologie eine Lautheitsoptimierung an, die in

störenden Geräuschkulissen für eine adäquate Anpassung der Lautstärke sorgt. Laut Herstellerangaben erfolgt die Binauralisierung mittels intelligenter Algorithmen, die das Audiosignal analysieren. Während der Positionierung einzelner Klangelemente findet eine Faltung in Echtzeit statt (ohne hörbare Latenz), sodass eine dreidimensionale auditive Szenerie über Kopfhörer wiedergegeben werden kann.¹¹¹

6.2.4. Spatial Audio Designer

Der Spatial Audio Designer ist eine von der Firma New Audio Technology entwickelte Software-Lösung, welche als Plug-In alle gängigen Formate bedienen kann. In einer DAW eingesetzt, ermöglicht der Spatial Audio Designer neben Mischungen in Stereo, Surround und Dolby Atmos auch binauralisierte dreidimensionale Klangerlebnisse. Dafür muss jeder Kanal, der Teil dieser Mischung werden soll, mittels Send-Plug-In (hier kann die Kanalbezeichnung vorgenommen werden) in den Spatial Audio Designer geroutet werden. Dieses bündelt alle Kanäle und die Positionierung aller Klangquellen kann erfolgen. Um einen Surround 3D-Kopfhörermix zu erhalten, muss im Interface des Spatial Audio Mixers die Auswahl „Virtualize Speaker“ getroffen werden.

In der grafischen Ansicht des Plug-In kann nun für jeden vorhandenen Kanal die räumliche Verteilung in drei Ebenen erfolgen. Neben einer Mute- und Solo- Funktion für jeden Kanal kann auch die Lautstärke im Mix bestimmt werden.

Das Anwendungsgebiet des Spatial Audio Designer liegt in der Postproduktion bereits aufgenommener Audioinhalte und ist für den Live-Bereich nicht geeignet.¹¹²

¹¹¹ Vgl. Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS [Stand: 10.05.2018]

¹¹² Vgl. Scholz [Stand: 16.06.2018]

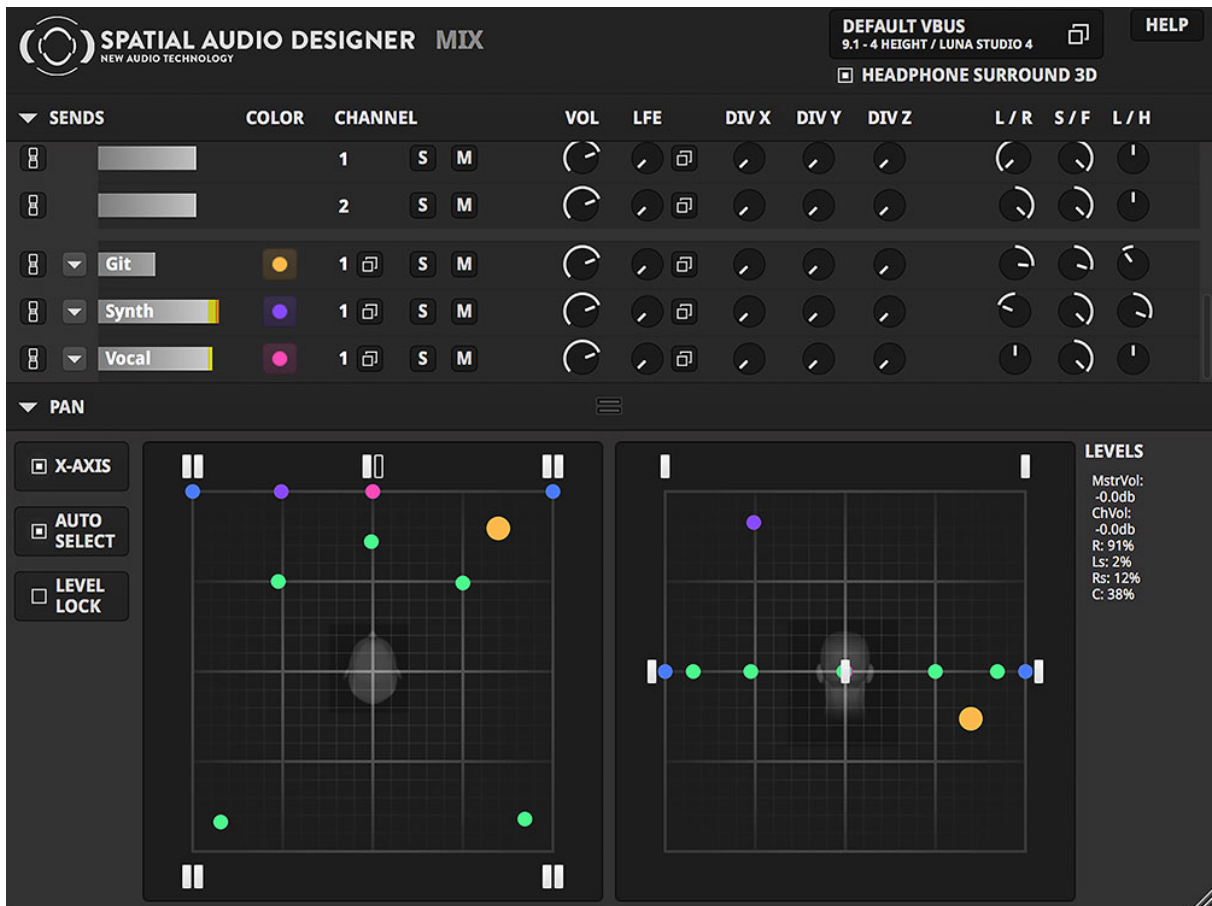


Abb. 25: Grafische Oberfläche des Spatial Audio Designer der Firma New Audio Technology

7. Ethernet-basierte Audionetzwerke

Die Basis der Signalübertragung aller Kanäle des binauralen Kopfhörerkonzertes stellt ein Dante-Netzwerk dar, welches über die Dante-Schnittstelle in der KLANG:fabrik und des Allen&Heath GLD-80 Digitalpultes miteinander verbunden war. Als Grundvoraussetzung zum Verständnis dieser Vorgehensweise, geht diese Arbeit im Folgenden auf die Grundlagen eines Dante-Netzwerkes ein.

Auf Grund der in den letzten Jahrzehnten voranschreitenden Digitalisierung ist auch in der Audioverarbeitung und -distribution seit einiger Zeit der Austausch von größeren Datenmengen über Netzwerke etabliert, nicht zuletzt, weil der Anspruch mit fortschreitenden Entwicklungen ständig zunimmt. Besonders Entwicklungen in der spatialen Audio-Technologie fordern die Übertragung einer enormen Anzahl von Audiokanälen, sodass die Nachfrage nach einem sicheren und effizienten Übertragungssystem stetig wächst. Analoge Mehrkanalübertragung ist, bedingt durch die erforderlichen Datenmengen und wegen seiner Störanfälligkeit in den vergangenen Jahren zunehmend in den Hintergrund geraten.¹¹³ Die digitale Übertragung ermöglicht die verlustfreie Übermittlung großer Datenmengen über weite Distanzen und besitzt zudem die Möglichkeit, an verschiedenen Stellen abgegriffen werden zu können, was den Verkabelungsaufwand erheblich eindämmt.¹¹⁴ Systemanbieter wie *Stagetec*, *Calrec* und *Lawo* haben bisher Installationen mit optischen Verbindungen angeboten. Seit geraumer Zeit geraten aber immer mehr Netzwerkinfrastrukturen bei der Audioübertragung in den Vordergrund, da sie vergleichsweise kostengünstig zu realisieren sind.¹¹⁵ Die Netzwerktechnologie bietet zudem noch einen weiteren Vorteil. Die Routingeinstellungen und Konfigurationen können mit einer PC-kompatiblen

¹¹³ Vgl. Altrichter, S. 1

¹¹⁴ Vgl. Heyden, S. 1

¹¹⁵ Vgl. Altrichter, S. 1

Vorgehensweise über Softwareoberflächen erfolgen, sodass kostenaufwendige analoge Kreuzschienen nicht mehr notwendig sind.¹¹⁶ Die Synchronität der Datenübermittlung, also die Übertragung in Echtzeit, ist besonders bei Audiodaten ausschlaggebend, was die Anforderungen der Netzwerkinfrastruktur im Gegensatz zu anderen digitalen Signalübertragungen erheblich erhöht. Das Verfahren der Datenübertragung nutzt Protokolle zur Kommunikation in Netzwerken. Sie dienen dem Verpacken von Nutzdaten, um sie dann über abstrahierte Schichten versenden zu können. Diese Datenprotokolle können allein noch nicht als Netzwerk definiert werden, sondern sind lediglich Datenströme, die den Informationsaustausch vom Sender zum Empfänger gewährleisten. Es existieren aktuell eine Reihe an Datenprotokollen, die sich nach Funktionsumfang unterscheiden und je nach Anspruch und Anwendung eingesetzt werden. Jede dieser Technologien erfüllen dabei einen zugeschriebenen Standard, in dem deren verfügbare Eigenschaften festgehalten werden. Bei der Wahl einer bestimmten Netzwerk-Technologie sollte also im Vorfeld die Nutzungsanforderung erörtert werden. Das OSI-Referenzmodell stellt dabei die Grundlage dieser Kategorisierung dar. Für diese Arbeit sind lediglich Grundlagenkenntnisse der Netzwerk-Technologie und die prinzipielle Herangehensweise der Ethernet-basierten Audio-Datenübertragung von Bedeutung, weshalb sich die folgenden Kapitel insbesondere auf diesen Teilbereich konzentrieren.¹¹⁷

¹¹⁶ Vgl. Heyden, S. 1

¹¹⁷ Vgl. Altrichter, S. 2f

7.1. Grundlagen der Netzwerktechnologie digitaler Audiodaten

Die für ein Netzwerk benötigte Hardware stellt die Grundvoraussetzung für ein funktionierendes Netzwerk dar. Daher wird das folgende Kapitel auf die benötigten Kabelverbindungen eingehen. Anschließend werden Grundlagen zum Verständnis der Netzwerkarchitektur erläutert, um nachfolgend einen Überblick über die am weitesten verbreitete Ethernet-basierten Netzwerktechnologie Dante zu geben. Diese Technologie ist besonders von Bedeutung, da sie die Basis der Netzwerkstruktur des binauralen Kopfhörerkonzertes darstellt.

7.1.1. Hardware

Das Übertragungsmedium einer Ethernet-basierten Punkt-zu-Punkt Übertragung erfolgt mittels Twisted-Pair-Kupferkabel in den Leistungsklassen CAT 5, CAT 6 oder CAT 7. Die dazugehöriger Schnittstellen bestehen aus RJ-45 Buchsen.¹¹⁸ Ein Kupferkabel besitzt vier Paare von verdrehten Leitungen, die die Übertragung eines symmetrischen, hochfrequenten Digitalsignal ermöglichen. Zwei der Leitungspaare werden für den Up-und Downstream eingesetzt, die verbleibenden zwei können für eine dieser richtungsgebundenen Wege herangezogen werden.¹¹⁹

7.1.2. Das OSI-Referenzmodell

Das OSI-Modell (Open System Interconnection) skizziert die Datenstruktur der einzelnen hierarchischen Schichten von Computersystemen. Das Modell dient der Standardisierung und Vereinheitlichung unterschiedlicher Netzwerkprotokolle und wurde Anfang der Achtziger Jahre von der ISO Organisation entwickelt.¹²⁰ Ziel

¹¹⁸ Vgl. Heyden, S. 1

¹¹⁹ Vgl. Altrichter, S. 4

¹²⁰ Vgl. Infotip Service GmbH [Stand: 13.06.2018]

dieses standardisierten Schichtenmodells ist die Kommunikation der teilnehmenden Geräten in einer Netzwerkstruktur über genormte Schnittstellen, sodass es allgemein als Grundlage für die Kommunikationstechnologie gilt. Das Offenlegen standardisierter Vorgaben ermöglicht es Anpassungsschwierigkeiten und Fehler unterschiedlicher Produkte in einem Netzwerk zu vermeiden. Hersteller können so ihre Systeme innerhalb eines Netzwerkes aufeinander abzustimmen.¹²¹ Es umfasst sieben Schichten (auch *Layer* genannt). Jede Schicht übernimmt bei der Kommunikation eine spezielle Funktion.¹²²

Im **OSI-Layer 1** (*Physical Layer* oder *Bitübertragungsschicht*) wird die physikalische Verbindung zwischen zwei in einem Netzwerk befindlichen Systemen mittels Bitübertragung definiert, enthält allerdings noch keine Verweise auf Struktur oder Inhalt der übertragenden Daten-Bits. Die Kompatibilität verschiedener Geräte wird hier anhand von elektrischen und zeitlichen Spezifikationen überprüft und geregelt.

In **Layer 2** (*Data Link Layer*) findet die erste Bewertung der eingehenden Daten-Bits statt. Algorithmen zur Fehlererkennung sorgen für eine funktionierende Verbindung zwischen Endgerät und Übertragungsmedium. Dafür werden alle eingehenden Daten auf ihre Vollständigkeit und korrekte Reihenfolge überprüft und Übertragungsfehler direkt erkannt. Um die Effektivität der verlust- und fehlerfreien Datenübertragung zu steigern, werden dafür alle Daten-Bits in kleinere Pakete zusammengefasst. Wird ein Datenverlust oder Übertragungsfehler erkannt, muss anstelle einer kompletten Datenreihe nur das fehlerhafte Frame übertragen werden. Zusätzliche Steuersignale sorgen zudem für eine synchrone Datenübertragung.

Der **Layer 3** im OSI-Referenzmodell (*Network Layer*) ist für die eigentliche Verwaltung der im Netzwerk befindlichen Kommunikationssystemen verantwortlich. Hier findet die eindeutigen Zuordnung der eintreffenden und ausgehenden

¹²¹ Larisch, Dirk: Netzwerktechnik, S.57

¹²² Vgl. Infotip Service GmbH [Stand: 13.06.2018]

Datenpakete mit der Vergabe von Netzwerkadressen statt und erlaubt damit erstmals den Datenweg (Routing) zwischen den Systemen. Das gelingt durch Hinzufügen zusätzlicher Attribute, die ein Datenpaket genauer kennzeichnen.¹²³ Systeme, die mit OSI-Layer 3 arbeiten können und den Datentransport mit vollem Funktionsumfangs erfüllen, werden Router oder Layer 3 Switches genannt.¹²⁴

In der vierten Schicht, dem **OSI-Layer 4** (*Transport Layer*) findet der Verbindungsaufbau statt. Die Datenpakete werden hier je nach vorangegangener Adressierung, also einer Anwendung entsprechend, weitergeleitet.¹²⁵ Die folgenden OSI-Layer 5 bis 7 werden in dieser Arbeit nicht weiter beschrieben, da sie inhaltsbezogene Regelungen behandeln und für die weitere Betrachtung von Ethernet-fähigen Audionetzwerken uninteressant sind.¹²⁶

7.1.3. Grundlagen der Datenstruktur

In einem Ethernet-basierten Netzwerk werden Daten in zusammengefassten Einheiten übertragen. Diese Einheiten werden Datenpakete genannt, deren Größe sich am Übertragungsprotokoll orientiert. Es können maximal 1500 Bytes oder 12 kBit an Daten übertragen werden. Damit ein Netzwerkteilnehmer bei Vorliegen eines Pakets das Routing bestimmen kann, ist jedes der vorhandenen Pakete mit einer Quell- und Zieladresse versehen. Die Adressierung erfolgt auf verschiedenen OSI-Layern (siehe *OSI-Referenzmodell*). MAC-Adressen, die der Übermittlung der Nutzdaten von einem Netzwerksegment zum anderen dienen, sind für jedes im Netzwerk vorhandene Gerät eindeutig zugeordnet. Sie werden im OSI-Layer 2 verteilt und besitzen eine Länge von 48 Bit. Zusätzlich erfolgt eine Adressierung in

¹²³ Larisch, Dirk: Netzwerktechnik, S. 58f

¹²⁴ Vgl. Universität Graz, S. 136

¹²⁵ Larisch, Dirk: Netzwerktechnik, S. 59

¹²⁶ Vgl. Universität Graz, S. 136

der dritten Schicht des OSI-Referenzmodells mittels TCP/IP-Protokollen. Es ist die am häufigsten verwendete Adressierung und dient der Übermittlung von Nutzdaten im Internet.¹²⁷

7.1.4. Netzwerkinfrastruktur

Der Grundgedanke einer Netzwerkinfrastruktur ist das Verknüpfen mehrerer Systeme. Das kann jedoch nicht allein durch Kabel realisiert werden, sondern hängt zudem von weiteren verbindenden Elementen ab. Dafür stehen bei einer Ethernet-Netzwerkverbindung drei Geräte zur Verfügung, die sich je nach Anwendung in ihrer Funktion unterscheiden. Folgende drei Systeme sind hierbei von Bedeutung:

Hub

Die Verstärkung eines Signals wird durch einen sogenannten Hub realisiert, der im OSI-Layer 1, also auf der Bitübertragungsschicht arbeitet. Da er ein Signal nicht analysiert, sondern lediglich verstärkt, ist die Funktionsfähigkeit eines Hubs auf die Hardwareebene begrenzt. Der Hub verbindet in einem Netzwerk mehrere Hosts miteinander und verteilt die Datenbits an alle angeschlossenen Geräte. Jedes System erhält dabei exakt die gleiche Information. Er sendet die ihm vorliegende Information an alle angeschlossenen Geräte, sodass alle Systeme die Netzwerkbandbreite des Hubs teilen. Ein Hub limitiert damit die Bandbreite eines Netzwerkes. Solange ein Hub Datenpakete sendet, sind alle Hosts belegt, sodass Netzwerkteilnehmer nur dann Informationen senden können, wenn der Sendevorgang eines Hubs beendet ist.

¹²⁷ Vgl. Altrichter, S. 7f

Switch

Die Funktion eines Switches ist ähnlich der eines Hubs. Er regelt die Verteilung der vorliegenden Datenpakete und verteilt sie an die angeschlossenen Netzwerkteilnehmer. Ist dem Switch zusätzlich die Adressierung der Empfänger bekannt, so kann er zielgerichtet eine direkte Verbindung zu bestimmten Geräten schalten. Damit steht einem Switch die volle verfügbare Bandbreite der Punkt-zu-Punkt Netzwerkverbindung zur Verfügung. Liegt diese Information nicht vor, so verteilt er die vorliegenden Datenbits wie ein Hub an alle Anschlüsse. Eine Erweiterung, ein sogenannter *Managed Switch*, sorgt zusätzlich für das Auslesen der Informationen aus dem OSI-Layer 3. Damit erweitert sich die Funktionalität eines Switches um die Blockierung von Ports und die Priorisierung der Datenpakete. Letzteres ist besonders für die Übertragung von Audiodaten relevant, da hier der zeitliche Ablauf, also die Übertragung in Echtzeit, besonders von Bedeutung ist. Priorität haben also solche Datenströme, die für die Synchronisation der Daten von Bedeutung sind.¹²⁸

Router

Router sind wie Managed Switches (Layer 3 Switches) für die Wegfindung eines Datenpakets innerhalb eines Netzwerkes verantwortlich. Sie arbeiten auf dem OSI-Layer 3. Zur Bestimmung des besten Weges nutzt er die Informationen der OSI-Layer 3 Zieladressen, die er aus der lokal vorhandenen Routingtabelle zieht. In ihr sind alle aktuellen Wegbeschreibungen in der Netzwerkinfrastruktur eingetragen. Die Einträge erfolgen entweder manuell als statische Routen, oder sie werden dynamisch im Austausch mit Routingprotokollen gefüllt. Sie verteilen die Informationen über das Netzwerk und der darin teilnehmenden Systemen.¹²⁹

¹²⁸ Vgl. Altrichter, S. 6

¹²⁹ Vgl. Wikipedia: Router [Stand 12.06.2018]

7.2. Audinate Dante

Das Dante-Netzwerk steht für Digital Audio Network Through Ethernet und ist eine Audio-über-Ethernet-Anwendung, die auf dem OSI-Layer 3 des Referenzmodells arbeitet. Sie ist die derzeit am weitesten verbreitete Schnittstelle in Systemen unterschiedlicher Hersteller. Dante ist ein Netzwerkprotokoll, das die Übertragung mehrere Kanäle unkomprimierter digitaler Audiodaten über ein Netzkabel ermöglicht. Der Dante-Standard wurde 2006 von der australischen Firma Audinate hervorgebracht. Im Vergleich zu anderen Audionetzwerk-Anwendungen wie CobraNet oder EtherSound integriert Audinate mit dem Dante-Protokoll die Möglichkeit einer sehr hohen Übertragungskapazität mit geringer Latenz und einer automatischen Wordclock-Konfiguration, um eine synchrone Datenübertragung zu ermöglichen. Auf Grund der geringen Latenzen ist ein Dante-Netzwerk besonders für die Audio-Datenübertragung im Bereich der Live-Beschallung interessant. Dante-Schnittstellen sind mittlerweile in zahlreichen Endgeräten wie Mischpulte, Bühnen-Monitore und PA-Lautsprechersysteme verbaut, sodass die Kompatibilität mit verschiedensten Systemen gewährleistet ist.¹³⁰ Mit einem Switch oder Router können die einzelnen Netzwerkkomponenten sternförmig miteinander verbunden werden. Das heißt die einzelnen Netzwerkteilnehmer sind mit einem Übertragungsmedium verknüpft. Der Geräteaufwand ist damit zwar gering, was aber einen nicht zu vernachlässigen Risikofaktor impliziert. Im Falle eines Ausfalls würde das gesamte Netzwerk und damit die Signalübertragung innerhalb der einzelnen Komponenten blockiert. Zur Vermeidung dieser Fehlerquelle ist der Einsatz eines weiteren Switch oder Router empfehlenswert, was den Aufbau zweier redundanter Netzwerke ermöglicht. Sollte es hier zu einem Ausfall des Switch oder Routers kommen, fallen lediglich die darin befindlichen Komponenten und nicht alle verwendeten Systeme aus. Die folgende Abbildung (**Abb. 26**) zeigt schematisch die

¹³⁰ Vgl. Wikipedia: *Dante (Netzwerkprotokoll)* [Stand 10.06.2018]

Kopplung mittels eines Verbindungssystems (links) und die Netzwerkinfrastruktur mit zwei Kopplungsgeräten.¹³¹

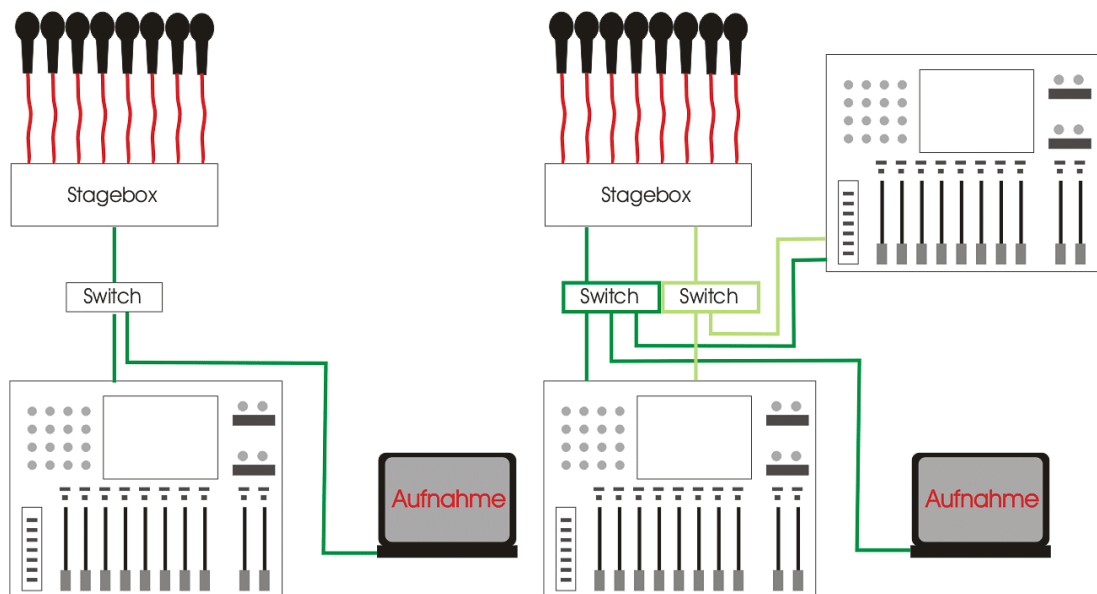


Abb. 26: Anschlussbeispiel Dante-Netzwerk, **links:** sternförmige Verbindung mit einem Switch, **rechts:** Aufbau von zwei Netzwerken durch Verwendung von zwei Switches

Jedes dieser Dante-fähigen Systeme verfügt über einen Mechanismus des gegenseitigen Erkennens anderer im Netzwerk verbundener Dante-fähiger Systeme (*Auto-Discovery*). Alle neu angeschlossenen Audio-Ein- und Ausgänge werden kurz nach Anschluss einer Dante-Schnittstelle selbständig erkannt, sodass das Routing zwischen den Systemen beliebig erfolgen kann. Audinate stellt also mit ihrem Netzwerkstandard Dante eine automatische Netzwerkkonfiguration zur Verfügung, wodurch keine manuelle Adressierung oder Konfiguration durchgeführt werden muss. Ist ein Gerät verbunden, jedoch nicht eingeschaltet, wird die Verbindung zunächst ignoriert und dann wiederhergestellt, wenn das Gerät wiedereingeschaltet

¹³¹ Vgl. Bangert [Stand 10.06.2018]

wird.¹³² Latenzzeiten können in einem Dante-Netzwerk je nach Komplexität des Netzwerkes unterschiedlich ausfallen. Um einen samplegenauen, synchronen Datenverkehr zu gewährleisten, können alle angeschlossenen Systeme auf die gleiche Latenz eingestellt werden. Diese Konfiguration kann über den kostenlosen softwarebasierten Dante Controller zentral geregelt. Um einen Computer in ein Dante-Netzwerk-Verbund zu integrieren, ist lediglich die von Audinate zur Verfügung gestellte Software *Dante Virtual Soundcard* nötig. Dieses virtuelle Audiointerface fungiert mit bis zu 64 Ein- und Ausgängen als Schnittstelle im Dante-Netzwerkverbund, sodass ein herkömmlicher Computer als Mehrkanal-Zuspieler oder Mehrkanal-Recorder verwendet werden kann. Übliche Latenzzeiten liegen hier je nach Kanalanzahl und Rechnerleistung bei vier bis zehn Millisekunden.¹³³

Die Kapazität eines Dante-Netzwerkes hängt generell von der vorliegenden Netzwerkbandbreite ab. Es überträgt bidirektional bei 100 MB/s 32 Audiokanäle mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz je teilnehmendes Gerät. Bei einer Übertragungsbandbreite von 1000 MB/s können 128 Audiokanäle für jede Übertragungsrichtung und eingebundenes System übertragen werden. Der Einsatz von Layer-3 Switches verbessert zusätzlich die Stabilität und Latenz, da Echtzeit-kritische Audiodaten gegenüber dem übrigen Datenverkehr priorisiert werden.¹³⁴

Dante Controller

Der Dante Controller ist eine von Audinate zur Verfügung gestellte kostenlose Software-Lösung, die das Einrichten und Verwalten des Signal-Routing in einem Dante-Netzwerk ohne zusätzliche Hardware ermöglicht. Außerdem können Netzwerk- und Gerätestatus, sowie Diagnosefunktionen computerbasiert konfiguriert werden.

¹³² Vgl. Wikipedia: *Dante (Netzwerkprotokoll)* [Stand 10.06.2018]

¹³³ Vgl. Altrichter, S. 19

¹³⁴ Vgl. ebd., 18

Nach Start des Controllers wird selbständig nach Dante-fähigen Geräten im Netzwerk gesucht. Die grafische Benutzeroberfläche zeigt die visuelle Darstellung in Form eines Matrix-Gitters, in dem alle verfügbaren Ein- und Ausgänge angezeigt werden. Diese visuelle Anordnung kann benutzerdefiniert mit auf-und zu-klappbaren Ansichten der jeweiligen Gerätekanäle angepasst werden. Zudem können auch individuelle Beschriftungen für alle angegebenen Systeme und Kanäle gewählt werden. Eine Routingverbindung zwischen zwei Geräten wird mit einem Klick in das entsprechende Feld dieser Matrix vollzogen. Eine erfolgte Verknüpfung wird, wie in **Abb. 27** dargestellt, mit einem grünen Haken markiert. Alle getroffenen Verknüpfungen und Einstellungen können mittels dieser softwarebasierten Routing-Lösung gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden.¹³⁵

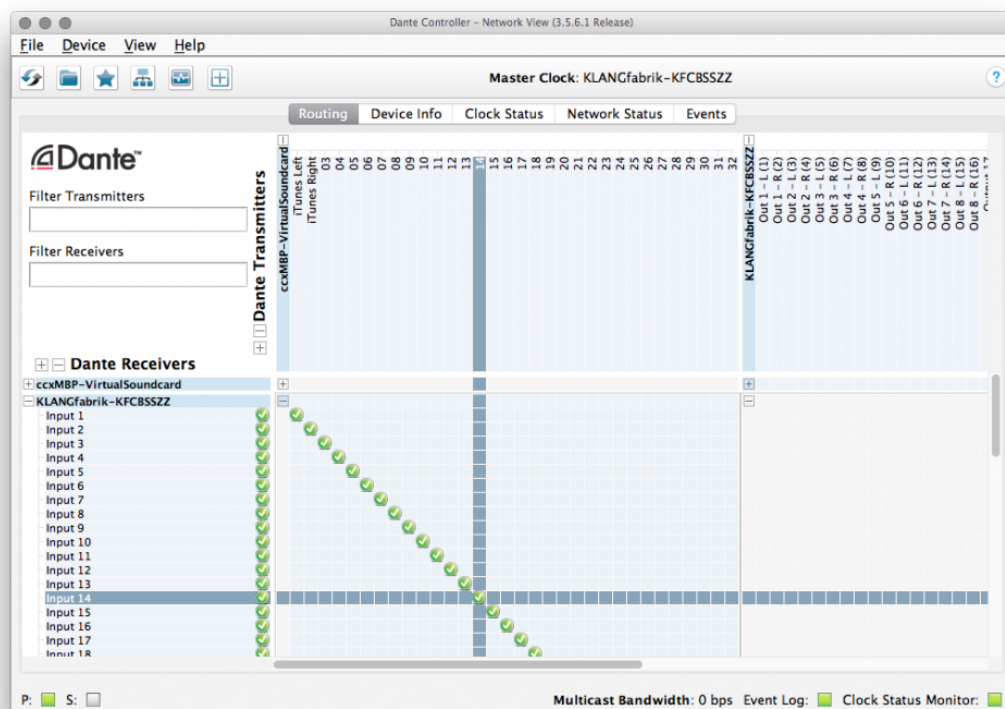


Abb. 27: Grafische Benutzeroberfläche des Dante-Controllers, Routing-Matrix: Eingänge (links) und Ausgänge (rechts) der im Dante-Netzwerk

¹³⁵ Vgl. Audinate [Stand 10.06.2018]

8. Vorbereitung des binauralen Kopfhörerkonzertes

Im folgenden Kapitel werden die Faktoren aufgeführt, die für die Umsetzung eines Kopfhörerkonzertes in der Vorbereitung essentiell sind. Da für das angestrebte Konzept neben der Umsetzung auch die Durchführung in einem professionellen Rahmen war, verlief die Vorbereitung branchenüblich. Neben der Auswahl der Musik, ist auch die Wahl einer geeigneten Veranstaltungsstätte, das Vertrautmachen mit dem technischen Setups, die Kostendeckung durch Erhöhen der Reichweite und Bekanntheit des Events und die Vorkalkulation und Finanzierung von Bedeutung. Da die im Folgenden beschriebene Kriterien nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können, sondern sich wechselseitig bedingen, ist eine chronologische, abgrenzende Aufführung der Faktoren nur bedingt möglich (die Wahl des Veranstaltungsdatums beeinflusst die Wahl der Band und umgekehrt). Im Folgenden wird nun gesondert auf jeden dieser Punkte eingegangen.

8.1. Musikalische Auswahlkriterien

Die Besonderheit eines binauralen Kopfhörermixes ist, neben dem möglichen natürlichen Klangeindruck akustischer Instrumente, die Freiheit, bestimmte Quellen frei im Raum zu platzieren, beziehungsweise durch Panning „wandern“ zu lassen. Gut geeignet dafür sind elektronische Klänge, da es hier im Gegensatz zu akustischen Instrumenten weniger Hörerfahrungen gibt. Der Mischer kann sich also entweder als Handwerker betrachten, der versucht das Geschehen auf der Bühne möglichst natürlich auf den Kopfhörern klingen zu lassen, oder selbst als Künstler, der mit Effekten und Panoramafahrten massiven Einfluss auf den Sound nimmt.

Die Bands des vorliegenden Silent Concerts sollen sich im Bereich der Mainstreamfähigkeit bewegen, da untersucht werden soll, ob sich das

Konzept für ein kommerzielles Event eignet. Daher wäre es ungünstig, nur eine sehr spezielle Nische zu bedienen. Es soll sich also um Pop-Bands handeln, die sich idealerweise akustischer und elektrischer/synthetischer Klänge bedienen, um die Aspekte Natürlichkeit und Kreativität des Mischens zu verbinden.

Die Band „Matija“

Die Alternative-Pop-Band Matija aus München wurde 2011 unter dem Namen „The Capitols“ von Matt Kovac (Gesang, Gitarre, Blockflöte), Johann Blake (Backgroundgesang, Bass, Synthesizer), Jan Salgovic (Gitarre, Keys) und Sami Salman (Drums) gegründet. 2016 änderten sie ihren Namen zu Matija und wurden vom Hamburger Label Clouds Hill unter Vertrag genommen, bei dem sie 2017 ihr Debütalbum „Are We An Electric Generation Falling Apart“ veröffentlichten. Sie verbinden eingängige Liedstrukturen, E-Gitarren und elektronische Musik mit gelegentlichem Einsatz der Blockflöte.

„Bitte Benimm Dich“

Bitte Benimm Dich ist ein Stuttgarter Trio bestehend aus Benedikt Vogler (Vocals, Talkbox, Keys), Tilo Ehmann (Ableton Live, Synth) und Gerry Slade (Gitarre). Den Musikstil kann man als Mischung aus House, Blues, Pop und Electro bezeichnen. Die Basis bilden dabei die vorproduzierten Beats und Basslines, die von Tilo aus Ableton wiedergegeben werden.

8.2. Die Wahl der Veranstaltungsstätte

Die Auswahl der Veranstaltungsstätte hängt von folgenden Kriterien ab: Die Fassungsvermögen des Raumes muss den Ansprüchen der Veranstaltung genügen. Dabei ist entscheidend, jedem Zuhörer ausreichend Platz zu gewährleisten, vor allem um Risikofaktoren für die Technik wie Kopfhörer und Empfänger und die des Publikums weitgehend einzugrenzen. Dennoch muss der Raum ausreichend Menschen fassen, um mit den voraussichtlichen Eintrittseinnahmen alle kalkulierten Kosten decken zu können. In diesem Zusammenhang ist auch die Verkehrsanbindung des Clubs entscheidend, um Beeinträchtigungen der Erträge im Vorfeld auszuschließen. Ein weiterer Faktor muss als Auswahlkriterium berücksichtigt werden: Veranstaltungen im Rahmen eines „No Budget Projekts“ können nur dann realisiert werden, wenn Ausgaben, wie anfallende Mietkosten, so gering wie möglich gehalten werden. Zudem sollte im Vorfeld auch auf die Übereinstimmung des nach außen wirkenden Club Images zum Veranstaltungsprofil überprüft werden. Ist die Konzerthalle für ein bestimmtes Musikgenre bekannt, so sollte das Veranstellen eines Konzertes mit konträren Musikstil vermieden werden. Weniger entscheidend ist der Aufbau des Raumes, da ein Kopfhörerkonzert unabhängig der Raumakustik ist. Nach diesen Gesichtspunkten ist der ClubCANN die Veranstaltungsstätte mit der größten Schnittmenge.

Der ClubCANN ist ein Teilbereich des CANN Jugendhauses und wird von der Stuttgarter Jugendhaus Gesellschaft betrieben. Das Jugendhaus und damit auch die darin befindliche Konzerthalle ist zum Teil städtisch subventioniert, sodass sich die Mietkosten für ein studentisches Kulturprojekt in Grenzen halten. Neben einer guten Anbindung sind auch die räumlichen Gegebenheiten der Veranstaltungshalle für ein Kopfhörerkonzert gut geeignet. Das Fassungsvermögen des Clubs liegt bei 350 Menschen.¹³⁶

¹³⁶ lt. Darko Veric, Veranstaltungskoordination Jugendhaus GmbH



Abb. 28: ClubCANN Konzerthalle

Neben zwei Backstage-Räumen gibt es ein ausreichend großes Foyer, um die Vergabe der Funkkopfhörer und Empfänger problemlos umzusetzen. Die vorhandene Bühnentechnik reduziert das aufwendige technische Setup, sodass zusätzlich ausschließlich die spezielle Binauraltechnologie integriert werden musste.

Der ClubCANN ist eine auf Alternative Rock/Pop spezialisierte Konzerthalle. Es kann daher angenommen werden, dass die Auswahl der für dieses Projekt eingesetzten Bands mit den Hörgewohnheiten des Publikums größtenteils übereinstimmen.

Bei der Wahl des Veranstaltungsdatums muss im Vorfeld auf vorhandene Statistiken zurückgegriffen werden. Veranstaltungen in den Anfangsmonaten eines Jahres werden verhältnismäßig geringer besucht als Frühlings- oder Herbstmonate.¹³⁷ Unter diesem Aspekt sollten zudem Konkurrenzveranstaltungen berücksichtigt und so ein geeignetes Datum austariert werden. Das Datum des binauralen Kopfhörerkonzertes fällt auf Freitag, den 13. April 2018.

¹³⁷ lt. Darko Veric, Veranstaltungskoordination Jugenhaus GmbH

8.3. Vorproduktion

Die Vielzahl an technischem Equipment und das komplizierte Routing über das Dante-Netzwerk erforderten einiges an Eingewöhnungsarbeit. Dabei sollte sich dies nicht nur auf „Trockenübungen“ beschränken, sondern es sollte auch mindestens je eine Probe mit den Bands stattfinden - nicht nur um sich mit der Technik zu befassen und Schwierigkeiten und Probleme frühzeitig zu erkennen, sondern auch, damit sich die Musiker mit dem neuen, andersartigen Spielgefühl vertraut machen zu können. Außerdem sollten die Einzelspuren möglichst vieler Songs aufgezeichnet werden, um zum Einen im Anschluss binaurale Mischungen für das Konzert vorbereiten zu können (quasi als „Misch-Übungen“) und zum Anderen einen Song für ein kurzes Teaser-Video mit 3D-Sound zu produzieren. An Equipment dafür vorhanden waren:

- Digitalpult Allen&Heath GLD-80 mit Dante-Card
- Stagebox Allen&Heath AR2412
- Achtkanal-Kopfhörerverstärker Behringer HA8000
- E-Drumset Roland TD-9
- KLANG:fabrik
- Kemper Profiling Amp (2x)
- DI-Boxen (4x)
- Kopfhörer
- Mikrofonkabel, Netzwirkkabel
- MacBook mit Ethernetport
- Audiointerface

8.3.1. Probe mit Matija

Für den 1. März 2018 wurde eine Probe mit der Band Matija in deren Münchner Proberaum festgesetzt.

8.3.2. Mischpult

Die Wahl des Mischpults fiel aus verschiedenen Gründen auf das GLD-80 von Allen&Heath. Die Anforderungen an das Mischpult waren: Mindestens 24 Mikrofonvorverstärker, Anschlussfähigkeit an ein Dante-Netzwerk, Vorhandensein von MIDI-Fadern, um die Kanäle der KLANG:App zu steuern, Kompaktheit und eingebaute Effekte wie Hall, Delay, etc.. Außerdem musste sich ein Sponsor finden lassen, der uns das Pult kostenfrei bzw. kostengünstig zur Verfügung stellt. Mit Allen&Heath und dem GLD-80 wurde ein Sponsor und ein Pult gefunden, dass allen Ansprüchen genügte. Ein weiterer großer Bonus war, dass unser Praxisbetreuer Tobias Raunigk selbst mit dem Pult äußerst vertraut war, sodass wir bei Fragen auf ihn zurückkommen konnten.

Das Pult wurde zur Vorverstärkung der Signale, Klangbearbeitung (EQ, Kompression), Effektzumischung (Hall, Delay, Chorus), Übergabe der Signale an das Dante Netzwerk und Weiterleitung der In-Ear-Mischungen der Zuhörer von der KLANG:fabrik an den Kopfhörerverstärker via Stagebox genutzt.

8.3.3. Drumset

Als Schlagzeug sollte ein möglichst hochwertiges E-Drumset zum Einsatz kommen. Wichtig waren neben einem sehr guten Spielgefühl Outputs verschiedener Kanäle. E-Drumsets der unteren Preiskategorie geben meist nur eine Stereosumme aus, was für den Einsatz im 3D-Mischumfeld ungenügend gewesen wäre. Leider stellte sich das Finden eines Sponsors, der ein E-Drumset zur Verfügung stellt, als ein sehr schwieriges Unterfangen dar. Letztlich wurde für das Konzert selbst ein Roland TD-50 gemietet, wobei uns der Verleiher einen äußerst fairen Preis machte. Das TD-50 ist Rolands E-Drumset-Spitzenmodell. Für die Probe konnte privat ein Roland TD-9 organisiert werden, ein Modell der Einsteigerklasse. Dass dies nur eine Stereosumme ausgeben kann, war für die Probe an sich unerheblich, doch für den angedachten Teaser in 3D-Sound wäre dies unzufriedenstellend gewesen. Deswegen wurde der MIDI-Ausgang des Drummoduls genutzt, womit es angeschlossen an ein Interface möglich war, die Performance des Schlagzeugers in MIDI-Signalen aufzuzeichnen. In einem späteren Schritt konnten mittels einer Sampling-Software (Native Instruments Studio Drummer und Pro Tools) Einzelspuren als Audio wiederhergestellt werden. Es stellte sich heraus, dass die Qualität der Software-Samples derer des Drummoduls deutlich überlegen war. Grundsätzlich wäre diese Methode auch für den Live-Einsatz denkbar, allerdings wäre das MacBook mit seinen anderen Aufgaben während des Konzerts an der Leistungsgrenze gewesen und daher tendenziell unzuverlässig, sodass darauf verzichtet werden musste. Ein weiterer leistungsfähiger Laptop mit entsprechender Software stand nicht zur Verfügung.

8.3.4. Gitarren & Synthesizer

Eine wichtige Rollen nehmen bei Matija die Röhren-Gitarrenverstärker ein. Lead-Gitarrist Jan nutzt einen Vox AC-30. Darüber spielt er nicht nur seine Gitarre, sondern auch Fender Rhodes. Matt spielt seine Gitarre und die elektrische Blockflöte „Elody“ über einen Fender Deluxe Reverb. Beide Verstärker wurden mit dem Kemper Profiling Amp mittels „Profiling“ emuliert. Effektgeräte wie Delays oder Verzerrer konnten so ohne weiteres eingesetzt werden.

Bei Matija kommen drei verschiedene Synthesizer zum Einsatz, welche mit Hilfe von DI-Boxen direkt abgenommen wurden. Für die Bassgitarre wurde der DI-Ausgang des Bassverstärkers genutzt (ein Lautsprecher wurde nicht eingesetzt).

8.3.5. Elody

Zum Sound der Band gehört auch das gelegentliche Spiel der Blockflöte. In Studiosituationen wird die Blockflöte häufig durch ein Kleinmembran-Kondensatormikrofon in 0,5 bis 1,5 Metern Abstand aufgenommen. Was in einem isolierten Aufnahmerraum funktioniert, erweist sich auf der Bühne mit einer Rockband als unzulänglich, da Schlagzeug und Gitarren den geringen Schallpegel einer Blockflöte weit übertönen. Häufig wird deshalb live ein dynamisches Mikrofon verwendet, das sehr nah an der Flöte platziert sein muss. Leider führt dies, genauso wie andere Methoden der Abnahme wie beispielsweise ein Headset, zu einem mangelhaften Klangeindruck und häufig ist das Übersprechen anderer Instrumente weiterhin ein Problem. Deshalb

verwendet Matt bei Konzerten die Elody, eine elektrische Blockflöte von Mollenhauer. Bei ihr ist ein Piezo-Tonabnehmer im Kopfstück der Flöte so integriert, dass die Luftsäule nicht verändert wird, sodass eine Verstimmung des Instruments vermieden wird. Üblicherweise werden derartige Tonabnehmer zur Abnahme von Körperschall bei Saiteninstrumenten eingesetzt. Bei der Elody kommt ein spezielles, vom Hersteller „Advanced Piezo Technology“¹³⁸ genanntes System zum Einsatz, das die Abnahme des Luftschalls innerhalb des Flötenrohrs ermöglicht. Durch ein 6,3mm-Klinkenstecker kann der Tonabnehmer mit gängigen Effektgeräten und Verstärkern mit hoher Eingangsimpedanz verbunden werden. Dadurch ist ein Einbinden der Elody in ein bestehendes E-Gitarrensetup problemlos möglich. Außerdem wird so der Einsatz verschiedenster Effektgeräte, wie Hall, Delay oder auch Verzerrer möglich, was dem Flötisten eine völlig neue Klangperspektive durch das Experimentieren mit diesen Effekten eröffnet. Aus diesem Grund kam beim Silent Concert, trotz der relativ problemlosen Möglichkeit der akustischen Abnahme der Blockflöte, die Elody zum Einsatz.

¹³⁸ Conrad Mollenhauer GmbH [Stand: 03.07.2018]

8.3.6. KLANG:fabrik

Die KLANG:fabrik ist der Ort, an dem der eigentliche Mix entsteht. Die Einbindung ins Setup erfolgt über ein Dante Netzwerk. Im Dante Controller (Software für PC/Mac) werden die Verbindungen ähnlich wie bei einem Steckfeld zugewiesen. In diesem Fall wurden die einzelnen, klanglich bearbeiteten Kanäle via Direct Out (Post-EQ, Post-Kompressor) an die korrelierenden Eingänge der KLANG:fabrik zugewiesen. In der KLANG:fabrik erfolgte nur noch die Pegelanpassung und Verteilung im dreidimensionalen Raum. Dies geschieht durch die KLANG:app, einer Software für PC/Mac, Tablets oder Smartphones. Im ursprünglichen Sinne ist die KLANG:fabrik zur Nutzung als In-Ear-Monitoring-Lösung gedacht, wobei die Musiker ihren eigenen Mix mittels App auf ihrem mobilen Gerät über WLAN regeln können. Aufgrund der geringen möglichen Einarbeitungszeit mit den Musikern, entschieden wir uns, darauf zu verzichten und die Monitormischungen selbst und auf Zuruf der Musiker anzufertigen. Hierfür standen uns zwei Geräte zur Verfügung: Ein MacBook und ein iPad. Das MacBook war als „Dante Controller“ und Aufnahmegerät ohnehin anwesend und via LAN mit der KLANG:fabrik verbunden, sodass auf das iPad und damit nötige WLAN-Netzwerk hätte verzichtet werden können. Jedoch funktioniert das Panning/ die Verteilung im Raum wesentlich intuitiver und unkomplizierter am iPad als mittels Touchpad des MacBooks.

In der KLANG:fabrik können mehrere „User“ angelegt werden, die eine eigene Mischung, eigenes Panning, und falls gewünscht auch ein alternative Kanalbenennung und -sortierung enthalten können. Es wurde für jeden Musiker ein eigener User erstellt, mit einem zusätzlichen für die Haupt-Publikumsmischung mit dem Namen „Crowd“.

Die fünf erstellten Mischungen wurden über Dante zurück ans Pult geroutet und von dort mittels Stagebox an die Kopfhörerverstärker der Musiker. Das Abhören der Hauptmischung und das Prüfen der Monitormischungen erfolgte durch die Kopfhörerbuchse am Mischpult. Auch möglich gewesen wäre das direkte Verbinden der KLANG:fabrik mit dem Kopfhörerverstärker über die XLR-Ausgänge an der Rückseite der KLANG:fabrik, doch dies hätte zu längeren Kabelwegen geführt und nur ein umständliches Prüfen der Monitormischungen erlaubt.

8.3.7. Schlussfolgerungen

Dank vorhergehender Einarbeitung mit dem Mischpult, der KLANG:fabrik und dem Dante-Netzwerk verlief die Probe ohne besondere Probleme oder Vorfälle. Die technische Einrichtung inklusive Aufbau, Verkabelung, Profiling der Gitarrenverstärker und Soundcheck dauerte mit vier Stunden allerdings länger als erwartet. Das MacBook erwies sich, trotz seiner vielfältigen Aufgaben, als Host für den „Dante Controller“, KLANG:app und der Mehrspuraufnahme in Pro Tools als stabil. Bemerkenswert war, wie die Musiker auf das binaurale Monitoring reagierten. Das im Vorfeld grob vorbereitete Panning erwies sich als zu breit, bevorzugt wurde eine wesentlich „schmalere“ Verteilung der Instrumente. Das Klangbild wurde zwar als natürlich, nicht jedoch als dreidimensional wahrgenommen. Beim testweise Abhören der Monitormischung mit hochwertigen Studio-Kopfhörern (Beyerdynamic DT-770) konnte festgestellt werden, dass dies hauptsächlich auf die minderwertige Qualität der In-Ear-Ohrhörer der Musiker zurückzuführen war. Auch die unzureichende Wiedergabe im Bassbereich der

Ohrhörer erwies sich als problematisch, da ohne Basslautsprecher auf der Bühne so die Bassinformation nur stark eingeschränkt wahrnehmbar war. Es wurde empfohlen, dass die Band hochwertigere Over-Ear-Kopfhörer benutzen werde.

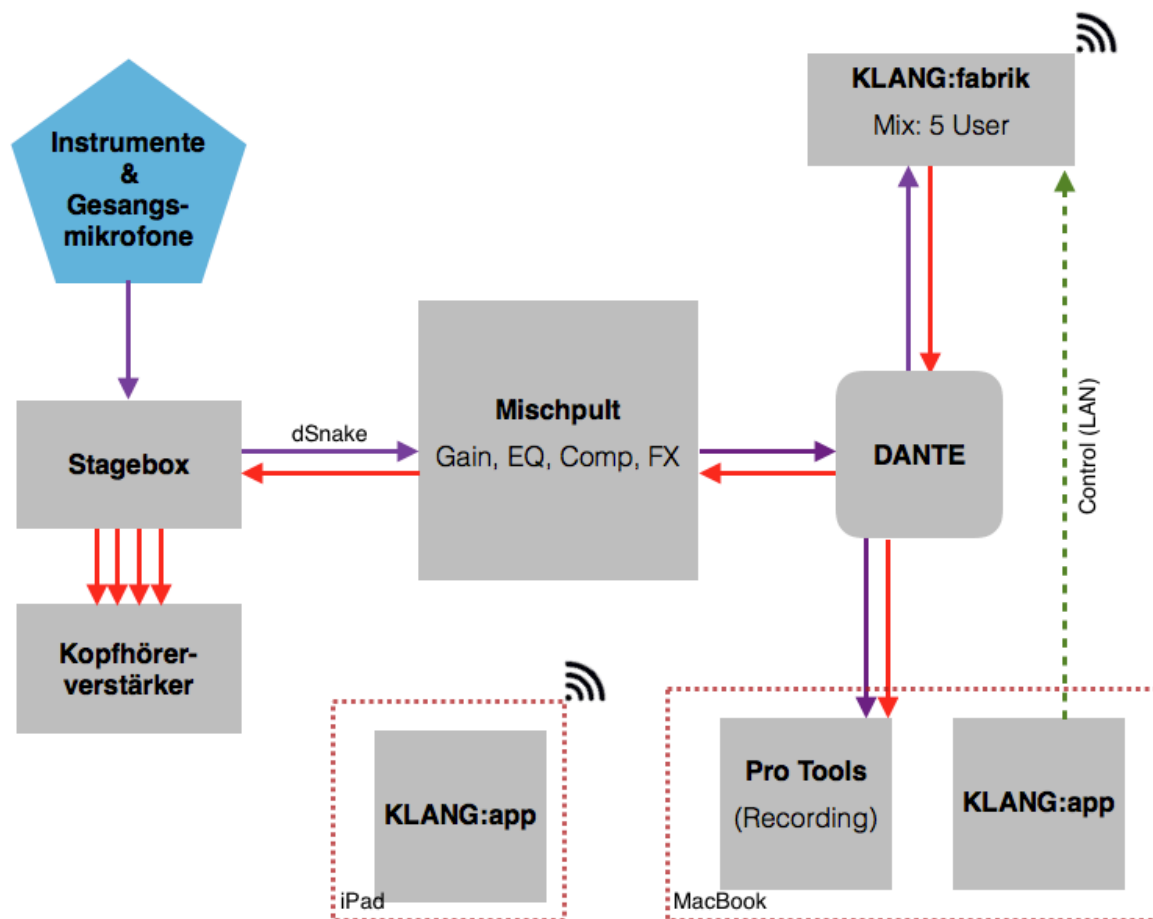


Abb. 29: Verbindungsschaubild des Probenaufbaus

8.3.1. Probe mit Bitte Benimm Dich

Eine Probe mit Bitte Benimm Dich erfolgte erst am 11.04.2018, also zwei Tage vor dem Konzert. Dies war jedoch ausreichend, da es bis dahin genügend Gelegenheiten gab, sich mit der Technik vertraut zu machen und das Setup der Band vergleichsweise weniger anspruchsvoll war.

Das Hauptelement der Band besteht zumeist aus Beat und Bassline, welche, zusammen mit anderen (voraufgezeichneten) Spuren wie Synthesizer, Backing Vocals oder Effektspuren, von Tilo in Ableton live gemischt und als Stereospur ausgegeben werden. Dazu kommen von Benes Synthesizer- und E-Pianospuren (jeweils mono), Gesangs- und Talkboxmikrofon, und Gerrys E-Gitarre. Da Gerry zufälligerweise das gleiche Gitarrenverstärkermodell wie Jan (Vox AC-30) nutzt, wurde beschlossen, das von dessen Amp angefertigte Profil zu nutzen.

Außerdem wurde von der Band ein Click bereitgestellt, der rein zu Monitoringzwecken diente.

Zusätzlich zum oben genannten Equipment, standen zu diesem Zeitpunkt auch schon die Funkkopfhörer bereit, sodass diese Probe auch genutzt werden konnte, um deren Klang zu beurteilen.

8.3.1. Funkkopfhörer „Neon Lights“ und stationäre Sender

In der Probe wurden die Kopfhörer zusammen mit dem stationären Sender getestet, in der Annahme, dass zwei identische Sendermodelle geliefert wurden. Es wurde festgestellt, dass der Frequenzgang der Kopfhörer für die

Wiedergabe von Binauralsound nicht zufriedenstellend war. Hohe Frequenzen waren äußerst schwach ausgeprägt, während der Bassbereich überbetont war. Was vielleicht im „Silent Disco“-Bereich ausreichend war, zeigte sich als unzulänglich, um den 3D-Effekt der KLANG:fabrik wiederzugeben. Am Mischpult wurde bei fast allen Signalen die Höhen mittels Equalizer angehoben, was nur minimale Besserung verschaffte. Aufgrund der kurzen Zeit bis zum Konzert war jedoch keine andere Lösung praktikabel, als sich mit der gegebenen Situation zu arrangieren.

8.4. Finanzierung

Die Finanzierung ist ein zentrales Thema bei der Umsetzung einer kommerziellen Veranstaltung. Ist die Eventstrategie in groben Zügen geplant, muss ein finanzieller Rahmen festgelegt werden. Dazu gehört neben der vorausschauenden Ermittlung anfallender Kosten die anschließende Analyse und Festlegung notwendiger Finanzierungsmethoden und bildet zudem die Grundlage der Preisermittlung. Die Realisierung der Veranstaltung ist zu jedem Zeitpunkt abhängig von dem Leistungszuspruch einiger Sponsoren. Eine branchenübliche Vorkalkulation mit Aufstellung der finanziellen Aufwendungen bezüglich aller für die Veranstaltung notwendigen technischen Systeme ist damit unzweckmäßig. Im Vorfeld waren also die Sponsorenleistungen bereits bekannt, was in der Betrachtung der nachfolgenden Kalkulation berücksichtigt werden muss.

8.4.1. Vorkalkulation

Im Vorfeld müssen entstehenden Kosten erörtert werden, um mögliche Finanzierungsmethoden zu bestimmen. Dieser Prozess wird in der Vorkalkulation beschrieben. Ohne vorhandenes Eigenbudget besteht ein zentraler Anspruch in der Akquise von Sponsoren. Zudem musste im Vorfeld der Ticketpreis mit einem effizienten Kompromiss aus Kostendeckung und Verkaufszahlen ermittelt werden. Diese Faktoren beeinflussen sich wechselseitig, sodass die Festlegung des Vorverkaufspreis eine diffizile risikobehaftete Entscheidung darstellt. Entscheidungsträger waren Faktoren wie Zielgruppenanalyse, Vorkalkulation der Kostenpunkte und Erfolgsaussichten der Sponsorenbeiträge. In der Vorbereitung des Events mussten also diese Prozesse abgeschlossen sein. Die folgende Tabelle zeigt die Kalkulation der Einnahmen durch den Ticketverkauf im Bezug auf das Fassungsvermögen der im ClubCANN möglichen Stehplätze:

EINNAHMENKALKULATION (BRUTTO)

Verfügbare Plätze	€ / Platz	Potentielle Gesamteinnahmen / Brutto
350	12 €	4.095 €

Eine Vorkalkulation für die Festlegung des Finanzierungsrahmens geht aus der Gewinnermittlung (Erlöse abzüglich aller Gebühren) hervor:

BERECHNUNG VON BRUTTO AUF NETTO-ERLÖS

Bruttoeinnahmen	4.095 €
Abzgl. aller Gebühren (1,70 € /Ticket)	595 €
Nettoeinnahmen	3.500 €

Nettoeinnahmen von 3500 € ist der maximal zu erreichende Gewinn ohne Betrachtung aller weiteren Kosten.

Festgelegt wurde zudem der Abendkasse-Ticketpreis auf 15€ pro Ticket.

8.4.2. Sponsoren

Mit Hilfe eines im Vorfeld erstellten *Sponsorship Package* (im angehängten *Datenträger*), der grafischen Vorstellung und textlichen Beschreibung des Konzeptes, konnten die nachfolgend aufgeführten Unternehmen als Sponsoren gewonnen werden. Gegenleistungen wurden in Form von Promotionen gewährleistet, die für die unternehmenseigenen Kommunikations- und Marketingziele von Vorteil waren.

LEISTUNGEN NACH SPONSOREN

Technisches System	Anzahl	Sponsor / Unternehmen
Mischpult: GLD-80 Digitalpult	1	Allen&Heath
Stagebox SB 24/12	1	Allen&Heath
KLANG:fabrik	1	KLANG:technologies GmbH
Kemper Profiling Amp	2	Kemper GmbH
Funk-Kopfhörer: „neon lights“	350	Silent Events
Funk-Sender	2	Silent Events
Digitales In-Ear-System MI-909T	4	Mipro Germany GmbH
E-Drum Set 50% Rabatt	1	Crystal Sound GmbH
Basslets	12	Lofelt GmbH
Sonstige Leistungen		Sponsor / Unternehmen
Mietkosten der Location		ClubCANN
Lichttechniker während der Veranstaltung		ClubCANN
Catering für Bands		ClubCANN
Beamer-Leihe für Live-Visuals		ClubCANN
Transport zur Abholung des E-Drum Sets		ClubCANN
GEMA-Kosten		ClubCANN
Öffentliche Werbeflächen in Stuttgart / Plakatieren		ClubCANN
Versandkosten KLANG:fabrik		KLANG:technologies GmbH
Printkosten Werbemittel (Plakate, Flyer)		Thomann

8.4.1. Kostenaufstellung

Trotz der Zusage für die genannten Aufwendungen treten einige offenen Posten auf, die nach Abschluss des Events mit den Netto-Einnahmen der Ticket-Erlöse beglichen werden müssen. Die entstehenden Aufwendungen sind nachfolgend tabellarisch aufgestellt:

TATSÄCHLICHE AUSGABEN VERANSTALTER

Position	Unternehmen	Betrag in Brutto / €
E-Drum Set (TD50KV) + CAT - Trommel	Crystal Sound GmbH	178,50
Spritkosten Abholung	ClubCANN	50,00
Gage Band - (25% jedes verkauften Tickets)	Matija	372,87
Fahrtgeld der Band (München - Stuttgart)	Matija	140,00
Rückversand Kopfhörer	Silent Events	158,27
Rückversand Kemper Amps	Kemper GmbH	18,00
Rückversand Basslets	Lofelt GmbH	6,00
Rückversand Digitales In-Ear-System	Mipro Germany GmbH	18,00
Paketmarken für Versand		39,97
Dante Virtual Soundcard (30 Tage Lizenz)	Audinate	8,54
Osculator	OSCulator	19,99
Hosting Homepage (11/17 - 11/18)	Strato	48,00
Catering für Helfer	-	50,00
Fahrtkosten für Probe in München	-	126,00
Probedruck Print-Werbung	Optikplan GmbH	15,00
Facebook Promotion	Facebook Inc.	54,00
Klinkenadapter (3,5 mm in 6,3 mm Klinkenbuchse)	Sound of Music	30,00
Verbrauchsmaterial	Diverse	115,19
Gesamt		1448,33

Die tatsächlichen Einnahmen der Ticketverkäufe belaufen sich auf 780 € im Vorverkauf (78 Tickets) und 720 € an der Abendkasse (48 Tickets). In folgender Tabelle werden nun alle Aufwendungen den Erträgen gegenübergestellt, um den tatsächlichen Gewinn der Veranstaltung zu berechnen:

Gewinn-, und Verlustrechnung (GuV)

Erträge	1.500,00 €
Aufwendungen	1.219,83 €
Gewinn	280,17 €

Der tatsächliche Gewinn beläuft sich auf 280,17 €. Alle Kosten konnten also mit den Ticketerlösen gedeckt werden, sodass der Break-even-Point erreicht und sogar überschritten wurde.

8.5. Kommunikation und Vermarktung

Zu den Herausforderungen einer kommerziellen Veranstaltung gehört auch die zielgruppen-orientierte Steigerung des Bekanntheitsgrads. Je höher die Reichweite einer Veranstaltung, desto größer wird die Zahl potentieller Besucher. Hier muss der finanzielle Aufwand (Investition) dem Nutzen gegenübergestellt werden. Allgemein gilt folgende Definition:

„Kommunikation bedeutet die Übermittlung von Informationen und Bedeutungsinhalten zum Zweck der Steuerung von Meinungen, Einstellungen, Erwartungen und Verhaltensweisen bestimmter Adressaten gemäß spezifischer Zielgruppen.“ ¹³⁹

Bevor ein Konzept ausgearbeitet werden kann, muss eine für dieses Event typische Zielgruppe festgesetzt und die Kommunikationsinhalte darauf abgestimmt werden.

¹³⁹ Bruhn, S.3

Dafür musste die Veranstaltung *Silent Concert* zu einer Marke generiert werden. Dafür war die Konzeption eines Logos erforderlich, welches in allen Bereichen der Kommunikation integriert werden sollte.

Grundlegend für die Steigerung der Seriosität ist das Vorhandensein einer Internetpräsenz. Für das binaurale KopfhörerKonzert wurde daher eine Homepage seitens des Veranstalters entwickelt und über einen Webhost der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Diese war unter folgendem Link aufrufbar: www.silent-concert.de. Die Funktionalität liegt dabei nicht nur in der Bereitstellung von Informationen für Besucher und Sponsoren, sondern auch in der Verlinkung des Ticket-Shops. Zudem ist die Präsenz in verschiedenen Sozialen Netzwerken für die Steigerung der Reichweite von Vorteil. Es wurde daher sowohl ein Facebook- als auch ein Instagram-Account erstellt und mit zielgruppenangepassten Inhalten während der Vorbereitungsphase gefüllt. Diese wurden wiederum auf der Homepage verknüpft, um die Interaktion der Besucher zu steigern.

Da trotz fortschreitender Digitalisierung dennoch Printmedien zu einer effizienten Kommunikationsmethode gehören, sind zudem auch Hand-Flyer und Plakate zum Einsatz gekommen. Design, Formatierung und wurde auf Veranstalterseite geleistet und stellte demnach keinen zusätzlichen Kostenaufwand dar. Auf Grund gesponserter Druckkosten und Werbeflächen wurde auch hier der Mehraufwand auf ein sehr geringes Maß reduziert.

Alle Werbemittel sind im angehängten Datenträger hinterlegt.

9. Mischung

9.1. Mischen in Stereo

Um das Mischen von moderner Popmusik für Kopfhörer mittels binauralem Prozessor zu untersuchen und mit konventionellem Stereomischen zu vergleichen, soll letzteres zunächst beschrieben werden.

Den Prozess, den wir Mixing oder Mischung nennen, hat sich im Laufe der Jahrzehnte außerordentlich gewandelt. In der Anfangszeit der professionellen Musikaufnahme auf Tonband, also Anfang der 1950er bis Anfang der 1960er Jahre, hieß der Mischer bei EMI¹⁴⁰ noch „Balance Engineer“. Der Begriff beschreibt die Hauptaufgabe des Mischens, nämlich das Angleichen des Pegels verschiedener Elemente. Der Balance Engineer war anfangs noch hauptsächlich beim Aufnahmeprozess gefragt, denn die verschiedenen Mikrofonsignalen wurden direkt auf ein Mono- oder Two-Track-Band aufgenommen. Der Mix fand also schon bei der Aufnahme statt. Die Möglichkeiten der nachträglichen Klangbearbeitung waren sehr begrenzt, beispielsweise mittels simpler Equalizer und Kompressoren, die üblicherweise schon bei der Aufnahme insertiert wurden. Mit dem Aufkommen von Mehrspurbandmaschinen im Laufe der 1960er Jahre und der damit einhergehenden Möglichkeit, 24, 48, oder mehr Spuren separat zu speichern, stiegen auch die Möglichkeiten der Nachbearbeitung, sodass hierbei mehr Zeit eingeräumt werden musste. Bobby Owsinski schreibt, ein moderner Pop-Mix bestünde aus sechs Elementen:

¹⁴⁰ Electrical and Musical Industries Ltd., ein ehemaliges Major-Label

- Balance: Die Pegelverhältnisse der musikalischen Elemente.
- Frequenzbereich: Die angemessene Repräsentation aller Frequenzen.
- Panorama: Platzierung eines musikalischen Elements im Schallfeld.
- Dimension: Das Hinzufügen von Rauminformationen zu einem musikalischen Element.
- Dynamik: Die Kontrolle der dynamischen Entwicklung der Mischung oder einer Spur.
- Interesse: Dem Mix etwas ‚Besonderes‘ verleihen.¹⁴¹

Eine Mischung beginnt immer mit dem Herstellen einer **Balance** der Pegel der verschiedenen Elemente, da alle weiteren Schritte auf dieser Balance beruhen. Im Zweifelsfall bedeutet das auch, aktiv in das Arrangement einzugreifen, da dieses einer guten Balance zugrunde liegt. Instrumente, die im selben Frequenzbereich gleichzeitig spielen, sind im Mix oft schwierig unterzukriegen, da beide um die Aufmerksamkeit unserer Ohren „kämpfen“. Folglich wird der Klang der Mischung als „unklar“ und undefiniert empfunden. Das Weglassen mancher Elemente an bestimmten Stellen kann also für einen aufgeräumter klingenden Mix sorgen.

Die Frage nach dem **Panorama** stellt sich erst seit der Markteinführung von Stereo-Schallplatten Ende der 50er Jahre. Es handelt sich um die Verteilung von Klangquellen auf der Stereobreite zwischen den beiden Lautsprechern mittels Panorama-Potentiometer (auch Pan-Pot genannt). Dabei entstehen Phantomschallquellen, d.h. bei der Abstrahlung des selben Signals zweier Lautsprecher, die zusammen mit dem Hörer ein gleichschenkliges Dreieck bilden, nimmt dieser nicht die beiden Lautsprecher als Schallquellen wahr, sondern lokalisiert eine virtuelle Schallquelle zwischen den Lautsprechern.¹⁴² Eine seitliche Verschiebung der Phantomschallquelle kann durch Zeit- und Pegeldifferenzen erreicht werden. Wegen der schlechten Monokompatibilität durch Zeitdifferenzen

¹⁴¹ Vgl. Owsinski 2006, S. 10

¹⁴² Vgl. Dickreiter, S. 221

(es entstehen kammfilterbedingte Klangverfärbungen bei einem Mono-Downmix)¹⁴³, arbeitet ein Pan-Pot zumeist mit Pegeldifferenzen. Die Verteilung von Spuren im Stereobereich kann den Mix breiter und durch Bewegung aufregender wirken lassen. In ähnlichen Frequenzbereichen spielende Instrumente an verschiedene Stellen des Stereospektrums zu pannen kann für mehr Klarheit sorgen, was allerdings bei einem Mono-Downmix nicht mehr zu tragen kommt.

Die Bearbeitung des **Frequenzspektrums** einzelner Signale und damit maßgebliche Veränderung der Klangfarbe erfolgt mittels Equalizer. Laut Owsinski werden dabei drei Hauptziele verfolgt:

- Ein Instrument klarer und definierter klingen lassen.
- Ein Instrument oder einen Mix größer klingen lassen („larger than life“).
- Durch Frequenzanpassungen einzelner Elemente diese besser harmonisieren zu lassen, sodass jedes Element seinen eigenen vorrangigen Frequenzbereich hat.¹⁴⁴

Für mehr Klarheit und Definition sorgt häufig eine leichte Anhebung in den oberen Mitten (1 bis 4 kHz) oder Höhen (4 bis 8 kHz). Auch durch eine Absenkung im Tiefmitten-Bereich (400 bis 800 Hz) kann das gewünschte Ergebnis erreicht werden. „Größe“ wird oftmals durch eine Anhebung des Grundtonbereichs (40 bis 250 Hz) erzielt. Bei allen Equalizeranpassungen ist zu beachten, dass die Spur nicht Solo gut klingen muss, sondern im Zusammenspiel mit allen anderen. Von besonderer Bedeutung ist an dieser Stelle der sogenannte Maskierungseffekt: Die Anwesenheit von bestimmten Frequenzen führt unter Umständen zur Maskierung (also Verdeckung) anderer Frequenzen. So kann es passieren, dass bei der Einstellung des Equalizers einer Spur diese im Solo-Modus gut zu klingen scheint, sobald die anderen Spuren hinzukommen sich jedoch plötzlich ein ganz anderes Bild ergibt.¹⁴⁵

¹⁴³ Vgl. Dickreiter. S. 371

¹⁴⁴ Vgl. Owsinski 2007, S. 25

¹⁴⁵ Vgl. Eisner, S. 29

Mehrere Spuren im gleichen Frequenzbereich anzuheben würde zu einem „Buildup“ in diesem Bereich sorgen, sodass die erwünschte Klarheit verloren geht. Außerdem sind die Mittel eines Equalizers insofern begrenzt, dass nichts angehoben werden kann, was nicht ohnehin schon im Signal vorhanden ist.

Die **räumliche Dimension** ist das Ambiente, also der Anteil von natürlichen oder künstlich erzeugten akustischen Rauminformationen. Da in der Popmusik fast immer mit Close-Miking gearbeitet, also das Mikrofon sehr nahe an die Schallquelle platziert wird, um einen druckvollen und definierten Sound zu erhalten, hat man es häufig mit einem relativ bis sehr trockenem Klang zu tun. Dabei gestaltet ein hörbarer, wahrnehmbarer Raum eine Aufnahme unmittelbar lebendiger und aufregender.¹⁴⁶ Außerdem hilft der Raum, eine Aufnahme „größer, breiter und tiefer erscheinen zu lassen“.¹⁴⁷ Also muss gegebenenfalls diese Rauminformation nachträglich hinzugefügt werden. Dabei wurde in der Vergangenheit zum Beispiel eine speziell präparierte Hallkammer genutzt, in die das Signal mittels Lautsprecher abgestrahlt und anhand eines Mikrofons wieder aufgezeichnet wurde. Heute werden digitale Hallgeräte oder Plug-Ins genutzt, die Hallkammern, Räume, oder auch andere analoge Hallerzeuger wie Hallplatten oder Hallfedern simulieren.

Eingriffe in die **Dynamik** sind im Popmusikbereich wesentlich wichtiger als beispielsweise im Klassik- oder Jazzbereich. Kompression ist in populärer Musik eine überaus wichtige Methode der Klangbearbeitung, die laut Owsinski „eine Mischung so sehr und auf so vielfältige Weise beeinflussen kann“¹⁴⁸ wie kaum etwas anderes. Dynamikprozessoren sind vorrangig Kompressoren und Limiter, aber auch De-Esser, Noise-Gates und andere Abwandlungen derer. Vereinfacht ausgedrückt reduziert ein Kompressor die Dynamik des Audiomaterials, in dem es ab einem einstellbaren Pegel („Threshold“) eine weitere Pegelzunahme nach einem eingestellten Verhältnis („Ratio“) einschränkt. Da so Pegelspitzen reduziert werden, kann der Gesamtpegel des Signals anschließend erhöht werden. Durch verringerte Dynamikschwankungen

¹⁴⁶ Vgl. Owsinski 2007, S. 67

¹⁴⁷ ebd.

¹⁴⁸ Owsinski 2007, S. 81

erscheint das Signal druckvoller und direkter, übermäßiges Anwenden des Kompressors resultiert jedoch in einem unnatürlichen Klang. Es wird unterschieden zwischen Kompression zur Dynamikkontrolle, also des Ausgleichens von Pegelschwankungen, und Kompression als Effekt, also zu Veränderung des Klangcharakters.¹⁴⁹

Über den letzten Punkt, das Erzeugen von **Interesse**, sagt Toningenieur Ed Seay: „Der schwierigste Teil und der letzte Schritt der Mischung sind die Stunden, die ich dazu brauche, um es emotional, eindringlich und aufregend klingen zu lassen, so dass es nicht nur ein Stück ist, sondern eine professionelle Aufnahme.“¹⁵⁰ Dabei geht es nach Owsinski darüber hinaus, einen technisch korrekten und fehlerfreien Mix zu erstellen, sondern einen Grad an Emotionalität und Leidenschaft zu erzeugen, der den Hörer hineinzieht.¹⁵¹ Dafür muss der Mixing-Engineer selbst kreativ werden, ohne dabei jedoch die Richtung und Grundstimmung des Songs aus den Augen zu verlieren.

Eine Schwierigkeit, mit denen sich der Mixing-Engineer auseinandersetzen muss, ist die Abhörsituation. Während dieser im Optimalfall in einem akustisch behandelten Raum mit hochwertigen Abhörmonitoren arbeitet, muss gleichzeitig sichergestellt werden, dass der Mix auch auf weitverbreiteten günstigen Ohrhörern, Kopfhörern oder aber auch PA-Systemen gut klingt. Auch in Mono, beispielsweise auf Küchenradios mit nur einem Lautsprecher, muss der Mix funktionieren. Außerdem sollte der Mix im Vergleich zu anderen kommerziellen Songs nicht abfallen.

¹⁴⁹ Vgl. Owsinski 2007, S. 87

¹⁵⁰ Zit. nach Owsinski 2007, S. 99

¹⁵¹ Vgl. ebd., S. 99f

9.2. Mischen in Surround

Der Zwischenschritt zwischen Stereo und 3D-Sound, sei es durch ein dreidimensionales Lautsprecher-Array oder binaural, ist Surround-Sound. Da das Klangbild von binauralem Stereo nah an dem von Lautsprecher-Surround ist, soll nun das Mischen in Surround erläutert werden, um daraus Rückschlüsse auf das binaurale Mischen zu ziehen.

Vielerorts ist man davon überzeugt, dass Surround-Sound für den Hörer ein realistischeres und angenehmeres Klangerlebnis erzeugt als Stereo.¹⁵² Während dies für Kinofilme, E-Musik und auch Spielarten der U-Musik wie Jazz zutreffend zu sein scheint, so ist es für Pop- und Rockmusik zumindest fragwürdig, da dabei gerade der druckvolle Sound von Stereo geschätzt wird. Schon bei der weitläufigen Umstellung von Mono zu Stereo in den 1960er-Jahren traten Kritiker auf den Plan, wie etwa George Harrison:

„I remember thinking ‚what do you want two speakers for?’ because it ruined the sound from our point of view. We had everything coming out of one speaker and now we had to come out of two speakers. It all sounded very naked.“¹⁵³

Bei Pop- und Rockmusik geht es nämlich nicht in erster Linie um das Erzeugen eines möglichst authentischen Klangbildes, sondern die Mischung spielt eine entscheidende Rolle in der Wirkung des Songs. Die Balance wird gewissermaßen „künstlich“ erschaffen. Denn im Gegensatz zu einem Symphonieorchester, das in sich ausbalanciert und für dessen Abnahme in einem wohlklingenden Raum nur ein Stereo-Hauptmikrofon vonnöten ist (ggf. ergänzt durch Stützmikrofone), ist dies für eine Rockband nicht zutreffend. Das kann jeder bestätigen, der eine solche Band in einem Proberaum gehört hat. Damit Gesang, Akustikgitarren oder auch elektronische Instrumente wie Synthesizer gegen das Schlagzeug ankommen, ist

¹⁵² Vgl. Owsinski 2007, S. 147

¹⁵³ Zit. nach „The Beatles Anthology“, DVD 5

eine Verstärkung erforderlich. Außerdem stellt beispielsweise ein E-Gitarrist seinen Röhrenverstärker in der Regel nicht nach Gesichtspunkten der Lautstärke ein, sondern so, dass der perfekte Sound entsteht. Das Herstellen einer Balance ist also nicht wie bei einem Orchester Aufgabe des Dirigenten, sondern des Mischers. Die gefragte Klangästhetik ist also seltener authentisch-natürlicher Natur, viel häufiger ist ein „druckvoller“ Sound gefragt. Dieser wird gerne durch zahlreiche Dopplungen und teils heftige Kompression erzeugt. So werden diese klanggestalterischen Maßnahmen zum wichtigen Teil des Band-Sounds. Es dauerte eine Weile, bis die Toningenieure den druckvollen Monosound auch in Stereo umsetzen konnten und sich auch das Publikum daran gewöhnte, doch hat Stereo sich schließlich fest etabliert. Mit den eben erläuterten Gedanken wird klar, warum Surround-Sound, der ein „realistischeres und angenehmeres Klangerlebnis“ liefern soll als Stereo, nicht per se das bessere Format für Rock- und Popmusik ist.

Das heute am weitesten verbreitete Surround-System ist 5.1. Vor allem von Heimkino-Enthusiasten geschätzt, ist seine Verbreitung unter Musikfans doch eher gering ausgeprägt. Dabei bietet es, wie alle anderen Surround- und auch 3D-Audio-Formate einige Vorteile: Durch die Mehrzahl an Lautsprechern, insbesondere des Center-Kanals, wird die klangliche Transparenz deutlich verbessert und die Positionen im Panorama verankert - im Gegensatz zur „Phantommitte“. Außerdem schreibt Owsinski, dass ein schnelleres Mischen möglich sei. Dies sei bedingt durch die in Surround-Sound automatisch eingebaute Tiefe und Räumlichkeit, die man in Stereo durch harte Arbeit erschaffen muss. So müssen in der Regel weniger Equalizer und Effekte eingesetzt werden.¹⁵⁴

Zur Panoramaverteilung gibt es die von Owsinski „Bühnen-“ und „Publikumsansicht“ genannten Denkansätze.¹⁵⁵ Bei der Bühnensicht wird der Zuhörer inmitten der Band platziert, die Instrumente spielen also um ihn herum auf alle Lautsprecher verteilt. Für die Publikumsansicht wird die Musik hauptsächlich auf die Frontlautsprecher gemischt, die Surroundlautsprecher geben hauptsächlich das

¹⁵⁴ Vgl. Owsinski 2007, S.154

¹⁵⁵ Vgl. ebd. S. 155

räumliche Ambiente wieder - das Mittel der Wahl vor allem für klassische Aufnahmen. Obwohl die Bühnensicht ein dramatischeres, interessanteres und größer wirkendes Klangbild erzeugt als die Publikumsmethode oder herkömmliches Stereo, so bringt es nach eigenen Erfahrungen auch Nachteile mit sich. Zum einen führt das „Außeinanderreißen“ der Band tatsächlich zu einem interessanten Klangergebnis, doch lenkt es von der Gesamtperformance der Band ab, da man seine Aufmerksamkeit stets verschiedenen Richtungen und Inhalten widmet. Obwohl Owsinski von einem vergrößerten Sweet Spot spricht¹⁵⁶, ist nach eigener Erfahrung der Sweet Spot wesentlich kritischer, da die Balance durch die Position des Hörers im Raum wesentlich beeinflusst wird. Sind beispielsweise eine verzerrte Gitarre und ein Tamburin nach hinten gepannt, wird der Hörer diese viel stärker wahrnehmen als den im Centerkanal untergebrachten Gesang, wenn er sich weiter hinten im Raum befindet - ein Umstand, der bei Stereo nicht gegeben ist. Außerdem entfernt man sich noch weiter vom gewohnten und so wichtigen druckvollen Sound, wenn man die einzelnen Elemente noch weiter auseinander teilt. Eine reine Mischung aus „Publikumsansicht“ entspricht einem erweiterten Stereomix und lässt jede Rechtfertigung eines Surroundsystems vermissen. Aus eigener Erfahrung lässt sich sagen, dass eine Mischform beider „Ansichten“ für Rock- und Popmusik optimal ist. Dabei liegt der Hauptfokus auf den Frontkanälen. Die Surround- (und ggf. falls auch Höhen-)Kanäle liefern nicht nur Ambiente, sondern auch Begleitinstrumente wie Percussion oder Synthesizerflächen. Für Soli und Spezialeffekte bieten sich auch Panoramafahrten im gesamten Raum an.

Die aus Popmusikmischungen in Dolby Atmos gewonnenen Erfahrungen sollen für das 3D-KopfhörerKonzert umgesetzt werden.

¹⁵⁶ Vgl. Owsinski 2007, S. 153

9.3. PA-Mix vs Studio-Mix

Beschallung ist das Verstärken von zu leisen akustischen Nutzsignalen für ein Publikum mittels eines PA(Public Address)-Systems. Eine „gute“ Beschallung zu definieren ist schwierig, da sich Laien und auch Fachleute in Sachen Lautstärke und Entzerrung oft uneinig sind. Klarer ist hingegen was schlechte Beschallung ist: Nämlich dann, wenn Rückkopplungen auftreten. „Das Ziel einer guten Beschallung sollte sein, möglichst alle Zuhörer mit Direktschall aus den Lautsprechern zu versorgen, an allen Orten eine gleichmäßige Frequenzverteilung herzustellen [und] überall gleiche Pegelverhältnisse zu schaffen.“¹⁵⁷ Im Idealfall wird das Schallereignis so unterstützt, dass die Beschallungsanlage als solche gar nicht wahrgenommen wird.

Im Unterschied zum Studio findet bei Beschallung die Aufnahme der Schallquellen und die Wiedergabe nicht in getrennten, sondern im selben Raum statt. Die Schwierigkeiten dabei sind, neben der Vermeidung von Rückkopplungen, einen einigermaßen homogenen Schalldruckpegel für den gesamten Publikumsbereich herzustellen und die akustischen Gegebenheiten des Raumes so zu integrieren, dass sie zu keinen negativen klanglichen Folgen führen. Da ein Schallereignis in die selbe akustische Umgebung abgestrahlt, in der es aufgenommen wird, kommt es zu einer Verstärkung der hörbaren Räumlichkeit. Der Idealfall ist daher erreicht, wenn beim Hörer möglichst viel Direktschall und nur wenig Diffusschall ankommt.¹⁵⁸ Obwohl im Regelfall PA-Systeme in Stereo ausgelegt sind, nutzt ein Konzertbeschaller dies selten aus. Meist handelt es sich um sogenannte „Big Mono“-Mischungen: Fast alles wird ins Zentrum gepannt und auch Stereospuren werden nicht über die gesamte Breite ausgedehnt. Der Grund ist, dass sich das Publikum nicht nur zentral, sondern auch seitlich, teilweise direkt vor einer Seite der PA, befindet. Während eine gewisse Schwankung der Balance durch Abweichen aus dem „Sweet Spot“ hinzunehmen ist,

¹⁵⁷ Dickreiter, S. 572

¹⁵⁸ Dickreiter, S. 569

so gilt es doch extreme Schwankungen zu vermeiden, sodass alle wichtigen Elemente mittig oder annähernd mittig platziert werden.

Während das Ziel einer Konzertbeschallung häufig ist, möglichst unauffällig den Bandsound zu transportieren und dabei einen für jeden Gast akzeptablen Klang und Schallpegel herzustellen, kann und muss man beim Abmischen einer Aufnahme zur Veröffentlichung nicht auf die speziellen räumlichen Gegebenheiten des Zuhörers und dessen Abhörlautstärke eingehen. Außerdem hat man wesentlich mehr Zeit, kann Passagen immer wieder abspielen und kann viel stärker kreativ ins Geschehen eingreifen. Im Gegensatz zur Beschallung, bei der die Abmischung speziell auf das verwendete PA-System und die räumlichen Gegebenheiten abgestimmt wird, muss ein Studiomix auf allen Anlagen und bei variierenden Abhörpegeln funktionieren. Im Vergleich zu anderen Mischungen sollte das Klangbild nicht negativ, beispielsweise als zu spitz oder zu dumpf, empfunden werden. Da auch der Konsument die Aufnahme immer wieder abspielen und mit Kopfhörern wiedergeben kann, ist es besonders wichtig, dass diese frei von Störgeräuschen und Artefakten ist.

9.4. Mischen mit Kopfhörern

Das Abmischen von Popmusik, bestehend aus mehreren nah-mikrofonierten Mono- und Stereospuren, auf Kopfhörern stellt sich aus mehreren Gründen als schwierig dar. Durch die grundlegend unterschiedliche Hörerfahrung ist eine Kompatibilität von auf Kopfhörern abgemischter Musik und Lautsprecherwiedergabe problematisch. Dieses Problem ist jedoch beim Silent Concert nicht gegeben, da der Mix ausschließlich auf Kopfhörern wiedergegeben wird. Durch das Verwenden der KLANG:fabrik, welche eine räumliche Wiedergabe speziell für Kopfhörer ermöglicht, ist ein freies und kreatives Panning möglich, ohne mit einem unnatürlichen Höreindruck rechnen zu müssen. Eine weitere Schwierigkeit beim Mischen mit Kopfhörern ist das Beurteilen des Bassbereichs, da dieser bei Lautsprecherbeschallung nicht nur gehört, sondern auch mit dem Körper gespürt wird. Auch hier ist der Vorteil, dass man nicht auf Kompatibilität achten muss, sodass

der Bassbereich nach Belieben gestaltet werden kann, solange man das Klangbild für ausgewogen hält.

Da das Musikhören mittels Kopfhörern als besonders intensiv empfunden wird¹⁵⁹ und Störgeräusche und Artefakte leichter erkannt werden¹⁶⁰, muss der Mix eher einem Tonstudiomix entsprechen, als einer typischen Konzertmischung.

9.5. Subwoofer

Entgegen des Silent-Stage-Prinzips ist es selbstverständlich auch möglich zur besseren Basswahrnehmung Subwoofer miteinzubeziehen, die zum Beispiel im Bereich von 20 bis 80 oder bis 120 Hz abstrahlen. Grund dafür ist, dass Bässe nicht nur mit den Ohren gehört, sondern mit dem ganzen Körper wahrgenommen werden. Bei Rockkonzerten ist das Aufstellen vieler Subwoofer üblich, sodass man jeden Kick der Bassdrum "in der Magengrube" spürt. Da dieses Phänomen beim Kopfhörerkonzert gänzlich eliminiert wird, kann es passieren, dass genau dieses Gefühl von Publikum aber auch Musikern vermisst wird. Daher kann das leichte Verstärken des Bassbereichs mittels Subwoofer hierbei Abhilfe schaffen, sofern die Gegebenheiten dies zulassen. Beim Silent Concert wurde festgestellt, dass beim Hinzuschalten der Subwoofer gerade bei den Musikern ein gewohntes und bühnentypisches Gefühl entsteht. Der Pegel wurde so gewählt, dass die Subwoofer nicht sofort auffielen während man den Kopfhörer trug, sondern eher unterbewusst wahrgenommen wurden. Wurden diese dann stummgeschaltet merkte man sofort, dass etwas fehlte. Man muss hierbei also entscheiden ob man die Erfahrung des Publikums und der Musiker durch Subwoofer erweitern, oder dem Silent-Stage-Prinzip treu bleiben möchte (oder muss, etwa bei Open-Airs zu späterer Stunde).

¹⁵⁹ Vgl. Dickreiter, S. 211

¹⁶⁰ Vgl. ebd. S. 349

9.6. Sonderfall Kopfhörer-Konzert

Der Mix für ein 3D-Kopfhörerkonzert sollte sich demnach trotz der Live-Situation eher wie eine Studiomischung anhören. Ein unaufdringliches Verstärken der Instrumente ist angesichts der Silent Stage und das Tragen von Kopfhörern unmöglich. Da das Hörerlebnis mit Kopfhörern intensiver ist und man „wie mit der Lupe“ hinhören kann, sollte die Qualität der Mischung entsprechend hoch sein. Deutlich wird der Sonderfall beim Einsatz von Kompression. Während bei einer CD-Produktion der Kompressor heutzutage ein unverzichtbares Mittel ist, um auch bei geringer Abspiellautstärke einen druckvollen Sound zu erzeugen, ist er in der Live-Situation weniger essenziell. Da im Regelfall ein Konzert ohnehin mit hohen bis sehr hohen Pegeln beschallt wird, wird das Klangerlebnis ohnehin als druckvoll empfunden. Ein Kopfhörerkonzert ist daher als Mischform zu betrachten. Die Abhörlautstärke ist nicht ganz so laut wie bei vielen Konzerten und individuell einstellbar, aber auch nicht zu gering. Außerdem muss er sich nicht gegen Nebengeräusche oder andere Ablenkungen durchsetzen. Es ist also ein druckvoller, aber gemäßigter Sound gefragt, der genügend Platz für Dynamik und Natürlichkeit aufweist, sofern gewünscht.

Abschließend kann festgestellt werden, dass dem Mischer die Entscheidungsfreiheit zufällt, sich für eine eher konventionelle, natürliche oder innovativ-verrückte Mischung und Nutzung des dreidimensionalen Raumes zu entscheiden. Beim vorliegenden Fall wurde sich für eine druckvolle, aber natürlich klingende Herangehensweise mit gelegentlichen Effekten entschieden, um nicht von der Musik an sich abzulenken.

9.7. Static Binaural Mixing - Grundlagen

Static Binaural Audio ist die einfachste und kostengünstigste Möglichkeit, einem Hörer ein 3D-Klangerlebnis zur Verfügung zu stellen, da auf der Konsumentenseite keine besonderen Geräte oder Einrichtungen erforderlich sind. Wie in Kap. 6 beschrieben, wird durch das Anwenden von HRTFs eine binaurale Tonwiedergabe ermöglicht, die das natürliche Hörerlebnis replizieren und so das scheinbare Lokalisieren von Schall aus drei verschiedenen Dimensionen beim Tragen von Kopfhörern realisiert. Da diese ohrspezifischen räumlichen Informationen bereits bei der Aufnahme oder in der Nachbearbeitung integriert werden, ist keine weitere Dekodierung bei der Wiedergabe nötig und ist mit jedem handelsüblichen Kopfhörer möglich.¹⁶¹ Static Binaural Audio arbeitet ohne Head-Tracking, wodurch der Mixing-Engineer eine sehr hohe Kontrolle über das Endergebnis hat, da der Hörer nicht in das System eingreifen kann.

Die einfachste Methode, eine statische binaurale Audioaufnahme zu erstellen, ist mittels **Kunstkopfverfahren**. Dieses übertragungstechnisch einfache Verfahren ermöglicht am besten eine originalgetreue Übertragung.¹⁶² Eines der am weitesten verbreitete Modelle ist das KU-100 von Neumann. Der Kunstkopf ist dem menschlichen Kopf hinsichtlich seiner Formgebung, insbesondere der akustischen Eigenschaften, weitestgehend angenähert. Anstelle der Gehörgänge ist er mit Mikrofonen ausgerüstet. Wird das damit aufgezeichnete Signal auf Kopfhörern wiedergegeben, „entsteht ein Höreindruck, der fast vollständig demjenigen gleicht, den der Hörer bei stillgehaltenem Kopf am Ort des Kunstkopfes gewinnen würde und vermittelt daher die Illusion des Dabeiseins am Ort der Darbietung.“¹⁶³ Nach Aussagen von Neumann entspricht das Klangerlebnis bei Lautsprecherwiedergabe weitgehend dem eines herkömmlichen Stereomikrophons, „jedoch mit

¹⁶¹ Vgl. Sennheiser, S. 3

¹⁶² Vgl. Dickreiter, S. 345

¹⁶³ Georg Neumann GmbH, S. 3

differenzierter Abbildung der Raumtiefe“¹⁶⁴. Hörversuche zeigen jedoch, dass sich Kunstkopfaufnahmen deutlich von herkömmlichen Stereomikrophon-Aufnahmen bei Lautsprecherwiedergabe unterscheiden¹⁶⁵. Das Kunstkopfverfahren implementiert die Außenohr-Übertragungsfunktion schon bei der Aufnahme und bedarf keiner weiteren Nachbearbeitung. Es eignet sich besonders gut zur Wiedergabe der natürlichen akustischen Gegebenheiten des Aufnahmeraums. Essenziell ist die Aufnahmeposition des Kunstkopfmikrophons. Diese sollte die Position sein, an der „beim natürlichen Hören ein optimaler Klangeindruck entsteht“¹⁶⁶. Bei musikalischen Darbietungen mit hauptsächlich akustischen Instrumenten, die in sich gut ausbalanciert sind (z.B. Kammermusik, Acoustic Folk etc.), bietet sich die Platzierung auf oder nahe der Bühne an. Bei Konzerten mit hauptsächlich elektrischen Instrumenten, die stark auf die PA angewiesen sind, empfiehlt sich die Platzierung im oder über dem Publikum.¹⁶⁷

Um Mono- und Mehrkanalinhalte zu „binauralisieren“, bedarf es eines Prozessors, der die HRTFs auf das Signal anwendet. Solche Prozessoren gibt es in Hard- und Softwareform. Eine bekannte Hardwarelösung ist die im vorliegenden Fall verwendete KLANG:fabrik der Firma KLANG:technologies, eine Softwarelösung wäre beispielsweise das Plugin „Ambeo Orbit“ der Firma Sennheiser, das seit Anfang 2018 als kostenloses Plugin in den Formaten VST, VST3, AU und AAX angeboten wird.

¹⁶⁴ ebd.

¹⁶⁵ Vgl. Sengpiel [Stand: 03.07.2018]

¹⁶⁶ Dickreiter, S. 348

¹⁶⁷ Vgl. Sennheiser, S. 7

9.7.1. Wiedergabe

Zur optimalen Wiedergabe empfehlen sich offene Kopfhörer. Sie weisen tendenziell einen neutraleren Frequenzgang und eine detaillierte Wiedergabetreue auf, welche die Unterscheidung zwischen Klangfarbenänderungen und „Externalisierung“ eines binauralen Signals erleichtern.¹⁶⁸ Geschlossene Kopfhörer hingegen können aufgrund ihrer Bauart zu internen Resonanzen führen und wegen weit verbreiteter Anhebungen im Bassbereich die Wiedergabetreue verschlechtern. Für offene Kopfhörer spricht außerdem die leichtere Bauart und die langsamere Ermüdung des Gehörs, was längere Mixing-Sessions und eine bessere Beurteilungsfähigkeit der Mischung erlaubt.

9.7.2. Probleme beim binauralen Mischen

Naturgemäß verändert sich durch das Anwenden von HRTFs die Klangfarbe des Signals, sodass man es ständig mit einem Kompromiss zwischen Erhalt der Originalklangfarbe und der „Externalisierung“, also der glaubwürdigen Lokalisation einer Schallquelle außerhalb des Kopfes, zu tun hat. Werden HRTF-Datensätze gewählt, die ein sehr externalisiertes Klangbild versprechen, wird die Klangfarbe des Signals mitunter stark verändert. Ist die Erhaltung der Klangfarbe die höchste Priorität, leidet die Lokalisationsgenauigkeit. Es wird zwischen „externalisierteren“ und „tonaleren“ HRTF-Datensätzen unterschieden.¹⁶⁹ Besonders bei Schallquellen, mit denen wir sehr vertraut sind, wie der menschlichen Stimme, macht sich eine starke Klangfarbenänderung schnell bemerkbar und führt zu einem unnatürlichen bzw. stark gefilterten Klangeindruck. Bei Schallquellen, mit denen man weniger Erfahrung hat, beispielsweise elektronischen Instrumenten, fällt hingegen eine Klangfarbenänderung weniger stark ins Gewicht, sodass stärker externalisierte

¹⁶⁸ Vgl. Sennheiser, S. 5

¹⁶⁹ Vgl. Sennheiser, S. 16

HRTF-Datensätze gewählt werden können. In der Regel hat der Mixing-Engineer jedoch keine Möglichkeit aus verschiedenen Datensätzen zu wählen, sondern muss sich mit dem, was die von ihm gewählte Hard- oder Software zur Verfügung stellt zufrieden geben. Neuartig ist daher das „Clarity“-Feature im Ambeo Orbit Plugin von Sennheiser. Es handelt sich dabei um einen virtuellen Drehregler, der stufenlos zwischen maximaler Externalisierung (0% Clarity) und größtmöglicher Erhaltung der Klangfarbe (100% Clarity) regeln kann.

Der dreidimensionale Raum des Plugins ist nicht als Würfel gestaltet, sondern wie der Name schon impliziert als Kugel, an dessen Außenbahnen die Elemente platziert werden können (Orbit = Umlaufbahn, von lat. orbita). Eine „Elevation“ von +/- 90° entspricht also der Lokalisation genau über bzw. unter dem Hörer.¹⁷⁰

Gerade Instrumente mit viel Bassanteil, zum Beispiel Bassgitarre oder Bassdrum, verlieren mit der Binauralisierung an „Wucht“.

Dann bietet es sich an, auf die Binauralisierung des einzelnen Elements zu

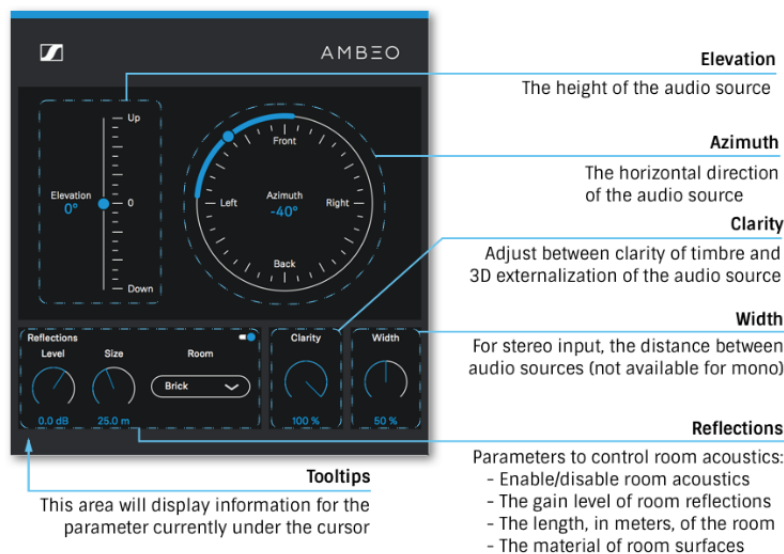


Abb. 30: Instanz des Orbit Ambeo Plugins

verzichten. Das gilt auch für Elemente, die aus dem Mix herausstechen sollen, wie etwa der Erzähler bei einem Hörspiel. Hall und ähnliche Effekte können unter Umständen auch besser klingen, wenn sie nicht binauralisiert werden.

Das Ambeo Orbit Plugin macht es auch einfacher,

ein Kunstkopfmikrofon mit Stützmikrofonen zu kombinieren, denn so können Stützmikrofone in den dreidimensionalen Raum eingepflegt werden. Besonders stimmige Ergebnisse sollten bei Verwendung des Kunstkopfs Neumann KU-100

¹⁷⁰ Vgl. Sennheiser, S. 11

erzielt werden, da die HRTF-Datensätze des Plugin auf Messungen anhand des KU-100 beruhen.¹⁷¹ Eine weitere Besonderheit von Ambeo Orbit ist die „Reflections“-Sektion. Ist sie aktiviert, werden die Raumreflektionen eines quaderförmigen Raums, dessen Größe einstellbar ist, binaural emuliert. Da der Raumeindruck („Empfindung von Größe und Ausgestaltung eines Raums“¹⁷²) Bestandteil des räumlichen Hörens ist und eine Wahrnehmung der Entfernung in geschlossenen Räumen auch durch das Verhältnis von direktem zu diffusem Schall (Reflektionen) ermöglicht wird¹⁷³, kann so die Wahrscheinlichkeit der Lokalisation der einzelnen Elemente außerhalb des Kopfes noch verbessert werden. Es stehen dafür fünf wählbare Räume zur Verfügung: Drapes, Curtains, Brick, Drywall, Glass - sortiert vom trockensten Raum zu dem mit den ausgeprägtesten Reflektionen.

9.8. Static Binaural Mixing am Beispiel „Justify Your Love“ von Matija

Der Prozess des binauralen Mischens soll nun beispielhaft anhand des Songs „Justify Your Love“ von Matija demonstriert werden. Es handelt sich dabei um einen Mehrspurmitschnitt des Silent Concerts vom 13.04.2018. Die Spuren wurden nicht durch die Bearbeitungen im Pult während des Konzertes beeinflusst oder binauralisiert. Da ein Übersprechen so gut wie nicht auftritt, kann man die Situation durchaus mit einer Studioaufnahme vergleichen. Als Binauralprozessor kommt das „Ambeo Orbit“ Plugin von Sennheiser zum Einsatz.

Es gibt verschiedene Vorgehensweisen, wann die Binauralisierung eingesetzt werden soll - direkt am Anfang, im späteren Verlauf oder ganz am Ende. Für die Einbindung des Plugins gleich zu Beginn spricht die Tatsache, dass das Plugin das Signal

¹⁷¹ Vgl. Sennheiser, S. 16

¹⁷² Dickreiter, S. 32

¹⁷³ Vgl. Dickreiter, S. 132f

verfärben wird und daher alle Entschlüsse zur Klangbearbeitung getroffen werden sollten, während man die Färbungen des Plugins hört.

Eine Binauralisierung am Ende des Prozesses, nachdem also eine herkömmliche Stereo-Mischung erstellt wurde, ist dann praktisch, wenn von einem Song sowohl eine lautsprecher- als auch kopfhörerstereofone Mischung erstellt werden soll; es wird nämlich nur ein weiterer Arbeitsschritt benötigt, um beide Mischungen zu erstellen. Das binaurale Ergebnis wird so wahrscheinlich nicht das raffinierteste sein, doch die Vorgehensweise ist definitiv die effizienteste.

Die dritte Methode ist die Binauralisierung als Zwischenschritt. Zunächst werden alle Spuren mono (oder stereo) in Balance gebracht und grob klanglich bearbeitet. Der Fokus sollte dabei das Lösen von klanglichen Problemen sein, wie beispielsweise die Reduktion von Zischlauten oder Trittschall, und weniger eine künstlerische Bearbeitung, da sich durch die Klangverfärbungen der Binauralisierung das Klangbild ändern kann. Nach dem Verteilen der Spuren im binauralen Raum wird dann schlussendlich eine kreative Klangbearbeitung durchgeführt.

Die dritte Methode wird im folgenden Beispiel angewandt.

Nr.	Spur
1	Kick
2	Snare
3	HiHat
4	Toms Links
5	Toms Rechts
7	Crash Links
8	Crash Rechts
9	Bass Synth
10	Synthesizer Johann
11	E-Gitarre Jan (Kemper Profiling Amp)
12	E-Gitarre Matt (Kemper Profiling Amp)
13	Lead Vocal
14	Backing Vocal
15-16	Atmo

Es sei angemerkt, dass es sich bei dem Schlagzeug um ein E-Drumset handelt. Das heißt, es gibt keinerlei Übersprechen und die Samples sind an sich schon bearbeitet, was die Mischung im Gegensatz zum mikrofonierten Schlagzeug deutlich erleichtert.

1. Erstellen eines Roughmixes

Wie bei einer gewöhnlichen Stereomischung wurde zunächst in Mono eine grobe Balance der Pegel erstellt. Beginnend mit dem Lead-Gesang wurden dann einzelne Spuren mit Equalizern bearbeitet. Mit dem SSL E-Channel von Waves wurden störende Subbassfrequenzen gefiltert und der Klang grob geformt, ohne dabei zu sehr ins Detail zu gehen. Als problematisch zeichnete sich Matts E-Gitarre ab, da der Sound sehr nasal-klingend und basslastig war. Da das Signal sehr vorsichtig eingepegelt war und Matt gerade am Anfang extrem leise spielt, ist ein Rauschen wahrnehmbar. Dadurch war eine Anhebung im Höhenbereich nicht uneingeschränkt möglich, da das Rauschen sonst zu laut würde.

Mit einem Low Shelf von ca. -5 dB unterhalb ca. 120 Hz, einer deutlichen Absenkung im Tiefmittenbereich und einer Anhebung um 2,5 kHz konnte ein annehmbares Resultat erzielt werden. Mit einem weiteren Equalizer Plugin wurde um 540 Hz abgesenkt, was den noch immer nasalen Charakter des Signals deutlich reduzierte.

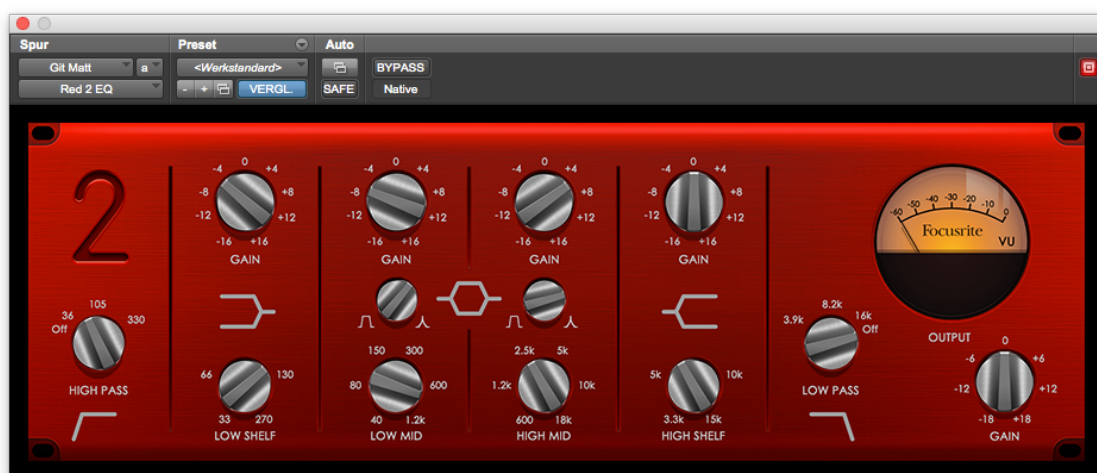


Abb. 31: Equalizer auf Matts Gitarrenspur

Zwei E-Gitarren kommen sich in ihren Frequenzbereich oft in die Quere, doch hier unterscheiden sie sich in ihrer Klangcharakteristik. Jans Gitarre klingt brillanter, Matts eher „wärmer“ und bassiger, was entsprechend betont wurde.

Offensichtlich benötigten Matts Gitarre und sein Gesang Kompression, da beide sehr dynamisch vorgetragen wurden. Besonders stark sind die Dynamikunterschiede zwischen dem lauten zweiten Refrain und dem Rest des Stückes in Matts Gitarre, sodass die Spur mittels „Clip-Gain“ in den leisen Sektionen um 5 bzw. 6 dB angehoben wurde. Um den Bass-Synthesizer druckvoller und präsenter zu gestalten, wurde auch dieser leicht komprimiert.



Abb. 32: Finale Equalizer-Einstellung am Lead-Gesang. Die Dynamiksektion des Plugins wurde nicht genutzt.

Hörbeispiel 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Mix in einem sehr frühen Stadium. Es wurden nur die Pegel angeglichen und keine weiteren Bearbeitungen vorgenommen.

2. Einsetzen des Orbit-Plugins

Nachdem alle Spuren grob bearbeitet waren, wurde nach und nach das Plugin eingesetzt - hinter allen anderen Plugins, um die HRTFs nicht durch Frequenzveränderungen zu kompromittieren. Es wurde nicht gleichzeitig bei allen Spuren aktiviert, um die Klangverfärbungen der einzelnen Spuren untersuchen und gegebenenfalls mittels „Clarity“-Funktion korrigieren zu können. Über die grobe räumliche Verteilung wurde schon im Vorfeld nachgedacht, sodass die Spuren dann auch direkt verteilt werden konnten, wie in **Abb. 33** dargestellt.

Es wurde festgestellt, dass sich minimale Änderungen in der Höherebene klanglich nur durch Verfärbungen, kaum jedoch als Lokalisation nach oben oder nach unten bemerkbar machten. Auch extreme Einstellungen führten zu übermäßig gefiltert klingenden Resultaten. Als am eindrucksvollsten zeichneten sich die „Elevation“-Positionen von $\pm 30^\circ$ bis $\pm 60^\circ$ ab, die im Mix wie folgt angewandt wurden:

+60°: Git Jan, (Snare Delay)

+30°: Tom L

+15°: Git Matt

0°: Lead Vocal, (Vocal Delay,) HiHat, Crash, Atmo

-30°: Backing Vocal, Synth, Snare, Tom R

-40°: Bass Synth

-60°: Kick

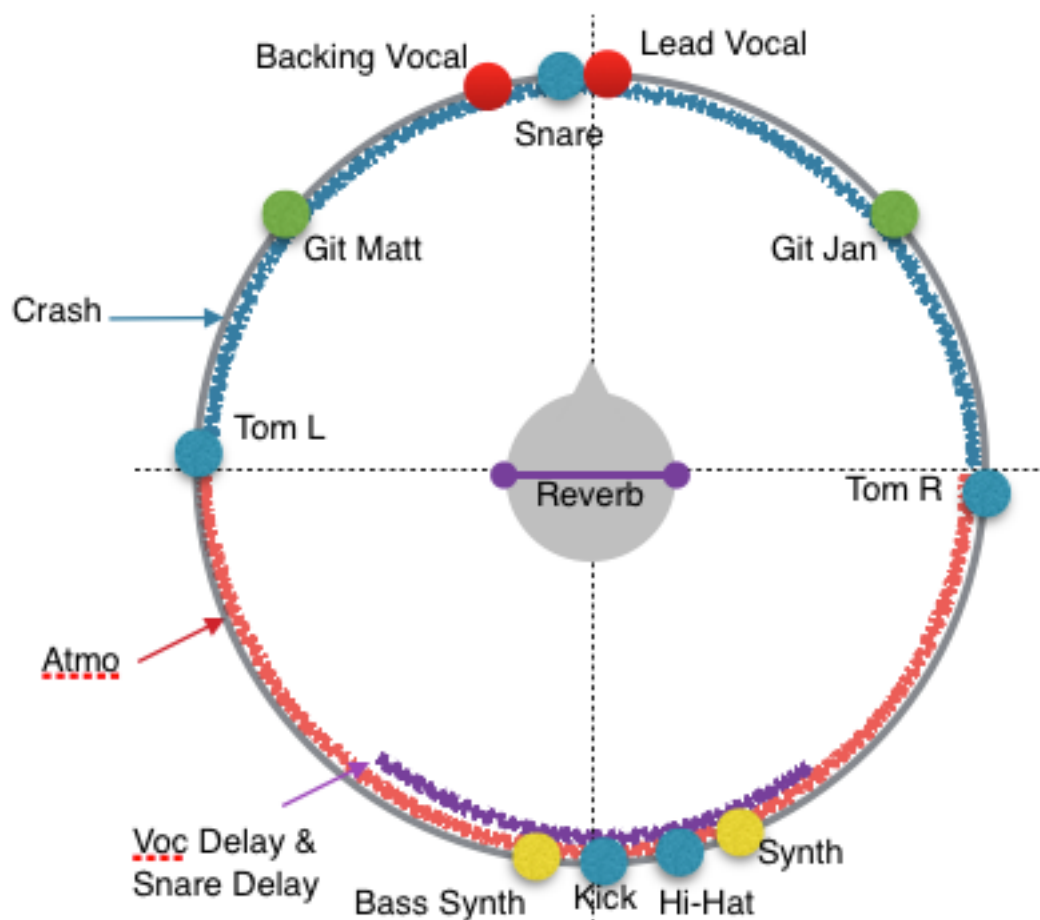


Abb 33: Schaubild der horizontalen Verteilung der Spuren

Nur bei wenigen Spuren machten sich Klangverfärbungen negativ bemerkbar: Die Crashbecken klangen sehr unnatürlich, sodass hier Clarity auf 100% gestellt wurde. Beim Bass Synth wurde selbiges auf 50% gestellt, um ihm mehr Präsenz zu verleihen. Bei beiden Spuren wurde auch auf die Reflections verzichtet.

Die Reflections zeigten sich als besonders wirksam, wenn alle Elemente im selben „Raum“ platziert wurden, da so ein kohärenter Eindruck entsteht. Besonders das E-Drumset, dessen Einzelspuren im Gegensatz zu einem mikrophonierten, realen Schlagzeug keinerlei Übersprechen aufweisen, konnte so an Natürlichkeit und Glaubwürdigkeit gewinnen.

3. Feinbearbeitung, Effekte, Automatisierung

Nachdem alle Elemente verteilt waren, stellte sich heraus, dass nur minimale weitere Bearbeitungen nötig waren, da jedes Element an sich gut klang und es keine im Frequenzbereich „konkurrierenden“ Elemente gab. Es wurde ein Stereo Hall („Med Vocal Hall“) eingerichtet, der den Stimmen, Gitarren, Snare, HiHat und Toms mehr Räumlichkeit und Tiefe verleiht. Dieser Hall wurde nicht binauralisiert, da sonst der gewünschte Effekt nicht eintritt. Zusätzlich wurden noch zwei Effekte angelegt: Ein Hall (Plate) mit sehr langem Pre-Delay (125 ms), der mittels Orbit Plugin nach hinten oben platziert wurde, welcher der Snare den Eindruck verleiht, als würde der Hall nach hinten oben „wandern“. Der zweite Effekt, ein verhallter Multi-Tap-Delay, kommt als Besonderheit nur im letzten Chorus auf dem Backgroundgesang zum Einsatz. Durch einen Kompressor, der mittels Side-Chain-Eingang durch den Leadgesang getriggert wird, kommt es zur Unterdrückung des Signals wenn beide Sänger singen. Nachdem eine Zeile gesungen wurde, öffnet der Kompressor und der Multi-Tap-Delay wird hörbar, sodass der Eindruck entsteht, das letzte Wort werde einige Male wiederholt. Dieser Effekt wurde nach hinten auf der Medianebene gelegt.

Abschließend wurde der statische Mix durch Pegel-Automatisierung, insbesondere der Gitarren, Synthesizer und Leadgesang abgerundet. Als weiterer Effekt wurde das

Synthesizer-Arpeggio am Ende des letzten Refrains hervorgehoben, indem es über acht Takte eine 360°-Drehung um den Hörer durchführt (frontal beginnend und endend), und dabei von einer Elevation von +60° auf -60° absteigt.

4. Summenbearbeitung

Während einige Engineers es bevorzugen, die Stereosumme unangetastet zu lassen, so gibt es doch auch viele, die beherzt zum Summenkompressor oder Equalizer greifen. Nicht unüblich ist dabei, diese schon sehr früh im Mix einzusetzen (beispielsweise nach oder während der Erstellung des Roughmixes) und dann sozusagen „hinein“ zu mischen. Um eine etwaige Beeinträchtigung der Lokalisation zu vermeiden, wurde letztere Methode im vorliegenden Beispiel nicht verwendet. Doch da es sich um einen äußerst dynamischen Titel handelt, bei dem der letzte Chorus besonders „laut“ und „dicht“ klingen soll, sollte ein Summenkompressor verwendet werden. Gewünscht war dabei, dass ab dem „Build-Up“ vor dem letzten Chorus der Kompressor einsetzt, sodass der „laute“ Chorus effektiv klanglich verdichtet und im Pegel abgesenkt wird, wodurch der vorhergehende ruhige Part in der Lautheit nicht ganz so sehr abfällt.



Abb. 34: Kompressor auf der Stereo-Summe

Das führte jedoch dazu, dass der letzte Chorus sehr stark komprimiert wurde, der Anfangsteil hingegen überhaupt nicht. Daher wurde entschieden, eine Parallel-Kompression anzuwenden. Das bedeutet, dass die Summe extrem stark komprimiert wurde, wobei schon im Anfangsteil der Kompressor greift. An den lautesten Stellen wird um über 10 dB reduziert. Diese komprimierte Summe wurde dann mit der unkomprimierten Summe gemischt. Mit dem Dry/Wet-Regler des Red3-Plugins von Focusrite ist das sogar innerhalb eines einzelnen Plugins möglich. So bleiben Teile der Dynamik erhalten, die Summe wird verdichtet und Transienten kommen immer noch zur Geltung.

Im **Hörbeispiel 2** ist der selbe Ausschnitt wie in **Hörbeispiel 1** zu hören, diesmal mit vollständiger klanglicher Bearbeitung, jedoch ohne Binauralisierung. **Hörbeispiel 3** ist ein Ausschnitt aus der finalen, binauralen Mischung.

Der vollständige Mix ist unter dem **Hörbeispiel 5** zu finden.

5. Einschränkungen & Fazit

Wie die Bearbeitung der Stereosumme ist auch die Bearbeitung von Bussen bzw. Gruppen bei Stereomischungen üblich. Dabei werden verschiedene Spuren, beispielsweise die Einzelspuren eines Schlagzeugs, zusammen auf eine Stereospur geroutet, die dann bearbeitet wird. So werden unter anderem Equalizer- und Kompressoreinstellungen auf allen Spuren gleichzeitig angewendet, wodurch ein kohärenterer Klangeindruck entstehen kann. Grundsätzlich ist diese Methode auch für binaurale Mischungen möglich. Will man jedoch die Spuren einzeln ins 3D-Panorama einfügen und nicht als Stereogruppe, so geschieht dies in den Einzelspuren. Die Gruppenbearbeitung erfolgt dann anschließend, was so nicht empfohlen wird, da dadurch die Binauralisierung beeinträchtigt werden kann. Außerdem ist es fraglich, ob ein kohärenteres Klangerlebnis entsteht, wenn räumlich scheinbar getrennte Einzelelemente gemeinsam komprimiert werden. Ein Zeitersparnis durch Gruppenbearbeitung ist jedenfalls nicht zu erwarten.

Das binaurale Mischen mit dem Orbit Plugin unterscheidet sich nicht wesentlich vom herkömmlichen Mischen in stereo. Der Engineer sollte sich im Vorfeld bewusst sein, welches Ergebnis er anstrebt und auf welche Weise er dieses Ziel verfolgen will. Hat man sich an die Vorgehensweise und die Benutzung des Plugins oder der Hardwarelösung für binaurales Mischen gewöhnt, ist das Erstellen einer 3D-Mischung zusätzlich zur Stereomischung ohne erheblichen Mehraufwand nötig. Auch bereits bestehende Stereomischungen lassen sich auf einfache Weise in binaurale Mischungen umwandeln. Wird einzig eine 3D-Mischung angestrebt, kann der Mischprozess unter Umständen aufgrund der besonderen Begebenheiten von binauraler Musik schneller ausfallen, als eine reguläre Mischung.

10. Umsetzung des Silent Concerts

10.1. Technisches Setup

Da der ClubCANN zwei Tage für die Veranstaltung reserviert wurde, konnte der Aufbau bereits einen Tag vor dem Konzert beginnen und eine Generalprobe mit Bitte Benimm Dich stattfinden. Das technische Setup war prinzipiell dem der beiden Proben sehr ähnlich, mit folgenden Unterschieden:

Im Gegensatz zu den Proben standen bei der Generalprobe und beim Konzert Funkstrecken für das In-Ear-Monitoring der Musiker zur Verfügung. Die Sender wurden direkt an die XLR-Outputs der KLANG:fabrik angeschlossen, anstatt zurück ins Pult geleitet zu werden. Davon unberührt blieb der Crowd-Mix, der weiterhin in das Pult und von dort weitergeleitet wurde.

Beim Einrichten des Ersatz-Senders für die Crowd-Kopfhörer, ein batteriebetriebener Taschensender, wurde zum großen Erstaunen aller Beteiligten ein wesentlich offeneres und transparenteres Klangbild im Vergleich zum stationären Sender festgestellt. Die bemängelten fehlenden Höhen des stationären Senders waren plötzlich da und der Bassbereich war nicht mehr überbetont. Nachdem alle möglichen Fehlerquellen überprüft wurden und ein Vergleich mit der selben Verkabelung der Geräte angestellt wurde, wurde entschieden, den Taschensender als Haupt-Sender einzusetzen. Die Frage, warum die beiden Sender sich klanglich derartig unterscheiden, bleibt auch nach Rückfrage beim Verleiher unklar. Es könnte sich um eine höherwertige Eingangsstufe handeln, die im Taschensender verbaut ist. Theoretisch ist jedoch jeder handelsübliche professionelle Funksender im kompatiblen Frequenzbereich in der Lage, das Signal an die Kopfhörer zu senden und so ein hochwertiges Klangerlebnis zu ermöglichen.

Im Umkreis von ca. einem Meter um den Sender ist mit Interferenzen zu rechnen. Deshalb wurde beschlossen, die beiden Sender mit einem möglichst großen Abstand zueinander zu positionieren. Der Main-Sender wurde am FOH-Platz in

Betrieb genommen, vor allem um die Batterien des Taschensenders im Ernstfall möglichst schnell austauschen zu können. Der Spare-Sender wurde an die Stagebox angeschlossen und stand daher auf der Bühne.

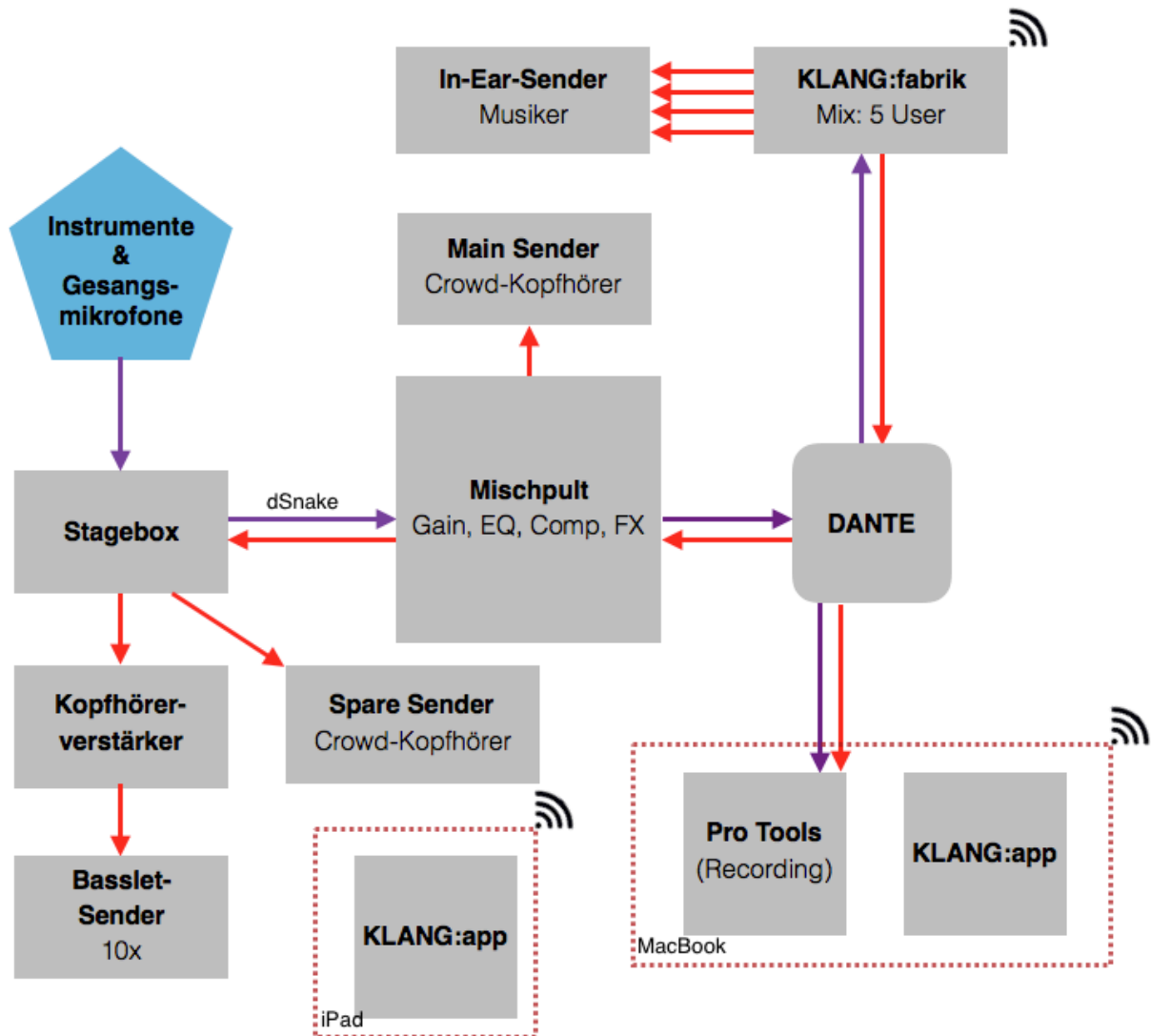


Abb. 35: Verbindungsschaubild des Konzertaufbaus

10.2. Timetable & Ablauf

Da es möglich war, die Venue zwei Tage lang zu nutzen, konnte die Hauptarbeit bereits am Donnerstag, also dem Tag vor dem eigentlichen Konzert erfolgen. Dies beinhaltete beispielsweise das Einrichten des FOH-Platzes, der Bühne, der Beleuchtung und der Projektion. Außerdem konnte eine Generalprobe mit Bitte Benimm Dich stattfinden. Trotz dieser ausgiebigen Vorbereitungen sollte der Zeitplan für den Tag des Konzertes eher großzügig ausfallen, um den Besonderheiten des Konzepts Rechnung zu tragen.

Die Zeitplanung für Freitag, den Tag des Konzerts sah wie folgt aus:

13:00 Get-In Crew
16:00 Get-In Matija
17:00 Soundcheck Matija
18:00 Soundcheck Bitte Benimm Dich
18:30 Dinner
19:00 Doors
20:00 - 20:45 Showtime Bitte Benimm Dich
20:45 - 21:00 Changeover
21:00 - 22:30 Showtime Matija

Leider verzögerte sich die Ankunft von Matija um über eine Stunde aufgrund von Staus. Dadurch konnten die Türen zum Konzertraum erst um ca. 19:45 Uhr geöffnet werden. Die Showzeiten verzögerten sich aber nur geringfügig.

10.3. Technische Gegebenheiten

Die Show an sich verlief ohne größere technische Schwierigkeiten. Leider wies die Klinkenbuchse des Fender Rhodes frühzeitig während des Konzerts einen Defekt auf, sodass auf dessen Benutzung verzichtet werden musste.

Als nicht ganz zufriedenstellend erwies sich das E-Drumset Roland TD-50. Während das Spielgefühl für ein E-Drumset sehr gut war, waren die internen Samples nicht mit denen der (für den Teaser genutzten) Software Native Instruments Studio Drummer zu vergleichen. Außerdem erfolgte die Audioausgabe über acht Klinkenausgänge ohne jegliches und für ein akustisch abgenommenes Schlagzeug typisches Übersprechen der Mikrofone, sodass nicht der Klangeindruck eines akustischen Schlagzeugs entstand. Ein artifizielles „Übersprechen“ der Spuren wäre womöglich einstellbar gewesen, doch in der Kürze der Zeit war dies nicht möglich. Schlagzeuger Sami entschied sich daher dafür, ein bewusst nach E-Drums bzw. Drummachine klingendes Set zu wählen.

Um die Klinkenausgänge des E-Drummoduls mit den XLR-Eingängen der Stagebox zu verbinden waren pro Spur eine, also insgesamt sieben (der Kanal für das Ride-Becken wurde nicht genutzt) DI-Boxen notwendig. Zusammen mit den anderen Instrumenten wurden im Gesamten 14 DI-Boxen gebraucht. Glücklicherweise waren mit Hilfe des Repertoires des ClubCANN und der Beteiligten genügend DI-Boxen einsatzfähig.

10.4. GLD-80 als MIDI-Controller der KLANG:app

Das Pult wurde vorrangig zur Vorverstärkung, klanglichen Bearbeitung (EQ, Kompressor) und dem Hinzufügen von Effekten genutzt. Die eigentliche Mischung entstand in der KLANG:fabrik, die über OSC (Open Sound Control)-Mitteilungen gesteuert wird, welche die KLANG:app oder eine andere Quelle bereitstellt. Da das Abmischen eines Live-Konzerts am Laptop bzw. iPad mühselig ist, sollten MIDI-Fader des Digitalpults zur Steuerung der KLANG:app benutzt werden. Dazu

notwendig ist eine Software, welche die vom Pult bereitgestellten MIDI- in OSC-Mitteilungen umwandelt. Das dafür verwendete Programm heißt OSCulator.

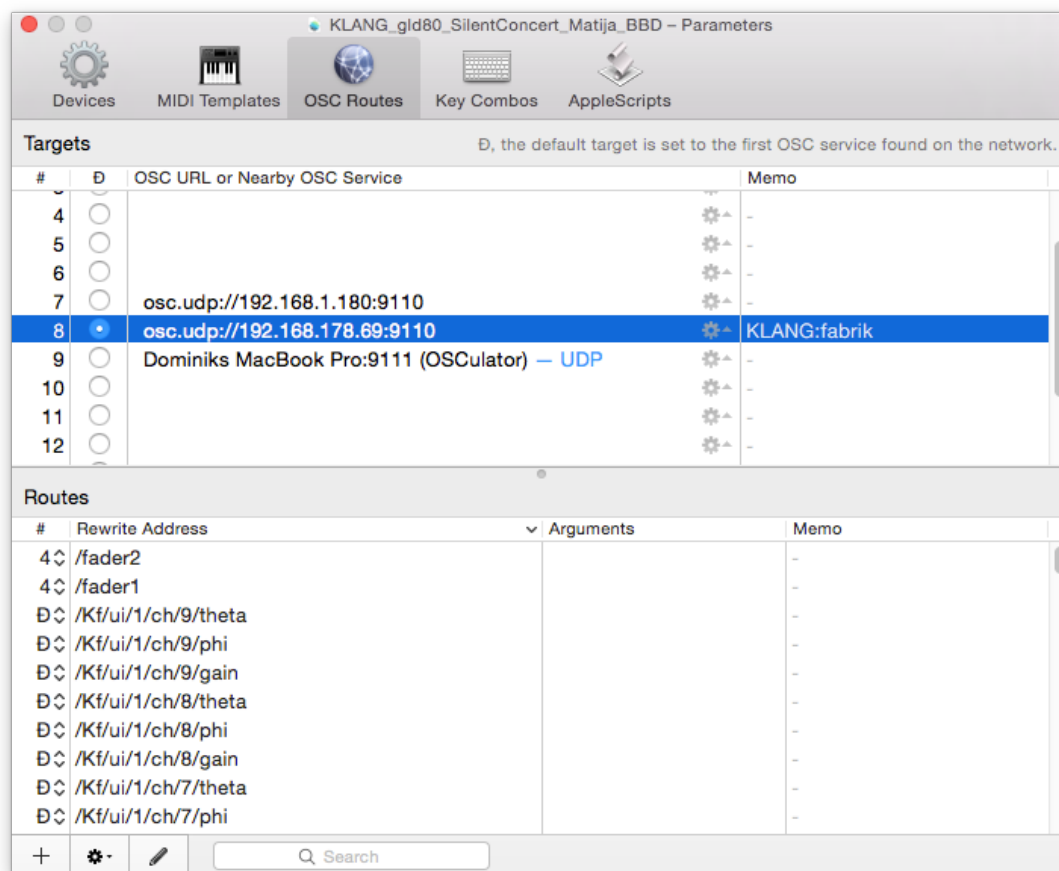


Abb. 36: OSC-Routes-Tab in OSCulator

Die Ausgabe der MIDI CC (Continuous Control)-Nachrichten erfolgen durch TCP/IP mittels Netzwerk-Port des GLD-80-Pults. (Im vorliegenden Fall ist dieser Port mit dem „Control Network“-Port der Dante-Card verbunden. Durch Einstellung im Dante Controller werden die Control-Daten auch über das Dante-Netzwerk übermittelt.) Damit die ankommenden Signale vom Rechner erkannt werden, ist die Installation und der Betrieb der Treibersoftware „Allen&Heath TCP MIDI Driver“ notwendig, in das die korrekte IP-Adresse des GLD einzutragen ist. Im OSCulator-Menü „Devices“ ist „AH TCP MIDI“ als MIDI Input Port auszuwählen. Unter „OSC Routes“ wählt man das Zieleingabegerät. Um die KLANG:fabrik auszuwählen, muss deren OSC URL (in der Form `osc.udp://«IP ADRESSE»:«PORT»`) eingegeben werden. Der vom Hersteller festgelegte Input Port der KLANG:fabrik ist 9110.

Am GLD erstellte MIDI-Strips sind nummeriert und können verschiedenste Parameter als MIDI-Nachricht ausgeben, beispielsweise Stand des Faders, der Gain- und Panorama-Drehregler oder der Mute- und PAFL-Tasten. So ist nicht nur das Fernsteuern der Pegelsteller der KLANG:app, sondern unter anderem auch die Position auf den drei Achsen durch Drehregler oder das Stummschalten mittels Mute-Taste möglich. Da die Panorama-Einstellung via iPad als am intuitivsten empfunden wurde, sollte sich die Aufgabe der MIDI Strips auf das Einstellen des Pegels beschränken.

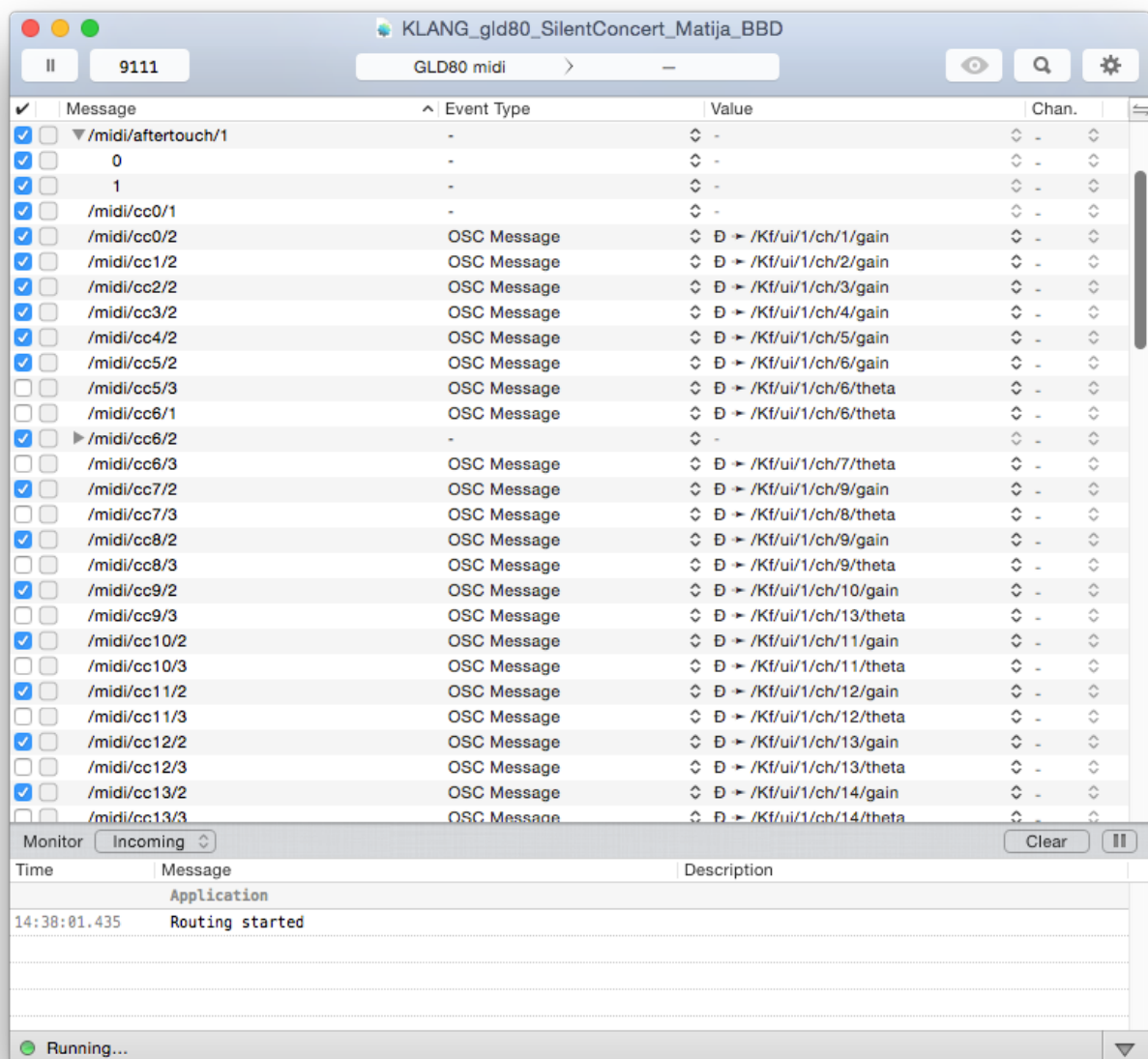


Abb. 37: Mapping-Ansicht in OSCulator

Die Faderstellungen sind im OSCulator als Message *midi/ccX/2* zu empfangen, wobei X einer MIDI-Stripnummer entspricht. Hier ist Vorsicht geboten, denn der MIDI-Strip „MIDI 1“ sendet Nachrichten als */cc0/*, „MIDI 2“ als */cc1/* usw. Als „Event Type“ ist „OSC Message“ auszuwählen. In der Zeile „Value“ kann man nun den gewünschte Zielparameter eintragen.

Um den Pegel eines Kanals zu bestimmen ist „D“ („Standard Destination“) auszuwählen und als Adresse */Kf/ui/«USER NUMBER»/ch/«CHANNEL NUMBER»/gain* einzutragen, wobei Kanal 1 in der KLANG:fabrik auch die Channel Number 1 trägt. Ist ein Häkchen an erster Stelle der Zeile gesetzt, um das Event zu aktivieren, kann nun mit dem MIDI Strip-Fader der Kanalpegel in der KLANG:fabrik gesteuert werden.

Auch bei der Auswahl der Zielkanäle besteht eine Fehlerquelle. Im GLD-80 gibt es keine Stereo-Kanäle für Signale, die von der Stagebox kommen. Um ein Stereopaar zu erstellen, können zwei Fader als „Gang“ gesetzt werden, sodass gewünschte Parameter zweier oder mehrerer Kanäle parallel einstellbar sind. In der KLANG:app ist hingegen bei der Verlinkung („LINK“) zweier Kanäle nur ein Fader sichtbar.

In diesem Beispiel werden die beiden Overhead-Kanäle (kurz OH) mit den Inputs 7 und 8 „gelinkt“. In der Fader-Ansicht ist nur ein Fader, jedoch zwei Leucht-Meterstrips sichtbar. Wird nun durch Zuweisung in OSCulator nur der Wert für Kanal 7 verändert, bleibt der Wert für Kanal 8 unsichtbarerweise unverändert.

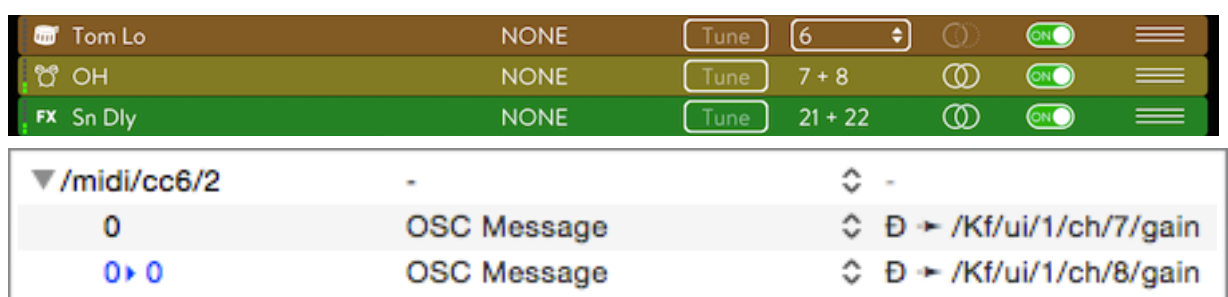


Abb. 38.1: Stereospur 7&8 (OH) in der Channel-Ansicht der KLANG:app (oben) und in OSCulator (unten)

Daher ist die gewünschte Message in OSCulator zu duplizieren und auch der zweite Kanal als Destination anzugeben.

Nachdem alles eingerichtet war, wurde festgestellt, dass das Mischen über die MIDI-Fader sich anders „anfühlt“, als gewohnt. Der Grund ist die abweichende Skalierung des KLANG:app-Pegelstellers im Vergleich zur üblichen Skalierung eines Mischpults. Der Fader in der KLANG:app verhält sich nicht spiegelbildlich zum realen Fader, sodass die auf dem Pult abgedruckte und für Toningenieure gewohnt Skalierung nicht mehr zutrifft. Die 0-dB-Stellung der KLANG:fabrik entspricht dem oberen Ende des realen Faders, also der eigentlichen +10-dB-Stellung. Die 0-dB-Stellung des Mischpults entspricht hingegen einem Wert von ca. -2 dB in der KLANG:app. Die Mitte des realen 100mm-Faders, beim GLD bei -10 dB, entspricht in der KLANG:app gerade mal dem Wert -6 dB. Während man mit dem Fader in der oberen Hälfte einen „gefühlten“ Dynamikbereich von 20 dB abdeckt, regelt man in Wahrheit nur einen Bereich von 6 dB. Geht man von einem hörbaren Dynamikbereich von 60 dB aus, werden in der oberen Faderhälfte (also einer Strecke von 50 mm) gerade mal 10% abgedeckt und sogar fast 80% im unteren Viertel. Die extrem feine Auflösung im oberen Bereich des Faders erweist sich als praktisch für das Mischen in der KLANG:app am Rechner oder iPad, für die Fernsteuerung mittels realer MIDI-Fader als eher unpraktisch.

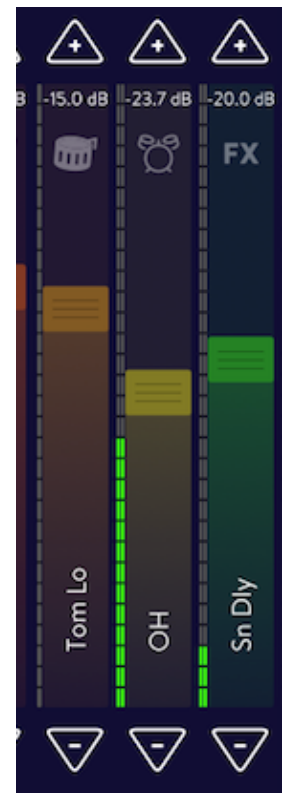


Abb. 38.2:
Stereospur in
der Mixer-
Ansicht der
KLANG:app

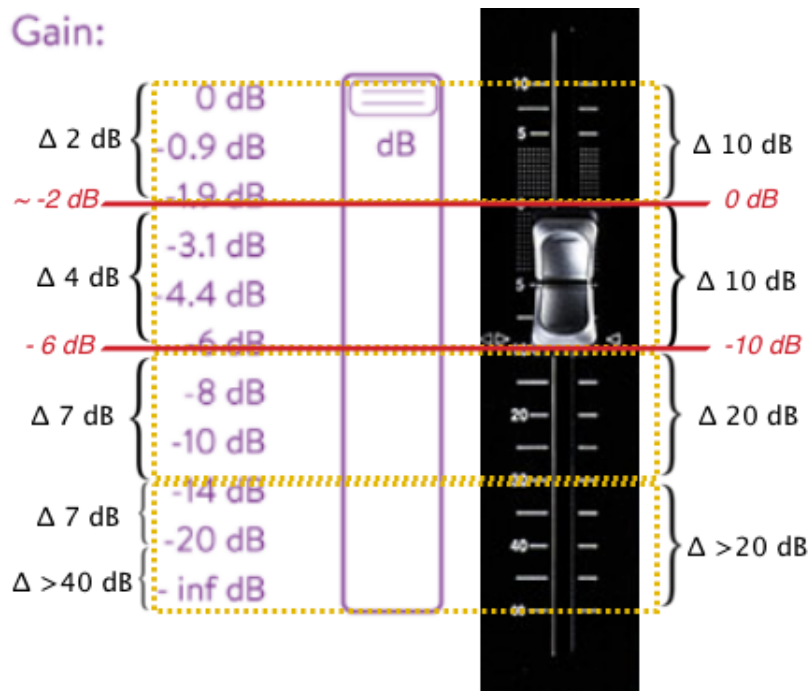


Abb. 39: Vergleich der Skalierung der Fader in der KLANG:app (links) und am GLD (rechts)

In der KLANG:fabrik wurden fünf User eingerichtet; einer für das Publikum (genannt Crowd) und vier User für die Musiker, wobei sich die Musiker der zwei Bands den User und die damit verbundene Funkstrecke teilen:

User 1	User 2	User 3	User 4	User 5
Crowd	Matt / Bene	Jan / Tilo	Johann / Gerry	Sami

Durch das Erstellen von „Snapshots“ in der KLANG:app, lassen sich Pegel und Positionen der Einzelspuren speichern und wieder aufrufen, sodass innerhalb eines Users verschiedene Mischungen getrennt voneinander bearbeitet werden können. Ursprünglich war angedacht, Panorama-Positionen für einzelne Songs mittels der in der Probe aufgezeichneten Aufnahmen für den Crowd-Mix zu erstellen und entsprechend live aufzurufen. Es stellte sich heraus, dass ein flexibles Anpassen und Verändern der Positionen während der Live-Situation vorzuziehen ist, da ein schnelles Reagieren ohnehin erforderlich ist und die Übergänge der Songs oft nicht klar waren. Wenn der FOH-Mischer mit dem Songablauf der Band besser vertraut ist, ist die Snapshot-Methode jedoch ohne weiteres anwendbar und gegebenenfalls auch auf Pegelstände erweiterbar.

10.5. Alternatives Setup

Ein alternatives Setup bestünde aus der Einrichtung eines Surround- oder 3D-Outputs am Pult. Es soll nun am Beispiel eines 5.0-Setups erläutert werden.

Anstatt alle Kanäle via Direct Out an die KLANG:fabrik weiterzuleiten und dann innerhalb der KLANG:app zu mischen, besteht auch die Möglichkeit, eine im Pult erstellte Surroundmischung an die KLANG:fabrik weiterzureichen. Dafür müssen in der KLANG:app die entsprechende Spuren eingerichtet werden, in diesem Fall Left, Right, Center, Surround Left, Surround Right. Wichtig ist eine Anordnung der Inputs in Korrelation zur Anordnung der Surroundkanäle des Pults. So entstehen in der KLANG:fabrik „virtuelle Lautsprecher“, welche die im Pult erstellte Surroundmischung weitergeben. Da nur die wenigsten Digitalpulte über die Möglichkeit zur Mischung in 3D verfügen, muss man sich im Regelfall bei dieser Methode mit einem Surroundmix, sprich ohne Höhenkanäle begnügen. Als Erweiterung zum gewöhnlichen Stereo ist dies jedoch oft ausreichend. Natürlich besteht weiterhin die Möglichkeit, sich spezielle Effektkanäle einzurichten, die dann mittels KLANG:app frei bewegbar sind. Der Vorteil dieser Methode ist die Nutzbarkeit der gewohnten Strukturen des Pultes, allen voran der Fader. Inwiefern das so erzeugte Surround-Klangbild von der ursprünglichen Binauralisierung innerhalb der KLANG:fabrik, insbesondere bei Panoramafahrten, abweicht, ist zu untersuchen.

10.6. Monitoring

Musiker auf der Bühne benötigen zum gemeinsamen Zusammenspiel in der Regel eine spezielle Abhörmischung, den Monitormix. Häufig wird diese Mischung über „Wedges“, also ein bis zwei spezielle Monitorlautsprecher pro Musiker wiedergegeben. Von Vorteil ist hierbei, dass diese nur eine unterstützende Funktion zum vorhandenen Klang der Instrumente einnehmen und so eine Lokalisation von beispielsweise Schlagzeug oder Gitarrenverstärker weitgehend unverändert bleibt. Nachteilig ist die Unflexibilität der Musiker, da der Abhörbereich eher klein ist und eine Erhöhung des ohnehin schon vorherrschenden Schallpegels, sodass eine Beschädigung des Gehörs wahrscheinlicher wird. Ebenso wird die Gefahr von Rückkopplungen durch die Wiedergabe von Mikrofonsignalen von der und auf die Bühne erhöht. Die andere Methode ist das Monitoring mittels Kopfhörer. Da die äußerliche Erscheinung der Musiker nicht durch große, ohrumschließende Kopfhörer geprägt sein und die Mobilität nicht eingeschränkt werden soll, ist das Mittel der Wahl meist In-Ear-Monitoring (IEM). Die Signale dafür werden per Funk an einen Taschenempfänger gesendet, den der Musiker bei sich trägt. Zur Wiedergabe werden (im Optimalfall individuell angepasste) Ohrhörer verwendet. Dies bringt zahlreiche Vorteile mit sich: Durch die hohe Isolation angepasster Ohrhörer kann der in den Gehörgang eindringende Schalldruckpegel enorm reduziert werden, was eine Beschädigung des Gehörs weniger wahrscheinlich macht und eine bessere Wahrnehmung der Monitormischung erlaubt, ohne den Pegel zu hoch fahren zu müssen. Außerdem ist der Musiker damit vollständig mobil und kann überall auf der Bühne unverändert seine Monitormischung wahrnehmen. Die Gefahr von Rückkopplungen durch Monitoring ist ausgeschlossen. Der Transport eines In-Ear-Sets ist dazu wesentlich leichter als von Monitorlautsprechern. Nachteilig ist, dass durch die hohe Isolation eine Kommunikation zwischen den Musikern erschwert wird und durch fixe Panoramaverteilung bei Bewegung verwirrend sein kann. Außerdem ist IEM im Vergleich zum Monitoring mittels Wedges mit einem erheblich höherem finanziellen Aufwand verbunden.

Da beim Silent Concert nicht nur auf PA-Beschallung verzichtet, sondern auch die Bühne nach dem „Silent Stage“-Prinzip aufgebaut werden sollte, war die Verwendung von Monitorlautsprechern ausgeschlossen. Um die Mobilität der Musiker nicht einzuschränken, sollte auch keine kabelgebundene Kopfhörerlösung Verwendung finden, sondern Funk-Taschenempfänger zum Einsatz kommen. Da alle Gäste Kopfhörer tragen werden würden und für Monitoring ohrmschließende, geschlossene Kopfhörer vorteilhafter sind als Ohrhörer¹⁷⁴, sollte dies die Monitorlösung für die Musiker sein.

Dafür standen vier digitale Stereo-Funkstrecken des Typs MI-909 von Mipro zur Verfügung. Für Tilo, der in Ableton eine Live-Mischung verschiedener vorproduzierter Spuren erstellt, war es jedoch essentiell einen Publikums-Funkkopfhörer in Reichweite zu haben, um seine Mischung und Klangeinstellung auf diesen zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Wie bei der Probe festgestellt, kommt der binaurale Mix der KLANG:fabrik nur auf einigermaßen hochwertigen Kopfhörern voll zur Geltung. Entgegen der Empfehlung, hatten Matija jedoch nur unzureichende Ohrhörer dabei. Beim Soundcheck entschlossen sie sich daher dafür, stattdessen die Funk-Kopfhörer des Publikums zu benutzen und damit einhergehend den Crowd-Mix abzuhören. Im Anschluss hat die Band mehrfach das hervorragende Monitoring betont. Es ist interessant festzustellen, dass bei der Probe sehr lange an den individuellen Mischungen gearbeitet wurde und kleinste Feinheiten einen großen Unterschied zu machen scheinten. (So wie das erfahrungsgemäß sehr häufig bei In-Ear-Monitoring verschiedenster Musiker der Fall ist.) Doch ein ausgewogener, von einem Mischer ständig überwachter Mix für alle Musiker war vollkommen suffizient und wurde gelobt.

Bitte Benimm Dich nutzten Smartphones und Tablets um ihre individuellen Mischungen mit der KLANG:app anzupassen.

¹⁷⁴ Vgl. Dickreiter, S. 214

10.7. Live-Mischung von Bitte Benimm Dich

Da mit Matija zuerst eine Band feststand, die über ein für das Projekt relativ großes Setup verfügten, sollte die zweite Band ein wenig einfacher instrumentiert sein. Die von Bitte Benimm Dich bereitgestellten Spuren beinhalteten:

- Ableton Tilo (stereo)
- E-Gitarre (Kemper Amp, mono)
- Piano (mono)
- Synthesizer (mono)
- Gesang Bene
- Talkbox
- Atmo-Mikrofone (stereo)

Grundsätzlich hätte die Möglichkeit bestanden, von Tilo statt einer Stereosumme bis zu acht Einzelspuren zu bekommen und diese binaural zu mischen. Da dies mit einem erheblichen Probenmehraufwand verbunden gewesen wäre, wurde jedoch darauf verzichtet.

Die Basis des Bandsounds ist eben jene Ableton-Summe. Synthesizer und Talkbox spielen gelegentliche „Hook“-Melodien darüber, die ebenfalls wichtig sind. Piano und E-Gitarre haben eher begleitenden und klangformenden Charakter. Auf Wunsch der Band wurde der Gesang weniger laut als üblich gemischt und sehr stark komprimiert, da sich teilweise geflüsterte Passagen mit geschrienenen abwechseln.

Das Panorama wurde wie folgt gestaltet: Die Ableton-Summe wurde wie eine übliche Stereospur hart links/rechts gepannt. (In der KLANG:app direkt an die Ohren des Kopfes gesetzt.) Die Gitarre wurde wie bei Sicht auf die Bühne nach vorne rechts platziert, das Piano zum Ausgleich nach vorne links. Der Gesang wurde tendenziell mittig, doch leicht nach links versetzt positioniert, um den Binaural-Effekt zu betonen und nicht mit einer Im-Kopf-Lokalisation zu verwechseln, was bei einer zentral-vorderen Platzierung auftreten kann. Während die bisher genannten Spuren fix

platziert waren und nur geringfügig geändert wurden, hatte die nur gelegentlich gespielte Talkbox keinen festen Platz, sondern wurde frei bewegt und um den Kopf rotiert, um die Aufmerksamkeit darauf zu lenken und die Möglichkeiten der KLANG:fabrik zu demonstrieren. Auch in der Höherebene wurde einzig die Talkbox verändert, während alle anderen Spuren bei Bitte Benimm Dich auf der Medianebene verweilen.

Effekte

Ein mittlerer Stereohall wurde für Stimme, Gitarre und Talkbox eingesetzt, um sie im Stereobild zu verbreitern und die Stimme nicht zu trocken klingen zu lassen. Als weiterer Effekt wurde auf der Stimme der sogenannte „ADT“-Effekt genutzt. ADT (Artificial Double Tracking oder auch Automatic Double Tracking), ist ein Effekt der von EMI-Technikern in den Abbey Road-Studios erfunden wurde und exzessiv auf Aufnahmen der Beatles Verwendung fand. Es simuliert Double-Tracking, also das doppelte Aufnehmen von beispielsweise Gesangsspuren, um diese kräftiger und voller klingen zu lassen. Ursprünglich wurde der Effekt erzielt, indem ein aufgenommenes Signal an zwei verschiedenen Stellen einer Bandmaschine abgenommen (Aufnahme- und Wiedergabekopf), durch eine zweite Bandmaschine verzögert und dann mit dem Originalsignal zusammen gemischt wird. Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass die Verzögerung des zweiten Signals mittels Varispeed (Steuerung der Geschwindigkeit der Bandmaschine per Oszillator) variiert werden konnte und sogar vor dem Originalsignal am Mischpult ankommen konnte. So entsteht ein stärkerer Eindruck einer tatsächlichen Dopplung, als bei einer statischen Verzögerung des Signals. Im GLD-80 ist eine Simulation dieses Effekts in der Effektsektion vertreten.

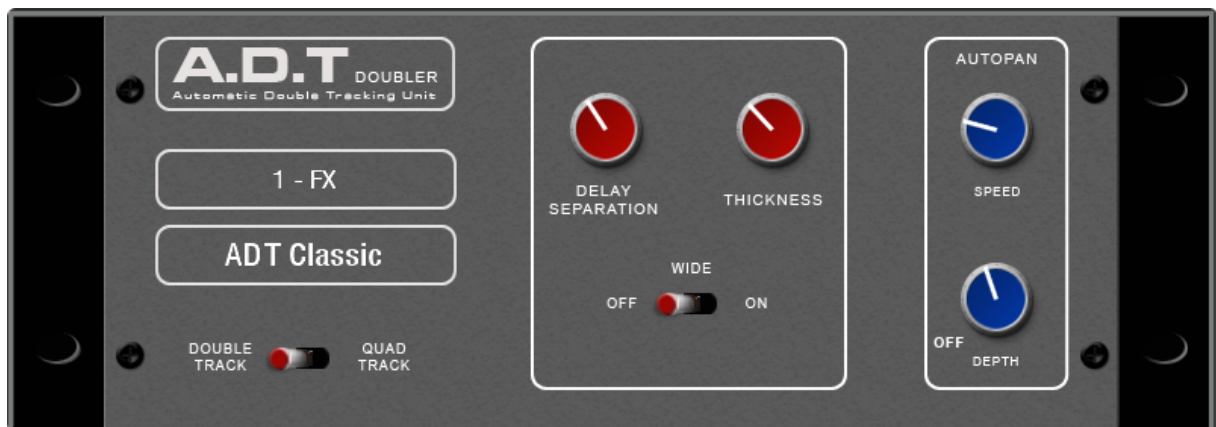


Abb. 40: ADT in der Effektsektion des GLD-80

10.8. Live-Mischung von Matija

Die Spuren von Matija beinhalteten:

- Kick
- Snare
- HiHat
- Toms (Stereo)
- Crash (Stereo)
- Bass DI
- Bass Synth
- Gitarre Jan (Kemper Profiler)
- Gitarre Matt (Kemper Profiler)
- Synthesizer Jan
- Synthesizer Johann
- Gesang Matt
- Gesang Johann

Auch hier war das Ziel eine annähernd natürliche Hörsituation zu schaffen, die durch Ausnutzung des dreidimensionalen Feldes interessanter gestaltet wird. Es zeigte

sich, dass ein extremes seitliches Panning zu einem unnatürlichen Höreindruck führt, weshalb ein Großteil der Spuren im Bereich $-45^{\circ}/+45^{\circ}$ vor und $135^{\circ}/225^{\circ}$ hinter dem Hörer positioniert wurden. Die „Crash“-Spuren wurden so vor dem Hörer platziert, dass ein gewohntes Hörerlebnis entsteht und das HiHat-Signal entsprechend eingebettet. Kick und Snare, traditionell bei Popmusik in der Mitte, wurden leicht mittig versetzt, die Snare dabei vor dem Hörer und die Kickdrum hinter ihm. So sollte ein umhüllendes Gefühl geschaffen werden. Die Bassdrum wurde außerdem tiefer in Richtung Boden platziert. Die Stereo-Toms-Spur wurde hart links und rechts gepannt, da diese meist als Fills eingesetzt werden.

Da Jan sich bei Sicht auf die Bühne auf der rechten Seite befand, wurde sein Kemper-Profil, über den er Gitarre und Fender Rhodes spielte, nach vorne rechts gepannt. Sein Synthesizer dazu kontrastierend nach rechts hinten.

Um den Raum auszufüllen, wurde Matts Gitarre nach vorne links gepannt. Bassgitarre und Synth-Bass wurden hinten mittig und etwas tiefer positioniert, da so Bassfrequenzen betont werden und kein unausgeglichenes Hörerlebnis einstellt, wie sich zeigte. Johannis Synthesizer wurde nach links hinten gepannt.

Gemäß der Bühnenpositionierung wurde Matts Gesang mittig vorne, Johannis leicht links vorne gepannt.

Als Effektspuren kamen ein Stereohall, ein mittleres Stereodelay und ein langer Stereohall mit sehr langem Pre-Delay zum Einsatz, welche vom integrierten Effektprozessor des Digitalpultes bereitgestellt wurden. Der Stereohall wurde zum Andicken der sonst trockenen Stimmen benutzt und nur wenig für die Gitarren, da diese bereits durch Effektpedale der Gitarristen mit Hall versehen waren. Das relativ kurze Delay wurde als gelegentlicher Effekt für Stimmen und Gitarren benutzt, gerade bei ruhigeren Parts und Soli. Der lange Hall mit ca. 45ms Pre-Delay wurde speziell für die Snare eingerichtet. Durch die Positionierung der Snare vorne mittig (leicht unterhalb der Medianlinie) und der gegenüberliegenden Platzierung des Halls weiter oben, wurde der Eindruck erweckt, dass der Hall nach oben wandert. Die Zumischung der Effekte geschah songabhängig.

In **Hörbeispiel 4** ist der selbe Ausschnitt aus den **Hörbeispielen 1-3** als Summenmitschnitt des Konzerts zu hören.

11. Fazit und Ausblick

Das Silent Concert war für alle Beteiligten eine einzigartige Erfahrung. Aber ist der technische und organisatorische Aufwand auch für kommerzielle Produktionen vertretbar? Die Durchführung des Konzerts unterscheidet sich kaum von der eines gewöhnlichen Konzerts, doch bis dahin ist eine Menge an Vorbereitung vonnöten. Insbesondere die Zusammenstellung der technischen Komponenten und die Einarbeitungszeit ist mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Die Qualität des Projekts wächst mit steigender Erfahrung und im besten Fall mehreren Proben mit der Band, um eine interessante und ausgewogene Mischung erstellen zu können. Wenn das Setup steht und alle Beteiligten sich mit dem neuen Umfeld vertraut gemacht haben, ist die wiederholte Durchführung problemlos und relativ einfach möglich. Infolgedessen lässt sich zusammenfassen, dass der finanzielle und technische Mehraufwand sich lohnen kann, wenn mehrere Veranstaltungen, zum Beispiel im Rahmen einer Tour, geplant sind. Für Einzelveranstaltungen sollte man besser auf in diesem Bereich erfahrenes Personal zurückgreifen, da es eine Vielzahl von Fehlerquellen gibt, die es zu kennen gilt.

Abschließend lässt sich sagen, dass ein Silent Concert eine herausragende Abwechslung zu gewöhnlichen Konzerten darstellt, aber diese wahrscheinlich niemals ersetzt wird. Nicht alle Musikstile eignen sich für den Kopfhörersound, binaurale HRTFSs funktionieren nicht für jeden Menschen gleich gut und manchmal möchte man keine Kopfhörer tragen, sondern einfach laute Musik hören. Doch gerade bei ruhigerer Musik mit elektronischen Elementen bietet sich ein 3D-Kopfhörer-Konzert an. Mit der bisher nicht für ein größeres Publikum realisierbaren potenziellen Möglichkeit des Head-Tracking lässt sich das Konzept auch noch um eine weitere Stufe erweitern und kann damit sogar an weiterer Besonderheit gewinnen.

Vielleicht wird eines Tages ein "ganz normaler Clubbesuch" nicht mit schmerzenden Ohren, sondern mit leuchtenden Kopfhörern verbunden sein.

Quellenangaben

Verzeichnis verwendeter Literatur

Altrichter, Tim: *Ethernet-basierte lokale Audionetzwerke im Vergleich hinsichtlich ihrer Technologie und Anwendungsmöglichkeiten*. Bachelorarbeit HFF Konrad Wolf 2014

Bruhn, Manfred: *Kommunikationspolitik*, München: Verlag Vahlen 2014 - 3. Auflage

Dickreiter, Michael/ Dittel, Volker/ Hoeg, Wolfgang/ Wöhr, Martin: *Handbuch der Tonstudiotechnik*, Berlin/Bosten: Walter de Gruyter GmbH 2014 - Bände 1 & 2

Eisner, Uli: *Mixing Workshop 2.0*. Bergkirchen: PPVMEDIEN GmbH 2013

Eska, Georg: *Schall und Klang : wie und was wir hören*, Basel ; Bosten ; Berlin : Springer Basel AG 1997

Friesecke, Andreas: *Die Audio-Enzyklopädie - Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*, Berlin/Bosten: Walter de Gruyter GmbH 2014

Guski, Rainer: *Wahrnehmen - ein Lehrbuch*, Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH 1996

Hagen, Mechthild: *Förderung des Hörens und Zuhörens in der Schule*, Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 2006

Hagendorf, Herbert/ Krummenacher, Joseph/ Müller, Hermann-Josef/ Schubert, Torsten: *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH 2011

Hellbrück, Jürgen/ Kellermeier, Wolfgang: *Hören*, Göttingen: Hogrefe-Verlag 2004

Heyden, Marcus: *Untersuchung von Qualitätsparametern ethernetbasierter Audionetzwerke*, Hamburg: Diplomica Verlag GmbH 2011

Heyden, Marcus: *Untersuchung von Qualitätsparametern ethernetbasierter Audionetzwerke*, Hamburg: Diplomica Verlag GmbH 2012

Larisch, Dirk: *Netzwerktechnik*, Landsberg: Verlag moderne Industrie Buch AG & Co. KG 2005

Müsseler, Jochen/ Rieger, Martina: *Allgemeine Psychologie*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2017

Owsinski, Bobby: *The Mixing Engineer's Handbook - 2nd edition*. Boston: Thomson Course Technology PTR 2006

Owsinski, Bobby: *Mischen wie die Profis - Das Handbuch für Toningenieure*. München: GC Carstensen Verlag 2007

Schönhammer, Rainer: *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie - Sinne, Körper, Bewegung*, Wien: Facultas Verlag- und Buchhandels AG 2009

Steckmann, Andreas, Dipl.-Ing.: *Eintauchen in virtuelle Räume*, Hamburg: Diplomics Verlag GmbH 2018

Weinzierl, Stefan: *Handbuch der Audiotechnik*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008

Wendt, Mike: *Allgemeine Psychologie - Wahrnehmung*, Göttingen: Hogrefe Verlag GmbH & Co. KG (2014

Werner, S.; Klein F.; Harczos, T.: *Context-dependent quality parameters and perception of auditory illusion*, To be published in: Proc. of 4th International Symposium on Auditory and Audiological Research (ISAAR), Denmark.

Zuhören e.V. (Hrsg): *Ganz Ohr: interdisziplinäre Aspekte des Zuhörens*, Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 2002

Internetquellen

Audinate (o.D.): *Dante Controller*. Online unter: <https://www.audinate.com/products/software/dante-controller> [Stand 10.06.2018]

Auro Technologies (o.D.): *Listening Formats*. Online unter: <http://www.auro-3d.com/system/listening-formats/> [Stand: 19.06.2018]

Bangert, Christiane (o.D.): *Netzwerke: Digitale Übertragung von Audiosignalen*.rtikel aus dem Archiv. Online unter: <https://www.production-partner.de/basics/netzwerke-digitale-uebertragung-von-audiosignalen/> [Stand 10.06.2018]

Bangert, Christiane (o.D.): *Opern-Akustik: 3D-Sound in der Oper Zürich*. Online Artikel aus dem Archiv. Online unter: <https://www.professional-system.de/case-studies/opern-akustik-3d-sound-in-der-oper-zuerich/>, [Stand 01.07.2018]

Chun, Kimberley (1999): *FLAMING LIPS PRESENT THE MUSIC AGAINST BRAIN DEGENERATION REVUE*. Online unter: <https://www.mixonline.com/recording/flaming-lips-present-music-against-brain-degeneration-revue-373902>

Conrad Mollenhauer GmbH (o.D.): *ELODY Gebrauchsanweisung*. Online unter: <https://www.mollenhauer.com/images/Elody-Instructions-for-use.pdf> [Stand: 03.07.2018]

Deutsches Patent- und Markenamt (2008): *Offenlegungsschrift DE 10 2006 035 188 A1*. Online unter: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102006035188A1> [Stand: 03.07.2018]

Deutsches Patent- und Markenamt (2017): *Patentschrift DE 10 2015 110 938 B4*. Online unter: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015110938B4> [Stand: 03.07.2018]

Dolby Laboratories (2014): *Dolby Atmos Next-Generation Audio For Cinema*. Online unter: <https://www.dolby.com/us/en/professional/cinema/products/dolby-atmos-next-generation-audio-for-cinema-white-paper.pdf> [Stand: 03.07.2018]

Fels, Janina (2016): *Binauraltechnik*. Online Beitrag RWTH Aachen University - Institut für Technische Akustik 2016. Online unter: <http://www.akustik.rwth-aachen.de/cms/Technische-Akustik/Forschung/Forschungsgebiete-Medizinische-Akustik/~dzgk/Binauraltechnik/>, [Stand 12.05.2018].

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS (o.D.): *Fraunhofer Cingo®*. Online unter: <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/amm/prod/audiocodec/audiocodecs/cingo.html> [Stand: 10.05.2018]

Georg Neumann GmbH (o.D.): *Der Kunstkopf - Theorie und Praxis*. Online unter: https://de-de.neumann.com/product_files/7472/download [Stand: 03.07.2018]

Grasser, Thomas/ Rothbucher, Martin/ Diepold/Klaus (2014): *Auswahlverfahren für HRTFs zur 3D Sound Synthese*. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Technische Universität München. Online unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1206688/850421.pdf> [Stand 17.05.2018]

Infotip Service GmbH (o.D.): *REFERENZMODELLE UND PROTOKOLLE - NETZWERKTECHNOLOGIE*. Kompendium. Online unter: <https://kompendium.infotip.de/netzwerktechnologie2-referenzmodelle-und-protokolle.html> [Stand: 13.06.2018]

Johnston, Ian (2009): *Silent disco craze spreads*. Online unter: <https://www.telegraph.co.uk/culture/music/music-news/6142360/Silent-disco-craze-spreads.html> [Stand: 3.07.2018]

KLANG:technologies GmbH (o.D.): *3D IN-EAR MIXING FÜR 5 MUSIKER*. Online unter: https://www.klang.com/de/products/klang_vier [Stand: 10.05.2018]

KLANG:technologies GmbH (o.D.): *3D IN-EAR MIXING FÜR 8 MUSIKER*. Online unter: https://www.klang.com/de/products/klang_fabrik [Stand: 10.05.2018]

KLANG:technologies (o.D.): *KLANG BRINGS NATURAL MONITOR SOUND TO SILENT STAGE*. Online unter: <https://klang.com/blog/silent-stage/>

KLANG:technologies GmbH (o.D.): *ÜBER KLANG:TECHNOLOGIES*. Online unter: <https://www.klang.com/de/about> [Stand: 09.05.2018]

Kronlachner, Matthias (2012): *Ambisonics Binaural Dekoder Implementation als Audio Plug-in mit Headtracking zur Schallfeldrotation*. Institut für Elektronische Musik und Akustik. Online unter: <http://www.matthiaskronlachner.com/wp-content/uploads/2013/01/2012-09-27-Kronlachner-homepage.pdf>, [Stand 01.07.2018]

Laumann, Klaus J. (o.D.): *Über Methoden zur Qualitätsbeurteilung von virtuellen Kopfhörern*. Lehrstuhl für Mensch-Maschine Kommunikation Technische Universität München. Online unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295008/document.pdf> [Stand 18.05.2018]

Latta, Alex (2017): *KLANG:fabrik 3D In-Ear-Monitoring für Bühne und Studio*. Sound & Recording Ausgabe 07/2017. Online unter: <https://www.soundandrecording.de/equipment/klangfabrik-3d-in-ear-monitoring-fuer-buehne-und-studio/> [Stand: 09.05.2018]

Schärer, Zora (2008): *Kompensation von Frequenzgängen im Kontext der Binauraltechnik*. Institut für Sprache und Kommunikation Fachgebiet Audiokommunikation Technische Universität Berlin Fakultät I. Online unter: https://www.ak.tu-berlin.de/fileadmin/a0135/Magisterarbeiten/Zora_Schaerer_MagB.pdf [Stand: 10.05.2018]

Scholz, Florian (o.D.): *TEST: NEW AUDIO TECHNOLOGY SPATIAL AUDIO DESIGNER, MULTIFORMATPANNER*. Online unter: <https://www.amazona.de/test-spatial-audio-designer/2/> [Stand: 10.05.2018]

Schröder, Jürgen (2018): *Freifeldentzerrung und Diffusfeldentzerrung bei Kopfhörern*. Online unter: <https://www.lowbeats.de/freifeldentzerrung-und-diffusfeldentzerrung-bei-kopfhoerern/> [Stand: 05.06.2018]

Sengpiel, Eberhard (1998): *Die beiden gegensätzlichen Stereo-Verfahren*. Online unter: <http://www.sengpielaudio.com/GegensaetzlicheStereo-Verfahren.pdf> [Stand: 03.07.2018]

Sennheiser electronic GmbH (o.D.): *Approaching Static Binaural Mixing With AMBEO Orbit*. Online unter: https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/9582/Approaching_Static_Binaural_Mixing.pdf [Stand: 03.07.2018]

Stern, Claire (2015): *How Silent Discos Are Reinventing Clubbing, One Pair of Headphones at a Time*. Online unter: <https://www.instyle.com/news/what-silent-discos-quiet-party>

Theile, Günther (1980): *Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld*. Online unter: http://hauptmikrofon.de/theile/1980-1_Diss._Theile_deutsch.pdf [Stand: 20.06.2018]

VC-Magazin (2016): *Klang:technologies erhält weitere Wachstumsfinanzierung*.
Online unter: <https://www.vc-magazin.de/deals/klangtechnologies-erhaelt-weitere-wachstumsfinanzierung/> [Stand: 07.07.2016]

Universität Graz (2016): Online unter: https://www.spsc.tugraz.at/sites/default/files/da1-v8_6_2016-01-25_S133-149.pdf

Wiggings, Bruce (2004): *University of Derby an Investigation into the Real-time Manipulation and Control of Three- Dimensional Sound Fields* [Stand 15.06.2018]

Wikipedia (o.D.): *Router*. Online unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Router>
[Stand 12.06.2018]

Wikipedia (o.D.): *Dante (Netzwerkprotokoll)*. Online unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Dante_\(Netzwerkprotokoll\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Dante_(Netzwerkprotokoll)) [Stand 10.06.2018]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Seite
Abb. 1: Kopfhörerkonzert-Plakat der "Flaming Lips" von 1999 Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Flaming_Lips_-_headphone_concert_poster.png	6
Abb. 2.1: Beispielhafte Impulsantwort eines digitalen Klangwandlers Abb. 2.2: Logarithmische Darstellung des der Impulsantwort entsprechenden Amplitudengangs Abb. 2.3: Amplitudengang nach digitaler Tiefpassfilterung Quelle: https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015110938B4	13
Abb. 3: Kopfbezogenes Koordinatensystem Quelle: Dickreiter, Michael/ Dittel, Volker/ Hoeg, Wolfgang/ Wöhr, Martin: Handbuch der Tonstudientechnik, Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH 2014 - Band 1	16
Abb. 4: Interaurale Laufzeitdifferenz mit verschiedenen Laufzeitunterschieden vom rechten zum linken Ohr (Δt) Quelle: Frießbeck, Andreas: Die Audio-Enzyklopädie - Ein Nachschlagewerk für Tontechniker, Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH 2014	17
Abb. 5: Interaurale Pegeldifferenz unterschiedlicher Frequenzen bei verschiedenen Schalleinfallswinkeln Quelle: Steckmann, Andreas, Dipl.-Ing.: Eintauchen in virtuelle Räume, Hamburg: Diplomics Verlag GmbH 2018, S. 53	20
Abb. 6: Schematische Darstellung der Überlagerung von vier zeitgleich aktiven Schallereignissen (links) am Eingang des Sinnessystems. Die Schallanteile werden nach Aufsummieren (rechts) durch den Prozess der auditiven Szenenanalyse in die Ursprungssignale zerlegt Quelle: Müßeler, Jochen/ Rieger, Martina: Allgemeine Psychologie, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2017, S. 56	25
Abb. 7: Bei geringem Frequenzabstand wird die Tonreihenfolge als eine verbundene Tonsequenz (Melodie) wahrgenommen (oben), bei einem großen Frequenzabstand separiert das auditive System die Tonreihenfolge in zwei unverbundene Melodien (unten) Quelle: Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 73	27
Abb. 8: Verstärkungsfaktoren g_1 und g_2 , Abbildungswinkel der Phantomschallquelle θ und Versatzwinkel θ_0 Quelle: Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 658	30
Abb. 9: Ambisonics 1. Ordnung mit den vier Kanälen W, X, Y, Z - der In-Phase Anteil ist rot gekennzeichnet Quelle: Wiggins, Bruce (2004): An Investigation into the Real-Time Manipulation and Control of Three- Dimensional Sound Fields. Dissertation, University of Derby. Online unter: https://pdfs.semanticscholar.org/be51/5c49c1b61b79284427f8b8d7011e5a10b954.pdf?_ga=2.161986101.829267565.1530623082-1969432678.1530623082 , S.52	32

Abbildung	Seite
Abb. 10: Sphärische Harmonische der High Order Ambisonics -Technologie Quelle: Mróz, Bartłomiej: Externalisation and Distance in Ambisonic Rendering on Headphones, 2017, Master-Thesis: Gdansk University of Technology	33
Abb. 11: Der Schalldruck der Primärquelle PQ kann am Hörerplatz A dann eindeutig bestimmt werden, wenn an jedem Punkt der Umgrenzung S Schalldruck und Schallschnelle bekannt ist Quelle: Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 667	34
Abb. 12: Prinzip der Wellenfeldsynthese - Die Reproduktion in zwei Schritten Quelle: Dickreiter, Michael/ Dittel, Volker/ Hoeg, Wolfgang/ Wöhr, Martin: Handbuch der Tonstudiotechnik, Berlin/Bosten: Walter de Gruyter GmbH 2014 - Band 1, S. 354	36
Abb. 13: SpatialSound Wave System in Verbindung mit dem Prinzip der Wellenfeldsynthese im Opernhaus Zürich Quelle: Bangert, Christiane: Opern-Akustik: 3D-Sound in der Oper Zürich. Online Artikel aus dem Archiv. Online unter: https://www.professional-system.de/case-studies/opern-akustik-3d-sound-in-der-oper-zuerich/ , [Stand 01.07.2018]	37
Abb. 14: Auro 9.1 (links) und Auro 11.1 (rechts) Quelle: http://www.auro-3d.com/system/listening-formats/	39
Abb. 15: 7.1.4 mit vier Deckenlautsprechern Quelle: https://www.dolby.com/us/en/professional/cinema/products/dolby-atmos-next-generation-audio-for-cinema-white-paper.pdf	40
Abb. 16: Prinzip der Binauralen Synthese: Links die Messung verschiedener BRIR mit einem drehbaren Kunstkopf, rechts: abhängig vom Drehwinkel des Kopfes werden die passenden Raumimpulsantworten ausgelesen Quelle: Laumann, Klaus J.: Über Methoden zur Qualitätsbeurteilung von virtuellen Kopfhörern. Lehrstuhl für Mensch-Maschine Kommunikation Technische Universität München. Online unter: https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295008/document.pdf	45
Abb. 17: Binaurale Synthese: Faltung eines nachhallfreien Quellsignals mit zwei zuvor simulierten binauralen Raumimpulsantworten Quelle: Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 672	47
Abb. 18: Kunstkopf KU 100 (Neumann) Quelle: Thomann GmbH, Online unter: https://www.thomann.de/de/neumann_ku100.htm [Stand 01.05.2018]	50
Abb. 19: Messung Außenohrübertragungsfunktion von zwölf Personen an drei verschiedenen Messpunkten: Vor dem Trommelfell (links), am offenen Eingang zum Ohrkanal (Mitte), geblockter Eingang zum Ohrkanal (Rechts) Quelle: Weinzierl, Stefan: Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 587	51

Abbildung	Seite
Abb. 20: Freifeld-HRTF (blaue Kurve) mit frontaler Schalleinfallrichtung (0° Azimut, 0° Elevation), Diffusfeld-HRTF (rote Kurve) mit Berücksichtigung verschiedener Schalleinfallrichtungen Quelle: Schröder, Jürgen (2018): Freifeldentzerrung und Diffusfeldentzerrung bei Kopfhörern. Online unter: https://www.lowbeats.de/freifeldentzerrung-und-diffusfeldentzerrung-bei-kopfhoerern/ [Stand: 05.06.2018]	56
Abb. 21: Vorder- und Rückansicht der In-Ear-Monitoring-Lösung „KLANG:fabrik“ Quelle: KLANG:technologies GmbH (o.D.): 3D IN-EAR MIXING FÜR 8 MUSIKER. Online unter: https://www.klang.com/de/products/klang_fabrik [Stand: 10.05.2018]	60
Abb. 22: Interface der KLANG:app Applikation, hier: Menüpunkt „Stage“ zur Positionierung der Einzelkanäle in drei Ebenen Quelle: KLANG:technologies GmbH (o.D.): INTUITIVE KONTROLLE ÜBER DEINEN MIX. Online unter: https://www.klang.com/de/products/klang_app [Stand: 10.05.2018]	61
Abb. 23: Benutzeroberfläche des Ambeo Orbit Plug-In Quelle: Sennheiser electronic GmbH (o.D.): AMBEO® Plugins. Online unter: https://en-us.sennheiser.com/ambeo-blueprints-downloads [Stand: 13.06.2018]	62
Abb. 24: Signalfluss von Audiosignalen in einer DAW mit Ambeo Orbit Binauraltechnologie Quelle: Sennheiser electronic GmbH (o.D.): Approaching Static Binaural Mixing With AMBEO Orbit. Online unter: https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/9582/Approaching_Static_Binaural_Mixing.pdf , S. 15 [Stand: 13.06.2018]	64
Abb. 25: Grafische Oberfläche des Spatial Audio Designer der Firma New Audio Technology Quelle: New Audio Technology: Spatial Audio Designer. Online unter: https://newaudiotechnology.com/products/spatial-audio-designer/ , [Stand 16.06.2018]	66
Abb. 26: Anschlussbeispiel Dante-Netzwerk, links: sternförmige Verbindung mit einem Switch, rechts: Aufbau von zwei Netzwerken durch Verwendung von zwei Switches Quelle: Bangert, Christiane (o.D.): Netzwerke: Digitale Übertragung von Audiosignalen.rtikel aus dem Archiv. Online unter: https://www.production-partner.de/basics/netzwerke-digitale-uebertragung-von-audiosignalen/ [Stand 10.06.2018]	75
Abb. 27: Grafische Benutzeroberfläche des Dante-Controllers, Routing-Matrix: Eingänge (links) und Ausgänge (rechts) der im Dante-Netzwerk angeschlossenen Systeme Quelle: KLANG:technologies GmbH (o.D.): DANTE ROUTING I GETTING STARTED. Online unter: http://klang.com/blog/connectivity/dante/ , [Stand: 10.06.2018]	77
Abb. 28: ClubCANN Konzerthalle Quelle: Darko Veric, Veranstaltungskoordination Jugenhaus GmbH und Betreuer des Silent Concerts	81
Abb. 29: Verbindungsschaubild des Probenaufbaus Quelle: Eigene Grafik	89
Abb. 30: Instanz des Orbit Ambeo Plugins Quelle: https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/9582/Approaching_Static_Binaural_Mixing.pdf , [Stand 16.06.2018]	113

Abbildung	Seite
Abb. 31: Equalizer auf Matts Gitarrenspur. Quelle: Screenshot	116
Abb. 32: Finale Equalizer-Einstellung am Lead-Gesang. Die Dynamiksektion des Plugins wurde nicht genutzt. Quelle: Screenshot	117
Abb 33: Schaubild der horizontalen Verteilung der Spuren Quelle: Eigene Grafik	118
Abb. 34: Kompressor auf der Stereo-Summe Quelle: Screenshot	120
Abb. 35: Verbindungsschaubild des Konzertaufbaus Quelle: Eigene Grafik	124
Abb. 36: OSC-Routes-Tab in OSCulator Quelle: Screenshot	127
Abb. 37: Mapping-Ansicht in OSCulator Quelle: Screenshot	128
Abb. 38.1: Stereospur 7&8 (OH) in der Channel-Ansicht der KLANG:app (oben) und in OSCulator (unten) Quelle: Screenshot	129
Abb. 38.2: Stereospur in der Mixer-Ansicht der KLANG:app Quelle: Screenshot	130
Abb. 39: Vergleich der Skalierung der Fader in der KLANG:app (links) und am GLD (rechts) Quelle: Eigene Grafik	131
Abb. 40: ADT in der Effektsektion des GLD-80 Quelle: https://www.allen-heath.com/key-series/gld-series/gld-fx-processing/adt-doubler/	137

Angabe des Verfassers

Eidesstattliche Erklärung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Danksagung	VI
1. Einleitung	1
2. Silent Disco	3
2.1. Vergleich von Lautsprecher- und Kopfhörerwiedergabe	3
2.2. Tiefe Frequenzen	5
2.3. Geschichte	5
2.4. Silent Concert	6
3. Besonderheiten und Schwierigkeiten eines Silent Concerts	7
3.1. Reduktion/Vermeidung von Bühnenschall - „Silent Stage“	7
3.2. E-Gitarren	7
3.2.1. Silencer / Load-Box	8
3.2.2. Ampsimulation	8
3.3. Kemper Profiling Amp	9
3.4. Schlagzeug	14
3.5. Ambience Mics	14
4. Räumliches Hören	16
4.1. Psychoakustische Parameter	16
4.1.1. Interaurale Laufzeitdifferenzen	18
4.1.2. Interaurale Pegeldifferenzen	19
4.1.3. Entfernungslokalisation	21
4.1.4. Im-Kopf-Lokalisation	22
4.2. Auditive Wahrnehmung	23
5. 3D Audio	28
5.1. Funktionsprinzipien	29
5.1.1. Vector Base Amplitude Panning	29
5.1.2. Ambisonics	31
5.1.3. Wellenfeldsynthese	33
5.2. 3D-Audio Wiedergabeformate	38
5.2.1. Auro 3D	38
5.2.2. Dolby Atmos	39

5.2.3. Iosono	41
6. Binaurale Technik	42
6.1. Funktionsweise	42
6.1.1. HRTF - Head Related Transfer Function	42
6.1.2. BRIR - Binaural Room Impulse Response	44
6.1.3. Binaurale Raumsynthese	44
6.1.4. Kunstkopfstereofonie	48
6.1.5. Messung kopfbezogener Impulsantworten	50
6.1.6. Diffus-und Freifeldentzerrung von Kopfhörern	52
6.2. Überblick aktueller Binauraltechnologien	57
6.2.1. KLANG:technologies GmbH	57
6.2.2. Ambeo Orbit.....	62
6.2.3. Cingo	64
6.2.4. Spatial Audio Designer	65
7. Ethernet-basierte Audionetzwerke	67
7.1. Grundlagen der Netzwerktechnologie digitaler Audiodaten	69
7.1.1. Hardware	69
7.1.2. Das OSI-Referenzmodell	69
7.1.3. Grundlagen der Datenstruktur	71
7.1.4. Netzwerkinfrastruktur	72
7.2. Audinate Dante	74
8. Vorbereitung des binauralen Kopfhörerkonzertes.....	78
8.1. Musikalische Auswahlkriterien	78
8.2. Die Wahl der Veranstaltungsstätte	80
8.3. Vorproduktion	82
8.3.1. Probe mit Matija	83
8.3.2. Mischpult	83
8.3.3. Drumset	84
8.3.4. Gitarren & Synthesizer	85
8.3.5. Elody	85
8.3.6. KLANG:fabrik	87
8.3.7. Schlussfolgerungen.....	88
8.3.1. Probe mit Bitte Benimm Dich	90
8.3.1. Funkkopfhörer „Neon Lights“ und stationäre Sender	90
8.4. Finanzierung	92
8.4.1. Vorkalkulation.....	92
8.4.2. Sponsoren	93

8.4.1. Kostenaufstellung	94
8.5. Kommunikation und Vermarktung	96
9. Mischung	98
9.1. Mischen in Stereo	98
9.2. Mischen in Surround.....	103
9.3. PA-Mix vs Studio-Mix.....	106
9.4. Mischen mit Kopfhörern	107
9.5. Subwoofer	108
9.6. Sonderfall Kopfhörer-Konzert.....	109
9.7. Static Binaural Mixing - Grundlagen.....	110
9.7.1. Wiedergabe	112
9.7.2. Probleme beim binauralen Mischen	112
9.8. Static Binaural Mixing am Beispiel „Justify Your Love“ von Matija	114
10. Umsetzung des Silent Concerts	123
10.1. Technisches Setup	123
10.2. Timetable & Ablauf.....	125
10.3. Technische Gegebenheiten.....	126
10.4. GLD-80 als MIDI-Controller der KLANG:app	126
10.5. Alternatives Setup	132
10.6. Monitoring	133
10.7. Live-Mischung von Bitte Benimm Dich.....	135
10.8. Live-Mischung von Matija.....	137
11. Fazit und Ausblick.....	140
Quellenangaben	141
Abbildungsverzeichnis	148
Angabe des Verfassers	152

Legende:

Dominik Stuhler (blau)

Maria Härtwig (gelb)