

FH JOANNEUM Graz
Institut für Elektronische Musik und Akustik
Kunstuniversität Graz



FH | JOANNEUM
University of Applied Sciences



Binaurales Echtzeitabhörsystem an der Oper Graz

Methode zur Optimierung der Abhörsituation der Tonschaffenden

Masterarbeit

von

Hanna Brühwiler

51903734

Hanna.Bruehwiler@gmx.de

CMS – Sound Design

Vorgelegt zur Erlangung des
akademischen Grades eines
Master of Arts (M.A.)

Graz, 17. Januar 2022

Betreuer der Masterarbeit:
DI Ph. D. Matthias Frank

.....

Zweitprüferin:
Dipl.-Ing. Astrid Drechsler

.....

Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, 17. Januar 2022

.....

Danksagung

Den größten Dank muss ich als erstes meinem Betreuer Matthias Frank aussprechen, der mich seit der Ideenentwicklung ganzheitlich bis zur Finalisierung dieser Arbeit mit seinem Expertenwissen und seiner tatkräftigen Unterstützung in der Umsetzung begleitet hat.

Inspiziert zu dieser Thematik wurde ich während meiner Arbeit in der Tonabteilung des Opernhauses in Graz, da ich dort den suboptimalen Hörplatz selbst erfahren habe und dafür eine Lösung finden wollte. Deshalb auch ein großes Dankeschön an Christian Komp und seine gesamte Tonabteilung für die Hilfe und die Möglichkeit, meine Lösungsansätze mit ihnen an der Oper Graz zu testen. Danke auch an alle Tonschaffende an Opernhäuser, die sich zu diesem Thema geäußert haben und somit meiner Arbeit einen globalen Sinn gegeben haben. Insbesondere das große Interesse von Oleg Surgutschow und Sal Distefano mit darauffolgenden Zoom Gesprächen und von Sarah Black mit einer detaillierten Antwort, hat diese Masterarbeit vorangebracht.

Auch für die technische Unterstützung der Software-Entwickler Daniel Rudrich, Svein Berge und Peter Stitt bin ich sehr dankbar, da sie mit mir bereitwillig ihre Kenntnisse, Informationen und ggfs. Lizenzen für ihre jeweiligen Plugins teilten.

Für die Finalisierung der Dokumentation muss ich mich unbedingt bei meinen Freundinnen Annette und Sina im virtuellen Co-Working bedanken, die durch gemeinsames Arbeiten und Korrekturlesen meiner Arbeit, danke auch an Timo, mich bei diesem Prozess unterstützten. Außerdem war Sarah mit ihren dokumentarischen Fotos, während des technischen Aufbaus in Oper Graz, und ihrem Designerinnenblick eine besondere Unterstützung, ebenso wie meine Schwester Lena mit ihren schweizerischen Transkriptionskünsten und Bernies Formulierungskopf.

Zum Schluss möchte ich mich noch bei den wichtigsten Menschen in meinem Leben bedanken – meiner Familie und meinem Freund Jakob, der mich in allen Lebensphasen stärkt und mir für meine Masterarbeit kompetente wie auch mentale Unterstützung geschenkt hat.

- ein großes DANKESCHÖN an alle -

Kurzfassung

Für Tonschaffende an einem Opernhaus spielt die Verteilung der verstärkten und akustischen Klangereignisse im Zuschauerraum eine besondere Rolle. Das Klangbild aus dem Zuschauerraum wird in der Tonregie nicht adäquat wiedergegeben. Diese Problematik ist ein fester Bestandteil des Arbeitsalltags an den meisten Opernhäusern weltweit. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde mit den Tonschaffenden des Opernhauses in Graz eine Methode zur Optimierung der Abhörsituation evaluiert, wodurch eine ambisonische Echtzeitübertragung einer Hörposition im Zuschauerraum das dynamisch binaurale Abhören dieses Hörplatzes in der Tonregie über Kopfhörer ermöglicht. Die Ergebnisse der Hörversuche zeigen, dass zwar eine Echtzeitübertragung des Zuschauerraums grundsätzlich möglich ist, es jedoch für eine Nutzung während der Mischung noch an Optimierung bedarf.

Abstract

For sound engineers at opera houses, the distribution of the amplified and acoustic sound events in the auditorium plays a special role. The sound image from the auditorium is not adequately reproduced in the control room of the sound engineers. This problem is an inherent part of everyday work at most opera houses around the world. In this master's thesis, a method to optimize the listening situation of sound engineers was evaluated with the sound staff of the Opera House in Graz, whereby an Ambisonics real-time transmission of a listening position in the auditorium enables a dynamic binaural listening of this listening position in the control room over headphones. The results of the listening tests show that, although a real-time transmission of the auditorium is basically possible, optimization is still required for use this system for the sound mixing process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Problematik.....	2
1.3	Gliederung der Arbeit.....	4
2.	Grundlagen	6
2.1	Räumliches Hören.....	6
2.1.1	Lokalisation und Richtungswahrnehmung.....	7
2.1.2	Selektives Hören.....	9
2.1.3	Außenohr-Übertragungsfunktion (HRTF).....	11
2.2	Binaurale Aufnahmemethoden.....	12
2.2.1	Binaurale Zweikanalaufnahmen.....	13
2.2.2	Binaurale Mehrkanalaufnahmen.....	17
2.3	Aufnahme von Raumimpulsantworten.....	22
2.4	Raumklang und Nachhall.....	25
2.5	Akustische Herausforderungen in Opernsälen.....	27
3.	Fokus und Balancen von 3D Audio in Echtzeit	32
3.1	Auralisation von Konzert- und Opernsälen.....	32
3.2	3D Audio an Theater- und Opernhäusern.....	36
3.2.1	Immersive Lautsprechersysteme.....	37
3.2.2	Binaurale Produktionen.....	40
3.3	Ambisonics Plugins zur 3D Audioverarbeitung.....	45
3.3.1	Signalabhängige Verfahren.....	45
3.3.2	Signalunabhängige Verfahren.....	49

4. Praktische Durchführung	54
4.1 Interviews mit Tonschaffenden an Opernhäusern	55
4.2 Planung der Hörversuche durch Auralisation.....	57
4.2.1 Technischer Probeaufbau in großem Hörsaal	58
4.2.1 Aufnahme von Impulsantworten im Opernsaal in Graz	61
4.3 Durchführung der Hörversuche in Echtzeitanwendung	67
4.3.1 Erster Hörversuch an der Oper Graz – Clivia BO	67
4.3.2 Beurteilung und Überarbeitung des ersten Hörversuchs	72
4.3.3 Zweiter Hörversuch an der Oper Graz – Schwanda BO	77
4.4 Zusammenfassende Ergebnisse der Durchführung.....	82
5. Fazit und Ausblick.....	87
Abkürzungsverzeichnis.....	89
Abbildungsverzeichnis.....	90
Literaturverzeichnis.....	94
Anhang.....	105

„Discretely standing somewhere in the circle (is) not
the optimum mix position but better than the control room“

– *Sarah Black, Sydney Opera House*

„Eigentlich die beste Lösung wäre, wenn man mitten drin
im Zuschauerraum sitzt ohne jegliche Einschränkung“

– *Oleg Surgutschow, Oper Zürich*

„There isn't much interest in creating a permanent
mixing position by anyone other than the sound department“

– *Josh Marks, The Metropolitan Opera New York*

„With this system like yours, maybe we could stay then in a different position,
it doesn't care where you are and where you monitoring.“

– *Sal Distefano, Teatro alla Scala*

Kapitel 1

Einleitung

1 Einleitung

Was macht einen Besuch in der Oper zu Zeiten von Kino und Netflix immer noch besonders? Eine mitreißende Handlung, musikalische Höchstleistungen, ausgefallene Kostüme, abgestimmtes Lichtdesign, gewagte Bühnenbilder, durchdachte Konzepte – Das Zusammenspiel aller künstlerischen und technischen Gewerke kriert nach wie vor eine unvergleichbare Live-Stimmung für das Publikum. Einen essentiellen Teil des ganzheitlichen Erlebnisses macht ein ausbalanciertes Klangerlebnis aus, welches auf jedes Opernhaus einzeln abgestimmt ist. Diese klangliche Umhüllung wird durch die unauffällige Kombination aus verstärkten und unverstärkten Klangelementen erreicht. Die klanglichen Balancen im Raum werden von den Tonschaffenden¹ der Opernhäuser für die Zuschauer*innen im Auditorium so angepasst, damit diese ein möglichst ausgewogenes Klangbild hören. Durch unterschiedliche Zuspieldirectionen, welche dramaturgisch unterstützend wirken, wird diese räumliche Immersion gestärkt. Eine andere Methode zur Klangverteilung im Raum bietet das Opernhaus in Zürich, durch die Verwendung eines immersiven Lautsprechersystems für die Klangumhüllung. Jedoch sind die Abhörmöglichkeiten für die Tonschaffenden während einer Vorstellung begrenzt, da diese sich zu diesem Zeitpunkt nicht im Auditorium selbst aufhalten können, sondern in einem abgegrenzten Raum den Ton mischen. Die Balancen in dieser Tonregie entsprechen nicht dem tatsächlichen Klangbild im Zuschauerraum.

1.1 Aufgabenstellung

Die Tonschaffenden befinden sich somit während der Veranstaltungen in einer suboptimalen Hörsituation, um die richtigen Balancen für den Raumklang im Auditorium einzustellen. Während die Autorin dieser vorliegenden Arbeit in der Tonabteilung der Oper Graz beschäftigt war, wurde sie auf diese Problematik aufmerksam. Der Austausch mit dem Leiter der Tonabteilung des Opernhauses, Christian Komp, schärfte zudem das Bewusstsein für die weite Verbreitung und unterschiedliche Ausprägung des Problems an internationalen Theater- und Opernhäusern. Laut Komp gibt es derzeit für die Problematik der schlechten Hör-

¹ Mit Tonschaffenden sind alle Mitarbeiter einer Tonabteilung gemeint, dazu gehörten Tontechniker*innen, Toningenieur*innen und Tonmeister*innen

situation für Tonschaffende noch keine optimale Lösung. Andere Gewerke in Theaterhäusern, sowie branchenfremde Personen tendieren dazu die Tragweite der Thematik zu unterschätzen, wodurch die Lösungssuche betriebsintern nicht vorangetrieben wird. Somit ergibt sich die zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit:

Kann die Hörsituation der Tonschaffenden an Opernhäusern durch eine zusätzliche binaurale Abhöre eines Hörplatzes im Auditorium optimiert werden?

Im Rahmen des Masterstudiums ‚Sound Design‘ an der FH JOANNEUM in Kooperation mit der Kunstuniversität Graz wird ein praxisorientierter Lösungsansatz für das Opernhaus in Graz, mit möglicher Weiterverwendung an anderen Opernhäusern, erarbeitet. Hierbei werden im Studium erworbene Kompetenzen aus Themenbereichen wie 3D Audio, Übertragungstechnik, sowie Psycho- und Raumakustik in der Praxis angewendet.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur Optimierung der Hörsituation für Tonschaffende an Opernhäusern zu entwickeln. Um die Relevanz der Thematik aufzuzeigen, wurde eine Problemanalyse durchgeführt, auf welche im folgenden Unterkapitel eingegangen wird.

1.2 Problematik

Als Methode zur Analyse der Problematik wurden schriftliche Befragungen und sowohl digital als auch persönliche Interviews mit Tonschaffenden an verschiedene Opernhäusern weltweit durchgeführt. Hierfür wurden insgesamt 13 Tonabteilungen von Opernhäusern aus neun verschiedenen Ländern von der Autorin kontaktiert, wobei sich sieben Tonschaffende stellvertretend für acht Opernhäuser bereitwillig über diese Thematik zu äußern.

In Form eines Interviews wurde Oleg Surgutschow, Cheftonmeister der Oper Zürich, Sal Distefano, Tontechniker an der Mailänder Scala, und Christian Komp, Leiter der Tonabteilung, zur ihrer Situation am jeweiligen Theaterhaus befragt. Die übrigen Korrespondenzen wurden mit Sarah Black, Tontechnikerin am Sydney Opera House und Nationaltheater London, Anthanasios Rovakis, Chefonmeister an der Staatsoper Wien, Josh Marks, Leiter der Tonabteilung an der MET Oper New York und Philippe Taberlet, Leiter der Tonabteilung an der Nationaloper Paris Bastille geführt.

Die Problematik der Hörsituation wurde in allen Interviews bestätigt und anschaulich beschrieben. Folgendes Hauptmerkmal wirkt sich auf die suboptimale Hörsituation zusätzlich negativ aus: In der Tonregie ist eine Kombination aus verstärkten und unverstärkten Signalen aus unterschiedlichen Richtungen wahrnehmbar, die nicht der tatsächlichen klanglichen Situation im Zuschauerraum entspricht.

Als Praxisbeispiel aus der Oper Graz beschreibt Christian Komp in seinem Interview eine Übertragung des „Engelschor“ aus der Lustkuppel, welche sich über dem Auditorium befindet, sowie Klangzuspielungen von der Hinterbühne, welche in der Tonregie dynamisch verfälscht ankommen (vgl. Komp 08.06.2021, S. 127 Anhang). Die Einschätzung der Balancen dieser Klangereignisse im Zuschauerraum wird dadurch zusätzlich erschwert. Hinzu kommen unverstärkte, akustische Signale aus dem Orchestergraben, welche sich durch die Reflexionen an der Decke erst im Auditorium ausbreiten, vom Balkon abgefangen werden und erst dann in der Tonregie ankommen. Selbst die Balancen innerhalb des Orchesters werden in der derzeitigen Hörsituation nicht realitätsnah wiedergegeben.

Da es bei Musical Vorstellungen Standard ist, die Sänger*innen auf der Bühne zu mikrofonieren, ist es für die Tonschaffenden in der Tonregie schwierig das Verhältnis zwischen Orchester und verstärktem Gesang zu regulieren. Das Zumischen der Stimmen zum unverstärkten Orchesterklang gestaltet sich schwierig, da die verstärkten Signale über die Beschallungsanlage in der Tonregie an der Oper Graz deutlicher abgebildet werden ankommen. Zudem ist die Richtungswahrnehmung, welche vom Publikum im Auditorium vorhanden ist, ist in der Tonregie nicht möglich.

Die räumlichen Gegebenheiten in historischen Gebäuden lassen aufgrund des bestehenden Denkmalschutzes, wie beispielsweise in der Oper Graz, keine größeren baulichen Eingriffe in die Architektur zu, um die Hörsituation für die Tonschaffenden zu verbessern.

Gegen die Lösung, die Positionierung eines zentralen Mischplatzes im Zuschauerraum, sprechen wichtige Faktoren wie die auditive und visuelle Störung des Publikums (vgl. Surgutschow 20.04.2021, S. 106 Anhang). Da die Repositionierung des Hörplatzes in den Zuschauerraum einen Verlust der akustisch besten Sitzplätze für das Publikum bedeuten würde und zusätzlich finanzielle Einbußen damit einhergehen, wird dieser Lösungsansatz von den Geldgebern der Opernhäuser nicht unterstützt (vgl. Black 27.05.2021, S. 119; Marks 02.01.2022, S. 132 Anhang).

Ein weiterer Grund, welcher gegen eine räumliche Veränderung der Hörposition spricht, ist unter anderem die fehlende Möglichkeit zur Kommunikation zwischen Mitarbeitern der Tonabteilung während einer Vorstellung. Das impliziert auch die Interkom zwischen den Tonmischer*innen und anderen Abteilungen wie beispielsweise zum Inspizienten und zur Lichtabteilung, wodurch der gesamte Ablauf der Vorstellung massiv beeinträchtigt werden würde.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Problemanalyse lässt erkennen, dass eine allgemeine Lösung in Form einer Optimierungsmethode der Abhörsituation für Tonschaffenden an Opernhäusern gefunden werden sollte, welche ohne große finanzielle Belastung an verschiedenen Opernhäusern umsetzbar ist. Oleg Surgutschow berichtet in seinem Interview von einem Lösungsansatz, den er gemeinsam mit den Forschern des Fraunhofer IDMT in Zukunft in der Oper Zürich verfolgen möchte, welcher jedoch nicht universal anwendbar ist und zudem einen großen finanziellen Aufwand darstellt (vgl. Surgutschow, S. 107 Anhang).

Aufgrund der derzeit noch nicht bestehenden Lösung dieses Problems, wurde sich im Rahmen dieser Masterarbeit zum Ziel gemacht, eine Methode zu entwickeln, welche nicht nur auf die Oper Graz zugeschnitten ist, sondern auch für andere Opernhäuser eine Umsetzungsmöglichkeit bieten sollte. Die vorliegende Forschungsarbeit kann somit zur zukünftigen Lösung dieser Problematik beitragen und für Weiterentwicklungen genutzt werden.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit den Grundlagen im Bereich der Aufnahmemethoden, sowie der Psycho- und Raumakustik. Es folgen vertiefende Forschungsaspekte in Bezug auf Fokus und Balancen von aktuellen 3D Audio Technologien in Echtzeitübertragung. Abschließend wird die praktische Durchführung der Methodik in Form von Hörversuchen an der Oper Graz dokumentiert und ausgewertet. Zusammenfassend wird in Kapitel 5 ein Fazit formuliert, welches zusätzlich einen Ausblick auf Weiterentwicklungen bietet.

Kapitel 2

Grundlagen

2. Grundlagen

Um ein realitätsnahes Abbild einer Klangsituation zu kreieren, müssen zunächst die Grundlagen des räumlichen Hörens erfasst werden. Das menschliche Hörsystem ist ein komplexes Konstrukt, dessen Besonderheiten bei der Reproduktion eines dreidimensionalen Klangraumes beachtet werden sollten.

In diesem Kapitel wird zunächst das räumliche Hören beschrieben, die auditive Kognition von Klangereignissen, ebenso wie Besonderheiten, die bei deren Nachbildung zu beachten sind. Danach wird auf binaurale Aufnahmemethoden eingegangen, wobei auch unterschiedliche Mikrofonierungsmethoden gezeigt werden. Auf eine Reproduktion von 3D Audio über ein Lautsprecher-setup wird nicht weiter eingegangen, da diese Anwendung für diese Arbeit nicht relevant ist. Nach den binauralen Aufnahmemethoden werden Methoden zur Aufnahme von 3D-Impulsantworten besprochen, die bei der praktischen Umsetzung des technischen Probeaufbaus angewendet wurden. Im Anschluss wird der Raumklang und Nachhall in Kapitel 2.4 beschrieben, woraufhin sich Kapitel 2.5 der Thematik der akustischen Besonderheiten an Opernhäusern widmet.

2.1 Räumliches Hören

Das räumliche Hören, welches oftmals auch als Richtungshören bezeichnet wird, beschreibt das Erkennen und Zuordnen der Richtung einer vom peripheren Gehör wahrgenommenen Schallquelle, welche vom Hörorgan an das Gehirn weitergeleitet wird. Durch diese Richtungsempfindung wird nicht nur die Schallquelle lokalisiert und deren Entfernung wahrgenommen, sondern auch die Größe des umgebenden Raumes (Dickreiter et al. 2014, S. 127). Das menschliche Hörorgan besteht aus dem Außen-, Mittel- und Innenohr. Im Außenohr befindet sich der Gehörgang und die Ohrmuschel, auch Pinna genannt, welche bei jedem Menschen verschieden geformt sind (Vorländer 2008, 80f). Ideal können Schallereignisse mit Frequenzen zwischen 16 Hz und maximal 20 kHz zu Hörereignissen wandeln, solange diese mit ihrem Schalldruckpegel zwischen der Hörschwelle, bei 1kHz 4dB, und der Schmerzschwelle, 130dB bei 1kHz, liegen (Dickreiter et al. 2014, S. 15). Diese bilden gemeinsam den Hörbereich (Dickreiter et al. 2014, S. 119).

Die Fähigkeit des Hörens nimmt mit zunehmenden Alter zunächst in den höheren Frequenzen ab (Howard und Angus 2016, S. 441), bei mit $\sim 1\text{kHz}$ pro Dekade. Wenn man einen Klangraum mit einem oder mehreren Schallquellen beschreibt, besteht dieser aus dem Verhältnis des Direktschallanteils, der das primäre Signal beinhaltet, zum Diffusschallanteil, welcher die Umgebungsgeräusche abbildet.

2.1.1 Lokalisation und Richtungswahrnehmung

Da der Mensch zwei Ohren zum Richtungshören nutzt, werden die Hörsignale anhand der Intensitäts- und Laufzeitunterschiede der Schallwellen an den beiden Pinnae lokalisiert. Um die Ortung der Hörereignisse genauer beschreiben zu können, wird ein kopfbezogenes Polarkoordinatensystem verwendet (Blauert und Braasch 2008, S. 87). Hierbei werden drei Ebenen der Richtungswahrnehmung differenziert: die horizontale Ebene, welche durch Unterschiede in der Klangfarbe, des Pegels und der Laufzeiten zwischen den Ohrsignalen die Hörereignisse lokalisiert, die Frontalebene, welche ebenfalls anhand von Laufzeit-, Pegel- und Klangfarbenunterschiede ortet und die vertikale Ebene oder auch Medianebene genannt, welche die spektralen Veränderungen durch die Form der Ohrmuscheln zur Lokalisation nutzt. Hier wird auch entschieden, ob die Schallquelle von vorne oder von hinten wahrgenommen wird (Dickreiter et al. 2014, S. 127). Die Unterscheidung dieser drei Ebenen ist in der folgenden Abbildung 1 visuell dargestellt.

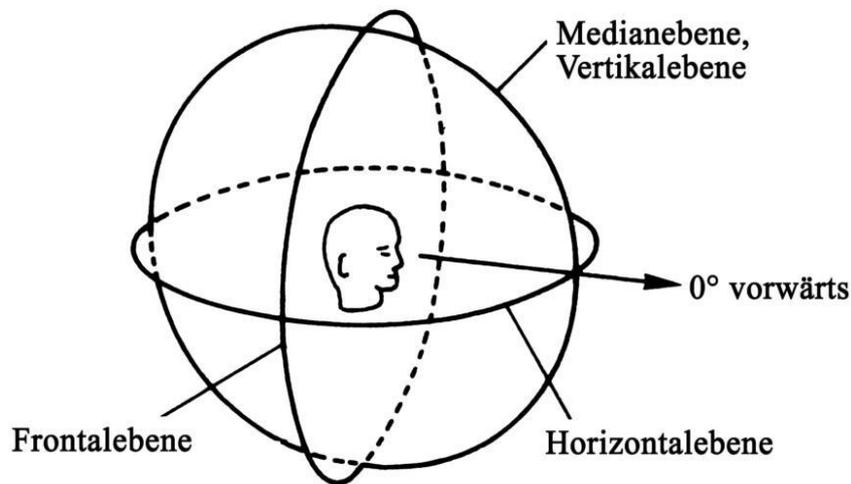


Abbildung 1: Kopfbezogenes Polarkoordinatensystem mit den Hörereignisrichtungen: Medianebene, Frontalebene, Horizontalebene (Dickreiter et al. 2014, S. 128)

Die primären Lokalisierungsmerkmale in der horizontalen Ebene wurden in Lord Rayleigh's „Duplex Theorie“ 1907 beschrieben, worin er die interaurale Laufzeit- und Pegeldifferenz unterscheidet (Wenzel et al. 2018, S. 11).

Die Duplex Theorie besagt, dass mit der interauralen Pegeldifferenz (engl. interaural level difference, kurz ILD, oder interaural intensity difference, kurz IID) hochfrequente Klänge über 1500 Hz lokalisiert werden, da hierfür der Schalldruckpegel der beiden Ohrsignale unterschieden wird. Tiefere Frequenzen weisen keine große Differenz auf, da sich ihre längeren Wellenlänge leichter um den Kopf beugt, was ebenfalls die Intensitätsunterschiede minimiert (Sunder 2021, S. 113). Bei tieferen Frequenzen unter 1500 Hz wird die Lokalisation von Hörereignissen durch die interaurale Laufzeitdifferenz (engl. interaural time difference, kurz ITD) wegen des zeitlichen Versatzes des Schalls an den beiden Ohren bestimmt (Dickreiter et al. 2014, S. 718). Der folgenden Darstellung (siehe Abbildung 2) kann man diese interauralen Zeit- und Intensitätsdifferenzen entnehmen.

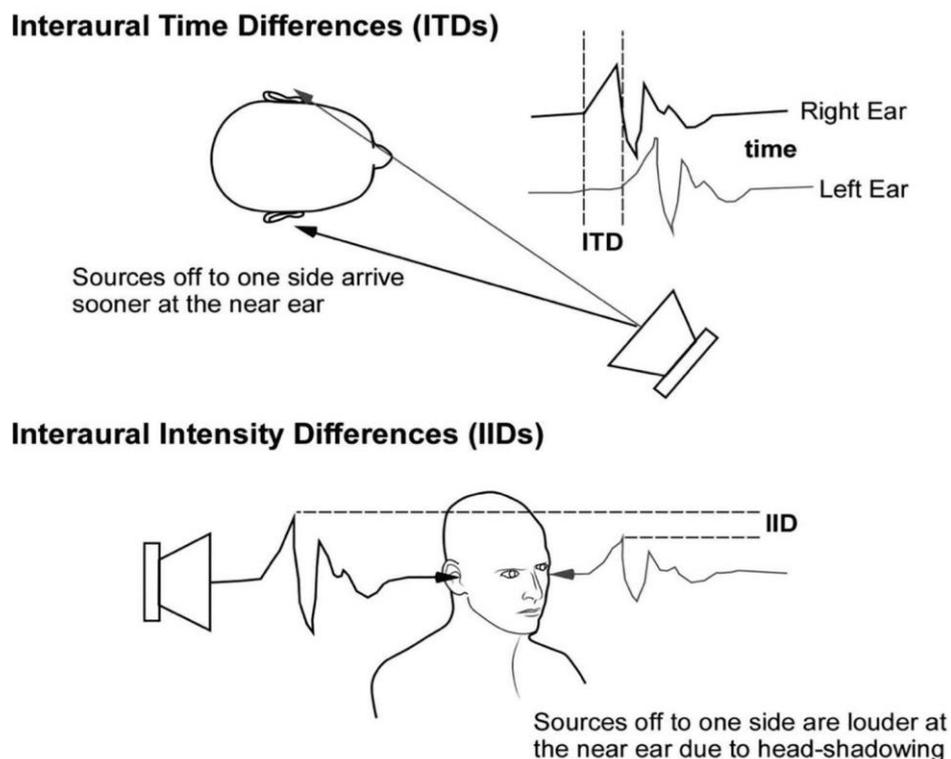


Abbildung 2: Interaural Time Difference (ITD) und Interaural Intensity Difference (IID)
(Roginska und Geluso 2018, S. 12)

Durch diese Unterscheidungen der Lautstärke und des zeitlichen Versatzes, ist eine sehr genaue räumliche Ortung in der horizontalen Ebene möglich. In der vertikalen Ebene dienen die spektralen Merkmale, auch „monaural cues“ genannt, als alleiniges Lokalisationsmerkmal (Vorländer 2008, S. 90). Die spektralen Verfärbungen werden durch den komplexen Resonanzhohlraum der Ohrmuscheln, Pinnae, erzeugt, welche für einen bestimmten Hörereignisort charakteristisch sind. Zudem weist die Morphologie der Pinna individuelle Unterschiede auf, da sie bei jedem Menschen verschieden geformt ist, wodurch das Frequenzspektrum beeinflusst wird (Sunder 2021, S. 133).

Besonders in lauter Umgebung gelingt es dem menschlichen Gehör mithilfe der interauralen Unterschiede gleichbleibende Geräusche wie Hintergrundrauschen in der wahrgenommenen Lautstärke zu reduzieren (Vorländer 2008, S. 90). Hierbei gilt zudem auch der Präzedenzeffekt, auch Haas Effekt genannt, der besagt, dass der erste wahrgenommene Impuls als Direktschall die Hörereignisrichtung bestimmt, auch als „Gesetz der ersten Wellenfront“ betitelt (Vorländer 2008, S. 93). Dieser Effekt tritt auch auf, wenn ein zweites Schallereignis lauter ist als das erste. Des Weiteren hilft der visuelle Einfluss dem Gehör beim Fokussieren von Hörereignissen aus der Entfernung (Dickreiter et al. 2014, S. 133), was durch selektives Hören ebenfalls verstärkt wird. Ein Beispiel hierfür wäre das Sehen des Sängers oder der Sängerin auf der Bühne.

2.1.2 Selektives Hören

Eine Fähigkeit des menschlichen Gehörs ist die Schallquellentrennung. Zudem ist der Mensch durch das periphere Hören in der Lage die perzeptive Lautstärke der Hörereignisse an die gegebene Situation anzupassen. Somit können Hintergrundgeräusche in ihrer Lautheit, also der wahrgenommenen Lautstärke, verringert werden, wodurch das primäre Nutzsignal klarer separiert werden kann (Dickreiter et al. 2014, S. 123).

Ein Beispiel dieses Effekts ist der „Cocktail-Party-Effekt“, den Colin Cherry in seinem Aufsatz von 1953 prägte (Bronkhorst 2015), welcher die Fähigkeit, die Sprachverständlichkeit eines einzelnen Sprechers unter mehrerer ablenkenden Sprechern bei starkem Geräuschpegel hervorzuheben, beschreibt (Pulkki 2015, S. 213). Allerdings funktioniert die bessere Sprachverständlichkeit nur, wenn ein binaurales Hören, also mit zwei Ohren, gewährleistet ist. Blaurot und Braasch (2008) schreiben beispielsweise in ihrem Kapitel über räumliches Hören, dass die Trennung von Sprach- und Rauschhörereignis beim Verschließen eines Ohres

schlechter funktioniert und somit die gewonnene Sprachverständlichkeit der beiden Ohren wieder verschwindet (vgl. Blauert und Braasch 2008, S. 113). Laut Pulkki (2015) liegt der Vorteil des binauralen Hörens in Situationen mit vielen Sprechern bei einer selektiven Anhebung von bis zu 8 dB (Pulkki 2015, 242 ff).

Das selbe Phänomen tritt bei großen Räumen mit viel Hall ein. Somit wird bei dichotischen² Zuhören die Halligkeit des Klangs minimiert. Das monaurale Hören, also mit nur einem Ohr, lässt den Raum noch halliger wirken, was auch als binaurale Nachhallunterdrückungs-Effekt in Blauerts und Braaschs Kapitel benannt wird (Blauert und Braasch 2008, S. 113). Der folgenden Abbildung 3 kann dieser Vergleich von monauralen und binauralen Hören entnommen werden. Diese Abbildung zeigt auf der linken Seite den Durchführungsaufbau des Vergleichs mit einem Rauschen als Eingangssignal in einem halligen Raum, welches zum einen mono (einkanalig) und zum anderen binaural (zweikanalig) aufgenommen wird. Die grafische Darstellung auf der rechten Seite bildet die wahrgenommene Nähe zur Schallquelle ab. Hierbei wird deutlich, dass der Hallraum mono größer wahrgenommen wird als binaural.

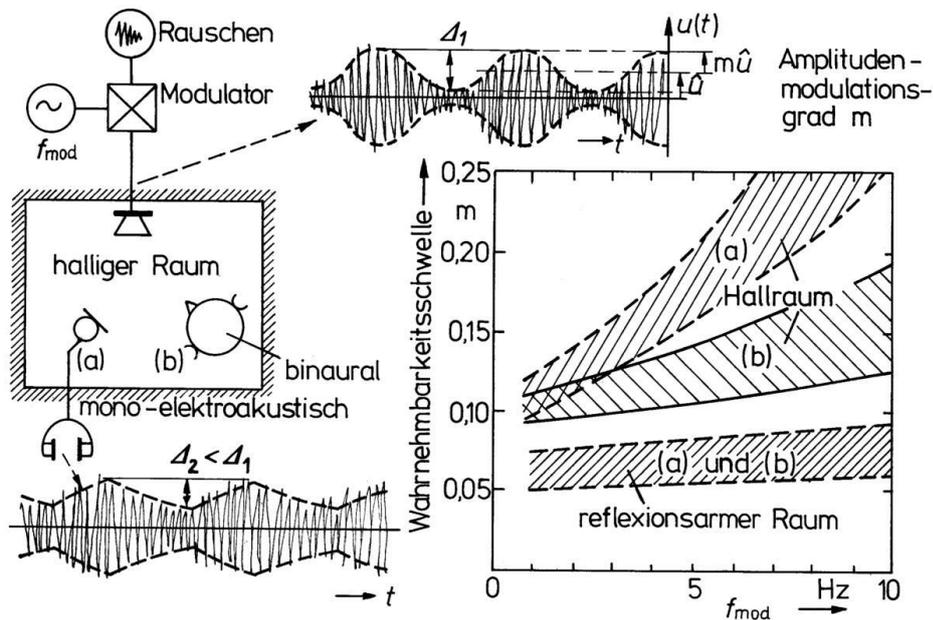


Abbildung 3: Zur Nachhallunterdrückung beim zweiöhrigen Hören (Weinzierl 2008, S. 120)

Zudem zeigt der Vergleichswert mit der Durchführung dieses Hörversuchs in einem reflexionsarmen Raum, dass die Nachhallunterdrückung sich nur in halligen Räumen bei mono und

² Dichotisch: beide Ohren hören ein anderes Signal

binaural unterscheidet. Blauert bezeichnete in seinem Buch „Spatial Hearing“ von 1996 diesen Pegelunterschied zwischen monauralem und binauralem Zuhören als binauraler Verständlichkeitspegelunterschied, welchen er mit BILD (engl. binaural intelligibility level difference) abkürzt (vgl. Blauert 1996).

Das Gehör nutzt diese Maskierungsmethoden, um nur die relevanten Daten zur Weiterverarbeitung ans Gehirn zu leiten (Dickreiter et al. 2014, S. 124). Zusätzlich ist es für das Gehör schwieriger mehrere Hörereignisse aus derselben Richtung zu unterscheiden (Dickreiter et al. 2014, S. 128), weshalb jegliche Merkmale zur Unterscheidung zur Hilfe genommen werden. Wie bereits erläutert, ist die Form der Ohrmuschel ausschlaggebend für die Lokalisation in der vertikalen Ebene, weshalb diese Unterscheidung ebenfalls für eine realitätsnahe Reproduktion des Schallfeldes mit einbezogen werden muss. Durch die Übertragungsfunktion des Außenohrs kann diese Form, die bei jedem Ohr variiert, in das binaurale Endsignal integriert werden.

2.1.3 Außenohr-Übertragungsfunktion (HRTF)

Die Außenohr-Übertragungsfunktion (engl. head-related transfer function, kurz HRTF) ermöglicht die mathematische Darstellung der spektralen, linearen Klangfärbung durch die Pinna, wodurch es möglich ist diese zu messen. Diese Veränderungen des Phasen- und Amplitudenverlaufs des Frequenzspektrums sind relativ zu den Ohren und gelten für den derzeitigen Ort des Schallereignisses (Blauert und Braasch 2008, S. 90). Nicht nur von Mensch zu Mensch unterscheidet sich die Form der Pinna, sondern auch das linke und rechte Ohr einer einzelnen Person weist verschiedene Verfärbungen auf, wie in der folgenden Abbildung 4 zu sehen ist.

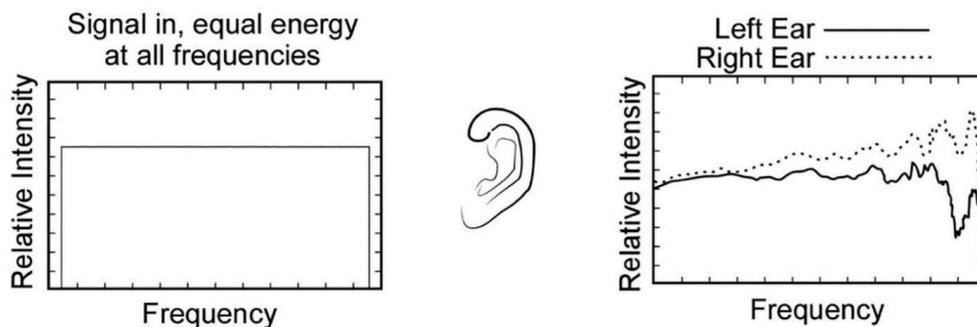


Abbildung 4: Spektrale Verfärbungen durch die Form der Pinna/ Ohrmuschel, resultierende Unterscheidungen in der Klangfärbung des linken und rechten Ohrs (Roginska und Geluso 2018, S. 12)

Nicht nur die Klangfärbungen durch die Pinna, welche im höheren Frequenzbereich über 3 kHz liegen, werden in der kopfbezogenen Übertragungsfunktion (HRTF) berücksichtigt, sondern auch der Einfluss der Wechselwirkungen des Schallereignisses mit dem Kopf- und dem Oberkörper, die die mittleren Frequenzen abdecken. Die HRTF ist erst über einer Frequenz von 200 Hz wirksam, da tiefere Frequenzen aufgrund der Beugung um den Kopf das Schallfeld nicht signifikant beeinflusst (vgl. Vorländer 2008, S. 88). Die Zeitbereichsdarstellung von HRTF wird als kopfbezogene Impulsantwort (engl. Head-Related Impulse Response, kurz HRIR) bezeichnet (He 2017, S. 11). Es werden im Internet solche Aufnahmen von diversen Forschungsgruppen frei verfügbar bereitgestellt. Ein Beispiel hierfür ist die Datenbank des SADIE Projekts der Universität in York, welches für „Spatial Audio for Domestic Interactive Entertainment“ steht (Armstrong et al. 2020).

Zusätzlich zu den bereits genannten Merkmalen, wird die dynamische Kopf und Oberkörperdrehung als wichtiger Aspekt für die Verbesserung der exakteren Schallokalisierung genannt (Vorländer 2008, S. 92). Dies kann bei der Reproduktion durch die Verwendung eines Headtrackers mit einbezogen werden. Hierbei wird die relative Kopfbewegung zum Headtracker mit einer Abtastrate von 10 bis 100 Hz überprüft und die Filterung durch die HRTF dynamisch geändert, um die wahrgenommene Schallrichtung innerhalb des kopfbezogenen Polarkoordinatensystems zu halten (Pulkki 2015, S. 300). Wie Vorländer (2008) in seinem Buch „Auralization“ erwähnt, wurden die ersten relevanten Studien zur Standardisierung der Simulation des menschlichen Kopfes in den 1960er Jahren von Burkhard und Sachs (1975) und Shaw (1982) vorgestellt, worauf 1972 die Einführung des KEMAR Kunstkopfes folgte (vgl. Vorländer 2008, S. 90). Die Messungen dieses Kunstkopfes dienen heute noch als Referenzdatenbank der HRTF. Im folgenden Kapitel wird auch auf die binauralen Aufnahmemethoden mit einem Kunstkopf eingegangen. Das räumliche Hören in Bezug auf die Lokalisation des Direktschalls in vier Aspekte gefasst werden: der interaurale Zeitunterschied (ITD), der Pegelunterschied zwischen den Ohren (ILD), spektrale Merkmale und die dynamische Kopfbewegung.

2.2 Binaurale Aufnahmemethoden

Um ein klangliches Abbild der Umgebung für Kopfhörerwiedergabe zu erstellen, gibt es verschiedene Mikrofonierungsmethoden, die zur binauralen Aufnahme genutzt werden können. Unter dem Ausdruck einer „binauralen Aufnahme“ wird ein Zweikanalsystem verstan-

den, welches die spektralen Eigenschaften des menschlichen Gehörs impliziert. Diese können entweder physikalisch im Aufnahmeprozess mit aufgenommen werden, beispielsweise durch die Verwendung von Ohrprothesen oder auch echten menschlichen Ohren (Hong et al. 2017, S. 6). Zudem können diese physikalischen Eigenschaften der Ohren, wie auch schon vorherigen Kapitel behandelt wurden, elektronisch zum Aufnahmesignal hinzugefügt werden (Geluso 2021, S. 229). Deshalb wird die Qualität einer dreidimensionalen Audioproduktion für gewöhnlich durch die menschliche Wahrnehmung evaluiert (He 2017, S. 22). Für die vorliegende Arbeit wurde dies in Form von zwei Hörversuchen durchgeführt, welche in Kapitel 4 näher erläutert werden. Demzufolge können binaurale Aufnahmesetups entweder aus einer zweikanaligen Mikrofonierung bestehen, oder es werden mehrkanalige Mikrofonaufnahmen des Klangraumes gemacht und nachträglich die HRTF durch eine binaurale Dekodierung hinzugefügt.

Dieses Kapitel zeigt einen Ausschnitt aus den derzeit möglichen Aufnahmemethoden zur Wiedergabe eines dreidimensionalen Klangbildes über Kopfhörer. Eine ausführliche Rezension zu aktuellen Mehrkanal 3D Mikrofonarrays, kann in Hyunkook Lee's Paper nachgelesen werden (Lee 2021). In den folgenden beiden Unterkapiteln wird zunächst auf die binauralen Zweikanalaufnahmen eingegangen und deren Vor- und Nachteile in der Anwendung genannt. Anschließend werden die mehrkanalige Mikrofonierungsmethoden zur binauralen Wiedergabe dargestellt.

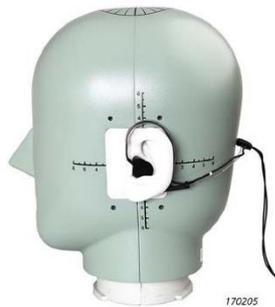
2.2.1 Binaurale Zweikanalaufnahmen

Die einfachste Methode ein Klangbild binaural mit nur zwei Mikrofonen aufzunehmen, ist durch das Einführen von Miniaturmikrofonen am Eingang des Gehörgangs des Menschen, da es nicht möglich ist, mit den Mikrofonen näher ans Trommelfell heran zu kommen (Hong et al. 2017, S. 6). Es funktioniert prinzipiell wie die Kunstkopftechnik, allerdings wird anstelle eines „Dummy Heads“ der eigene Kopf als Trennkörper der beiden Mikrofone genutzt.

Diese Aufnahmemethode funktioniert für kurze Sequenzen gut und führt zu einem optimalen Klangerlebnis für den Menschen, welcher die Mikrofone eingesetzt hatte. Der Nachteil hierbei ist zum einen die Subjektivität der resultierenden binauralen Aufnahme. Die klanglichen Verfärbungen sind durch die Form des Kopfes, der Ohrmuscheln und des Oberkörpers von der Person hörbar, welche auch die Mikrofone während der Aufnahme in den Ohren

hatte. Zudem darf sich die Person mit den Mikrofonen in den Ohren während des Aufnahmeprozesses nicht bewegen oder Geräusche machen. Ansonsten kann es im Nachhinein zu Lokalisationsschwankungen und Störungen in der Aufnahme kommen, weshalb eine komplette Konzertaufnahme über dieses System nicht praxisrelevant ist. Die Anwendung dieser binauralen Aufnahmemethode ist für die praktische Durchführung dieser Arbeit nicht relevant. Dies ist damit zu begründen, dass die Person, welches das Echtzeitsignal abhören soll, sich nicht an der Position der Mikrofone befinden kann.

Fachgemäß wird beispielsweise das Brüel & Kjør 4101 Mikrofonsystem (2017) für die Aufnahmen verwendet und im Consumerbereich sind die Originalkopfmikrofone von Soundman (2002) weit verbreitet, die in den folgenden Abbildungen 5 und 6 einander gegenübergestellt sind. Diese Mikrofone können auch nachträglich in einen künstlich modellierten Kopf eingesetzt werden.



*Abbildung 5: Brüel & Kjør Type 4101-B
Mikrophonkapseln, Trageweise an einem Modell gezeigt
(Brüel & Kjør 2017, S. 2)*



*Abbildung 6: Soundman OKM II Classic/
Studio Elektretmikrofon (Thomann Website)*

Kunstkopfstereofonie

In der kopfbezogenen Stereofonie, auch Kunstkopfstereofonie genannt, sind ebenfalls zwei kleine Mikrofone in den Gehörgang positioniert, jedoch wird hierbei ein der Norm entsprechendes Kopfmodell, im Englischen „Dummy Head“ genannt, verwendet. Dieser orientiert sich in den Materialien wie auch in der Form der Ohrmuschel sowie des Körpers an den akustischen Eigenschaften des menschlichen Körpers und dessen Anthropometrie. Der „Dummy Head“ soll den physischen Durchschnitt der Gesellschaft repräsentieren (Hong et al. 2017, S. 6).

Bei der Verwendung eines künstlichen Kopfes anstelle eines echten Menschen bringt den Vorteil, dass es keine ungewollten Bewegungen oder andere Geräuschstörung während der Aufnahme geben wird.



Abbildung 7: Verschiedene Kunstkopfsysteme, zusammengetragen von Pfanzagl-Cardone (Pfanzagl-Cardone 2020, S. 179)

Der „Durchschnittskopf“, welcher sich nach Mittelwerten aus anthropometrischen Datenbanken richten (Weinzierl 2008, S. 587), ist in Abbildung 7 zu sehen. Es gibt auch Kunstköpfe, welche sich speziell an unisex Dimensionen orientieren (Lindau und Weinzierl 2006). Das letzte Bild in der oberen Abbildung zeigt den Kunstkopf KEMAR (Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research), welcher 1972 von Mahlon D. Burkhard entwickelt wurde (KEMAR-Website 1972). Diese gelten noch immer als Industriestandard und werden deshalb oft als „Referenzohren“ verwendet. Ein Nachteil dieser statischen binauralen Aufnahmemethode ist das Fehlen der Möglichkeit zur nachträglichen Bearbeitung des aufgenommenen Signals. Dies liegt daran, dass die Frequenzverzerrungen durch die Form der Ohrmuscheln und die Reflexionen des Kopfes und Körpers integriert sind und auch eine nachträgliche Bewegungssimulation nur schwer möglich ist. Da der „Dummy Head“ nur ein Durchschnittsmaß darstellt, gibt es einige Menschen, dessen Anthropometrie weiter von diesen

Normeigenschaften abweichen und somit ein eingeschränktes Klangerlebnis haben (Vorländer 2008, S. 91). Deshalb kann es durchaus von Vorteil sein diese kopfbezogenen Eigenschaften, welche dadurch auch individualisiert werden können, erst nachträglich zur Aufnahme hinzuzufügen. Der Kunstkopf KU 100 der Firma Neumann, welcher mit zwei Kondensator-Druckempfängern bestückt ist und als zweites Bild in Abbildung 7 zu sehen ist, wurde in den technischen Versuchsaufbauten für die vorliegende Arbeit ebenfalls verwendet. Genauer hierzu wird in Kapitel 4 beschrieben. Anders als einen echten oder nachgebildeten Kopf für die physische Trennung der Mikrofone zu verwenden, können auch andere Formen als Trennkörper fungieren.

Trennkörper Mikrofonsystem

Das stereofone Trennkörper-Mikrofonsystem orientiert sich am natürlichen Hören und kombiniert durch die physische Trennung der beiden Mikrofonsignale das Intensitäts- und Laufzeitverfahren, wodurch frequenzabhängige Pegeldifferenzen entstehen. Der oben beschriebene Kunstkopf zählt hierbei als Spezialfall der Trennkörpermikrofone (Görne 2007, S. 124). Das hier zu erwähnende Trennkörpermikrofon ist das Kugelflächenmikrofon von Günther Theile, welches aus einer schallharten Kugel mit eingelassenen diffusfeldentzerrten Druckempfängern besteht und für diese Arbeit während des technischen Probeaufbaus im Hörsaal P1 verwendet wurde (siehe Abbildung 8). Der Abstand der beiden bündig eingelassenen Mikrofone ist an den durchschnittlichen Kopfdurchmesser von 20cm angepasst (Görne 2007, S. 125).



Abbildung 8: Kugelflächenmikrofon von Schoeps, hier zu sehen während des technischen Probeaufbaus im Hörsaal P1 der TU Graz (Brühwiler 2021)

Durch die Verwendung von Druckempfängern können vor allem die tieferen Frequenzen gut wieder gegeben werden (Görne 2007, S. 124). Zudem ist der Frequenzgang linear, sowohl beim Schalleintritt von vorne, als auch im Diffusfeld, da durch die bündige Positionierung der Membranen keine Kammfilter entstehen (Gatzmanga 2010, S. 12). Eine ähnliche Form weist auch das ambisonische Mikrofon Zylia auf, welches ebenfalls kugelförmig ist. Allerdings hat das Zylia nicht nur zwei Membrane bündig gespannt, sondern integriert insgesamt

19 digitale Mikrofone. Das Zylia Mikrofon lässt sich dem mehrkanaligen Aufnahmeverfahren zuordnen. Im folgenden Unterkapitel wird das mehrkanalige Aufnahmeverfahren für eine binaurale Wiedergabe über Kopfhörer behandelt.

2.2.2 Binaurale Mehrkanalaufnahmen

Ambisonische Mikrofone höherer Ordnung (engl. Higher Order Ambisonics, kurz HOA), wie das Zylia ZM-1 eines ist, reihen ihre Mikrofonkapseln mit Kugelcharakteristik kugelförmig an (Zotter und Frank 2019, S. 137). Dies wird mit steigender Mikrofonkapselzahl notwendig, da ein koinzidentes Setup, wie es in erster Ordnung noch möglich ist, immer schwerer zu realisieren ist (Nicol 2018, S. 286). Die beiden unteren Abbildungen (siehe Abbildung 9 und 10) zeigen die kugelförmige Anordnung der 19 Mikrofonkapseln bei Zylia und der 32 Mikrofonkapseln des Eigenmike em32 von MH Acoustics.



Abbildung 9: Zylia ZM-1, ambisonisches Mikrofon dritter Ordnung, hier zu sehen während des technischen Aufbaus an der Oper Graz (Frühwirt 2021)



Abbildung 10: Eigenmike® em32, ambisonisches Mikrofon mit 32 Kapseln, bis zu 4. Ordnung (Nicol 2018)

Die beiden Mikrofone unterscheiden sich nicht nur in ihrer höchst möglichen ambisonischen Ordnung, sondern liegen auch preislich weit auseinander. Hierbei gilt Zylia als benutzerfreundlich, da es weniger als ein Zehntel im Vergleich zum Eigenmike kostet, welches für die professionelle Anwendung ausgelegt ist. Durch die 32 Mikrofonkapseln kann das Eigenmike das Klangbild bis zu vierter Ordnung abbilden, wobei Zylia bis zur dritten Ordnung enkodiert werden kann. Mit höherer Ordnung steigt die Richtwirkung, da das Klangbild

durch eine höhere Auflösung detailliert abgebildet werden kann (Nicol 2018, S. 286). Auf Ambisonics und dessen Kodierungsverfahren wird im Verlauf dieses Kapitels noch genauer eingegangen. Im Vergleich zu den runden Mikrofontypen mit mehr als vier Mikrofonkapseln, steht das Mikrofonsystem für ambisonische Aufnahmen erster Ordnung (engl. First Order Ambisonics, kurz FOA), in welchem die vier Mikrofone in einem Tetraeder angeordnet sind.

Ambisonics erster Ordnung

Ambisonics basiert auf den räumlichen Kugelflächenfunktionen (engl. Spherical Harmonics), die jede Schallquelle als lineare Summierung von Richtungskomponenten darstellen lässt (Nicol 2018, S. 286). Die vier Mikrofonkapsel eines FOA Mikrofons setzen sich aus vier Mikrofonen mit Nierencharakteristik zusammen (Geluso 2021, S. 233f). In den unteren drei Abbildung (siehe Abbildung 11-13) werden drei gängige Tetraedermikrofone zur 3D Audio Aufnahme in FOA gezeigt: das SoundField ST450 (siehe Abbildung 11), welches auch bei den Hörversuchen am Opernhaus für diese Arbeit verwendet wurde, das NT-SF1 Mikrophon von RØDE (siehe Abbildung 12), dessen australisches Mutterunternehmen Freedman Electronics Group die Firma „SoundField“ 2016 gekauft haben (Hautz 2016), und das Ambeo VR Mic von der Firma Sennheiser (siehe Abbildung 13).

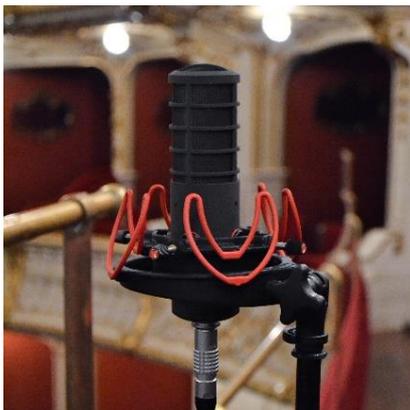


Abbildung 11: SoundField ST450, ambisonisches Mikrophon erster Ordnung, hier zu sehen während des technischen Aufbaus an der Oper Graz (Frühwirt 2021)



Abbildung 12: SoundField by RØDE NT-SF1 (Rode Website)



Abbildung 13: Sennheiser Ambeo VR Mic für 3D Audio Aufnahmen erster Ordnung (Sennheiser Website)

Alle drei Tetraedermikrofone erfassen mit vier annähernd koinzidenten Mikrofonkapseln das Schallfeld auf und werden in die räumlichen Kugelflächenfunktionen konvertiert.

Die untere Illustration (siehe Abbildung 14) zeigt die ersten drei Ordnungen, beginnend mit der 0. Ordnung, welche auch als Monokanal genutzt werden kann, da der Schall von allen Seiten aufgenommen wird.

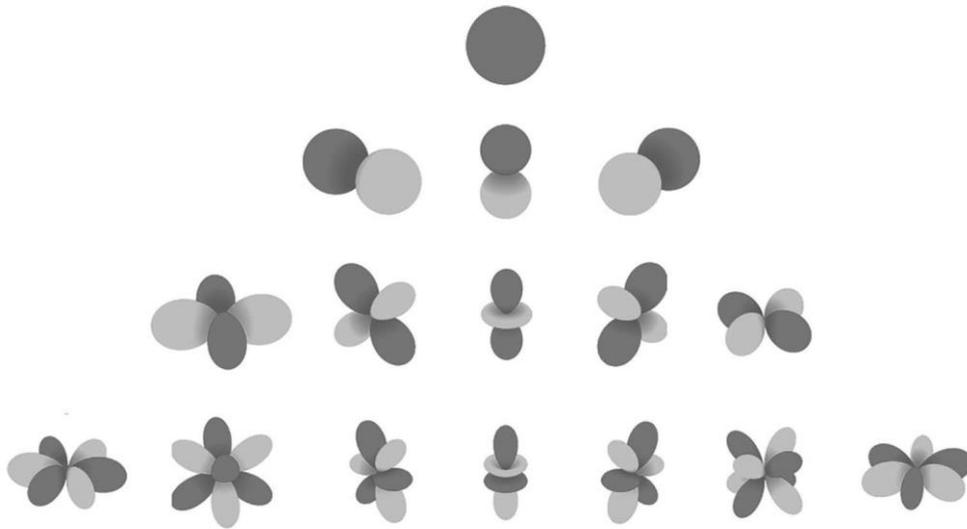


Abbildung 14: Illustration der Kugelflächenfunktionen (Spherical Harmonics) bis zur 3. Ordnung, beginnend mit der ersten Ordnung von oben der Reihe nach unten (Nicol 2018, S. 286)

Die 0. Ordnung kombiniert mit der zweiten Reihe ergibt die 1. Ordnung mit insgesamt vier Kanälen. Fügt man zu dieser Ordnung noch die dritte Reihe hinzu, erhält man die 2. Ordnung mit 9 Kanälen und schlussendlich zeigt die vollständige Abbildung 14 die 3. Ordnung mit 16 Kanälen, welche die Kombination aller vier Reihen ist.

Matrizierung – A zu B Format

Die Rohsignale, die aus den FOA Mikrofonen resultieren, werden als A-Format bezeichnet, welches zunächst in das B-Format enkodiert werden muss, um anschließend über ein Abspielsystem, z.B. ein Lautsprechersystem oder Kopfhörer, dekodiert zu werden (Lee 2021, S. 16). Die A-Format Signale der vier Nierenmikrofone setzen sich aus LF (Left/Front), RF (Right/Front), LB (Left/Back), und RB (Right/Back) zusammen und werden über das folgende Gleichungssystem zum verbreiteten B-Format (d.h. in die Kugelflächenfunktionen) konvertiert (Nicol 2018, S. 279).

$$\begin{aligned}
 W &= LF + RF + LB + RB && (\text{Summe aller Signale, omnidirektional}) \\
 X &= LF - LB + RF - RB && (\text{Vorne/Hinten, Tiefeninformationen}) \\
 Y &= LF + LB - RF - RB && (\text{Links/Recht, horizontal}) \\
 Z &= LF - LB - RF + RB && (\text{Oben/Unten, vertikal})
 \end{aligned}$$

Das B-Format beschreibt die Darstellung des Schallfeldes um das Mikrofon herum durch die Komponenten W, X, Y und Z, welche in der folgenden Illustration mit ihrer Ausrichtung visualisiert sind.

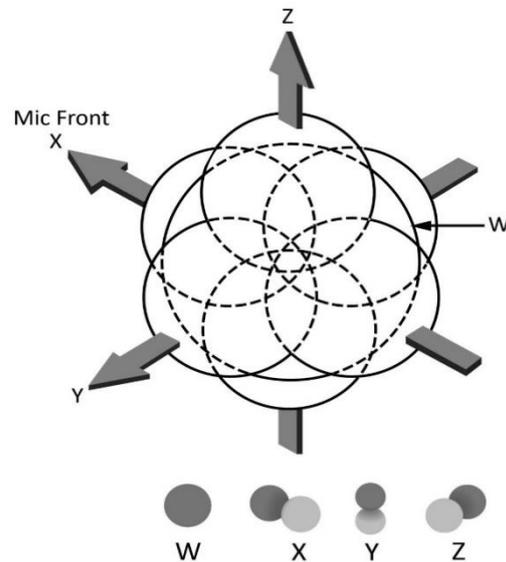


Abbildung 15: Illustration der Komponente W, X, Y, Z eines ambisonischen Mikrofons erster Ordnung mit im Tetraeder angeordneten Mikrofonkapseln (Nicol 2018, S. 281)

Das in Abbildung 11 gezeigte FOA Mikrofon ST 450 von SoundField hat einen eigenen Prozessor, welches die vier A-Format Kanäle direkt in W, X, Y und Z umwandelt, wodurch direkt ein B-Format Signal abgegriffen werden kann (Soundfield). Andere Mikrofonanbieter wie Sennheiser und RØDE stellen für die Matrizierung ihrer A-Format Mikrofonsignale jeweils ein eigenes Plugin zur Verfügung. Mithilfe der Plugins können die Signale ins B-Format konvertiert werden. Zudem ermöglicht das RØDE Plugin eine direkte Dekodierung auf verschiedene Lautsprecher setups, sowie binaural über Kopfhörer. Ebenso ist hiermit eine Konvertierung in die beiden Output-Formate AmbiX und Furse-Malham möglich.

Andere Mikrofonanbieter wie Sennheiser und RØDE stellen für die Matrizierung ihrer A-Format Mikrofonsignale jeweils ein eigenes Plugin zur Verfügung. Mithilfe der Plugins können die Signale ins B-Format konvertiert werden. Zudem ermöglicht das RØDE Plugin eine direkte Dekodierung auf verschiedene Lautsprecher setups, sowie binaural über Kopfhörer. Ebenso ist hiermit eine Konvertierung in die beiden Output-Formate AmbiX und Furse-Malham möglich.

Output-Formate

Das Furse-Malham (kurz FuMa) Format ist ein Ambisonic-Format, auf welchem viele Hard- und Softwaretools basieren, wie es auch das SoundField ST450 als Output-Format hat. Allerdings ist dieses Format hinsichtlich der möglichen Kanalanzahl nur bis zur dritten Ordnung definiert (Nachbar et al. 2011, S. 1). Das AmbiX-Format, was für „Ambisonics exchangeable“ steht, ist der aktuelle Standard für Ambisonics und unterscheidet sich vom FuMa-

Format in der Anordnung und der Lautstärkelevel der Ambisonics-Kanäle. Die Kanalbelegung des AmbiX-Formats wird mit ACN abgekürzt (engl. ambisonic channel order), und reiht ihre vier Kanäle W-Y-Z-X, während FuMa die Reihenfolge W-X-Y-Z nutzt (vgl. IEM, plugin suite). Durch die ebenfalls verschiedene Normalisierung der Lautstärke, kommen die Pegelunterschiede der beiden Formate zustande. AmbiX nutzt die Halbnormalisierung SN3D (engl. semi-normalization), welche sicherstellt, dass beim Kodieren der vier Kanäle der erste Kanal W von keinem anderen Kanal im Level überschritten wird.

Dekodierung auf Abspielsystem

Das konvertierte B-Format Signal kann auf jedes Abspielsystem dekodiert werden und ist nicht an ein vorgegebenes Lautsprecheresetup gebunden, wodurch Aufnahmen mit ambisonischen Mikrofonen flexibel anwendbar sind. Zudem ist hierbei der große Vorteil im Vergleich zu den Kunstkopfaufnahmen, dass man sich verschiedene Ohren in Form von kopfbezogenen Impulsantworten (engl. head-related impulse responses, kurz HRIR) auf das aufgenommene Signal dekodieren kann. Somit hat man die Freiheit individuelle Ohrformen beim binauralen Dekodierungsprozess zu nutzen. Dieser Vorteil wurde im zweiten Hörversuch dieser Arbeit ebenfalls genutzt, worüber genauere Informationen zur Anwendung in Kapitel 4 zu finden sind.

Ziel einer Verwendung der individuellen HRTFs bei der binauralen Dekodierung ist die akustisch identische Reproduktion des Klangereignisses, welches der*die Hörer*in an der Position des Mikrofons im Aufnahmebereich hören würde. Zudem ermöglichen ambisonische Aufnahmen eine Anpassung des Klangbildes bei einer Kopfbewegung, wodurch das Gefühl der Immersion bei dem Hörer oder der Hörerin verstärkt wird (Iijima et al. 2021, S. 2481).

Für das Abbilden des gesamten räumlichen Klangs inklusive eines realistischen Nachhalls, benötige es mehrere Mikrofone im Schallfeld verteilt, so Iijima et al. (2021), welche dann gemeinsam binaural dekodiert werden, um den ganzheitlichen Raumklang zu reproduzieren (Iijima et al. 2021, S. 2481). Sofern der Nachhall des Raumes nicht ebenfalls mit ambisonischen Mikrofonen aufgenommen wurde, können die im Diffusfeld verteilten Mikrofone ambisonisch enkodiert und dann gemeinsam mit dem ambisonischen Hauptmikrofon binaural dekodiert werden. Da Klänge sich in diffusen Schallfelder gleichmäßig über Raum und Zeit verteilen und als Nachhall beim Hörer oder der Hörerin ankommen, kann davon ausgegangen werden, dass der Nachklang positionsunabhängig ist (Frank und Zotter 2016, S. 1). Zudem wird der Eindruck von Weite durch dekorrelierte Signale vermittelt, welche durch große

Mikrofonabstände erreicht werde (Frank und Zotter 2016, S. 1). Somit wäre es von Vorteil das koinzidente FOA Mikrofon durch zusätzliche Raummikrofone beim Abbilden des Nachhalls zu unterstützen. Diese Aufgabentrennung der Mikrofonssysteme in Hauptmikrofon für die Hörposition und Raummikrofone für den Nachhall wurde auch bei den Hörversuchen dieser Arbeit angewendet, mehr dazu in Kapitel 4.

Farina und Tronchin (2013) schreiben in ihrem Buch „3D Sound Characterisation in Theatres Employing Microphone Arrays“, dass das räumliche Klangverhalten eines Theatersaals so komplex sei, dass Mono- oder Stereoimpulsantworten des Raumes nicht ausreichen können, um alle akustischen Probleme festzustellen (Farina und Tronchin 2013, S. 118) Zudem wurde das B-Format für viele Jahre als das optimale Mittel für die Durchführung von 3D-Impulsantwortmessungen in Theater oder Hörsälen gesehen (vgl. Farina und Tronchin 2013, S. 120). Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden unter anderem mehrkanalige Impulsantworten des Opernsaals in Graz aufgenommen, weshalb im folgenden Kapitel die Methoden zur Aufnahme von Raumimpulsantworten genauer erläutert wird.

2.3 Aufnahme von Raumimpulsantworten

Um einen Raum mit seinen Klangeigenschaften im dreidimensionalen Feld abzubilden, gibt es verschiedene Techniken, die mit den oben genannten binauralen Aufnahmemethoden durchgeführt werden können. Diese auditive Abbildung eines Raumes durch das Hörbarmachen numerischer Daten wird „Auralisation“ genannt (Vorländer 2008, S. 103). Beim Durchführen einer Auralisation wird ein Schallfeld mit einer oder mehreren Klangquellen durch Messungen oder Simulationen hörbar gemacht, wodurch das Hörereignis an der gemessenen oder simulierten Position wiedergegeben wird (Kuusinen 2016, S. 4).

Da für diese Arbeit synthetisch simulierte Auralisationen nicht notwendig sind und nur das Abbilden eines bereits existierenden Raumes von Bedeutung ist, wird in diesem Kapitel lediglich auf die akustischen Aufnahmemethoden von Raumimpulsantworten eingegangen. Auch mit einer physikalisch richtigen digitalen Nachbildung eines Raumes, wie man es beispielsweise mit der Simulationssoftware EASE von Ahnert Feistel Media Group (AFMG) realisieren kann, ist es möglich Raumimpulsantworten zu berechnen.

Zur akustischen Messung von Rauminformationen werden Raumimpulsantworten gemessen, wofür es verschiedene Methoden gibt. Die erste aufgeführte Methode ist die schnellste, da sie direkt die Antwort des Raumes auf einen Dirac-Impuls aufnimmt.

Dirac-Impuls

Der Dirac-Impuls oder auch Dirac-Stoß genannt ist ein mathematisch unendlich kurzes und schmales Rechtecksignal mit einer unendlich großen Amplitude, welcher den gesamten Frequenzbereich anregt (Görne 2014, S. 138). Dieser Impuls ist nach seinem Entwickler Paul Dirac (1902-1984) benannt und gilt als „idealer Impuls“. In der Praxis kann man sich der Dirac-Form nur annähern, da kein perfekter Impuls über ein Abspielsystem wiedergegeben werden kann. In Abbildung 16 wird der Dirac Impuls als Anregungssignal $x(t)$ über ein lineares Messsystem wiedergegeben, woraus die Impulsantwort $y(t)$ resultiert.

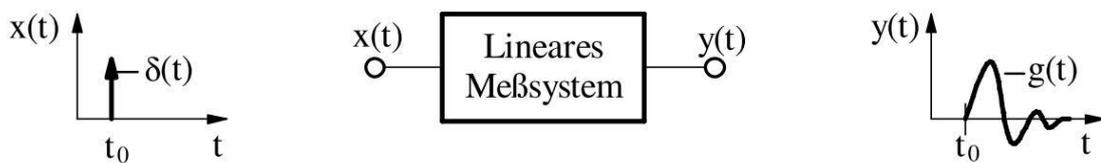


Abbildung 16: Impulsantwort $g(t)$ eines linearen Messsystems, ausgelöst durch einen Dirac-Impuls (Lerch 2007)

Die Verwendung eines Dirac Impulses zur Aufnahme von Raumimpulsantworten ist durch die kurze Anregung störungsanfällig und bildet tiefere Frequenzen schlechter ab, da während des kurzen Impulses nicht genügend Energie für sie aufgebracht werden kann.

Maximalfolge (MLS)

Die Maximalfolge heißt im Englischen „Maximum Length Sequence“ und wird deshalb mit MLS abgekürzt. MLS ist eine pseudo-zufällige Sequenz, die zur Impulsantwortmessung von Räumen verwendet werden kann (Farina 2000, S. 3). Der große Vorteil dieser Messmethode ist der geringe Rechenaufwand durch die Verwendung effizienter Algorithmen für das sequenzielle Generieren der Messwerte und der Kreuzkorrelation (Holters et al. 2009, S. 6). Jedoch ist diese Messmethode empfindlich gegenüber Verzerrungen durch Nichtlinearität und Zeitvarianz, weshalb das abgespielte Anregungssignal synchron zur Aufzeichnung der Systemantwort sein muss. Im besten Fall sollte direkt über denselben Rechner aufgenommen und abgespielt werden (Farina 2000, S. 1).

Time Delay Spectrometry (TDS)

Das TDS-Messverfahren, welches von Richard C. Heyser in den späten 60er Jahren entwickelt wurde (Partlow 2015), wird mit einem linearen Sinus-Sweep durchgeführt. Im späteren Verlauf ist dabei nur eine Multiplikation mit dem Messsignal notwendig, um die Impulsantwort zu erhalten. Jedoch können mit dieser Methode nur recht kurze Impulsantworten aufgenommen werden (Holters et al. 2009, S. 6). Ebenso wie das MLS-Verfahren geht diese Messmethode von einem linearen System aus, wodurch es beim Auftreten von Nichtlinearitäten zu Komplikationen kommen kann (Farina 2000, S. 1).

Logarithmischer Sinus-Sweep

Eine weitere Methode zur Messung der Raumimpulsantwort ist die Verwendung eines logarithmischen Sinus-Sweeps. Als Anregungssignal wird oft ein schneller Sweep, auch bekannt als "Chirp", verwendet (Görne 2014, S. 140). Hierbei steigt die Frequenz des sinusförmigen Signals exponentiell mit der Zeit an. Zudem kann eine Amplitudenmodulation hinzugefügt werden, um die unterschiedliche Energie im Frequenzbereich zu kompensieren (Farina 2000, S. 4). Wenn der Sweep langsam genug abgespielt wird, sodass jede harmonische Verzerrung in eine separate Impulsantwort verpackt wird, ohne sich mit der vorherigen zu überlappen, ist es möglich, diese Verzerrungen auszublenden (Farina 2000, S. 5).

Der exponentielle Sweep bringt in nichtlinearen Systemen nur Vorteile im Vergleich die Verwendung des Dirac Impulses, MLS oder TDS, da es unter anderem die Messungszeit verkürzt und einen größeren Dynamikbereich erlaubt (Holters et al. 2009, S. 6). Diese Methode wird von Novak et al. wie folgt zusammengefasst: Zunächst wird der exponentielle Sinus-Sweep erzeugt, welcher dann als Anregungssignal genutzt wird, um die Antwort des nichtlinearen Systems zu erhalten, woraufhin die Entfaltung der Impulsantwort folgt (Novak et al. 2015, S. 2). Ein weiterer Vorteil dieser Methodik ist die bessere Abbildung und höhere Energie von tieferen Frequenzen und zudem ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis (engl. signal-to-noise ratio), da ein logarithmischer Sweep dieselbe Energie in jedem Terzband hat. Diese Eigenschaft entspricht der menschlichen Wahrnehmung (Holters et al. 2009, S. 6).

Durch die Aufnahme von Raumimpulsantworten kann somit der Raumklang mit dessen Nachhall berechnet und reproduziert werden. Besondere Eigenschaften des Raumklangs werden im nächsten Kapitel erläutert.

2.4 Raumklang und Nachhall

Die periphere Distanz zur Hörereignisquelle ist abhängig von der wahrgenommenen Umgebung, in welcher der Klang gehört wird. Der Klang eines Raumes wird durch die Raumimpulsantwort (engl. room impulse response, kurz RIR) beschrieben, welche sich aus dem Direktschall, den frühen Reflexionen und dem späten Nachhall zusammensetzt (He 2017, S. 13). Zur Simulation der Schallwahrnehmung einer Klangumgebung werden diese RIRs gemessen, um später eine trockene Tonaufnahme in diesem Raum zu reproduzieren (He 2017, S. 13f). In der folgenden Abbildung 17 wird diese Unterteilungen der Impulsantwort schematisch gezeigt.

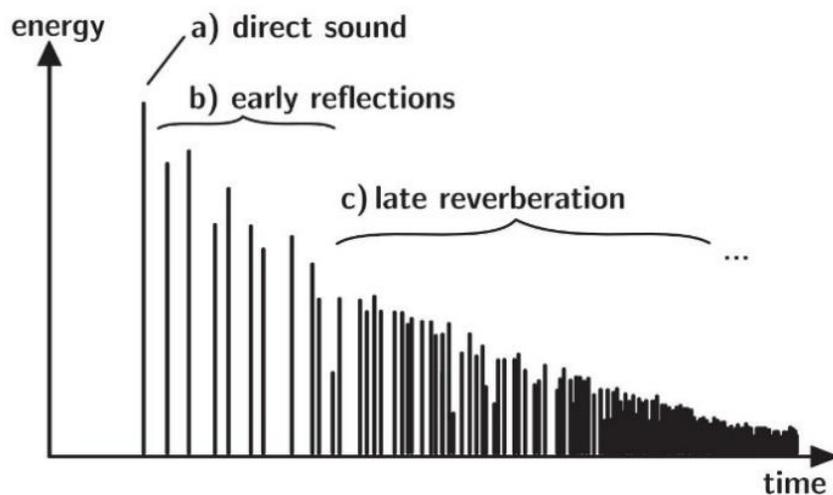


Abbildung 17: Unterteilungen der Signale einer Raumimpulsantwort (Vorländer 2008, S. 93)

Hierbei haben die frühen Reflexionen (engl. early reflections) einen besonderen Einfluss auf den direkten Klangeindruck und die Quellbreite, da sie unter anderem zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit und der Lautstärke beitragen (Vorländer 2008, S. 93). Die späten Reflexionen, die mehr als 50 bis 80 ms nach dem Direktschall eintreffen, schaffen die Immersion, also die Umhüllung der Hörer*innen durch den Nachhall. Der Eindruck des Nachhalls beinhaltet die Komplexität der Raumform und dessen Größe sowie den Anteil an absorbierender und reflektierender Oberflächen (Begault 2000, S. 86). Frühe und späte Reflexionen werden über ihre Dauer, welche als Nachhallzeit RT_{60} gewertet wird, sowie dem Verhältnis von Direktschall und Nachhall (engl. reverberation to direct ratio) beschrieben. Die Nachhallzeit RT_{60} zählt als wichtiger Aspekt der Raumakustik und wird definiert als die Zeit, die erforderlich ist, bis die Energie des reflektierten Schalls 60 dB leiser als der Direktschall ist (Begault 2000, S. 84).

Zudem gibt es Maskierungen, sowohl im spektralen Frequenzbereich als auch im zeitlichen Verlauf, welche zudem den wahrgenommenen Klang beeinflussen (He 2017, S. 14). Wenn zwei Klänge im selben Frequenzbereich sind, wird der lautere Klang den leiseren überdecken. Des Weiteren gilt bei einem kontinuierlichen Sprach- oder Musiksinal, dass wegen der beständigen Energiezufuhr nur die ersten 10 bis 20 dB Abfall im Raum hörbar sind (Begault 2000, S. 87).

Die Wahrnehmung des Raumklangs und Nachhalls wird aber nicht nur durch die schon erwähnten Parameter definiert, sondern unterscheidet sich auch in ihrer absoluten und relativen Distanzwahrnehmung.

Absolute und relative Distanzwahrnehmung

Bei der Unterscheidung von absoluter und relativer Distanzwahrnehmung wird die kognitive Vertrautheit des Schallereignisses mit einbezogen. Die absolute Distanzwahrnehmung beschreibt die Fähigkeit die Entfernung einer Schallquelle nach dem ersten Hören einschätzen zu können, ohne diese zuvor schon einmal gehört zu haben. Im Vergleich dazu wird die relative Distanzwahrnehmung durch Vorkenntnissen zur Schallquelle beeinflusst. Hierbei hat die Hörerin oder der Hörer dieselbe Schallquelle schon auf unterschiedlichen Positionen in derselben Umgebung gehört und nimmt somit die Distanz zur Schallereignisquelle bedingt wahr (Begault 2000, S. 69). Zudem schreibt Begault (2000) in seiner Monographie, dass die Lautstärke eines unbekanntes Klangereignisses eine größere Rolle für die Distanzwahrnehmung spielt als bei einem schon bekannten Klang (2000, S. 70).

Direktschall zu Nachhall

Wenn man sich von einem Klangereignis in einem Raum entfernt und dabei der Direkt-schallpegel sinkt, bleibt der Pegel des Nachhalls konstant. Somit verändert sich bei der Bewegung im Raum das Verhältnis von dem Direktschall des Klangereignisses zu dessen Nachhall im Raum. Je größer der Nachhallanteil im Verhältnis zum Direktschall wird, desto weiter entfernt wirkt das Klangereignis. Der Punkt, an dem das Direkt-Nachhall-Verhältnis (engl. direct-to-reverberant ratio) 1:1 ist, wird als Hallradius (engl. critical distance) beschrieben (Begault 2000, S. 85) Innerhalb des Hallradius dominiert der Direktschall und außerhalb bestimmt der Nachhall den Raumklang.

Für eine realistische akustische Abbildung der bereits genannten psychoakustischen Parameter, bedarf es an sogenannten „Wahrnehmungsknöpfen“ für die Nutzer*innen, damit sie sich z.B. die Klangquelle in einem virtuellen Konzertsaal mehr hervorheben und den Raumanteil dabei zurücknehmen können (vgl. Begault 2000, S. 94).

Zusammengefasst wird die Distanzwahrnehmung durch die Verknüpfung von Intensität, einer kognitiven Vertrautheit zur Schallquelle, das Direkt-Nachhall-Verhältnis und weitere nicht auditive Einflüsse, wie z.B. der visuelle Aspekt, definiert (He 2017, S. 9).

2.5 Akustische Herausforderungen in Opernsälen

Opernhäuser werden heutzutage nicht mehr ausschließlich für Opernvorführungen genutzt, sondern sind oftmals Mehrspartenhäuser. Ein Beispiel hierfür ist die Oper Graz, welche neben der Oper und Operette auch das Ballett und das Musical als Sparten abdeckt. Aus diesem Grund wurde beim Bau der historischen Opernhäuser auf die Optimierung der Akustik mit Fokus auf die Sprachverständlichkeit geachtet. Deshalb haben Opernhäuser einen kürzeren Nachhall als Konzertsäle (Beranek 2004, S. 14). Eines der bekanntesten und auch bedeutendsten Opernhäuser weltweit ist die Mailänder Oper Teatro alla Scala, welche von Giuseppe Piermarini 1778 erbaut wurde (Dickreiter et al. 2014, S. 59). Jedoch beschreibt Dickreiter (2014) in dem Kapitel „Historische Konzertsäle, Opernhäuser und Kirchen“ aus seinem Buch „Handbuch der Tonstudientechnik“, dass La Scala mit seinen 260 Logen in 7 Stockwerken zwar als Besonderheit gilt, jedoch akustisch nicht gleichwertig gelobt wird. Dies bestätigte auch Sal Distefano, Tontechniker im Mailänder Opernhaus, in seinem für diese Masterarbeit geführten Interview, welches dem Anhang als Transkription beigelegt ist. Distefano sagt, dass die Akustik bei Opernvorstellungen an manchen Positionen zwar gut sei, jedoch bei einem Sinfoniekonzert die Reflexionen dem Klang schaden. In einem Opernhaus ist Nachhall weniger wichtig als in einem Konzerthaus (Beranek 2004, S. 568). Die Nachhallzeit in La Scala ist vergleichsweise kurz (1.2s), wodurch es Komponisten zur Entstehungszeit ermöglicht wurde schnelle Textpassagen in ihre Werke zu integrieren, ohne um die Verständlichkeit ihres Librettos zu bangen (Beranek 2004, S. 15). Da in der La Scala ebenso wie in der Oper Graz nicht nur Opern aufgeführt werden, ist die Akustik somit nicht optimal.

Von den Wiener Architekten Ferdinand Fellner und Hermann Helmer wurden im 19. Jahrhundert ca. 50 Gebäude im neobarocken Stil in Europa erbaut (Dickreiter et al. 2014, S. 59). Neben der Wiener Staatsoper gehört auch die Oper Graz und das Opernhaus Zürich zu ihren Werken, welche sich zwar in ihrer Größe unterscheiden, jedoch demselben neobarocken Bautyp entspringen. Leo Beranek (2004) hat für seine Monographie „Concert Halls and Opera Houses“ verschiedene Opernhäuser und Konzertsäle besucht und sie in ihren klanglichen Merkmalen beschrieben und miteinander verglichen. In der Wiener Staatsoper saß er an verschiedenen Plätzen, wobei er auch den Klang für die Orchestermusiker im Orchestergraben hörte. Hierbei konnte er keine besonderen Missstände feststellen, was er mit der über dem Orchestergraben angebrachten Akustikelement an der Decke begründet. Diese „zusätzliche Decke“ über dem Graben ist so geformt, dass es die Stimmen der Sänger*innen auf den Boden reflektiert und somit auch für das Orchester hörbar macht und umgekehrt das Orchester auf die Bühne reflektiert (Beranek 2004, S. 567). Dies bestätigt auch die folgende Abbildung aus Beraneks’ Buch “Concert Halls and Opera Houses” (2004), welche die Wertung des Klanges verschiedener Opernhäuser von Dirigenten zeigt, wobei die Staatsoper Wien unter den Top 10 eingeordnet wurde.

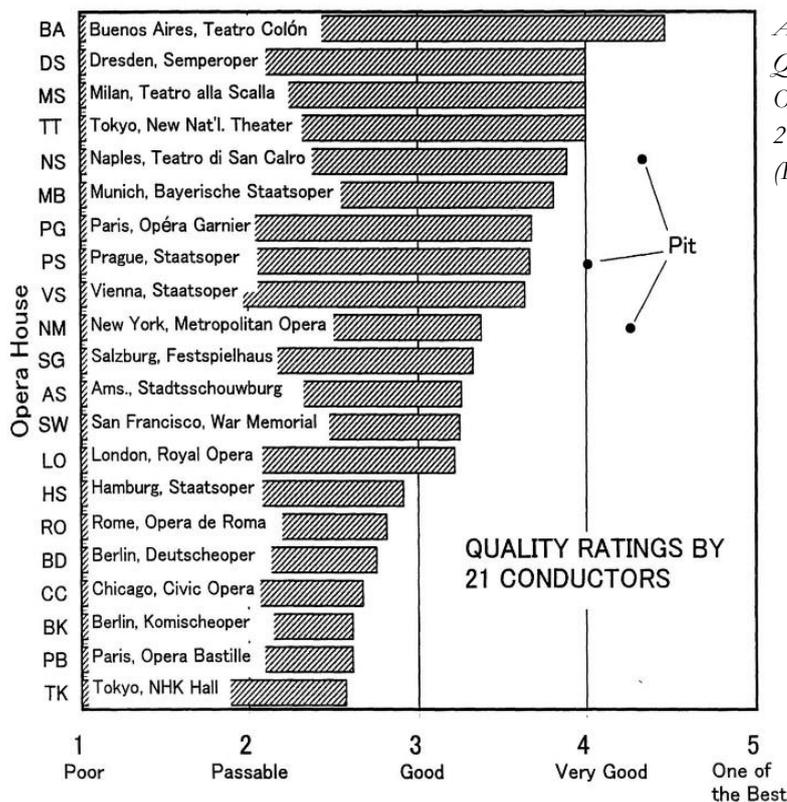


Abbildung 18: Akustisches Qualitätsranking von 21 Opernhäusern, gewertet von 21 Dirigenten (Beranek 2004)

Für die Tonschaffenden eines Opernhauses ist jedoch nicht nur die Hörsituation des*der Dirigenten*Dirigentin wichtig, sondern eine weit größere Anzahl an Hörpositionen im Auditorium von Belangen.

Besondere Herausforderungen für Tonschaffenden

Diese akustischen Herausforderungen entstehen für die Tonschaffenden hauptsächlich durch die ungünstige Positionierung ihrer Hörposition. Wie schon in der Einleitung deutlich wurde, ist dies nicht nur in der Oper Graz der Fall, sondern in vielen Opernhäusern weltweit. Oleg Surgutschow, Tonmeister am Opernhaus in Zürich, berichtet in seinem Interview zu diesem Masterarbeitsthema, dass oftmals schlechte Hörplätze zu Herausforderungen bei der Arbeit von Tonschaffenden führen kann (Surgutschow 20.04.2021, S. 106 Anhang). Surgutschow, Distefano und Komp, arbeiten in einer ähnlichen Klangumgebung. Ihre Tonregien befinden sich in einem kastenförmigen Raum mittig unter dem Balkon, mit der Option einer fahrbaren Glasscheibe mit Sicht auf die Bühne.

Der Klang in der Tonregie wird hauptsächlich vom Direktschall der Bühne bestimmt, jedoch wird nur begrenzte Rauminformation übermittelt, so Surgutschow. Auch Distefano erwähnt, dass es schwer sei, einen guten Livesound in der Tonregie, welche er während des Interviews „Box“ nennt, zu kreieren. In La Scala hat er zwar die Möglichkeit aus „der Box“³ in den Zuschauerraum zu gehen, um den echten Klang zu hören, muss dann aber wieder zurück in die „little box“. Komp erzählt in seinem Interview, dass es ohne das Feedback der Tonkollegen, welche sich während der Proben und gegebenenfalls auch während der Vorstellungen im Zuschauerraum aufhalten, sehr schwierig sei den Klang ausschließlich von der Tonregie aus zu beurteilen und danach gehend einzustellen. In der Tonregie stimme die Balance von den Stimmen zu Orchester nicht mit dem Klang im Zuschauerraum überein, so Komp (08.06.2021, S. 127 Anhang).

Bei tonintensiven Stücken darf das Tonteam aller drei Opernhäusern ein mobiles Mischpult im Parterre, also im Zuschauerraum, aufbauen, um den Raumklang besser beurteilen zu können. Jedoch ist dies für die Tonschaffenden der Oper Graz und La Scala nur während der Probezeit möglich. Danach muss der Platz wieder für das Publikum freigegeben werden und der Raumklang mit den Balancen von Bühne zu Orchester von Tonschaffenden festgestellt werden. Dies hilft den Tonleuten aber nur begrenzt für die Vorstellungen, da der Raumklang

³ Mit Box ist hierbei die kleine Tonregie gemeint

sich nochmals verändert, sobald der Opernsaal mit Publikum gefüllt ist. Dieser Unterschied kann beispielsweise durch die Beschaffenheit der Sitze minimiert werden (Beranek 2004, S. 572). Dennoch können die Schallabsorptionen durch die menschlichen Körper nicht vollständig simuliert werden.

Diesen Fokus zur Bühne und dessen richtige Balancen zum Orchesterklang im Raum zu erreichen, ist der Ansatz dieser Arbeit zur Lösung der beschriebenen Problematik. Im folgenden Kapitel wird auf die Besonderheiten und Merkmale von Fokus und Balancen in 3D Audio genauer eingegangen.

Kapitel 3

Fokus und Balance von
3D Audio in Echtzeit

3. Fokus und Balancen von 3D Audio in Echtzeit

„Man (lernt es) einzuschätzen, wie muss zum Beispiel die Balance bei mir in der Tonregie klingen, damit es im Zuschauerraum passt.“ – *Christian Komp, Oper Graz*

Die Aufgabe der Tonmischer*innen ist es den bestmöglichen Klang für die Zuschauer zu kreieren, wobei an einem Opernhaus hierfür vor allem die Balance zwischen dem Fokus auf die Bühne, den Instrumenten aus dem Orchestergraben und der zusätzlich verstärkten Signale wichtig. Die vollständige Kontrolle über diese Balancen im Auditorium kann der*die Tonmischer*in durch die direkte Mikrofonierung aller Signale erreichen, ähnlich einer Film- oder CD-Produktion. Eine komplette Mikrofonierung wird im Vorstellungsbetrieb an Opern- und Theaterhäusern selten benötigt und wegen zu viel zusätzlichen Mehraufwand für die Tonabteilung nur selten umgesetzt. Da die Tonschaffenden sich während einer Vorstellung nicht im Zuschauerraum befinden, sondern von der Tonregie aus den Ton für das Publikum mischen, muss das Einschätzen der richtigen Balancen erlernt werden.

Aus diesem Grund wird für die Umsetzung dieser Arbeit nach einer Methode gesucht, welche die gegebenen Balancen zwischen Orchestergraben und Bühnengeschehen in Echtzeit möglichst realitätsnah und ohne zusätzliche Aufwand für die Tonschaffenden in die Tonregie übertragen kann. Hierfür wird in diesem Kapitel der aktuelle Stand von 3D Audioanwendungen in Form von Ausschnitten aus der Praxis aufgeführt. Kapitel 3.1 thematisiert Auralisationen von Konzert- und Opernsälen, worauf 3D Audioanwendungen an Opern- und Theaterhäusern in Kapitel 3.2 folgen. Abschließend werden ausgewählte signalabhängige und signalunabhängige Ambisonics Plugins zur 3D Audioverarbeitung in Kapitel 3.3 besprochen.

3.1 Auralisation von Konzert- und Opernsälen

Die Auralisation von Konzert- und Opernsälen wird genutzt, um den dortigen Raumklang an verschiedenen Positionen im Saal nachbilden zu können. Dieser kann entweder durch die Aufnahme von Raumimpulsantworten im Saal realisiert werden oder durch physikalisch richtige Raumsimulationen. Der Höreindruck in einem Opernsaal unterscheidet sich nicht auf allen Sitzplätzen, jedoch können erst ab einem Sitzabstand von mehr als zwei Sitzen hörbare

Unterschiede festgestellt werden (Vorländer 2008, S. 100). Es gibt nur wenig aktuelle wissenschaftliche Dokumentationen, die sich speziell mit der Anwendung von Echtzeitsimulationen von Hörplätzen in Opernsälen befassen, weshalb in diesem Kapitel ähnliche Referenzen herangezogen werden.

In 2006 wurde ein Sitzplatz im Konzertsaal des Sydney Opera House (SOH) binaural auralisiert, was hier als älteres Referenzbeispiel für eine Auralisation in einem Opernhaus aufgeführt wird (Li et al. 2006). Zwar liegt dieser Forschungsversuch schon mehr als 15 Jahre zurück, jedoch resultieren daraus Erkenntnisse, die auch für zukünftige Projekte relevant sind. Li et al. von der Universität Sydney nahmen Head-Related Impulse Responses (HRIRs) von sieben Testpersonen mit Mikrofonen in beiden Ohren und einen Kunstkopf an derselben Hörposition im Auditorium auf, wobei das Anregungssignal in Form eines 5s langen logarithmischen Sweeps aus sechs auf der Bühne verteilten Lautsprechern abgespielt wurde (Li et al. 2006, S. 1). Nach der Aufnahme der Impulsantworten, wurden reflexionsarme Sprach- und Musikaufnahmen als Hörbeispiele zur Faltung für die folgenden Hörversuche zusammengetragen. Durch die verschiedenen Lautsprecherpositionen auf der Bühne, ist durch das Ändern der Lautstärke der Faltungssignale eine spätere Anpassung von Fokus und Balancen im Raum möglich. Die Ergebnisse dieser Hörversuche zeigen, dass die Wahrnehmung von komplexen orchestralen Werken, die Unterscheidung zwischen den verschiedenen HRIRs erschwert (Li et al. 2006, S. 3). Hierbei wurde die 5. Sinfonie von Dimitri Schostakowitsch gewählt. Bei Faltungssignalen wie ‚weißes Rauschen‘ oder perkussiven Klängen wie dem Xylophon war die Quote der richtigen Zuordnungen fast bei 100% (Li et al. 2006, S. 3). In ihrem Paper heben die Autoren hervor, dass sich ein Klangerlebnis von jedem Ohrenpaar hörbar unterscheidet, wodurch die Verwendung von individuellen HRIRs bei Auralisationen von Vorteil seien (Li et al. 2006, S. 4).

Die Wahrnehmung von klanglichen Unterscheidungsmerkmalen verschiedener Hörpositionen in einem auralisiert wiedergegebenen Raum, wie z.B. der oben genannte Konzertsaal am SOH, kann durch Training verbessert werden, was am Effektivsten inklusive visuellem Feedback funktioniert (Klein et al. 2017). Forscher*innen der Technischen Universität Ilmenau und des Fraunhofer IDMT nahmen für dieses Training Binaurale Raum Impulsantworten (BRIR) mit dem KEMAR Kunstkopf an fünf verschiedenen Positionen in einem Raum auf (Klein et al. 2017, S. 3).

Hierbei handelt es sich nicht um einen Konzert- oder Opernsaal, weshalb auf dieses Anwendungsbeispiel nur kurz eingegangen wird. Sie bestätigen in ihrem Paper die Verbesserung der akustischen Hörpositionszuordnung durch Übung (Klein et al. 2017, S. 6). Zudem ziehen Klein et al. die Erkenntnis, dass mehr klangliche Unterschiede erkannt werden, wenn der Raum für den/die Hörer*in vertraut ist (Klein et al. 2017, S. 6), wie es beispielsweise für Musiker*innen und Tonschaffenden an Opernhäusern der Fall ist.

Im Vergleich zu den Hörversuchen am SOH, wurden in der noch laufenden Forschung zur Akustik des Kulturerbes ‚Notre-Dame‘ eine Auralisation in Echtzeit durchgeführt. Notre-Dame ist zwar eine Kathedrale und kein Theater- oder Opernhaus, jedoch ist es ebenfalls ein Veranstaltungsort für Konzerte und ist wegen der Echtzeitanwendung ein interessantes aktuelles Beispiel. Zudem ist das bekannte Pariser Gebäude für seine besondere Akustik bekannt, welche zumindest vor dem Brand im April 2019 einen Nachhall von sechs Sekunden hatte (Podbregar 2019). Die akustischen Eigenschaften des Weltkulturerbes wurden bereits vor dem Brand 2019 von Brian F.G. Katz analysiert und die ‚akustische Signatur‘ von Notre-Dame in einem geometrisch-akustischen Raummodell festgehalten (Podbregar 2019). Dieses akustische Modell machen sich derzeit Eley et al. von der Sorbonne Universität zu Nutze, um einen vierköpfigen Chor in Echtzeit im virtuellen Notre-Dame Klang singen zu lassen. Die vorläufigen Ergebnisse dieses Projekts wurden im Rahmen der „Immersive and 3D Audio“ (I3DA) Konferenz im September 2021 veröffentlicht (Eley et al. 2021). Die für dieses Projekt ausgewählten Musiker*innen wurden wegen ihrer musikalischen Erfahrung in der Kathedrale selektiert, da sie den Raumklang der Echtzeit-Auralisation im Vergleich zu ihren Erfahrungen evaluieren sollen (Eley et al. 2021, S. 2). Die Balancen konnten die Musiker*innen selbst an ihre Raumerinnerung anpassen, variierte aber nur leicht von der vorgegebenen Einstellung.

Der Nachhall der Kathedrale wurde durch das oben erwähnte akustische Raummodell mit Raumimpulsantworten in Ambisonics 3. Ordnung generiert, in Kombination mit einem zusätzlichen Hallplugin für späte Reflexionen (Eley et al. 2021, S. 2). Die Durchführung des Hörversuchs bestand darin die vier Sänger*innen ihren eigenen Gesang als Chor in der virtuellen Notre-Dame Kathedrale binaural über Kopfhörer zu hören, während sie in einem schalltoten Raum gemeinsam singen (Eley et al. 2021, S. 1). Hierfür wurden ebenfalls die Bewegungen der Sänger*innen erfasst, was sich jedoch als weniger effektiv herausstellte um die Immersion zu fördern, weshalb es für zukünftige Versuche nicht mehr eingesetzt wird

(Eley et al. 2021, S. 5). Somit wurde im Rahmen dieses Projekts von Eley et al. eine Auralsation mit hörbarem Direktsignal in Echtzeit umgesetzt, während sich die Musiker*innen nicht in dem selbigen Raum befanden, woraus als plausibel bewertete Klangabbildungen resultierten. Ebenso wurde eine Echtzeitsimulation eines Konzertsaals als virtuelle Probemöglichkeit für Musiker*innen von den Forschern Frank, Windtner und Brandner des IEMs entwickelt, welche ebenso nahezu latenzfrei funktioniert (Frank et al. 2021).

Einen anderen Ansatz verfolgen die Studierenden Faymann et al. von der Kunstuniversität Graz mit der Anwendung eines ‚Akustischen Vorhangs‘ für eine dreidimensionale Übertragung des Bühnengeschehens, beispielsweise eines Theater- oder Opernhauses (Faymann et al. 29.10.19). Der ‚Akustische Vorhang‘ fokussiert sich auf die räumliche Ortbarkeit zur Verbesserung der Lokalisation im Raum im Vergleich zu einem FOA Mikrofon, welche durch die Nähe zu den Schallereignissen auf der Bühne mit einer nahen Mikrofonierungsmethode am Bühnenrand umgesetzt wird (Faymann et al. 29.10.19, S. 3). Hierfür führten die Studierenden einen Testaufbau durch, in welchem sie die Impulsantworten von 16 Lautsprecher-signalen kommend von der angedachten Bühne mit 16 Kugelmikrofone und 8 Nierenmikrofonen am Bühnenrand aufnahmen. Im Vergleich dazu positionierten sie zwei SoundField SPS200 im Zuschauerraum und nahmen dessen Impulsantworten ebenfalls mit einem 10s langen Sweep als Anregungssignal der Lautsprecher auf (Faymann et al. 29.10.19, S. 5). Als Testsignale für die Faltung wurden über dieses beschriebene Mikrofonsetup das perkussive Instrument Cajon und ein E-Bass aufgenommen.

Die Ergebnisse des untersuchten Ansatzes bekräftigen, dass eine Aufnahme von möglichst reflexionsarmen Signalen von der Bühne den Fokus auf die Bühne ähnlich gut repräsentieren, wie es das FOA Mikrofon im Auditorium aufnimmt. Des Weiteren kann die Richtungs-schärfung durch eine diskrete Richtungs-zuordnung der omnidirektionalen Impulsantworten erreicht werden (Zaunschirm et al. 2018, S. 2). Somit könnte der ‚akustische Vorhang‘ bei Bühnensituationen auch in Echtzeit eingesetzt werden, wenn ein Positionieren eines ambisonischen Mikrofons im Zuschauerraum nicht möglich ist, aber dann ohne mögliche Umformung auf 3. Ordnung.

Im laufenden Opern- oder Theaterbetrieb eines Repertoire Hauses, wie es beispielsweise die Opernhäuser in Graz und Zürich sind, wäre eine solche Anwendung nur ein zusätzlicher Arbeitsfaktor, da der ‚akustische Vorhang‘ nicht fix an den gewünschten Positionen am Büh-

nenrand platziert werden könnte. Das liegt zum einen an den verschiedenen Bühnenaufbauten der wechselnden Stücke und die daraus resultierende Modifikation der Bühne. Außerdem verhindert der Eiserne Vorhang eine Installation von Mikrofonen am Bühnenrand, weshalb es in der Praxis einen ständigen Auf- und Abbau von zusätzlichen Mikrofonen bedeuten würde. Eine fixe Installation eines FOA Mikrofons im Auditorium ist daher eine geeignetere Möglichkeit. Allerdings verliert man hierbei den Vorteil der direkteren und somit reflexionsärmeren Mikrofonierung des Bühnensignals.

Es gibt bereits 3D Audio Methoden, welche an verschiedenen Theater- und Opernhäuser getestet und umgesetzt wurden, welche durch ihre Anwendung die Steuerung der Balancen im Zuschauerraum erleichtern. Auf diese Anwendungsbeispiele wird im folgenden Unterkapitel genauer eingegangen.

3.2 3D Audio an Theater- und Opernhäusern

„With the move to (...) more immersive sound systems, perhaps this central position is no longer the one optimum spot” – *Sarah Black, National Theatre London*

Das Interesse an der Anwendung von 3D Audio Techniken ist vor allem für Theaterproduktionen interessant, da sie eine genauere Abbildung und Lokalisierung von Geräuschen als Teil des Storytellings ermöglichen, wie es Sarah Black aus ihrer Erfahrung am Nationaltheater in London erzählt (Black 27.05.2021, S. 120 Anhang). Da es noch wenige wissenschaftliche Arbeiten über die Verwendung von 3D Audio Technologien an Theater- und Opernhäuser gibt, wurden die Tonschaffenden ebenfalls zu ihren Erfahrungen mit immersiven Techniken befragt.

Die 3D Audio Anwendungen an Theater- und Opernhäuser können in zwei Kategorien unterteilt werden. Zum einen die Installation von Mehrkanalsystemen zur räumlichen Umhüllung im Saal und zum anderen die Immersion über Kopfhörer an die Zuschauer wiederzugeben. Somit wird in diesem Kapitel ein Einblick über verschiedene immersive Lautsprechersysteme gegeben, welche nicht nur die exakte Verteilung von Klängen ermöglicht, sondern auch die Möglichkeit bietet die Raumakustik zu verändern.

3.2.1 Immersive Lautsprechersysteme

Immersive Lautsprechersysteme wie IOSONO, VIVACE, Soundscape, SoundMapp und Spatial Sound Wave (SSW) bieten eine zusätzliche Methode zur Klangverteilung im Zuschauerraum, wodurch es den Tonschaffenden ermöglicht wird die Balancen im Opern- und Theatersaal besser kontrollieren zu können und gegebenenfalls auch die Nachhallzeit dem Stück anzupassen.

Es folgen nun Berichtsausschnitte aus durchgeführten Interviews mit Sarah Back, die über die Installationen des weltbekannten Opernhauses in Sydney und im Nationaltheater in London erzählt, und mit Oleg Surgutschow, der über ihr 3D Audio System in der Oper Zürich berichtet. Black erwähnt hierbei Produktionen, die sie über die oben genannten immersiven System durchgeführt hatte, weshalb diese kurz beschrieben werden. „Demokratie für die Zuhörer“ – mit ihrem Slogan möchte die Firma d&b, welche das immersive Lautsprechersystem Soundscape entwickelt hatten, den Sinn hinter der Verwendung ihres Systems hervorheben. Sie möchten ‚für alle Theaterbesucher das bestmögliche Erlebnis bieten, unabhängig von ihrem Sitzplatz‘, wie Black es in Worte fasste (vgl. Black 27.05.2021, S. 119 Anhang).

Soundscape von d&b

Das Soundscape-System ist bereits im Lyttleton Theatre des Nationaltheaters in London installiert und wird derzeit ebenfalls für das Dorfman Theatre getestet, so Black (Black 27.05.2021, S. 120 Anhang). Der Leiter der Tonabteilung Dominic Bilkey nutze Soundscapes schon für viele Vorstellungen zur Spatialisierung von Klangereignissen, wie er es auch als Sound Designer in der Lehmann Triologie 2018 tat, berichtete Black. Über diese Produktion berichtet auch die Firma d&b selbst in ihrem Artikel „d&b Soundscape enhances storytelling for The Lehman Trilogy“, welchen man auf ihrer Website finden kann (2018). Hierin wird besonders der Bezug des Publikums zum gesprochenen Wort hervorgehoben. Trotz gelegentliche Positionierung einer Glaswand zwischen Publikum und Schauspieler, bemerken die Zuschauer keinen markanten akustischen Unterschied. Diese Illusion kann durch ihr mehrkanaliges Lautsprechersystem erreicht werden, womit auch die Aufmerksamkeit des Publikums gelenkt werden kann. Die Entwickler des d&b Soundscape Systems sind vom Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie (IDMT), welche ebenfalls IOSONO und Spatial Sound Wave (SSW) entwickelten, erzählte Oleg Surgutschow in seinem Interview (Surgutschow 20.04.2021, S. 115 Anhang).

IOSONO von Fraunhofer IDMT

2012 wurde im Joan Sutherland Theatre (JST) des Sydney Opera Houses (SOH) die Produktion „Die tote Stadt“ mithilfe von IOSONO umgesetzt, da diese für das Stück benötigte Orchesterbesetzung zu groß für den Orchestergraben war und deshalb in einer anderen Räumlichkeit des Hauses untergebracht werden musste (Black 27.05.2021, S. 120 Anhang). Die Aufgabe für das benötigte Soundsystem bestand darin, ein reales Klangfeld zu erzeugen, welches das Verhältnis zwischen den unverstärkten Sänger*innen und dem Orchester beibehält (d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. 2012). Aus diesem Grund wurde das IOSONO System mit d&b Lautsprecher kombiniert, wobei der entwickelte räumliche Algorithmus zum Platzieren von virtuellen Schallquellen im Raum konzipiert wurde. Dadurch kann es von allen Besuchern im Zuschauerraum einheitlich wahrgenommen werden (d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. 2012). Der Sound Designer von Korngolds Stück „Die tote Stadt“ und Leiter der Aufnahme- und Streamingabteilung des SOH Tony David-Cray berichtet in d&b’s Artikel, dass die Position der Sänger*innen auf der Bühne bereits bei ersten Tests des Systems das Orchester aus dem Orchestergraben wahrnimmt, obwohl es nur über das IOSONO System wiedergegeben wird (d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. 2012). Ebenso erwähnte David –Cray, dass der Orchesterklang ebenso natürlich im Zuschauerraum zu vernehmen war. Der detaillierte Vorgang der Produktion kann in d&b’s Artikel über das Projekt „A whole new world“⁴ nachgelesen werden. Sarah Black merkt hierbei noch an, dass ihr Mikrofonierungsplan des Orchesters für die Wiedergabe im Graben in diesem Artikel zu sehen ist (Black 27.05.2021, S. 119 Anhang). Für eine ähnliche Anwendung zur Auslagerung des Orchesters in einen anderen Saal, nutzte die Tonabteilung der Oper Zürich das Spatial Sound Wave System von Fraunhofer (Wisse 2021, S. 33).

Spatial Sound Wave von Fraunhofer

Während der Corona Pandemie 2021, als alle Kulturhäuser schließen mussten, wurden einige Stücke, für das Publikum aus dem Opernhaus in Zürich live gestreamt. Bei einem Abstand von 2 Metern zwischen den Musiker*innen, konnte das Orchester jedoch nicht im Orchestergraben spielen, da dort nicht mehr alle Musiker*innen Platz fanden. Deshalb wurde im Orchestergraben ein Lautsprecherorchester bestehend aus zehn Lautsprechern aufgebaut, welches die Signale des Orchesters aus einem anderen Saal übertragen sollte (Wisse 2021, S.

⁴ Link zum Artikel: <https://www.dbaudio.com/global/en/applications/theatre-and-opera/a-whole-new-world/>

32). Natürlich waren es mehr Instrumente als zehn Lautsprecher einzeln übertragen könnten, erzählte der Tonmeister des Hauses Oleg Surgutschow in seinem Interview (20.04.2021, S. 111 Anhang). Aus diesem Grund übertrug er die Signale des Orchesters gruppiert auf die Lautsprecher. Jedoch klangen die Grabenlautsprecher allein unnatürlich, weshalb ihr aus insgesamt 66 Lautsprechern bestehendes SSW-System hinzugezogen wurde (Surgutschow 20.04.2021, S. 111 Anhang). Da SSW die Orchestersignale als Reflexionen auf alle Lautsprecher verhältnismäßig verteilt, erreichte der Orchesterklang eine natürliche Umhüllung im Raum und lasse zudem eine Lokalisation des Orchesters im Graben zu, so Surgutschow (20.04.2021, S. 111 Anhang). Somit ist eine Relokalisation des Orchesters mit Echtzeitwiedergabe im Orchestergraben sowohl im Opernhaus in Sydney als auch in Zürich möglich, unter Verwendung von zwei verschiedenen Systemen derselben Entwickler von Fraunhofer IDMT. Oleg Surgutschow, Chef-Tonmeister des Opernhauses in Zürich, steht in enger Zusammenarbeit mit den Entwicklern von Fraunhofer IDMT, um ihr System an der Oper Zürich kontinuierlich zu verbessern.

Durch SSW können dreidimensionale Klangwelten kreiert werden, welche über das Verfahren der Wellenfeldsynthese ihre Klangereignisse im Raum verteilt, was auf Fraunhofers Website in dem Presseartikel „3D-Sound für das Opernhaus Zürich“ von Forschung Kompakt erklärt wird (Fraunhofer Audiotechnologie 28.04.2016). Surgutschow berichtete, dass ihnen mit SSW die Möglichkeit geboten wird Einfluss auf die Raumakustik des Opernsaals zu nehmen (Surgutschow 20.04.2021, S. 107 Anhang). Da die Oper Zürich, ebenso wie die Opernhäuser in Graz und Wien, als Sprechtheater konstruiert wurden, ist die Nachhallzeit für manchen Opern zu kurz, was durch SSW korrigiert werden kann (Fraunhofer Audiotechnologie 28.04.2016). Demzufolge kann SSW als Effekt zum Positionieren von verschiedener vorgefertigter Klänge im Raum und als raumakustisches Instrument zur Veränderung der Raumakustik verwendet werden (vgl. Surgutschow 20.04.2021, S. 112 Anhang).

VIVACE von Müller BBM

Vor der Renovierung des JSTs 2017 in Sydney arbeitete Sarah Black an einem elektroakustischen Versuchssystem mit, welches VIVACE als Prozessor nutzte und insgesamt 96 Signalausgänge ermöglichte (Black 27.05.2021, S. 120 Anhang). VIVACE ist ein innovatives elektronisches Raumakustiksystem der Ingenieursgesellschaft Müller BBM, welche unter anderem im Bereich Akustik tätig sind. Die Testung, die Black während ihrer Zeit im SOH miterlebte, wurde nach der Renovierung tatsächlich umgesetzt und wurde mit einem verbesserten Raumklang am 10.02.2018 wiedereröffnet. Durch den Umbau des Orchestergrabens und die

Installation von VIVACE, wurde im Zuschauerraum des JSTs ein ausgewogener und lebendiger Orchester- und Raumklang erzeugt (Müller BBM 2018, S. 3). Detaillierte Informationen über VIVACE sind auf der Website von Müller-BBM⁵ zu finden.

Spacemap Go von Meyer Sound

Das letzte immersive Lautsprechersystem, welches im Rahmen dieser Arbeit erwähnt wird, ist Spacemap Go der Firma Meyer Sound, Hersteller von professionellen Lautsprechersystemen. Im Olivier Theatre, welches mit 1150 Zuschauerplätzen das größte Theater des Nationalmuseums in London ist, wurde zur Zeit der Kontaktaufnahme mit Sarah Black das Spacemap Lautsprechersystem von Meyer Sound getestet (Black 27.05.2021, S. 120 Anhang). Spacemap Go ist ein räumliches Mixing- und Sound Design-Tool, welche das Galileo GALAXY Netzwerk von Meyer Sound in einer iPad Applikation nutzt. Diese App bietet eine dreidimensionale Klangsteuerung über eine zweidimensionale Benutzeroberfläche, welche die Klangereignisse zwischen den Lautsprechern auf verschiedenen physikalischen Ebenen verteilen kann (Meyer Sound 2020). Genauere Informationen zu diesem immersiven Lautsprechersystem können ebenfalls ihrer Website entnommen werden. Derzeit liegen noch keine aktuellen Berichte darüber vor, ob dieses System in diesem Theatersaal realisiert wurde oder noch in der Planung und Testung steckt. Im Nationaltheater in London wurden neben der immersiven Lautsprechersysteme auch die 3D Audio Produktion von Stücken über Kopfhörer durchgeführt, auf welche im folgenden Kapitel genauer eingegangen wird.

3.2.2 Binaurale Produktionen

„ (Theatre) always had that element of imaging and locating sounds specific to actions/objects as part of the storytelling” – *Sarah Black, National Theatre London*

Wie es das Zitat aus Sarah Black’s Befragung zeigt (27.05.2021, S. 120 Anhang), sind Theaterhäuser weniger an traditionelle Abspielsysteme gebunden als es die meisten Opernhäuser und können dadurch immersive Systeme vermehrt zur kreativen Effektanwendung einsetzen. Binaurale Produktionen bieten den Tonschaffenden zudem die Möglichkeit die Tonmi-

⁵ Müller BBM Website - <https://vivace.mbbm-aso.com/de/vivace-de/>

schung über dasselbe Medium wie auch die Zuschauer*innen zu kontrollieren. Diese Herangehensweise ist eine sehr intime Produktionsart und erfordert eine besondere Aufgabe für Sound Designer, um das Storytelling auch auf der klanglichen Ebene unterstützen zu können. Dabei kann gezielt mit dem Fokus gearbeitet werden, wodurch auch mit der Nähe und Distanz zur Bühne variiert werden kann, wie es auch schon das oben erwähnte Stück „Lehmann Triologie“ über das immersive Lautsprechersystem Soundscape von d&b im Nationaltheater London realisierte.

Auf eine rein binaurale Produktion im selben Theaterhaus macht Black zudem aufmerksam, wobei in diesem Stück ebenfalls mit einer akustischen Separation durch eine schalldichte Glasbox gespielt wurde (Black 27.05.2021, S. 120 Anhang). Der Thriller trägt den Titel „ANNA“, welches 2019 im Dorfman Theatre aufgeführt wurde und sich mit der Thematik des Lebens in Ostberlin im Jahr 1968 befasst (Hickson et al. 2019). Die dreidimensionale Klangwelt dieses Theaterstücks wurde von den beiden Brüdern und Sound Designern Ben und Max Ringham kreiert, welche die Möglichkeit der Immersion dafür nutzen die Aufmerksamkeit des Publikums zu steuern. Nur durch das Tragen der Kopfhörer können die Zuschauer die Welt von Anna erleben und den Abend subjektiv aus ihrer Perspektive betrachten, erzählt die Regisseurin Natalie Abrahami in der Dokumentation über das Stück (National Theatre 2019). Es handele sich hierbei um eine Kombination von Nähe, welche auch im Kino erreicht werden kann, und der Live Performance im Theater, die durch das klangliche Erlebnis erreicht wird.



Abbildung 19: Ausschnitt aus der Videodokumentation "ANNA: Working with Binaural Sound in Theatre", zu sehen ist der Sound Designer Ben Ringham in mitten der verteilten Kopfhörer im Zuschauerraum (National Theatre 2019)

Die Schauspielerin von Anna, Phoebe Fox, trägt während ihrer Performance Mikrofone in ihren Ohren, wodurch das binaurale Erlebnis generiert wird, so Ringham (National Theatre 2019). Ben Ringham, welcher in dem vorigen Bild (siehe Abbildung 19) zu sehen ist, kann

durch die rein binaurale Liveproduktion genau das hören, was auch die Zuschauer während des Tragens der Kopfhörer erleben. Der dokumentarischer Bericht inklusive Hörbeispiele aus dem Stück kann unter dem Namen „ANNA: Working with Binaural Sound in Theatre“ auf der Videoplattform Youtube gefunden werden⁶.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgte auch der Regisseur Richard Wagner mit seinem Team bei der Umsetzung des Stücks „Am Boden (Grounded)“ von George Brant (im Deutschen von Henning Bochert), welches im Staatstheater Darmstadt zu sehen war (2019). Dieses Theaterstück erzählt die Geschichte einer Frau aus ihrer eigenen Perspektive, die während des Krieges als Drohnenpilotin eingesetzt wurde und somit die Außenwelt nur durch die Kamera verfolgt (Staatstheater Darmstadt 2019).

Hierbei werden auch immer mehr ihre Emotionen und innere Gedankenwelt hervorgehoben, welche durch vorab aufgenommene binaurale Kunstkopfaufnahmen mit der Schauspielerin des Stücks Yana Robin la Baume für das Publikum hörbar wird (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Binaurale Aufnahmen des subjektiven Innenlebens der Kriegspilotin (links Yana Robin la Baume, rechts Kunstkopf KU100 von Neumann) (Staatstheater Darmstadt 2019)

Die dreidimensionalen Kunstkopfaufnahmen wurden von der Klangkünstlerin Anne Marie Himmelmann aufgenommen, die auch für das Klangkonzept des Stücks verantwortlich war. Das Eintreten in das Innenleben der Schauspielerin wird durch die Verwendung eines Silent

⁶ Youtube-Link: <https://www.youtube.com/watch?v=hFM4hPgGZuk&t=19s>

Disco Systems ermöglicht, wobei es während des Stücks Anweisungen zum Auf- und Abziehen des Kopfhörers gibt. Weitere Informationen zu diesem Stück sind auf der Website des Staatstheater Darmstadt zu finden⁷.

3D Audio wurde ebenfalls für Virtual Reality (VR) Experience des Schauspielhauses in Graz verwendet, welche während der Corona-Pandemie als „Theater für Zuhause“ in Form von einer Oculus VR Brille und der Verwendung von Kopfhörern ausgeliehen werden konnte. Die deutschsprachige Erstaufführung von Johan Harstads „Krasnojarsk: Eine Endzeitreise in 360°“, aus dem Norwegischen von Elke Ranzinger, wurde in diesem Format vom Schauspielhaus Graz 2020/21 produziert, um das Publikum in der Corona Pandemie weiter unterhalten zu können (Harstad 2021, Bühnen Graz). In der Geschichte ist ein Anthropologe nach der fast vollständigen Vernichtung der Erden auf der Suche nach weiteren Überlebenden, um den Wiederaufbau der Zivilisation in der sibirischen Stadt Krasnojarsk voranzutreiben (Harstad 2021). Für ein echtes VR- Erlebnis benötigt es neben den 360° Filmaufnahmen auch einen passenden 3D Sound, welcher bei diesem Stück von Elisabeth Frauscher gestaltet wurde. Diese Produktion beschränkte sich nicht nur auf den regionalen Raum um Graz, sondern wurde auch über den deutschsprachigen Raum hinaus verbreitet. Ein solches Präsentationsformat eines Theaterstücks ist somit nicht mehr ortsgebunden, sondern kann als neues Medium von überall auf der Welt gleich erlebt werden.

Wie die oberen Beispiele aus den Theaterhäusern zeigen, werden bereits binaurale 3D Audio Technologien für Produktionen verwendet. Zudem wurden während der Corona Pandemie in 2020/21 vermehrt binaurale 3D Audiotechnologien für Produktionen umgesetzt. An Opernhäusern ist es seltener, dass immersive Veranstaltungen in Form von binauralen Produktionen realisiert werden. Während in den Tonabteilungen der Grazer Oper und auch der Wiener Staatsoper zwar mit Kunstkopfaufnahmen experimentiert wurde, setzte das Opernhaus Zürich während der Corona-Pandemie im Streaming Format auch binaurale 3D Audio Produktionen um.

In Form eines 3D Audio Livestreams des philharmonischen Konzerts der 7. Sinfonie von Anton Bruckner verabschiedete sich der langjährige Generalmusikdirektor Fabio Luisi am 19. Juni 2021 von der Züricher Oper⁸. Hierbei konnten die Zuhörer*innen zwischen der

⁷ Link zur Website: <https://www.staatstheater-darmstadt.de/veranstaltungen/am-boden-grounded.445/>

⁸ Link: <https://www.opernhaus.ch/spielplan/kalendarium/abschiedskonzert/>

Option der Stereomischung und der binauralen 3D Audiomischung über Kopfhörer wählen. Die Anwendung der 3D-Audiotheorie beschreiben sie in ihrem Bericht über das Abschiedskonzert als „Klangkugel“, welche die Hörer*innen von Klangbild in 360° umhüllen solle (Opernhaus Zürich 2021).

Das Opernhaus Zürich gehört derzeit zu den wenigen Opernhäusern, die sich aktiv mit den aktuellen Innovationen von neuen 3D Audio Techniken auseinandersetzen. Wie schon im vorigen Kapitel erwähnt, ist in ihrem Opernsaal das Spatial Sound Wave System von Fraunhofer installiert, was ihnen immersive Möglichkeiten zur Klangbearbeitung und -verteilung bietet. In dem mit Oleg Surgutschow, Chefkonzeptionsmeister der Oper Zürich, geführten Interview erzählte er, dass sie ihre Effektmischungen für SSW bereits vorab über eine binaurale Abhöre namens Spatial Sound Headphones (SSH) in ihrem Tonstudio mischen können (Surgutschow 20.04.2021, S. 108 Anhang). Dies beschleunigt den Spatialisierungsprozess während der Probezeiten um ca. 70/80%, da während der Proben nicht viel Zeit für Anpassungen des Tons bleibt (Surgutschow 20.04.2021, S. 108 Anhang). Derzeit sei jedoch der Raumklang, der für die Auralisation des Systems genutzt werde, nicht der des Opernsaals in Zürich, weshalb das System auch weiterhin noch an Optimierung bedarf, so Surgutschow. Neben der Möglichkeit des Premix über Kopfhörer im auralisierten Saal, arbeitet Surgutschow gemeinsam mit Fraunhofer an einer Möglichkeit zur binauralen Echtzeitabhöre im Opernsaal, wie es auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit angegangen wird (vgl. Surgutschow 20.04.2021, S. 108 Anhang). Hierfür soll SSH zur dynamischen Echtzeitanwendung überarbeitet werden, sodass in der Tonkabine zu hören ist was im Saal ankommt (Surgutschow 20.04.2021, S. 109 Anhang). Diese Weiterentwicklung ist wegen der Pandemie noch in Wartestellung, ist aber laut Surgutschow für die nähere Zukunft angedacht.

Dieser Ansatz von Fraunhofer stellt eine kostenintensive individuelle Lösung für das maßgeschneiderte System der Opernhaus Zürich dar. Somit ist eine mögliche resultierende Lösung des Problems der schlechten Hörsituation für Tonschaffenden nicht auf andere Häuser übertragbar, wodurch das Problem hiermit nur individuell angegangen wird. Da diese Problematik jedoch nicht nur am Opernhaus in Zürich besteht, verfolgt die Methode der vorliegenden Arbeit einen allgemeineren Lösungsansatz, welcher bei erfolgreicher Anwendung in der Fallbeispiel Oper Graz auch auf andere Opernhäuser angewendet werden kann.

Die Kontrolle der Parameter Fokus und Balance wird ohne gegebenen Raumanpassungen erschwert. Dennoch gibt es hierfür ambisonische Plugins, um diese Parameter in einem dreidimensionalen auditiven Raum steuern zu können. Es sind bereits einige Plugins zur 3D Audioverarbeitung auf dem Markt, weshalb im nächsten Kapitel 3.3 nur ein Teil davon ausgewählt wurde, welche auch für die Methode dieser Arbeit relevant sind.

3.3 Ambisonics Plugins zur 3D Audioverarbeitung

Es gibt bereits einige Plugins, die die Verarbeitung von Ambisonics in einer DAW zur Produktion von dreidimensionalen Klangbildern ermöglichen, welche sowohl als Open-Source Produkt frei verfügbar oder durch Lizenzen geschützt sind. Hierbei lassen sich zwei Verfahren der Signalverarbeitung innerhalb des Plugins unterscheiden. Zum einen gibt es parametrische, signalabhängige Verfahren und zum anderen signalunabhängige Verfahren. Die Vor- und Nachteile dieser beiden Verfahren und ausgewählte Plugins werden in den folgenden Unterkapiteln behandelt.

3.3.1 Signalabhängige Verfahren

Signalabhängige Verfahren gehen von einem Modell des Klangfeldes aus und verfolgen die Modellparameter in der Aufnahme ambisonischer Mikrofonsignale sowohl zeitlich als auch im Frequenzspektrum. Somit können auch die einzelnen Klangkomponenten des Signals bearbeitet werden (McCormack und Politis 2019). Dennoch ist bei diesen Verfahren eine erhöhte Latenz im Signalfluss zu erwarten, da zunächst der ganze Frequenzbereich berechnet wird, um eine bessere Auflösung des Klangfeldes zu erreichen. Plugins wie Harpex, Directional Audio Coding (DirAC) und COMPASS nutzen dieses Verfahren und erreichen damit, selbst bei ambisonischen Aufnahmen mit niedriger Ordnung wie FOA, eine Umhüllung und Schärfe, welche durch signalunabhängige Verfahren schwer zu reproduzieren sind (McCormack und Politis 2019).

COMPASS

Die Abkürzung COMPASS steht für ‚Coding and Multidirectional Parameterization of Ambisonic Sound Scenes‘ (Politis et al. 2018, S. 1) und wurde von Dr. Archontis Politis, Leo McCormack und Dr. Sakari Tervo im Acoustics Lab der Aalto Universität 2018 in Finnland

entwickelt⁹. COMPASS ist eine Sammlung flexibler Plugins zur räumlichen Audioverarbeitung, wobei Politis et al. mit ihrem Binaural Decoder Plugin eine Möglichkeit zur Verwendung eines Headtrackers über Kopfhörer in Echtzeit verspricht (Politis et al. 2018, S. 1). Die angewandte Methode unterteilt das Signal im Frequenzbereich in Direktschallkomponenten und Umgebungskomponenten, welche alle diffusen Geräusche und den Nachhall implizieren (McCormack und Politis 2019).

Der ‚COMPASS Binaural‘ Decoder (siehe Abbildung 21) ist zwar mit Echtzeitinput nicht latenzfrei, kann dennoch eine Abhörmöglichkeit inklusive Kopfbewegungen in Echtzeit bei bereits aufgenommenen Eingangssignalen garantieren. Mit dem ‚Diffuse to Direct‘ Regler kann die Balance zwischen den direkten Klangkomponenten, die durch einen Enthallungseffekt hervorgehoben werden, und dem Nachhall im Raum angepasst werden (McCormack und Politis 2019). Diese Anpassungsmöglichkeit kann für jedes einzelne Terzband selbst ausgewählt werden, was der unteren Abbildung (siehe Abbildung 21) zu entnehmen ist. Dadurch kann beispielsweise der Fokus im Sprachbereich geschärft werden, um somit die Sprachverständlichkeit im Signal zu verbessern.

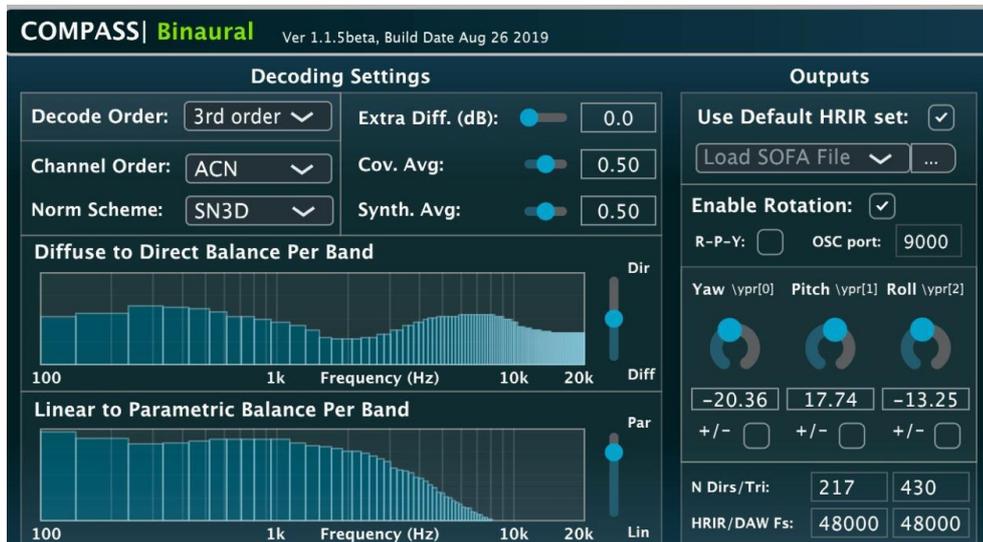


Abbildung 21: COMPASS Binaural Decoder (McCormack und Politis 2019)

In dieser Optimierungsversion des ‚COMPASS Decoder‘ zur speziell binauralen Kopfhörerwiedergabe ist zusätzlich das Verwenden von verschiedener HRTFs durch das Laden von SOFA (engl. Spatially Oriented Format for Acoustics) Files mit HRIRs möglich. Das SOFA-

⁹ COMPASS Website: <https://leomccormack.github.io/sparta-site/docs/plugins/compass-suite/>

Format ermöglicht ein Abspeichern von räumlich orientierten akustischen Daten, wie auch HRIRs und BRIRs, und als AES69-2015 von der Audio Engineering Society (AES) standardisiert wurde (Sofaconventions 2013). Dadurch kann man auch über eigene binaurale Filter das Eingangssignal anhören, wodurch ein individuelleres Hörerlebnis verschafft werden kann (McCormack und Politis 2019). In diesem Decoder kann neben der Regelung zwischen Vorder- und Hintergrundkomponenten auch der Anteil des linearen oder vollparametrischen Renderings angepasst werden (Politis et al. 2018, S. 4). Dieser Regler kann verwendet werden, um eine höhere Lokalisationsunschärfe im Signal zu gewinnen, welche über die lineare Ambisonics Dekodierungsmethode ermöglicht wird.

SoundField by RØDE

Ein weiteres Beispiel für die Verwendung von signalabhängigen Verfahren zur ambisonischen Signalverarbeitung ist das Plugin „SoundField by RØDE“ (v. 1.0.2)¹⁰, welches aufbauend auf dem originalen Plugin „SurroundZone“ (v. 1.0.0) von SoundField nach dem Zusammenschluss der beiden Firmen entwickelt wurde. Dieses Plugin ist speziell auf ihr ambisonisches Mikrofon erster Ordnung NT-SF1 angepasst, erlaubt aber auch andere Mikrofoninputs. Zudem ermöglicht es den Nutzer*innen über eine übersichtliche GUI zwischen Outputformaten von B-Format FuMa/AmbiX, über Surround auf alle gängigen Setups bis 7.1.4 zu wählen, wodurch verschiedene Dekodierungen des Eingangssignals möglich sind. Ebenso wie der oben beschriebene binaural Dekoder von COMPASS, greift das „SoundField by RØDE“-Plugin für die Signalverarbeitung in den Frequenzbereich ein und ermöglicht somit, laut ihrer Website, eine räumliche Genauigkeit für alle Frequenzen (RØDE 2018). Zudem kann bei den Surroundformaten, durch die individuelle Gewichtung der einzelnen Ausspielkanäle, eine Richtungswirkung im Klangraum eingestellt werden.

HARPEX

Die Adjustierung des Verhältnisses zwischen Direktsignalen und Raumanteil, wie es im COMPASS Plugin beschrieben wurde, ist auch im HARPEX-X Plugin möglich. HARPEX steht für ‚High Angular Resolution Planewave Expansion‘ und ist ein Signalverarbeitungsalgorithmus, welche zur maximalen Extrahierung von räumlichen Informationen aus einer

¹⁰ RØDE Website für Plugin: <https://de.rote.com/soundfieldplugin>

Klangaufnahme von Svein Berge und Natasha Barrett 2011 in Norwegen entwickelt wurden¹¹. Dieser Algorithmus wurde für das HARPEX-X Plugin verwendet, in welchem die räumliche Schärfe des parametrischen Verfahrens mit der linearen Dekodierung artefaktfrei kombiniert wird (Berge und Barrett 2010, S. 1). Das Plugin kann dafür verwendet werden ambisonische Aufnahmen eines Schallfeldes im A-Format, B-Format oder AmbiX in die Standard Surround- und 3D-Formate umzuwandeln. Als Eingangssignal werden FOA Signale, welche durch die vier koinzidenten Mikrophonkapseln eine geringe Winkelauflösung aufweisen, genutzt und können durch das Harpex-X Plugin (siehe untere Abbildung 22) auf eine höhere Auflösung in dritte Ordnung hochgerechnet werden (Berge und Barrett 2010, S. 3).



Abbildung 22: Harpex Plugin im Einsatz während der Auralisation der Oper Graz, Upmix des ST450 FuMa Signals auf AmbiX 3. Ordnung

Über den Umhüllungsregler (engl. envelopment), im Bild (siehe Abbildung 22) mit ‚ENV‘-Beschriftung zu erkennen, kann der Raumanteil des Klangbildes entweder hinzugefügt oder reduziert werden. Neben dem Pfeil für die Ausrichtung des Mikrofons ist eine schwarze Kugel in einem transparenten kugelförmigen Bereich zu sehen, welche die Richtung des Fokus beeinflussen kann. Hierfür kann die Kugel in X- und Y-Richtung ihren Dominanzanteil verändern und somit die Hörrichtung steuern. Wie in Abbildung 22 zu sehen, ist in diesem Beispiel der Fokus in ‚Dominance-X‘ Richtung ausgerichtet und lenkt den Fokus somit auf die frontalen Schallereignisse im Signal. Somit kann mit den beiden Parametern ‚Dominance-X‘ und ‚Envelopment‘ die Balance zwischen Fokus und Nachhall im Signal gesteuert werden.

¹¹ Harpex Website: <https://www.harpex.net/>

3.3.2 Signalunabhängige Verfahren

Im Vergleich zu dem oben beschriebenen Klangverarbeitungsverfahren steht das lineare zeitinvariante System, welches unabhängig von zeitlichen Verschiebungen funktioniert und somit signalunabhängig arbeitet. Hierbei werden die einzelnen Klangkomponente nicht einzeln berücksichtigt, weshalb nicht so detailliert in das Signal eingegriffen werden kann (McCormack und Politis 2019). Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit zur Echtzeitanwendung. Diese wird durch einfache Transformationsgleichungen zur schnellen Gewichtung erreicht, die das Signal nicht im Frequenzbereich rechnen und somit nicht auf Samples warten müssen. Die beiden gängigsten zeitinvarianten Plugin Suites sind die „IEM Plug-In Suite“ des Instituts für Elektronische Musik und Akustik (IEM) und die „AmbiX Ambisonic Plug-In Suite“ von Matthias Kronlachner.

AmbiX Ambisonic Plug-In Suite

AmbiX ist eine plattformübergreifende Plug-In Suite für Ambisonics, welche von Matthias Kronlachner am IEM 2014 in Graz entwickelt wurde und steht Open Source zur freien Verfügung¹².

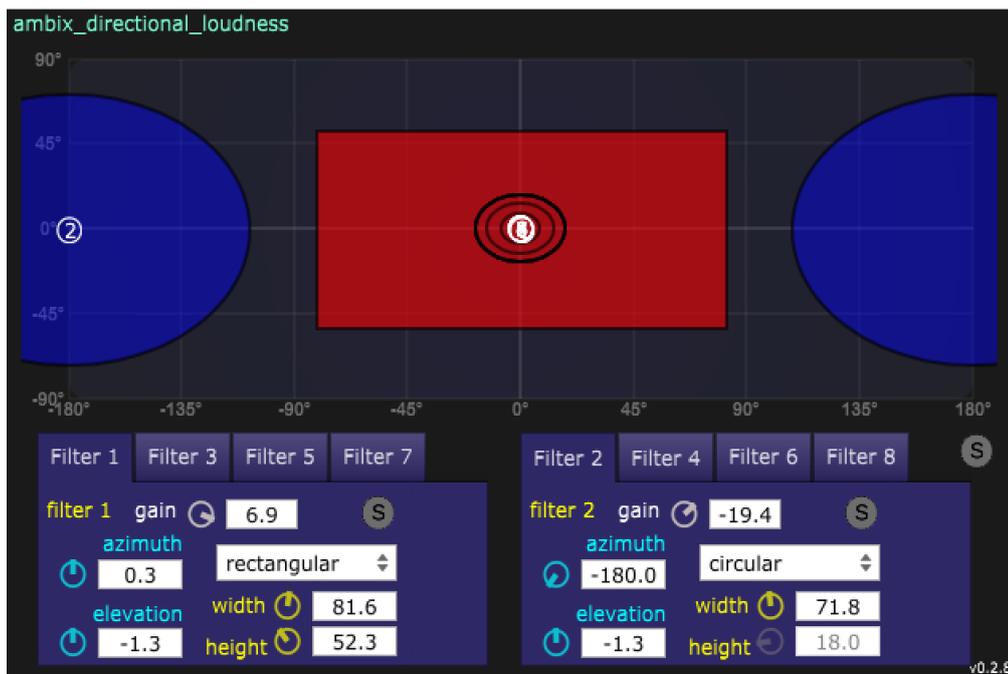


Abbildung 23: Eine Beispielanwendung des ambiX Directional Loudness Plugin von Kronlachner in den Einstellungen des ersten durchgeführten Hörversuches, siehe Kapitel 4.2.2

¹² Zum Download hier verfügbar: <http://www.matthiaskronlachner.com/?p=2015>

Die Suite vereint ambisonische 3D Audio Verarbeitungsmöglichkeiten vom Erstellen der Spatialisierung im Raum bis zum Rendern über verschiedene Abspielsysteme. Zu Kronlachers Plug-In Suite gehört unter anderem auch der „AmbiX Converter“. Dieser Konverter bietet die Möglichkeit die verschiedenen bestehenden Konventionen von Ambisonics, wie die Reihenfolge und die Gewichtung der Signalkomponente, in ein anderes Format umzuwandeln (Kronlachner 2014b, S. 3). Somit kann die Kompatibilität zwischen dem aufgezeichneten Signal und der zur verwendeten Software gewährleistet werden.

Dieser Konvertierungsprozess ist beispielsweise notwendig, um das resultierende FuMa Signal eines SoundField ST450 Mikrofons mit einem Mehrkanalplugin im AmbiX Format zu bearbeiten. Ein weiteres Plugin aus Kronlachers Ambisonics Plugin Suite ist das ‚AmbiX Directional Loudness‘, dessen GUI in der unteren Abbildung (siehe Abbildung 23) zu sehen ist. Dieses Plugin kann kreisförmige oder rechteckige Regionen in einem 360° Schallfeld bestimmen, welche daraufhin entweder zur Verstärkung der gewählten Bereiche oder zur Absenkung der Lautstärke genutzt werden kann (Kronlachner 2014b, S. 2). In der Abbildung 22 sind die Bereiche mit ihren Lautstärkeinstellungen während des ersten Hörversuchs zu sehen, welcher im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und in Kapitel 4.2.2 im Detail beschrieben ist. Dabei wurde Filter 1 auf den frontal auf das Mikrofonarray eintreffende Direktschall von der Bühne gelegt und mit dem Verstärkungsfaktor von dB fokussiert. Im Gegensatz zu Filter 1, senkt Filter 2 die Signale, die von hinten von dem Mikrofon aufgenommen werden, deutlich ab. Dieser Vorgang dämpft den Nachhall des Signals, da davon ausgegangen wird, dass der Nachhall hauptsächlich von hinten auf das Mikrofonarray trifft (Kronlachner 2014b, S. 2). Somit kann mit diesem Plugin eine zeitinvariante Steuerung der Balancen durch Fokussierung und Enthaltung des Signals erreicht werden.

IEM Plug-in Suite

Eine weitere Open Source Plugin Suite zur ambisonischen 3D Audio signalverarbeitet bietet das Institut für Elektronische Musik und Akustik in Graz an (IEM 2021). Alle Ambisonics Plugins aus dieser Suite können bis zur 7. Ordnung verwendet werden und auf der IEM Website mit Beschreibungen gefunden werden¹³. Die Plugin Suite beinhaltet insgesamt 20 verschiedene Plugins, von denen im Folgenden auf zwei signalunabhängige Plugins kurz beschrieben werden. Mit dem ‚Scene Rotator‘ Plugin kann ein Headtracker vor der binauralen

¹³ Website zur IEM Plug-in Suite: <https://plugins.iem.at/>

Dekodierung geschaltet werden, um in Abhängigkeit von Kopfbewegungen das 3D Klangbild in Echtzeit an die Richtungsänderungen anzupassen. Die Rotation der Klangszene kann, durch die händische Veränderung der Parameter Yaw, Pitch und Roll, auch ohne Headtracker erreicht werden. Das IEM entwickelt selbst eigene Headtracker unter dem Namen ‚MrHeadTracker‘ und steht als Do-it-Yourself (DIY) Anleitung auf ihrer Website zur freien Verfügung¹⁴. Um das Signal mit der Rotation über Kopfhörer abhören zu können, hat das IEM den ‚BinauralDecoder‘ entwickelt, welcher die HRTF des Neumann KU100 Kunstkopfes nutzt (Rudrich 2021). Im Vergleich zu anderen gängigen binaural Dekodern, wendet dieses Plugin des IEMs keine virtuellen Lautsprecher zur binauralen Dekodierung, sondern den „Magnitude Least Squares“-Ansatz von Zaunschirm, Schörkhuber und Höldrich an (Schörkhuber et al. 2018).

aXPlugins Suite

Ein weiteres signalunabhängiges Plugin zur binauralen Dekodierung ist der aXMonitor aus der aXPlugins Suite von der französischen Firma SSA Plugins, welche in erster, dritter und siebter Ordnung zu erwerben ist. Die aX Ambisonics Suite beinhaltet neun verschiedene Plugins. Neben den Plugins zum Abhören und Spatialisieren, bietet diese Plugin Suite ebenfalls Effektplugins wie De-Esser, Noise Gate, Delay und Equalizer (Stitt 2018). Der leitende Entwickler dieser Plugin Suite Peter Stitt ist ebenfalls an dem in Kapitel 3.1 erwähnten Projekt der Echtzeit Auralisation in Notre Dame beteiligt (Eley et al. 2021).

Der aXMonitor ist das DekodierungsPlugin dieser Suite und ermöglicht ein normales Stereoabbild oder eine binaurale 3D Wiedergabe über Kopfhörer. Die aktuelle Version dieses Plugins verwendet das oben erwähnte virtuelle Lautsprecherverfahren mit einer einfachen Dekodierung. Dabei werden die virtuellen Lautsprecherrichtungen in einem regelmäßigen Abstand auf einer Kugel angeordnet. Das Eingangssignal sollte im AmbiX (SN3D/ACN) Ambisonics Format sein, um im Signalfluss richtig weiterverarbeitet zu werden (SSA Plugins 2018). Zusätzlich können weitere HRTFs im SOFA Format in das Plugin gezogen werden, ähnlich wie es auch bei dem Binaural Dekoder von COMPASS möglich ist. Jedoch ist der größte Vorteil des aXMonitors gegenüber den bereits erwähnten binauralen Dekodierungs-Plugins, dass die Faltung mit individuellen HRIR-Aufnahmen im SOFA Format in das Plugin geladen werden können und somit ein subjektives Hörererlebnis in Echtzeit ermöglicht.

¹⁴ Link: <https://git.iem.at/DIY/MrHeadTracker>

Die resultierenden HRTFs für die virtuellen Lautsprecher sind eine Interpolation auf dem Raster der *.sofa- Datei.

Für die praktische Durchführung dieser Arbeit wurden mehrere der in diesem Unterkapitel erwähnten Plugins getestet und bei den zwei Hörversuchen angewendet, welche im Folgenden Kapitel 4 genauer beschrieben werden.

Kapitel 4

Praktische Durchführung

4. Praktische Durchführung

„The listening position is absolutely out of the stage, our control room is very far from the stage” – *Sal Distefano, Teatro alla Scala in Mailand*

Für die praktische Durchführung der Methodik dieser Masterarbeit wurde eine dreistufige Vorgehensweise gewählt: das Kontaktieren von Tonabteilungen aus Opernhäusern weltweit, die Planung der Hörversuche durch Auralisationen und deren Durchführung in Echtzeit.

Zunächst wurden die Tonabteilungen verschiedener Opernhäuser kontaktiert, um zum einen die Relevanz dieser Arbeit zu überprüfen und zum anderen die bisherigen Praxisanwendungen mit 3D Audio als Lösungsansatz in Erfahrung zu bringen. Da die Tonschaffenden das derzeitige Fehlen einer optimalen Lösung zur Verbesserung ihrer Hörsituation rückmelde-ten, wurde die Methode der vorliegenden Arbeit als Lösungsansatz entwickelt. Diese Methode kombiniert die theoretischen Erkenntnisse aus Kapitel 2 und 3, sowie die praktischen Erfahrungen der Tonabteilungen an Opernhäusern, welche dem Unterkapitel 4.1 entnommen werden können.

In dieser Methode wird ein Hörplatz im Zuschauerraum über ein ambisonisches Mikrofon in Kombination mit vier ambisonisch enkodierten Raummikrofonen in Echtzeit an die Tonregie übertragen. Somit können die ambisonischen Signale binaural dekodiert und über Kopfhörer wiedergegeben werden. Hierbei ist durch die Verwendung eines Headtrackers eine dynamisch binaurale Abhöre möglich.

Anschließend wurde die Evaluation dieser Methode in Form von praktischen Hörversuchen geplant, wofür unter anderem eine Auralisation des Opernsaals in Graz durchgeführt wurde. Dieser praktische Planungsprozess wird im Unterkapitel 4.2 genauer erläutert.

Schlussendlich konnten zwei Hörversuche mit vier männlichen Mitarbeitern der Tonabteilung des Opernhauses in Graz durchgeführt werden, weshalb der Terminus Probanden im weiteren Verlauf verwendet wird. Die Umsetzung dieser Hörversuche inklusiver Zwischenbilanz nach dem ersten Hörversuch sind dem Unterkapitel 4.3 zu entnehmen. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels 4.4 werden die Ergebnisse der Hörversuche ausgewertet und die Erkenntnisse der praktischen Durchführung zusammengefasst.

4.1 Interviews mit Tonschaffenden an Opernhäusern

Um die Relevanz dieser Arbeit zu stärken, wurden dreizehn verschiedene Opernhäuser in 2021 aus neun verschiedenen Ländern kontaktiert, wovon sich acht zurückmeldeten. Dabei wurde bestätigt, dass die Problematik der suboptimalen Hörposition für die Tonschaffenden viele Opernhäuser weltweit bestehen. Wegen des Fehlens von Dokumentationen über bereits an Opernhäusern getesteten Lösungsansätze zur Verbesserung der Hörsituation, wurden die Interviews durchgeführt. Mit dem Cheftonmeister der Oper Zürich, Oleg Surgutschow, dem Tontechniker Sal Distefano des Teatro alla Scala in Mailand und dem Leiter der Tonabteilung des Opernhauses in Graz, Christian Komp, wurden Interviews geführt, welche im Anhang als Transkriptionen zu finden sind. Die Tonschaffenden aus den anderen fünf Opernhäuser haben entweder per Mail oder über LinkedIn die Interviewfragen beantwortet. Darunter zählen Philippe Taberlet, Tonschaffender an der Nationaloper Bastille in Paris, Josh Marks, der Leiter der Audio- und Videoabteilung der Metropolitan Oper in New York und die Staatsoper Wien, repräsentiert von Cheftonmeister Anthanasios Rovakis.

Ein Grund zur Kontaktaufnahme zur Staatsoper Wien und dem Züricher Opernhaus war die Ähnlichkeit der Bauart zur Oper Graz. Surgutschow erwähnte, dass er im ständigen Austausch mit Kollegen andere Opernhäuser steht, unter anderem auch das mit Rovakis aus der Staatsoper Wien (Surgutschow 20.04.2021, S. 109 Anhang). Rovakis berichtet in seiner E-Mail Antwort, dass in der Staatsoper Wien bereits Kunstkopfaufnahmen gemacht wurden, diese jedoch nicht als brauchbare Abhör-Alternativen befunden wurden, da sich seiner Aussage nach 80% der Hörplätze im Diffusfeld befinden (Rovakis 15.04.2021, S. 105 Anhang). Diese Erkenntnis teilt auch Komp, welcher ebenfalls über vergangene Testaufnahmen mit dem Kunstkopf an der Oper Graz berichtet (Komp 08.06.2021, S. 129 Anhang).

Im Gegensatz dazu wurde laut Philippe Taberlet an der Pariser Nationaloper Bastille bisweilen noch nicht mit 3D Audio Techniken experimentiert. Anderes berichtet Sarah Black aus dem Sydney Opera House, an welchem sie jahrelang als Tontechnikerin gearbeitet hat. Wie schon in Kapitel 3.2 beschrieben wurde, haben sowohl das Sydney Opera House als auch das Nationaltheater in London bereits 3D Audio Technologien für ihre Produktionen angewendet. Das Londoner Nationaltheater wird hierbei ebenfalls in Referenz gezogen, da Black zu dem Zeitpunkt der Kontaktaufnahme an diesem Theaterhaus beschäftigt war und deshalb ebenfalls über ihre Erfahrungen dort berichtete.

Die Tonregie an den Opernhäusern von Rovakis, Surgutschow und Komp ist mittig unter dem Balkon mit der Option einer mechanisch fahrbaren Glasscheibe positioniert, wodurch sie einen direkten Blickkontakt zur Bühne und zudem bei offener Glasscheibe die Sänger hören können. Laut Komp sei diese Form der Abhörsituation noch gut im Vergleich zu anderen Opernhäusern wie das Bolshoi Theater in Moskau, welche leider ohne Rückmeldung kontaktiert wurde, da diese zum Teil nicht einmal zentriert zur Bühne ausgerichtet sind oder weder einen auditiven noch visuellen direkten Kontakt zum Bühnengeschehen haben (Komp 08.06.2021, S. 129 Anhang). Anders habe es das Landestheater in Linz gelöst, welches nach Renovierungsarbeiten einen zusätzlichen Mischplatz im Zuschauerraum integrierte, auf den bei Bedarf von der Tonregie aus gewechselt werden kann, so Komp (08.06.2021, S. 127 Anhang). Bei der Auswertung aller Kontaktaufnahmen stellt sich heraus, dass alle acht Opernhäuser eine suboptimale Hörposition für die Tonschaffenden bieten. Sal Distefano geht in seinem Interview sogar so weit zu sagen, dass wegen der Präsenz des Publikums womöglich kein Opernhaus einen guten Hörplatz für ihre Tonabteilung bietet (Distefano 08.06.2021, S. 125 Anhang). Ebenso argumentiert Josh Marks, Leiter der Tonabteilung der MET Oper in New York, dass sich das Opernhaus gegen einen permanenten FOH¹⁵ Platz wehrt, weshalb die Tonschaffenden weiterhin von ihrer zugeteilten Loge aus den Live-Sound mischen (Marks 02.01.2022, S. 132 Anhang).

Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, arbeitet die Oper Zürich an einer Kopfhörerversion der Spatial Sound Wave (SSW) Anlage. Somit kann die Oper Zürich in Zukunft voraussichtlich diesen Ansatz nutzen, um ihren Opersaal über Kopfhörer von ihrer Tonregie aus abhören zu können. Jedoch ist dies nur eine individuelle Lösung und nicht für andere Opernhäuser kompatibel. Zudem befindet sich dieser Lösungsansatz ebenfalls noch im Entwicklungsprozess und wurde bisher noch nicht erfolgreich angewendet (Surgutschow 20.04.2021, S. 108 Anhang). Zusätzlich erwähnt Surgutschow, dass ein dynamisches Abhörsystem das Ziel hierbei sei, um den Zuschauerraum als binaurale Variante abhören zu können (Surgutschow 20.04.2021, S. 109 Anhang). Den Wunsch nach einer dynamischen Abhörmethode äußert auch Rovakis, welcher sein Interesse an einer Fernbewegung eines Kunstkopfsignals mit Headtracking in Echtzeit bekundet (Rovakis 15.04.2021, S. 105 Anhang). Die durchgeführten Interviews bestätigen die Relevanz an der Problematik und dessen globalen Charakter.

¹⁵ FOH = Front Of House, ein meist mittiger Hörplatz für die Tonschaffenden im Zuschauerraum

Die Tonschaffenden bestätigen in den durchgeführten Befragungen, dass es bisweilen noch keine Lösung für das bestehende Problem ihrer suboptimalen Hörsituation gibt. Zum anderen wird an vielen Opernhäusern bereits mit 3D Audio Technologien experimentiert, sowohl mit immersiven Lautsprechersystemen wie Fraunhofers SSW, Iosono oder auch Soundscapes von d&b (siehe Kapitel 3.2), als auch binauralen Systemen für Theaterproduktionen oder binaurale Aufnahmeversuche mit Kunstkopf. Zudem wäre eine dynamisch binaurale Abhöre wünschenswert, welche bestenfalls auch die Möglichkeit bieten sich im Raum bewegen zu können (vgl. Rovakis 15.04.2021, S. 105 Anhang).

4.2 Planung der Hörversuche durch Auralisation

Die Durchführung der Hörversuche wird vorab durch eine Auralisation des Opernsaals in Graz geplant. Dadurch ist ein Testen des Signalfusses der Methode, unabhängig vom Proben- und Vorstellungsplan der Oper, möglich. Dieser Vorgang begünstigt auch die benötigte Zeit zum Anpassen der Parameter für die Hörversuche vor Ort, denn die Voreinstellungen können bereits in der Vormischung (engl. Premix) programmiert und mithilfe der Klangbeispiele angepasst werden.

Aufgrund der Tatsache, dass an Opernhäusern oftmals nicht genügend Zeit für technische Versuche zur Verfügung gestellt werden kann, ist zudem die Durchführung eines technischen Aufbaus dieser Methode zur Optimierung der Abhörsituation für Tonschaffende von Vorteil. Hierfür wurde zunächst ein Probeaufbau in dem Hörsaal P1 der TU Graz durchgeführt, damit der technische Ablauf zur Aufnahme der Impulsantworten vorab geprüft werden konnte. Anschließend konnte diese technische Aufnahme im Opernsaal durchgeführt werden.

Eine Auralisation des Opernsaals in Graz ist wegen des bereits erläuterten Zeitfaktors wichtig und ermöglicht zudem das virtuelle Hören verschiedener Klangbeispiele in der Oper Graz. Im Folgenden wird das methodischen Vorgehen der Raumimpulsantwortaufnahmen in zwei Räumen, welche zur Planung der Hörversuche an der Oper Graz durchgeführt wurden, beschrieben.

4.2.1 Technischer Probeaufbau in großem Hörsaal

Der technische Probeaufbau wurde am 21.09.21 im Hörsaal P1 der Technischen Universität in Graz umgesetzt, da dieser Raum mit seiner Größe von 535 m² zumindest ansatzweise an die Größe des Opernsaals in Graz herankommt. Weitere technische Details zu diesem Raum können der TU eigenen Website entnommen werden¹⁶.

Das verwendete Equipment für den Probeaufbau ist in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Lautsprecher	Lambda Labs CX-1A
Mikrofone	1x SoundField ST450 1x Kugelflächenmikrofon Schoeps 4x Schoeps MK5 (Kugel)
Stagebox	DirectOut Andiamo.MC
Interface	RME MADIface Pro
Aufnahmelaptop	Dell XPS15 9530 (Windows 64bit)

Über den Lautsprecher wurde ein logarithmischer Sinussweep, siehe Kapitel 2.3, mit einer Länge von 20 Sekunden im Frequenzbereich von 50 Hz bis 20 kHz abgespielt, um damit nacheinander den Raum von den zehn Positionen aus akustisch anzuregen.

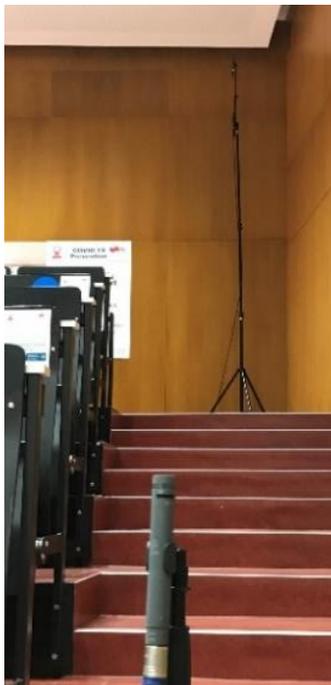
Für diesen technischen Probeaufbau wurden drei Hörpositionen im Saal gewählt, welche im nachfolgenden Bild (siehe Abbildung 24) markiert sind. Die erste Position befindet sich zentral im Mittengang. Position 1 ist mittig, Position 2 ist halb rechts höher, Position 3 ist halb links weiter unten (aus der Lautsprecherperspektive).

¹⁶ TU Graz Online: https://online.tugraz.at/tug_online/ris.detail?pRaumNr=2316

Abbildung 24: Ansicht der drei Hörpositionen der zwei Mikrofone aus Sicht der ersten Lautsprecherposition während des technischen Probeaufbaus im Hörsaal P1 an der TU Graz (Brühwiler 2021)



Die zwei Mikrofone wurden jeweils auf einer Sitzhöhe von ca. 1.20 m und mit einem Meter Abstand zueinander und aufgestellt. Das Kugelflächenmikrofon wurde hierbei als Ersatz zur Kunstkopferferenz verwendet, da beide als Trennflächenstereofonie funktionieren und somit ähnliche Messergebnisse zu erwarten waren.



Für die Simulation der Raummikrofonpositionen, die für den Opernsaal angedacht sind, wurden die vier Mikrofone mit Kugelcharakteristik nach oben gerichtet aufgestellt. Zwei Mikrofone sind am oberen Ende des Raumes in den jeweiligen oberen Ecken positioniert, während die anderen beiden ca. fünf Meter von diesen Mikrofonen entfernt in ihrer horizontalen Linie tiefer in den Raum hinein platziert wurden. Somit ist ein ausreichender Abstand zwischen den vier Mikrofonskapseln gegeben, damit die in Kapitel 2.2 beschriebene Weite aufgenommen werden kann.

Abbildung 25: Positionierung der vier Raummikrofone mit Kugelcharakteristik in P1, hier im Beispiel auf der rechten Seite des Raumes, gegenüber ist die gleiche Positionierung gespiegelt

Die zehn gewählten Lautsprecherpositionen und ihre Ausrichtungen orientieren sich an der Aufstellung eines Orchesters und den möglichen Gesangspositionen auf der Bühne. In Finnland wird diese Methode eines Orchesters bestehend aus Lautsprechern schon jahrelang an der Aalto Universität praktiziert (Pätynen und Lokki 2008).

Zudem wurde diese Methode erst kürzlich für ein Live-Stream Event aus dem Opernhaus in Zürich während des Lockdowns verwendet. Der folgenden Skizze (siehe Abbildung 26) kann die umgesetzte Positionierung der Lautsprecher während des technischen Probeaufbaus entnommen werden. Für den durchgeführten Versuchsaufbau wurde nur ein Lautsprecher verwendet, der an alle zehn markierten Positionen dreimal platziert wurde, jeweils einmal für jede der drei Mikrofonpositionen.

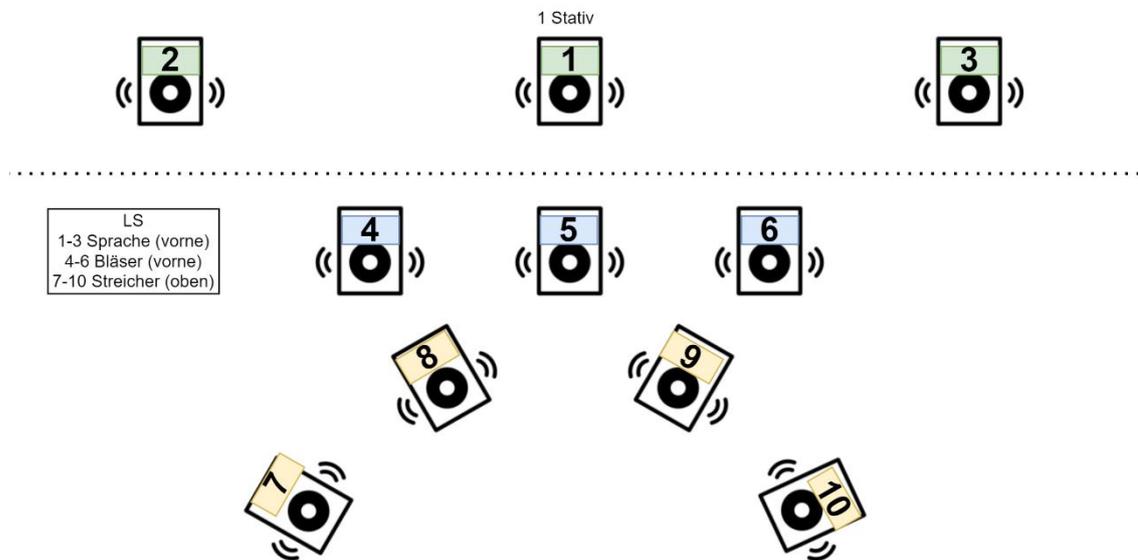


Abbildung 26: Skizze der Lautsprecherpositionierungen, welche in P1 getestet wurden

Die darauffolgende Entfaltung der gesweepen Raumaufnahmen in Impulsantworten und die spätere Faltung mit den Beispielsignalen, wird in Kapitel 4.2 genauer erklärt.

Nach diesem Testaufbau wurden bereits die Hörbeispiele zusammengetragen, welche anschließend hauptsächlich für die Faltung der Signale im Opernsaal genutzt wurden. Jedoch wurden diese teilweise auch mit den resultierenden Impulsantworten von P1 gefaltet. Hierzu gehören orchestrale Mehrkanalaufnahmen von Ravels „Pavane pour une infante défunte“ (1899) und Ausschnitte aus Gustav Mahlers „Das Lied von der Erde“ (1908). Das Musical „Robin Hood“, welches als Kindermusical in der Saison 2021/22 an der Oper Graz aufgeführt wurde, kam erst nachträglich als musikalisches Beispiel zur Faltung hinzu und wurde nur für die Faltung in der Oper Graz verwendet, da dort zusätzlich die Beschallungsanlage des Hauses bei der Aufnahme der Impulsantworten integriert wurde, welche für die Klangeignisse eines Musicals hauptsächlich im Einsatz ist. Dies wird im Folgenden Kapitel 4.2.1 beschrieben.

4.2.1 Aufnahme von Impulsantworten im Opernsaal in Graz

Der technische Probeaufbau fungierte als Test des Aufnahmesetups für die Raumimpulsantworten im Opernsaal in Graz, welche am 4.10.21 durchgeführt wurde. Diese Ausgangslage ermöglicht, dass das Setup für die bevorstehenden Hörversuche simuliert werden kann. Bei geschlossenem Eisernen Vorhang klingt der Opernsaal deutlich anders, als wenn der Zugang zur Bühne für den Zuschauerraum geöffnet ist, wodurch dieser für Testaufnahmen offen sein sollte. Da es durch den zeitlich strikten Probe- und Vorstellungsplan kein großes Zeitfenster für ruhige Testaufnahmen mit offenem Eisernen Vorhang im Opernsaal gibt, wurden in einem solchen kurzen Zeitfenster mehrkanalige Raumimpulsantworten aufgenommen. Durch eine Faltung mit Beispielsignalen und einer binauralen Dekodierung am Ende der Signalkette, wird das Abhören des Raumklangs in der Oper über Kopfhörer ermöglicht. Das Kugelflächenmikrofon, welches während des Probeaufbaus in P1 verwendet wurde, wurde bei der Aufnahme der Impulsantworten in der Oper durch den Neumann Kunstkopf KU100 ersetzt. Als zusätzliches Vergleichsmikrofon zum SoundField ST450 wurde noch das HOA Mikrofon Zylia ZM-1 verwendet.

Aufnahme

Die drei Mikrofone wurden auf einer Sitzhöhe von 1,20m an der im folgenden Foto (siehe Abbildung 27) markierten Position nacheinander positioniert, um die Sweep-Signale der insgesamt 15 Lautsprecher aufzunehmen.



Abbildung 27: Messposition am Balkon für die drei Mikrofone SoundField, Zylia und Kunstkopf (Frühwirt 2021)

Zu den drei Lautsprecherpositionen auf der Bühne und den sieben im Orchestergraben, wie auch schon im Hörsaal P1 die Aufstellung war, kommen im Opernhaus noch die Portallautsprecher links und rechts, der Centerlautsprecher und die zwei Delaylines (Position siehe Abbildung 28, Nr. 3 und 4) auf der Galerie hinzu.

Zeitlich war es nur möglich diese Position vollständig aufzunehmen, ebenso wie eine gekürzte Variante mit fünf Lautsprechern und den drei Mikrofonen mittig in dem Parterre positioniert. An dieser Position im Parterre wird bei Musicalproben ein Remote-Desk des Mischpults aufgebaut, um einen besseren klanglichen Eindruck des Raumes zu bekommen. Die angedachte dritte Positionierung wurde aufgrund örtlicher Gegebenheiten erst im ersten Hörversuch aufgebaut.

Neben der Positionierung des Hauptmikrofons wurde zusätzlich der Nachhall des Raumes mit vier ergänzenden Kugelmikrofonen aufgenommen. Diese wurden im oberen Bereich des Opernsaals platziert, um ausschließlich den diffusen Raumklang aufzunehmen, welche auf der folgenden Abbildung 28 markiert und nummeriert sind. Wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt wurde, sollen diese zusätzlichen Raummikrofone zur Unterstützung des Hauptmikrofons dienen und den Nachhall des Raumes aufnehmen. Die ersten beiden der vier Kugelmikrofone wurden von der Lusterkuppel links und rechts heruntergelassen auf der Höhe des ersten Rundbogens, um möglichst die Deckenreflektionen des Orchestergrabens abzuschirmen.



Abbildung 28: Positionen der vier Raummikrofone während des technischen Probeaufbaus und der zwei Hörversuche. Zwei Kugelmikrofone (Sennheiser MKH8020) hängen von der Lüsterkuppel herunter und zwei sind hinter den Delaylines auf der Galerie montiert (Frühwirt 2021)

Mikrofon Nummer drei und vier sind hinter den beiden Lautsprecherdelaylines in der Ecke auf der Galerie montiert, wobei der Direktschall zusätzlich noch von der Säule abgeschirmt wird. Alle vier Mikrofone haben einen großen Abstand zueinander, womit der Raum über unkorrelierter Signale aufgenommen wird.

Das Lautsprechersystem von dem technischen Probeaufbau im Hörsaal P1 wurde zusätzlich durch die interne Beschallungsanlage der Oper erweitert. In der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 29) sind die Lautsprecherpositionen auf der Bühne markiert, wobei die ersten drei Positionierungen jeweils die Schallquelle eines*r Sänger*in auf der Bühne darstellen, weshalb der Lautsprecher auf einem Stativ auf 1,70 m Höhe steht.



Abbildung 29: Lautsprecherpositionen im Orchestergraben und auf der Bühne während der Aufnahme der Impulsantworten. Dabei wurde ein aktiver Lautsprecher an die verschiedenen Positionen gesetzt (Frühwirt 2021)

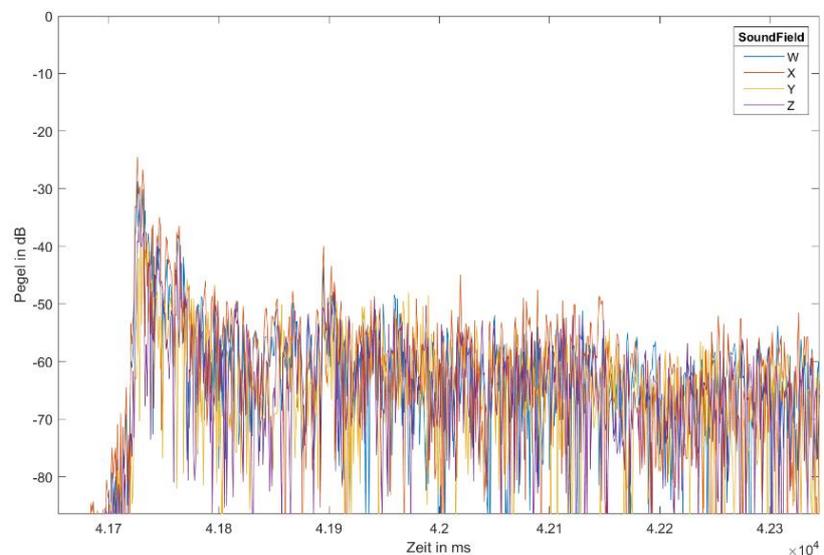
Die erste Position ist mittig, die zweite vorne rechts und die dritte hinten links. Die sieben Positionierungen im Orchestergraben unterteilen sich in zwei Instrumentengruppen, sodass die ersten drei Lautsprecherpositionen (siehe Abbildung 29, Nr. 4-6) auf den Stühlen nach vorne gerichtet und für die spätere Faltung als Blasinstrumente fungieren sollen. Die letzten vier Positionen (siehe Abbildung 29, Nr. 7-10) sollen Streicher simulieren, weshalb die Lautsprecher auf diesen Positionen auf den Stühlen liegend zur Decke ausgerichtet sind.

Alle Mikrofonsignale wurden mit demselben Laptop in Reaper aufgenommen. Von diesem Aufnahmesystem wurden auch die Sweeps abgespielt. Eine Ausnahme ist das Zylia Mikrofon mit seinen 19 Kanälen, da dieses als eigenes Interface fungiert und über USB an einem separaten Laptop angeschlossen wurde.

Faltung

Wie im Kapitel 2.3 beschrieben ist, wurden die Impulsantworten mit der exponentiellen Sweep Methode aufgenommen, wobei der Raum über die einzelnen 15 Lautsprecher mit dem 20 sekundigen Eingangssignal angeregt wurde. Um diese Methode anwenden zu können, muss zunächst ein solcher Sweep erstellt werden, was mit Hilfe des Betreuers dieser Arbeit DI Ph. D. Matthias Frank, Dozent an der Kunstuniversität in Graz, in Matlab erzeugt wurde. Zur Berechnung der Impulsantwort durch eine Entfaltung der aufgenommenen Sweep-Signale wurde Matlab eingesetzt. Hierfür wurde ein Skript von DI Ph. D. Matthias Frank verwendet, wobei nach der Entfaltung die Kanalanzahl des Inputs beibehalten wird. Ein Beispiel der berechneten Impulsantworten der vier SoundField Signale für die erste Lautsprecherposition ist in Abbildung 30 zu sehen.

Abbildung 30: Impulsantwort der ersten Lautsprecherposition von den vier Kanälen des SoundField ST450 auf der Position am Balkon



Für die Mehrkanalaufnahmen des Zylia Mikrofons müssen vor der Faltung noch ambisonische Enkodierungen durchgeführt werden, sodass aus den 19 Mikrofonsignalen ein HOA Signal 3. Ordnung mit 16 Kanälen entsteht. Diese Signale wurden mit dem Array Encoder von SPARTA¹⁷ enkodiert, welches ein Preset für die Enkodierung des Zylia integriert hat (McCormack et al. 2015).

Nachdem aus allen aufgenommenen Mikrofonsignalen der 15 Lautsprecherpositionen die Impulsantwort berechnet wurde, konnten diese mit möglichst trockenen Beispielaufnahmen gefaltet werden. Diese Faltung wurde mit dem mcfx_convolver Plugin von Kronlachner durchgeführt, welches auf Mehrkanalfaltungen ausgelegt ist (Kronlachner 2014a). Für dieses

¹⁷ SPARTA Website: <https://leomccormack.github.io/sparta-site/>

Plugin wird ein Konfigurationsskript benötigt, welches für diese Anwendung zunächst passend implementiert werden. Mithilfe des Konfigurationsskripts war eine Faltung der einzelnen Mikrofonensignale mit den 15 Lautsprechern möglich. Zusätzlich konnte mit diesem Skript in Kronlachers Faltungsplugin das Preset des SoundField Mikrofons, des Kunstkopfs und des Zylia-Mikrofons an den zwei Positionen ausgewählt werden. Für den Raumeindruck wurde jedoch hauptsächlich die erste Position am Balkon verwendet, da diese als beste Hörposition im Opernhaus bekannt ist und im Vergleich zur zweiten Position im Parterre alle Lautsprechersignale zur Faltung zur Verfügung hatte. Die Beispielsignale, die zur Faltung verwendet wurden, sind in Kapitel 4.2.1 aufgelistet.

Signalfluss

Das Hinzufügen der Raummikrofone, um den Nachhall des Raumes zu verstärken, wurde als Zusatz zu allen drei Mikrofonen getestet. Dafür wurden die vier Raummikrofone ambisonisch enkodiert und somit im 3D Klangbild positioniert, was der folgenden Abbildung 31 zu entnehmen ist.



Abbildung 31: Positionierung der Raummikrofone im ambisonischen Enkoders (IEM), orientiert an den echten Positionen im Raum

Die Positionierung der einzelnen Mikrofone im dreidimensionalen Raum orientieren sich an den echten Mikrofonpositionen im Opernsaal. Dabei resultierte ein ambisonisches Signal 5. Ordnung, welches anschließend binaural dekodiert wurde und zum Signal des wählbaren Hauptmikrofons hinzugefügt werden konnte.

Das SoundField ST450 wurde nach der Faltung mit dem Harpex-X Plugin von FuMa auf AmbiX konvertiert, ebenso wie auf 3. Ordnung hochgemischt. Mit dem integrierten Dominance Regler kann der Fokus in X-Richtung verschoben und somit auf die Bühne gelenkt

werden. Durch den Envelopment Parameter kann der Raumanteil reguliert werden. Anschließend wurde durch das AmbiX Directional Loudness Plugin von Kronlachner die Richtung zusätzlich gestärkt und Rauminformationen abgesenkt. Daraufhin konnte das resultierende Signal 3. Ordnung binaural dekodiert werden und somit über Kopfhörer abgehört werden. Der verwendete Binaural Dekoder des IEMs nutzte die HRTFs des Neumann KU 100 Kunstkopf, wodurch die Signale gut mit dem aufgenommenen Signal des echten Kunstkopfes verglichen werden konnten. Die Signale des Zylia Mikrofons benötigen nach der Faltung nur noch eine binaurale Dekodierung mit demselben Dekoder, um die Vergleichbarkeit zu wahren.

Auswertung und Einstellungen

Während das klanglichen Vergleichs über Kopfhörer, dass das ambisonische Mikrofon von SoundField mit den Plugins einen Kunstkopf-ähnlichen Klang erreicht. Im Gegensatz dazu fiel beim Zylia Mikrofon eine Überbetonung der höheren Frequenzen auf, was vor allem bei der weiblichen Gesangsstimme deutlich wurde. Auch die räumliche Darstellung schwankte bei Zylia etwas, was zu einer leicht instabilen Lokalisation führte. Das SoundField ST450 bildet vor allem das Orchester sehr klar ab, wie anhand des Beispiels von Ravel gut zu hören war. Auch die Balance zwischen Gesang von der Bühne und Orchester im Graben war ausgeglichen und konnte durch die Fokussierung durch das Harpex und Directional Loudness Plugin angepasst werden. Zusätzlich zu den bereits genannten Gründen, ist mit Zylia ZM-1 keine Abhöre in Echtzeit möglich, weshalb im weiteren Verlauf der Methode nicht dieses Mikrofon, sondern das SoundField ST450 als Hauptmikrofon eingesetzt wird. Da der Kunstkopf bei der Aufnahme der Impulsantworten nur als Referenz galt, kommt er in den Hörversuchen in der Oper nicht zum Einsatz.

Für den Hörversuch wird nun das SoundField Mikrofon mit Harpex-X Plugin, Directional Loudness und Binaural Decoder verwendet. Als ergänzendes Plugin für eine dynamisch binaurale Abhöre, wird das SceneRotator Plugin des IEMs in Kombination mit einem von ihnen entwickelten Headtrackern, zwischengeschaltet. Zudem werden die vier Raummikrofone zum Zumischen des Nachhalls genutzt, da diese Ergänzung sich in der Faltung als nützlich erwiesen hatte.

4.3 Durchführung der Hörversuche in Echtzeitanwendung

Die Hörversuche am Opernhaus in Graz wurden zur Evaluation der in dieser Arbeit beschriebenen Methode zur Optimierung der Abhörsituation der Tonschaffenden verwendet. Hierbei wurde die Echtzeitübertragung der ambisonisch enkodierten Mikrofon-signale aus dem Zuschauerraum über Kopfhörer mit Headtracker dynamisch binaural in der Tonregie wiedergegeben und von vier Mitarbeiter der Tonabteilung der Oper Graz im Herbst 2021 getestet.

Die Durchführung des ersten Hörversuchs wurde während der Bühnenorchesterprobe (BO) der Operette „Clivia“ von Nico Dostal realisiert und wird im folgenden Unterkapitel beschrieben. Ausgehend von den Erkenntnissen des ersten Hörversuchs, wurden die verbesserungswürdigen Auffälligkeiten der Methodik auf ihre Ursachen geprüft und Optimierungsschritte für die Durchführung des zweiten Hörversuchs eingeleitet. Diese Anpassungen werden im Unterkapitel 4.3.2 näher erläutert. Im Anschluss des ersten Hörversuchs wurde ein zweiter Hörversuch mit den Änderungen mit denselben vier Probanden des ersten Hörversuchs realisiert. Dieser Hörversuch fand parallel zur BO der tschechischen Operette ‚Schwanda, der Dudelsackpfeifer,‘ statt und ist detailliert in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Die Auswahl der beiden Proben für die beiden Hörversuche wurde von Christian Komp, getroffen, um die Realisierbarkeit während des Probeverkehrs zu garantieren. Die Methodik wurde somit in dem zeitlichen Rahmen dieser Masterarbeit durch zwei Hörversuchen am Opernhaus in Graz evaluiert.

4.3.1 Erster Hörversuch an der Oper Graz – Clivia BO

Für den ersten Hörversuch an der Oper Graz, welche am 22.10.21 während einer Bühnenorchesterprobe der Operette „Clivia“ durchgeführt wurde, gab es zwei verschiedene Hörpositionen. An beiden Positionen wurde als Hauptmikrofon ein SoundField ST450 platziert.

Die erste Hörposition des SoundField Mikrofon wurde, wie schon während des technischen Aufbaus, am Balkon positioniert und an der Halterung montiert. Diese hält die zwei Mikrofone für das Mithören auf der Bühne und die Kamera für die Totale. Ebenso wurde dort auch der SoundField Prozessor fixiert, sodass das Mikrofon-signal des ST450 im B-Format an die Andiamo Stagebox weitergeleitet wurde. Im folgenden Bild (siehe Abbildung 32) sieht

man die Positionierung des ambisonischen Mikrofons über den Mithörmikrofonen und der Kamera.

Somit befand sich diese Position nicht direkt an einem Sitzplatz, da dieser auch im laufenden Opernbetrieb immer für das Publikum und nicht für ein Mikrophon reserviert wird. Jedoch wurde das Mikrophon auf der Sitzhöhe der ersten Sitzreihe des Balkons montiert und ging etwa ein Meter davon entfernt weiter in den Raum hinein. Diese Balkonposition wird oft von den Tonschaffenden als Referenzplatz zum Hören aufgesucht, wie es Komp, während seines Interviews erzählt (Komp 08.06.2021, S. 127 Anhang). Ebenso wie Komp berichtete Sarah Black, während ihrer schriftlichen Befragung zur Hörsituation in der Oper in Sydney, dass die beste Position die „centre stalls position“ ist, da dort das Abspielsystem am besten abdeckt (Black 27.05.2021, S. 119 Anhang). Deshalb sind diese Plätze auch im Sydney Opera House begehrt.

Black erläutert, dass die Veranstalter und Produzenten diesen Platz meist lieber zu einem teuren Preis an die Zuschauer verkaufen, anstatt ihn für die Tontechnik zu sperren. Dadurch können die Tonschaffenden nur während der Probephasen diese Position aufsuchen und müssen für die Vorstellung selbst wieder an ihren Mischplatz in der Tonregie zurückkehren.

Die zweite gewählte Hörposition befindet sich auf der linken Seite der Galerie. Grund hierfür ist, dass dieser Hörplatz nach Einschätzungen von Komp zu den schlechteren im Haus zählt, da in den oberen Rängen die Sprachverständlichkeit oftmals kritisch sei.

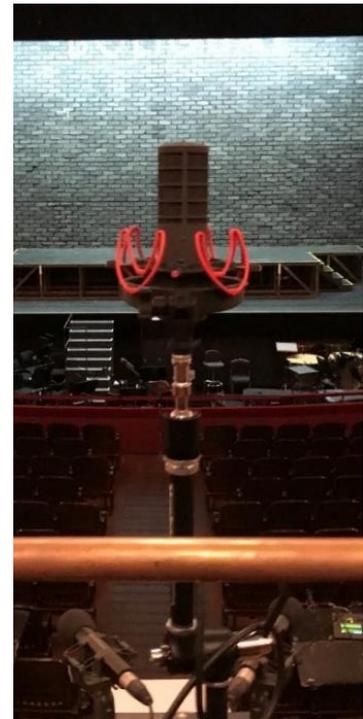


Abbildung 32: Erste Position des SoundField Mikrofons am Balkon während des ersten Hörversuchs (Brühwiler 2021)



Abbildung 33: zweite Position des SoundField Mikrofons links auf der Galerie während des ersten Hörversuchs

Dies berichtete Christian Komp während der Begehung am Opernhaus, welche zur Planung der praktischen Umsetzung dienen sollte. Während der Proben gehen die Tonschaffenden oft an diese Position, um den leitenden Tonmischer des Stücks rückmelden zu können, wie die Klangverteilung an dieser Position ist, berichtete Komp in seinem Interview (Komp 08.06.2021, S. 129 Anhang). Dem folgenden Bild (siehe Abbildung 33) kann diese Positionierung entnommen werden, mit dem Blick ausgerichtet auf die Bühne.

Die Höhe des Mikrofons wurde, wie auch schon während der Aufnahme der Impulsantworten, auf 1,20 m gestellt. Da dieser Platz sich näher an den reflektierenden Deckensegeln befindet, welche zum Verteilen des Orchesterklangs im Raum über dem Orchestergraben angebracht wurde, dominiere auf der Galerie oftmals das Orchester und überdecke somit die Stimmen auf der Bühne, was Komp ebenfalls in der Opernbegehung anmerkt. Deshalb sollte diese Position während des ersten Hörversuchs als Möglichkeit zum Positionswechsel genutzt werden.

Während der Durchführung des Hörversuchs, wurden mit einem separaten Laptop die Mikrofonsignale abgegriffen und aufgenommen, um diese im Nachhinein auf ihre Einstellungen zu prüfen und gegebenenfalls diese neu anpassen zu können. Ebenso dienen die aufgenommenen Signale zum Vergleich mit der zuerst durchgeführten Faltung. Zudem wurde ebenfalls der Headtracker des IEMs mit angebunden und den Proband*innen somit die Möglichkeiten geboten, diesen zu nutzen und somit das Signal dynamisch mit Kopfbewegungen abzuhören.

Fernsteuerung

Zur Fernsteuerung der Parameter der Plugins und der Kanallautstärken in der Digital Audio Workstation (kurz DAW) Reaper¹⁸, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Patch in der Software Max¹⁹ programmiert. Die beiden Programme sind über das Netzwerkprotokoll Open Sound Control (kurz OSC) verbunden, welches eine Echtzeitbearbeitung und somit eine Fernsteuerung von Sound ermöglicht (Wright und Freed 2021).

¹⁸ Reaper Website: https://www.reaper.fm/download.php?from_reaper=1

¹⁹ Cycling74 Website für Max Software: <https://cycling74.com/products/max>

Wie auf der Abbildung 34 zu sehen, ist die GUI simpel gehalten.

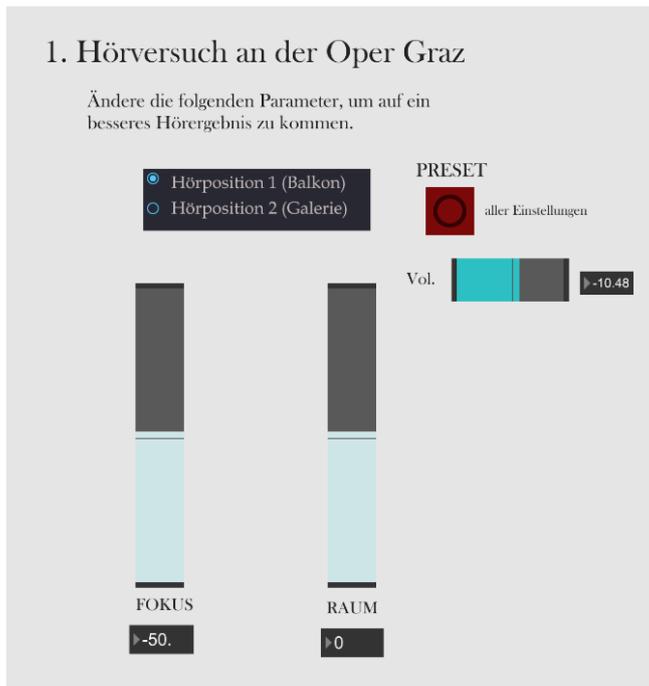


Abbildung 34: Max Patch des ersten Hörversuchs, welcher zur Steuerung der Parameter in Reaper über OSC genutzt wurde

Dieses Patch ermöglicht den Wechsel der beiden Hörpositionen am Balkon und auf der Galerie, das Einstellen der Lautstärke und das Zurücksetzen auf die Voreinstellungen, über welchen auch der Hörversuch durchgeführt wurde. Mit der Erhöhung des Fokus durch den gleichnamigen Regler, werden zum einen die Parameter „Envelope“, welcher gegen 0 geht, und zum anderen der „Dominance X“ Parameter, welcher gegen 1 geht, des Harpex-X Plugins gesteuert.

Somit wird der Raumanteil reduziert und die Richtung nach vorne zentriert, welches beim „Envelope“-Parameter im Bereich zwischen 2 bei -50 und 0 bei +50 einstellbar ist. Der Dominance X Regler bewegt sich zwischen einem Minimum von 0 bis auf ein Maximum von 0,6. Neben dem Harpex Plugin werden auch die Parameter des Directional Loudness Plugins durch die Adjustierung dieses Reglers verändert, welches ebenfalls auf das SoundField Signal angewendet wird. Hierbei werden die zuvor festgelegten Bereiche der frontalen Richtung und des Nachhallbereichs außerhalb des Zentrums in ihrer Lautstärke reguliert. Bei steigendem Fokus steigt die Lautstärke des frontalen Bereichs zwischen 0 dB und maximal 8dB und verringert gleichzeitig die Lautstärke des Nachhallbereichs zwischen -2 dB und -22 dB. Der „Raum“-Regler steuert ausschließlich die Lautstärke der Raummikrofone im Gesamtsignal, sodass bei einer Erhöhung der Anteil der Raummikrofone lauter wird. Hierbei kann der Raum maximal auf 8 dB hochgeregelt und unendlich weit abgesenkt werden. Somit ist die Übertragung der Raummikrofone bei einer Einstellung des Raumreglers auf -50 nicht mehr hörbar.

Durchführung

Der erste Hörversuch wurde mit den geschlossenen Kopfhörer DT770 von Beyerdynamic in der Tonregie während der Bühnenorchesterprobe von „Clivia“ durchgeführt. Jedoch hatten die Probanden zusätzlich die Möglichkeit die zwei Positionen vor der Durchführung des Hörversuchs selbst im Saal anzuhören. Drei von vier Probanden nutzten diese Option und konnten zusätzlich über Kopfhörer das kombinierte Mikrofonsignal der Haupt- und Raummikrofone abhören, was dasselbe binaurale Signal während des Hörversuchs in der Tonregie ist. Dieser Vergleich konnte nicht direkt an den Hauptmikrofonpositionen im Saal durchgeführt werden, da die Latenz des Mikrofonsignals hörbar war und das Direktsignal an diesen Positionen zu laut, um von den geschlossenen Kopfhörern zur Gänze ausgeblendet zu werden. Deshalb wurde das Signal in ein paar Metern Entfernung vor den Eingängen zur Galerie außerhalb des Auditoriums, für die zweite Hörposition, und zum Balkon, für die erste Hörposition, über einen separaten Kopfhörerverstärker angehört.

Nach dem akustischen Klangeindruck im Saal, wurde der Hörversuch in der Tonregie durchgeführt. Die schriftlichen Ergebnisse sind im Original dem Anhang beigelegt. Im Folgenden wird nun die Durchführung mit den ausgewählten Probanden dargestellt. Zunächst durften die Probanden entscheiden, ob sie während des Hörversuchs den Headtracker verwenden möchten, wofür sich drei von vier Testpersonen entschieden haben. Im Hörversuch wurde nach der allgemeinen Bewertung des Klangs, das Realitätsempfinden der Lautstärke, die Einschätzung des Fokus auf die Bühne und schlussendlich die Einordnung des Raumklangs als Abbild des Opernsaals gefragt. Nach der Beantwortung dieser Fragen konnte der Proband die Parameter Fokus, Raum und Volume von den beiden Hörpositionen anpassen und die persönlich als besser empfundenen Werte eintragen und gegebenenfalls Anmerkungen dazuschreiben.

Für die Repräsentativität war die Anzahl der Teilnehmenden zu klein, um verallgemeinerte Aussagen zu treffen. Allerdings ging es bei diesen Hörversuchen nicht primär darum das Klangbild von ausgebildeten Tonmeistern bewerten zu lassen, sondern um die Beurteilung der Tonschaffenden des Hauses, die nicht gesondert in der technischen Gehörbildung ausgebildet sein müssen, aber jahrelange Hörerfahrung in diesem Opernsaal vorweisen und somit den Raumklang gut kennen.

4.3.2 Beurteilung und Überarbeitung des ersten Hörversuchs

Nach der Durchführung des ersten Hörversuchs in Echtzeit, konnten deutliche Unterschiede zur Faltung mit den Beispielsignalen festgestellt werden, weshalb eine genaue Überprüfung der Methode an diesem Punkt verübt wurde. Eines der prägnantesten Auffälligkeiten im Vergleich zur Faltung war die Latenz im Signalfluss, was von allen vier Probanden als störend und erschwerend empfunden wurde, weshalb dieses Problem als erstes behoben werden musste.

Latenz

Die entstandene Latenz durch die verwendeten Plugins konnte während der offline Testung mit der Auralisation nicht festgestellt werden, da im Vergleich zur Faltung während des Hörversuchs ein Vergleichshören mit der Realität ohne Latenz möglich war. Es stellte sich heraus, dass das Harpex-X Plugin, welches ein signalabhängiges Verfahren nutzt, eine zu große Latenz im Signalfluss auslöste, wodurch es zur Echtzeitanwendung nicht brauchbar war. Um diesen Sachverhalt zu bestätigen, wurde der Inhaber und Entwickler von Harpex, Svein Berge, kontaktiert. Berge erklärte in einer E-Mail, dass die für das Plugin verwendete Signalverarbeitungsmethode eine Verzögerungszeit von etwa 0,15 Sekunden beinhalte, welche im Plugin nicht verhindert werden könne, wodurch es während des Hörversuchs zu einer Signalverschiebung um knapp 6000 Samples kam. Da dem menschlichen Gehör schon bereits eine Latenz von 50ms als Echo auffällt (Dickreiter et al. 2014, S. 33), sind 125ms vor allem auffällig, wenn noch andere Mikrofonsignale unverzögert dem Endsignal beigemischt werden.

Zudem war durch die verwendeten geschlossenen Kopfhörer von Beyerdynamic der Direkt-schall aus dem Saal noch deutlich hörbar, was die Problematik der Latenz im Signal verstärkt hat. Unter anderen Bedingungen wäre dieses Problem behebbar, jedoch besteht in der Tonregie durch die mechanisch herunterfahrbare Glasscheibe sowohl eine visuelle, wie auch eine akustische Verbindung zur Bühne, welche bei allen Proben und Vorstellungen offen ist. Deshalb wurde der Lösungsansatz zur Behebung des Latenzproblems für den nächsten Hörversuch umgesetzt, welcher auf die Verwendung des Harpex Plugins verzichtet und ausschließlich signalunabhängige Pluginverfahren nutzt. Zwar hat das Harpex Plugin klangliche Vorteile, welche jedoch wegen der großen Verzögerung nicht besonders wahrnehmbar waren und somit sekundär zu werten sind.

Dieser Ansatz wurde mit den aufgenommenen Signalen des Hörversuchs getestet und ein Signalfluss von der Konvertierung des FuMa FOA B-Formats auf AmbiX, über die Fokussierung und den gleichzeitigen Upmix auf 3. Ordnung durch das Directional Loudness Plugin und abschließend die binaurale Dekodierung erstellt. Dadurch ist eine Abhöre mit geringer Latenz (10-15ms) möglich. Abgesehen von der hohen Latenz, fiel zudem die nicht ganz ausgewogene Balance zwischen Orchestergraben und Bühne auf.

Balancen zwischen Orchestergraben und Bühne

Während des Hörversuchs wurde von zwei der vier Probanden angemerkt, dass der Raumklang den Fokus störe und die Bühne deutlich zu diffus sei. Der Klang des Orchesters wurde von allen als gut befunden, jedoch stimme das Verhältnis zu den Sänger*innen auf der Bühne nicht. Das folgende Diagramm (siehe Abbildung 35) zeigt die Ergebnisse des ersten Hörversuchs.

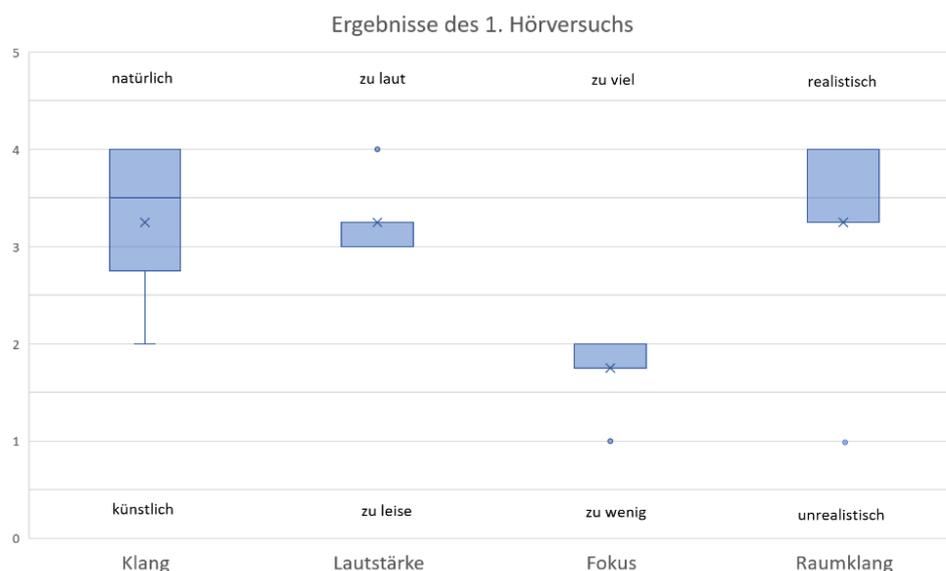


Abbildung 35: Ergebnisse des ersten Hörversuchs an der Oper Graz, die Daten beziehen sich auf beide Hörpositionen mit ihren jeweiligen Presets

Die Daten in Abbildung 35 und 36 werden in Form eines Kastengrafikdiagramm dargestellt, welches die Verteilung der vorhandenen Daten in Quartile anzeigt. Hierbei werden Ausreißer durch Punkte abgebildet und die Mittelwerte als Kreuz im Balken markiert wird. Die außerhalb der Balken liegenden vertikalen Linien zeigen die Aussteuerung der Quartile an. Die Quartilberechnung wurde inklusive Median, vorgenommen, welcher im Diagramm als horizontale Linie innerhalb des Balkens gekennzeichnet ist.

Da die empfundene Lautstärke weder zu laut noch zu leise gewertet wurde, muss dieser Parameter im zweiten Hörversuch nicht mehr überprüft werden. Zudem wird in der Grafik (siehe Abbildung 35) deutlich, dass der Fokus auf die Bühne als nicht ausreichend empfunden wurde. Diese Unausgewogenheit liegt vor allem daran, dass das Orchester nur schwer von den Sänger*innen zu trennen ist und somit mit dem Erhöhen des Fokusreglers ebenfalls in der Lautstärke mit angehoben wird.

Die Probanden nehmen die Sprache beim Testhören im Saal ohne Kopfhörer verständlicher wahr als es beim Hören des binauralen Signals der Fall ist. Bei der Möglichkeit zur Anpassung der Parameter, welche Teil des Hörversuchs war, konnte ebenfalls die Tendenz zu mehr Fokus und weniger Raumanteil an beiden Hörpositionen festgestellt werden. Die Ergebnisse der individuellen Einstellungen der Parameter während des ersten Hörversuchs sind im unteren Diagramm (siehe Abbildung 36) dargestellt.

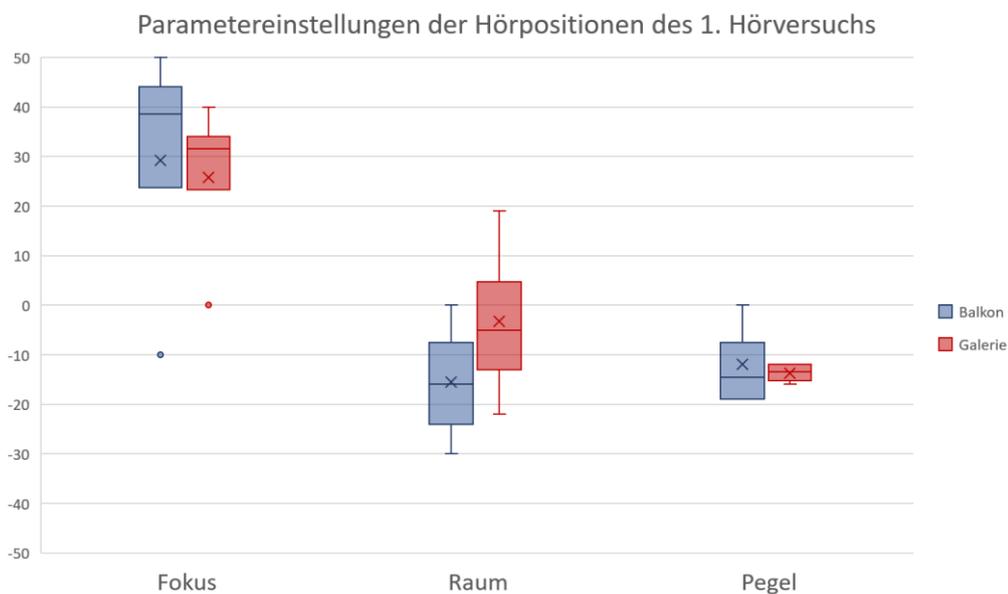


Abbildung 36: Einstellungen der Parameter Fokus, Raum und Volume (hier als Pegel beschriftet) während des 1. Hörversuch

Wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, ist das menschliche Gehör dazu in der Lage eine Enthüllung zu Gunsten der Sprachverständlichkeit durchzunehmen, was offenbar nur beim Hören mit den eigenen Ohren funktioniert. Diese Annahme wird getroffen, da dieser Effekt beim Abhören über Kopfhörer während des Hörversuchs nicht wahrnehmbar war. Deshalb wurde dem Lösungsansatz nachgegangen das abgehörte Signal in seiner Sprachverständlichkeit zu optimieren. Hierfür wurde mit Dr. Jan Rennies-Hochmuth, Leiter der Gruppe "Personalisierte Hörsysteme" am Fraunhofer IDMT, Kontakt aufgenommen.

Rennies-Hochmuth arbeitet gemeinsam mit seinem Team an einer Methode zur Echtzeitoptimierung der Sprachverständlichkeit, welche von ihm auf der Tonmeistertagung 2021 präsentiert wurde (Fraunhofer IDMT 2.11.21). Der hierfür entwickelte Algorithmus Adapt DRC (engl. adaptive dynamic range compression) absolviert eine Signalanalyse, welche durch modellbasierte Signalverarbeitungsverfahren eine Quellentrennung im Endsignal erreicht, wodurch der Dialog separat zum Hintergrundgeschehen verstärkt werden kann (Fraunhofer IDMT 2015). Die neuen Audioanalyseverfahren des Fraunhofer Instituts für Digitale Medientechnologie IDMT dienen zur Unterstützung der Tonschaffenden zur objektiven Einschätzung der Verständlichkeit von Sprache (Fraunhofer IDMT 2.11.21). Um näheres darüber zu erfahren, um eine mögliche Verbesserung für den zweiten Hörversuch zu erreichen, wurden im November 2021 ein digitales Gespräch mit Rennies-Hochmuth geführt. Diese Unterhaltung wurde nicht aufgezeichnet. Rennies-Hochmuth berichtete über eine vorhandene Latenz von mindestens 30ms im Signalfluss, welche in der Übertragung kompensiert und somit als nicht störend empfunden wird. Jedoch sei diese Latenz bei einer Echtzeitanwendung mit vorhandenem Input des zu übertragenden Signals, was auf die Echtzeitabhöre am Opernhaus zutrifft, hörbar und derzeit noch nicht vermeidbar. Dennoch testete Dr. Jan Rennies-Hochmuth nach diesem Gespräch mit seinem Team für diese Masterarbeit ihre bereits existierenden Algorithmen an den Hörbeispielen aus dem ersten Versuch im Opernhaus in Graz, da sie ihre Algorithmen bereits bei Musikszenen getestet haben und an einer Reduktion der Latenz arbeiten, wie er im Gespräch berichtete. Jedoch ergab die Testung mit der Signalanalyse und den bestehenden Algorithmen ohne weitere Anpassungen kein zufriedenstellendes Ergebnis. Laut Rennies-Hochmuth wäre hierfür eine Modifikation durch ein Re-Training notwendig, was jedoch im Rahmen dieser Masterarbeit nicht mehr umgesetzt werden kann. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann dieser Lösungsansatz für den zweiten Hörversuch nicht verwendet werden und wird deshalb nicht weiter im Detail behandelt.

Dennoch ist eine Verbesserung der Fokussierung auf das Bühnengeschehen für den zweiten Hörversuch essentiell. Eine mögliche Methode, um das Signal auf der Bühne deutlicher repräsentieren zu können, ist physische Nähe zur Schallquelle, wodurch das Mikrofon näher zur Bühne positioniert wird. Da diese Methode als Fixinstallation am Opernhaus schwer möglich ist, dient diese nur als Referenz zum Signal der eigentlich zu repräsentierenden Hörposition, um diesem Ansatz nachzugehen.

Zudem kann das Richtungshören durch ein zusätzliches Keulenmikrofon verstärkt werden, welches frequenzabhängig gerichtet ist und somit erst seine Richtwirkung idealerweise ab den mittleren Frequenzen erreicht (Weinzierl 2008, S. 351). Es wird davon ausgegangen, dass ein zusätzliches Richtrohr an der Hörposition das Endsignal bei seiner Fokussierung auf die Bühne unterstützen kann, da dadurch eine bessere Isolation der Stimme zum Orchester erzielt werden kann.

Individuelle binaurale Dekodierung

Wie der oberen Abbildung 35 mit den Ergebnissen des ersten Hörversuchs zu entnehmen ist, wird der allgemeine Klang in einem größeren Bereich zwischen natürlich und unnatürlich gewertet. Zwar geht die Tendenz zu einem natürlichen Klang hin, jedoch deutet die Breite des Bereichs auf eine notwendige Verbesserung des Klangerlebnisses der vier Probanden hin. Diese Verbesserung kann durch eine Individualisierung der binauralen Dekodierung erreicht werden (Zaunschirm et al. 2020, S. 2).

Eine komplette individuelle binaurale Abhöre kann nur mit der Ausmessung der eigenen Ohren in Form einer originellen HRTF erreicht werden. Jedoch ist die Aufnahme solcher angepassten HRTFs sehr umfangreich und zeitaufwendig, weshalb diese personalisierte Aufnahme für die vier Probanden des Opernhauses im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnte. Allerdings werden im Internet bereits Datenbanken mit aufgenommenen HRTFs zur Verfügung gestellt, welche für nicht kommerzielle Zwecke verwendet werden können. In manchen Datenbanken wurde zudem die Form des Ohrenpaares und der Kopfform den aufgenommenen HRTFs visuell zugeordnet, wodurch die Möglichkeit besteht ein ähnliches Paar Ohren wie das eigene zu finden. Die für diese Masterarbeit herangezogenen Datenbanken sind aus dem Audio Lab der York Universität (Armstrong et al. 2020), von der Technischen Universität Berlin (Brinkmann et al. 2019) und aus dem 3D Audio and Applied Acoustics Lab der Princeton Universität in New Jersey (Sridhar et al. 2021). Alle drei Datenbanken bieten ein visuelles 3D simuliertes Abbild der jeweiligen Testpersonen. Während es sich bei der SADIE (engl. Spatial Audio for Domestic Interactive Entertainment) Datenbank der Universität in York um hochaufgelöste Fotografien von echten Ohren mit einem 3D Kopfskan handelt, stellen die HUTUBS HRTF Datenbank der TU Berlin und die 3D3A Lab HRTF Datenbank der Universität in Princeton die gemessene Anthropometrie ihrer Testpersonen in 3D-Polygone dar, sodass man den Kopf von allen Seiten betrachten kann.

Dieser Lösungsansatz verlangt somit nach genauen Bildern der Ohren und des Kopfes der Probanden, welche vor der Durchführung des Hörversuchs gemacht und mit den Datenbanken abgeglichen werden kann. Dadurch wird zumindest eine ansatzweise Individualisierung der binauralen Dekodierung ermöglicht, welche dennoch zu einer Verbesserung der Klangwahrnehmung führen kann. Um die anthropometrischen Daten in den Signalfluss zu implementieren, benötigt es ein signalunabhängiges Plugin, welches das Laden solcher Daten im SOFA-Format erlaubt, da die oben erwähnten Datenbanken ihre HRTFs ebenfalls in diesem Format hinterlegt haben.

Diese Möglichkeit bietet unter anderem das aXMonitor Plugin aus der aX Ambisonics Plugins Suite, die das Laden einer benutzerdefinierten HRTF für personalisiertes binaurales Rendering in erster, dritter und siebter Ordnung erlaubt (Stitt 2017). Zur Verwendung dieses Plugins wurde von Peter Stitt, dem Entwickler und Berater der SSA Plugins, eine Volllizenz des Ambisonic Monitors zur Verfügung gestellt. Dadurch konnte die binaurale Dekodierung im zweiten Hörversuch mit den individuell ausgewählten HRTFs im aXMonitor realisiert werden.

Parameter für den zweiten Hörversuch

Zusammenfassend werden für den zweiten Hörversuch folgende Änderungen vorgenommen. Zum einen werden ausschließlich signalunabhängige Plugins verwendet, welche eine geringe, nicht auffällige Latenz garantieren soll. Des Weiteren wird zur Optimierung des Fokus ein weiteres SoundField ST450 Mikrofon als alternative Vergleichsposition näher an der Bühne platziert, ebenso wie ein zusätzliches Richtrohrmikrofon am Hörplatz montiert, wobei das Monosignal des Richtrohrs zunächst ambisonisch enkodiert wird. Abschließend wird die Individualisierung der binauralen Dekodierung mit den HRTFs der ähnlichen Personen in dem SSA Plugin aXMonitor durchgeführt.

4.3.3 Zweiter Hörversuch an der Oper Graz – Schwanda BO

Der zweite Hörversuch erfolgte am 10.12.21 während der Bühnenorchesterprobe der Operette „Schwanda, der Dudelsackpfeifer“ von Jaromír Weinberger in der Oper Graz. Es wurden die Kritikpunkte des ersten Hörversuchs korrigiert, angefangen mit der Latenz, die das größte Problem zur klanglichen Wertung darstellte. Aus diesem Grund wurde beim diesem Hörversuch ausschließlich mit signalunabhängigen Plugins gearbeitet, wodurch eine zusätzliche Konvertierung des ST450 Mikrofonsignals notwendig ist.

Diese Konvertierung von FuMa auf AmbiX, welche zuvor das Harpex Plugin übernommen hatte, wurde nun mit dem AmbiX-Converter Plugin von Matthias Kronlachner durchgeführt (Kronlachner 2014a). Zudem konnte durch die Nutzung des Directional Loudness Plugins das FOA Signal dennoch indirekt auf HOA in 3. Ordnung hochgemischt werden. Außerdem wurde das Fehlen des deutlichen Fokus auf die Bühne wegen des zu diffusen Raumklangs mit den zuvor in Kapitel 4.4 genannten Methoden optimiert. Somit wurde die Balkonposition in seiner Mikrofonierung um ein Shotgun Mikrofon, AKG C480 mit CK69 ULS-Kapsel, mit Ausrichtung auf die Bühne erweitert. In der folgenden Abbildung 37 ist dieser Aufbau zu sehen.



Abbildung 37: Balkonposition des SoundField Mikrofons inklusive Shotgun mit Ausrichtung zur Bühne (Brühwiler 2021)

Im zweiten Hörversuch wurde der Fokus auf das realitätsnahe Abbild einer Hörposition gelegt. Dennoch wurde ein zweites SoundField Mikrofon im Parterre aufgestellt und ebenfalls für den Hörversuch verwendet, welche jedoch ebenfalls den Hörplatz am Balkon darstellen soll. Dies ist ein weiterer Versuch den Eindruck der Diffusität des Hauptmikrofons zu mindern und den Fokus auf die Bühne durch die physische Nähe zu stärken. Bei der Positionierung dieses Mikrofons musste auf den Probeverkehr geachtet werden, weshalb dieses Mikrofon nicht ganz mittig im Parterre steht und auch nur annähernd auf die Höhe des Balkons kommt. Aber als Referenzposition für den Hörversuch ist diese Positionierung ausreichend. Diese ist in Abbildung 38 zu sehen.



Abbildung 38: zweite Position des SoundField Mikrofons im Parterre, näher an der Bühne

Die Umsetzung einer solchen Hörposition, wie sie in Abbildung 38 zu sehen ist, mit einem Mikrophon im Parterre als dauerhafte Installation während des Probenverkehrs ist im Opernhaus in Graz nicht denkbar, da es dort das Publikum physisch stören würde.

Die Raummikrofone befinden sich weiterhin an denselben Positionen wie auch schon während der Aufnahme der Impulsantworten und auch während des ersten Hörversuchs.

Individualisierung

Wie nach den Erkenntnissen des ersten Hörversuchs angedacht, wurden für den zweiten Hörversuch verschiedene HRTFs zur Verbesserung der individuellen Hörergebnisse verwendet. Da es nicht möglich war im Rahmen dieser Masterarbeit eigene HRTFs der vier Probanden des Opernhauses aufzunehmen, wurden Fotos der Ohren und des Kopfes aller vier Testpersonen erstellt, um anhand dessen aus Datenbanken ähnliche Testpersonen zu finden, bei denen bereits eine HRTF erstellt wurde.

Hierfür wurden die oben erwähnten Datenbanken verwendet. In der folgenden Abbildung (siehe Abbildung 39) ist ein Vergleichsbeispiel der Ohren eines Probanden des Hörversuchs mit den zugeordneten Versuchsobjekten der oben genannten Datenbanken. Im zweiten Hörversuch wird dies angewendet, um zu testen, ob die Ähnlichkeiten der Ohren zu einem besseren Ergebnis führen als es im Vergleich dazu die binaurale Dekodierung des KEMAR Kunstkopfs liefert. Die Auswahl der passenden Ohren können über die überarbeitete Fernsteuerung im Max Patch ausgewählt und im Vergleich gehört werden.

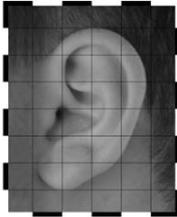
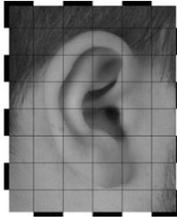
	LINKES OHR	KOPF	RECHTES OHR
Original			
H11 (SADIE)			
pp4 (TU Berlin)			

Abbildung 39: Vergleich der Obren und Kopfstruktur einer der Probanden, Ähnlichkeiten bei den Versuchssubjekten der Datenbanken von SADIE und TU Berlin gefunden

Fernsteuerung

Da sich für diesen Hörversuch einige Parameter geändert hatten, benötigt es eine Erweiterung des Max Patches, welches von der Autorin dieser Arbeit ebenfalls programmiert wurde und in Abbildung 40 als Präsentationsansicht dargestellt ist. Die Auswahl des eigenen Namens während des Hörversuchs bestimmt die Auswahl der passenden HRTFs in der zweiten Frage nach dem natürlichsten Klangbild.

Die steuerbaren Parameter des Fokus- und Raum-Reglers greifen hierbei nicht mehr separat auf die Parameter der Plugins zu, sondern steuert beim Fokus die Lautstärke des Richtrohrmikrofons und beim Raum weiterhin die Lautstärke der Raummikrofone. Beide Regler bewegen sich zwischen +12 und -40 dB, wodurch bei einem kompletten Absenken des Raumreglers die Raummikrofone nicht mehr hörbar sind, was ebenso für das Richtrohrmikrofon über den Fokusregler gilt.

Die Auswahl der Aktivierung oder Deaktivierung des Headtrackers wurde nicht mehr am Beginn des Hörversuchs ausgewählt, sondern konnte während des Hörversuchs noch hinzugefügt oder entfernt werden. Die drei zur Auswahl stehenden Klangoptionen der zweiten Frage beinhalteten in Einstellung 1 das KEMAR Ohrenpaar, was bei allen vier Testpersonen gleich ist und auf zwei und drei befinden sich jeweils die verschiedenen zugeordneten HRTFs aus den Datenbanken. Diese Bildvergleiche sind im Anhang zu finden.

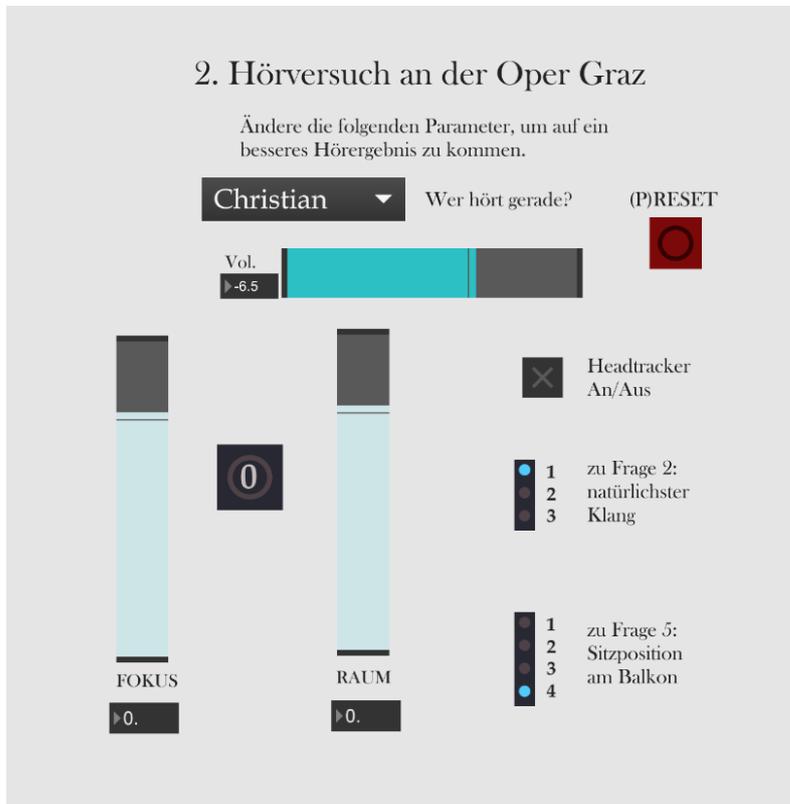


Abbildung 40: Max Patch für den zweiten Hörversuch, welcher die individuelle Auswahl des Probanden ermöglichte und zudem Vergleichshören für Frage 2 und 5 erleichterte

Das Patch bietet zudem die Auswahlmöglichkeiten für das realistischste klangliche Abbild der Balkonposition, wobei die ersten beiden Optionen das Mikrofon im Parterre zeigen, wobei die zweite Möglichkeit zusätzlich das Directional Loudness Plugin mit Mittenfokussierung integriert hat. Auf den Möglichkeiten drei und vier hört man das Klangbild des Mikrofons am Balkon und bei der Option vier wird noch das Shotgun Mikrofon beigemischt.

Mit diesem Mikrofonaufbau und integrierter Reaper-Fernsteuerung durch das überarbeitete Max Patch wurde der zweite Hörversuch durchgeführt.

Durchführung

Der zweite Hörversuch wurde ausschließlich in der Tonregie realisiert unter Verwendung der geschlossenen Kopfhörer NDH20 von Neumann, auf welchen der Headtracker fixiert wurde. Da die Neumann Kopfhörer den Schall von außen besser abschirmen als die Kopfhörer von Beyerdynamic, sollte die Qualität der Echtzeitabhöre mit diesem Wechsel zusätzlich optimiert werden. Das Referenzhören im Saal fiel bei diesem Hörversuch aus, da die Balkonposition den Ton-schaffenden klanglich bekannt war und sie deshalb ihrer Aussage nach kein zusätzliches Vergleichshören am Balkon benötigen. Das folgende Bild zeigt die Hörposition in der Tonregie während dem Einstellen der Parameter (Abbildung



Abbildung 41: Abbörposition während des zweiten Hörversuchs in der Tonregie (Brühwiler 2021)

41). Aus gesundheitlichen Gründen konnten mit zwei Testpersonen der Hörversuch nur offline durchgeführt werden, wobei sie einen Ausschnitt der Aufnahmen aus der Probe zu hören bekommen haben.

4.4 Zusammenfassende Ergebnisse der Durchführung

Insgesamt wurde von allen vier Probanden eine deutliche Verbesserung der Klangabbildung im Vergleich zum ersten Hörversuch festgestellt. Dies spiegelte sich auch in der Bewertung des allgemeinen Klangs und der Fokussierung auf die Bühne wider, was dem folgenden Kastengrafikdiagramm (Abbildung 42) zu entnehmen ist.

Der Klang wurde deutlich als natürlicher wahrgenommen als es noch beim ersten Hörversuch der Fall war. Dies könnte vor allem an der nun fehlenden Latenz im Signalfluss liegen, die im zweiten Hörversuch bei 11ms lag und somit für die Testpersonen nicht hörbar war. Zudem könnte die natürlichere Klangwahrnehmung an der angewendeten Individualisierung des binauralen Renderings liegen, da drei von vier Probanden durch die ausgewählten Ohren der HUTUBS Datenbank den natürlichsten Klang empfanden. Nur ein Proband wählte den KEMAR Kunstkopf als natürlichste Klangempfindung aus.

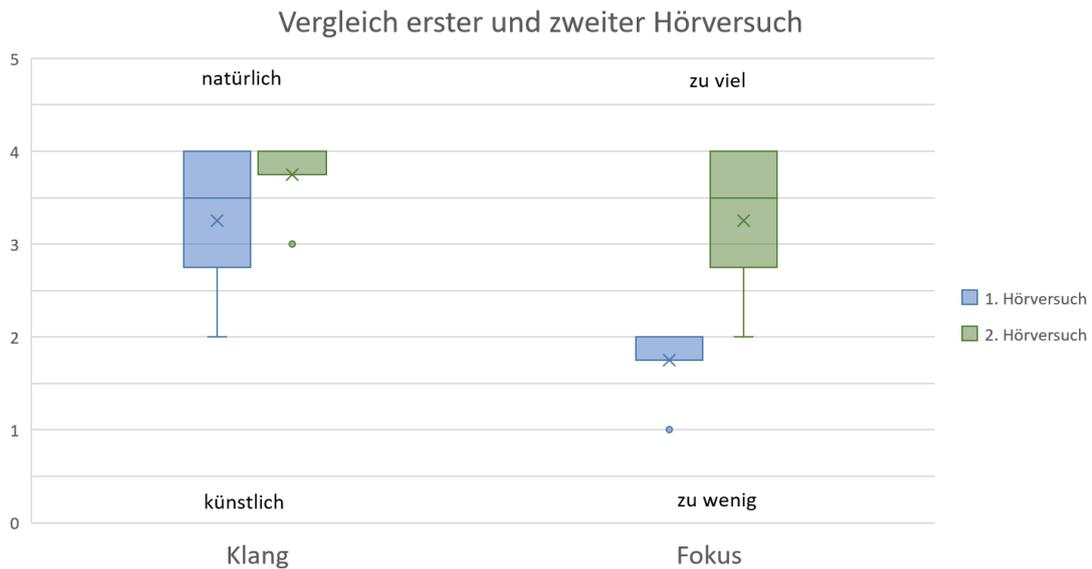


Abbildung 42: Vergleich der Ergebnisse von Klang und Fokus bei den beiden Hörversuchen

Des Weiteren ist anzumerken, dass keiner sich für das Abhören mit Headtracker entschieden hatte, da es für ihr analytisches Hören irritierend und verwirrend war und es zudem die Klangqualität beeinträchtigt hätte. Da während des ersten Hörversuchs die Mehrheit der Versuchspersonen den Headtracker in Verwendung hatten, ist dies ein deutlicher Rückgang. Dennoch muss hierbei berücksichtigt werden, dass diese Hörversuche mit nur vier Probanden durchgeführt wurde, welche keine früheren Erfahrungen mit Headtracking-Systemen vorzuweisen haben. Da dies eine subjektive Entscheidungsfrage ist, zeigt dieses Ergebnis, dass die Tonschaffenden am Opernhaus in Graz für ein Abhörssystem kein zusätzliches Headtracking wünschen.

Neben der klanglichen Beurteilung zeigt Abbildung 42 auch die Bewertung des Fokus, welcher im zweiten Hörversuch besser eingestuft wurde. Der Bereich liegt hier zwischen ‚genau richtig‘ und ‚etwas zu viel‘, wobei zuvor der Fokus nur im ‚zu wenig‘ Bereich gewertet wurde. Dies ist eine deutliche Steigerung im Vergleich zum ersten Hörversuch.

Die Anpassungen der Parameter Fokus, Raum und Volume zeigen weiterhin die Tendenz zu mehr Fokus und weniger Raumanteil, wodurch die Änderungen des Raumparameters am meisten vom vorgegebenen Preset abweichen (siehe Abbildung 43).

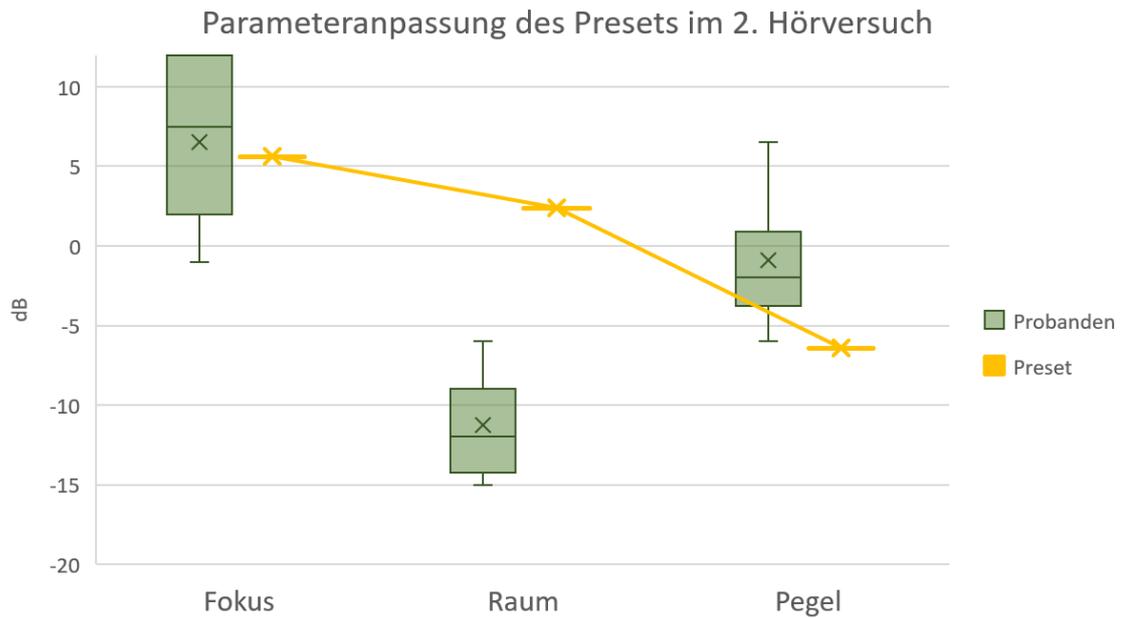


Abbildung 43: Anpassungen der Parameter Fokus, Raum und Volume (hier als Pegel benannt) während des zweiten Hörversuchs, im Vergleich zum Preset

Als Grundlage für diese Parameteranpassungen diente das Preset, welches die SoundField Position am Balkon inklusive Richtrohr repräsentiert, da diese Positionierung auch im laufenden Opernbetrieb realistisch umsetzbar wäre.

Bei der Frage nach dem Sitzplatz am Balkon bestanden vier Auswahlmöglichkeiten, welche die dort hörbaren Balancen zwischen Fokus auf die Bühne und Raumanteil wiedergeben sollen. Hierbei empfanden drei der vier Probanden die SoundField Mikrofonposition im Parterre inklusive der zusätzlichen Fokussierung durch das Directional Loudness Plugin als realistischste Repräsentation des Hörplatzes am Balkon. Somit festigt sich die Annahme, dass eine nähere Mikrofonierung den weiter hinten liegende Hörplatz realistischer in seinen Balancen wiedergibt. Ein Proband empfand die Balkonposition des SoundField Mikrofons inklusive des zusätzlichen Fokus durch das Richtmikrofon als repräsentativsten für den Balkon.

Die Entscheidung zur realistischsten Klangwiedergabe der Balkonposition ist gleichzustellen mit dem Realitätsempfinden gegenüber dem Raumklang aus dem ersten Hörversuch.

Abschließend wurde von den Probanden angemerkt, dass die Balancen im Raum über die Kopfhörerwiedergabe noch schwer einzuschätzen sind und damit das Vertrauen in das System zum Einstellen von Parametern wie Lautstärke oder Equalizer noch nicht ausreichend vorhanden ist, um dieses Abhörssystem im aktuellen Zustand zu nutzen. Jedoch sei ihrer Meinung nach die grundsätzliche Vorstellung des Klangbildes im Zuschauerraum über dieses System möglich.

Zusammenfassung

Aus dem ersten Hörversuch konnte die Erkenntnis erlangt werden, dass die zeitlichen Verschiebungen der verwendeten signalabhängigen Plugins zu groß für eine Echtzeitanwendung sind und deshalb bei dieser Methode zukünftig ausschließlich mit signalunabhängige Pluginverfahren gearbeitet wird. Zudem benötigt das FOA Mikrofonarray eine zusätzliche Möglichkeit zur Richtungsfokussierung, welches mit einem Richtrohrmikrofon umgesetzt wird.

Das Ergebnis dieser beiden Hörversuche zeigt, dass das Abhörssystem, welches in dieser Masterarbeit erarbeitet wurde, bedingt die Echtheit der Schallverteilung im Raum an einer bestimmten Hörposition wiedergeben kann. Zudem verbessert eine Personalisierung der binauralen Dekodierung durch individuelle HRTFs das Abhören, auch wenn diese Individualisierung nur ansatzweise durch den Abgleich von Ähnlichkeiten der Anthropometrie erreicht wird.

Diese Erkenntnisse zeigen, dass das Abhörssystem weiterer Optimierung bedarf, damit Tonschaffenden an Opernhäusern auf solche Systeme, während der Mischung einer Vorstellung, zugreifen können. Ein Überblick über die Vorschläge und Möglichkeiten für zukünftige Verbesserungen dieses Abhörsystems, werden im nächsten Kapitel ‚Fazit und Ausblick‘ beschrieben.

Kapitel 5

Fazit und Ausblick

5. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde nach einer Methode zur Lösung der suboptimalen Hörsituationen für Tonschaffenden während Vorstellungen an Opernhäusern geforscht. Hierfür wurden Korrespondenzen und Interviews mit Mitarbeiter*innen der Tonabteilungen aus verschiedenen Opernhäusern weltweit geführt, welche die Relevanz dieser vorliegenden Arbeit bekräftigen. Eine optimale Umsetzung eines Lösungsansatzes für dieses Problem würde ein binaurales Echtzeitabhörsystem über Kopfhörer mit einer Auswahlmöglichkeit der passenden individuellen HRTF der Tonschaffenden, wobei das System vorab die subjektive Lautstärkewahrnehmung reguliert. Die vorliegende Methode wurde durch die Anwendung ambisonischer 3D Audiotechnologien entwickelt und setzt sich aus der separaten Mikrofonierung des Haupthörplatzes mit FOA Mikrofon, des Fokus auf die Bühne durch Richtrohr und des Nachhalls im Raum mit vier im Raum verteilten Kugelmikrofonen zusammen.

Die Evaluation dieser Methode wurde am Opernhaus in Graz mit vier Tonschaffenden in Form von zwei Hörversuchen durchgeführt. Die Erkenntnisse dieser Auswertung weisen auf, dass die angewendete Methode den Raumklang im Zuschauerraum abbilden kann und die vorhandene Fokussierung auf die Bühne mehrheitlich als richtig wahrgenommen wird. Somit reicht die Methode aus, um das gehörte Klangereignis an dieser Position annähernd richtig balanciert wiederzugeben. Dennoch benötigt dieser Lösungsansatz weitere Optimierungsschritte im Bereich der Einstellung des Fokus. Zudem wird mit den Ergebnissen angedeutet, dass eine dynamische Version der binauralen Abhöre während des konzentrierten Hörens möglicherweise keinen Mehrwert bringt. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen der Hörversuche im Beispiel von Notre-Dame mit den Musiker*innen und von Fraunhofer mit dem Hörtraining aus Kapitel 3.1. Dennoch sollte für zukünftige Hörversuche erneut Headtracking verwendet werden, da die geringe Anzahl von vier Probanden nur eine Tendenz aufzeigen kann und somit noch kein allgemein geltender Ausschluss des Verfahrens beschlossen werden sollte. Dafür müsste diese Methode zunächst mit mehreren Tonschaffenden aus anderen Theaterhäusern getestet werden, um eine allgemeinere Aussage darüber treffen zu können. Für die Übertragung dieser Methode an andere Opernhäuser, müsste die Möglichkeiten zur Positionierung der Raummikrofone für den diffusen Nachhall und das

ambisonische Mikrofon inklusive Richtrohrmikrofon geklärt werden. Somit sind zwar individuelle Anpassungen notwendig, jedoch passt sich dieser Lösungsansatz an die Gegebenheiten des Opernhauses an und setzt keine komplette Umstrukturierung durch die Installation eines immersiven Lautsprechersystems voraus. Die bestehende Problematik der aktuellen Version dieser Methode ist das Fehlen der räumlichen Schärfe, welche in zukünftigen Forschungsprojekten angegangen werden sollte. Eine Möglichkeit zur Gewinnung von mehr Schärfe im Signal ist das Erhöhen der räumlichen Auflösung, welche durch die Erhöhung der Ordnung des ambisonischen Hauptmikrofons erreicht werden kann. Die Verwendung des Zylia HOA Mikrofons wurde wegen seiner klanglichen Qualität für diese Methode ausgeschlossen und wegen des noch hohen Preises ebenso das Eigenmike. Dennoch wäre es interessant die vorliegende Methode unter Verwendung des Eigenmikes zu überprüfen, ob durch die Verwendung eines HOA Mikrofons der Fokus nicht mehr im Raumklang verloren gehen würde.

Derzeit können die signalabhängigen Algorithmen wegen ihrer hörbaren Latenz noch nicht für die Verbesserung der räumlichen Schärfe durch Enthallungs- und (Sprach-)Fokussierungsprozesse verwendet werden. Jedoch wird in diesen Bereichen weiterhin geforscht, was zur einer zukünftigen Verringerung der Latenz führen könnte und somit eine Echtzeitanwendung in Zukunft möglich wäre. Zudem benötigt es weitere Hörversuche zur besseren Evaluierung des Systems. Hierbei wäre es interessant die Hörversuche zunächst nur an der gewählten Hörposition durchzuführen, um die Echtheit des übertragenen Signals im direkten Vergleich überprüfen zu können. Hierbei könnten die Parameter über eine Tablet-Fernsteuerung des Laptops angepasst werden. Weitere Hörversuche würden danach wieder in der Tonregie stattfinden.

Neben der Optimierung der Hörsituation der Tonschaffenden, wäre ein weiterer Verwendungsbereich eines solchen Systems die Streaming-Möglichkeit, welche den Zuhörer*innen ein binaurales 3D Klangerlebnis aus dem Opernhaus nach Hause liefern würde. Hierfür könnten ebenso signalabhängige Algorithmen angewendet werden, da die Zuhörer*innen das echte Direktsignal Zuhause nicht hören und somit dadurch keine hörbaren Latenzprobleme auftauchen können. Darüber hinaus kann ein solches System in Kombination mit einem zusätzlichen 360° Videoinput ein komplettes VR-Erlebnis kreieren.

Abkürzungsverzeichnis

ILD	interaural level difference
IID	interaural intensity difference
ITD	interaural time difference
FOA	First Order Ambisonics
HOA	Higher Order Ambisonics
ambiX	Ambisonics exchangeable
FuMa	Furse-Malham
ACN	Ambisonic channel order
SN3D	semi-normalization three dimensional
RIR	room impulse response
BRIR	binaural room impulse responses
HRIR	head-related impulse response
HRTF	head-related transfer function
SOFA	Spatially Oriented Format for Acoustics
COMPASS	Coding and Multidirectional Parameterization of Ambisonic Sound Scenes
HARPEX	High Angular Resolution Planewave Expansion
SPARTA	Spatial Audio Real-Time Application
Adapt DRC	adaptive dynamic range compression
OSC	Open Sound Control
SSW	Spatial Sound Wave
SSH	Spatial Sound Headphones
COMPASS	Coding and Multidirectional Parameterization of Ambisonic Sound Scenes
HARPEX	High Angular Resolution Planewave Expansion
SPARTA	Spatial Audio Real-Time Application
SOH	Sydney Opera House
JST	Joan Sutherland Theatre
GUI	Graphical User Interface
BO	Bühnenorchesterprobe
SADIE	Spatial Audio for Domestic Interactive Entertainment
KEMAR	Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kopfbezogenes Polarkoordinatensystem mit den Hörereignisrichtungen: Medianebene, Frontalebene, Horizontalebene (Dickreiter et al. 2014, S. 128).....	7
Abbildung 2: Interaural Time Difference (ITD) und Interaural Intensity Diffrencece (IID) (Roginska und Geluso 2018, S. 12).....	8
Abbildung 3: Zur Nachhallunterdrückung beim zweiohrigen Hören (Weinzierl 2008, S. 120)	10
Abbildung 4: Spektrale Verfärbungen durch die Form der Pinna/ Ohrmuschel, resultierende Unterscheidungen in der Klangfärbung des linken und rechten Ohrs (Roginska und Geluso 2018, S. 12).....	11
Abbildung 5: Brüel &Kjær Type 4101-B Mikrofonkapseln, Trageweise an einem Modell gezeigt (Brüel &Kjær 2017, S. 2)	14
Abbildung 6: Soundman OKM II Classic/ Studio Elektretmikrofon (Thomann Website)	14
Abbildung 7: Verschiedene Kunstkopfsysteme, zusammengetragen von Pfanzagl-Cardone (Pfanzagl-Cardone 2020, S. 179).....	15
Abbildung 8: Kugelflächenmikrofon von Schoeps, hier zu sehen während des technischen Probeaufbaus im Hörsaal P1 der TU Graz (Brühwiler 2021).....	16
Abbildung 9: Zylia ZM-1, ambisonisches Mikrofon dritter Ordnung, hier zu sehen während des technischen Aufbaus an der Oper Graz (Frühwirt 2021).....	17
Abbildung 10: Eigenmike® em32, ambisonisches Mikrofon mit 32 Kapsel, bis zu 4. Ordnung (Nicol 2018)	17
Abbildung 11: SoundField ST450, ambisonisches Mikrofon erster Ordnung, hier zu sehen während des technischen Aufbaus an der Oper Graz (Frühwirt 2021)	18
Abbildung 12: SoundField by RØDE NT-SF1 (Rode Website)	18
Abbildung 13: Sennheiser Ambeo VR Mic für 3D Audio Aufnahmen erster Ordnung (Sennheiser Website).....	18

Abbildung 14: Illustration der Kugelflächenfunktionen (Spherical Harmonics) bis zur 3. Ordnung, beginnend mit der ersten Ordnung von oben der Reihe nach unten (Nicol 2018, S. 286).....	19
Abbildung 15: Illustration der Komponente W, X, Y, Z eines ambisonischen Mikrofons erster Ordnung mit im Tetraeder angeordneten Mikrofonkapseln (Nicol 2018, S. 281)	20
Abbildung 16: Impulsantwort $g(t)$ eines linearen Messsystems, ausgelöst durch einen Dirac-Impuls (Lerch 2007)	23
Abbildung 17: Unterteilungen der Signale einer Raumimpulsantwort (Vorländer 2008, S. 93)	25
Abbildung 18: Akustisches Qualitätsranking von 21 Opernhäusern, gewertet von 21 Dirigenten (Beranek 2004).....	28
Abbildung 19: Ausschnitt aus der Videodokumentation "ANNA: Working with Binaural Sound in Theatre", zu sehen ist der Sound Designer Ben Ringham in mitten der verteilten Kopfhörer im Zuschauerraum (National Theatre 2019)	41
Abbildung 20: Binaurale Aufnahmen des subjektiven Innenlebens der Kriegspilotin (links Yana Robin la Baume, rechts Kunstkopf KU100 von Neumann) (Staatstheater Darmstadt 2019)	42
Abbildung 21: Harpex Plugin im Einsatz während der Auralisation der Oper Graz, Upmix des ST450 FuMa Signals auf AmbiX 3. Ordnung.....	48
Abbildung 22: Eine Beispielanwendung des ambiX Directional Loudness Plugin von Kronlachner in den Einstellungen des ersten durchgeführten Hörversuches, siehe Kapitel 4.2.2.....	49
Abbildung 23: Ansicht der drei Hörpositionen der zwei Mikrofone aus Sicht der ersten Lautsprecherposition während des technischen Probeaufbaus im Hörsaal P1 der TU Graz.....	59
Abbildung 24: Positionierung der vier Raummikrofone mit Kugelcharakteristik in P1, hier im Beispiel auf der rechten Seite des Raumes, gegenüber ist die gleiche Positionierung gespiegelt	59
Abbildung 25: Skizze der Lautsprecherpositionierungen, welche in P1 getestet wurden ...	60

Abbildung 26: Messposition am Balkon für die drei Mikrofone (SoundField, Zylia und Kunstkopf).....	61
Abbildung 27: Positionen der vier Raummikrofone während des technischen Probeaufbaus und der zwei Hörversuche. Zwei Kugelmikrofone (Sennheiser MKH8020) hängen von der Lüsterkuppel herunter und zwei sind hinter den Delaylines auf der Galerie montiert (Frühwirt 2021)	62
Abbildung 28: Lautsprecherpositionen im Orchestergraben und auf der Bühne während der Aufnahme der Impulsantworten. Dabei wurde ein aktiver Lautsprecher an die verschiedenen Positionen gesetzt (Frühwirt 2021)	63
Abbildung 29: Impulsantwort der ersten Lautsprecherposition von den vier Kanälen des SoundField ST450 auf der Position am Balkon	64
Abbildung 30: Positionierung der Raummikrofone im ambisonischen Enkoders (IEM), orientiert an den echten Positionen im Raum	65
Abbildung 31: Erste Position des SoundField Mikrofons am Balkon während des ersten Hörversuchs (Brühwiler 2021)	68
Abbildung 32: zweite Position des SoundField Mikrofons links auf der Galerie während des ersten Hörversuchs (Brühwiler 2021)	68
Abbildung 33: Max Patch des ersten Hörversuchs, welcher zur Steuerung der Parameter in Reaper über OSC genutzt wurde	70
Abbildung 34: Ergebnisse des ersten Hörversuchs an der Oper Graz, die Daten beziehen sich auf beide Hörpositionen mit ihren jeweiligen Presets.....	73
Abbildung 35: Einstellungen der Parameter Fokus, Raum und Volume während des ersten Hörversuch	74
Abbildung 36: Balkonposition des SoundField Mikrofons inklusive Shotgun mit Ausrichtung zur Bühne.....	78
Abbildung 37: zweite Position des SoundField Mikrofons im Parterre, näher an der Bühne	79
Abbildung 38: Vergleich der Ohren und Kopfstruktur einer der Probanden, Ähnlichkeiten bei den Versuchsobjekten der Datenbanken von SADIE und TU Berlin gefunden	80

Abbildung 39: Max Patch für den zweiten Hörversuch, welcher die individuelle Auswahl des Probanden ermöglichte und zudem Vergleichshören für Frage 2 und 5 erleichterte81

Abbildung 40: Abhörposition während des zweiten Hörversuchs in der Tonregie (Brühwiler 2021)82

Abbildung 41: Vergleich der Ergebnisse von Klang und Fokus bei den beiden Hörversuchen83

Abbildung 42: Anpassungen der Parameter Fokus, Raum und Volume (hier als Pegel benannt) während des zweiten Hörversuchs, im Vergleich zum Preset.....84

Literaturverzeichnis

A

Armstrong, Cal; Thresh, Lewis; Kearney, Gavin (2020): SADIE II Database. Spatial Audio for Domestic Interactive Entertainment. Hg. v. The Audio Lab. York University. Online verfügbar unter <https://www.york.ac.uk/sadie-project/database.html>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2020, zuletzt geprüft am 03.12.2021.

B

Begault, Durand R. (2000): 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia: The NASA STI Program. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/2571893_3-D_Sound_For_Virtual_Reality_and_Multimedia, zuletzt geprüft am 04.12.21.

Beranek, Leo L. (2004): Concert Halls and Opera Houses. Music, Acoustics, and Architecture. Second edition. New York, NY: Springer.

Berge, Svein; Barrett, Natasha (2010): High Angular Resolution Planewave Expansion. In: *International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics*. Online verfügbar unter <https://www.harpex.net/harpex.pdf>, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Blauert, Jens (1996): Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Localization: The MIT Press. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.7551/mitpress/6391.003.0006>, zuletzt geprüft am 14.1.22.

Blauert, Jens; Braasch, Jonas (2008): Räumliches Hören. Kapitel 3. In: Stefan Weinzierl (Hg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 87–122.

Brinkmann, Fabian; Dinakaran, Manoj; Pelzer, Robert; Wohlgemuth, Jan Joschka; Seipel, Fabian; Voss, Daniel et al. (2019): The HUTUBS head-related transfer function (HRTF) database. Unter Mitarbeit von Technische Universität Berlin. Technische Universität Berlin. Online verfügbar unter <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/9429>, zuletzt geprüft am 06.01.22.

Bronkhorst, Adelbert W. (2015): The cocktail-party problem revisited: early processing and selection of multi-talker speech. In: *Attention, perception & psychophysics* 77 (5), S. 1465–1487. DOI: 10.3758/s13414-015-0882-9.

Brüel & Kjær (2017): Product Data: Binaural Microphone Types 4101-B and 4965-B (bp2562). Brüel & Kjær. Online verfügbar unter <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2562.ashx>, zuletzt geprüft am 03.01.22.

Brühwiler, Hanna (15.04.2021): Hörsituation der Tonschaffenden an der Staatsoper Wien und Erfahrungen in 3D Audio Technik. Fragen im Rahmen der Masterarbeit gestellt. Interview mit Anthanasios Rovakis. Onlin. E-Mail.

Brühwiler, Hanna (20.04.2021): Hörsituation der Tonschaffenden am Opernhaus in Zürich. Interview im Rahmen der Masterarbeit. Interview mit Oleg Surgutschow. Online. Zoom.

Brühwiler, Hanna (27.05.2021): Listening Position for the Sound Engineers at Sydney Opera House and the National Theatre London. Part of the research for this master thesis. Interview mit Sarah Black. Online. LinkedIn.

Brühwiler, Hanna (08.06.2021): Hörsituation der Tonschaffenden am Opernhaus in Graz. Interview im Rahmen der Masterarbeit. Interview mit Christian Komp. Graz. Persönlich, mit Zoom H6 aufgenommen.

Brühwiler, Hanna (08.06.2021): Listening Position of the Sound Engineers at Teatro alla Scala in Milano. Part of the research for this master thesis. Interview mit Sal Distefano. Onlin. Zoom.

Brühwiler, Hanna (02.01.2022): Listening Position of the Sound Engineers at The Metropolitan Opera House in New York. Questions asked for the master thesis. Interview mit Josh Marks. Online. LinkedIn;

D

d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. (2012): A whole new world. Iosono at the Sydney Opera House. Online verfügbar unter <https://www.dbaudio.com/global/en/applications/theatre-and-opera/a-whole-new-world/>, zuletzt geprüft am 7.1.22.

d&b audiotechnik GmbH & Co. KG. (2018): d&b Soundscape enhances storytelling for The Lehman Trilogy. English debut in London at the National Theatre, in the Lyttelton Theatre. d&b. London. Online verfügbar unter <https://www.dbsoundscape.com/global/en/stories/db-soundscape-enhances-storytelling-for-the-lehman-trilogy/>, zuletzt geprüft am 7.1.22.

Dickreiter, Michael; Dittel, Volker; Hoeg, Wolfgang; Wöhr, Martin (2014): Handbuch der Tonstudioteknik. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: De Gruyter Saur (De Gruyter Saur reference).

E

Eley, Nolan; Mullins, Sarabeth; Stitt, Peter; Katz, Brian F. G. (2021): Virtual Notre-Dame: Preliminary results of real-time auralization with choir members. In: 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA). 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA). Bologna, Italy, 08.09.2021 - 10.09.2021: IEEE, S. 1–6.

F

Farina, Angelo (2000): Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In: *J. Audio Eng. Soc.*

Farina, Angelo; Tronchin, Lamberto (2013): 3D Sound Characterisation in Theatres Employing Microphone Arrays. In: *Acta Acustica united with Acustica* 99 (1), S. 118–125. DOI: 10.3813/AAA.918595.

Faymann, Markus; Hemmer, Dominik; Kocher, Larissa (29.10.19): Akustischer Vorhang. Immersive 3D Audiotechnik. Dokumentation zur Seminararbeit. Kunstuniversität Graz, Graz. Institut für Elektronische Musik und Akustik.

Frank, Matthias; Windtner, Simon; Brandner, Manuel (2021): Augmented Acoustics for Ensembles. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Hg.): DAGA 2021. 47. Jahrestagung für Akustik. DAGA 2021 - 47. Jahrestagung für Akustik. Wien, 15. - 18.08. DEGA.

Frank, Matthias; Zotter, Franz (2016): Spatial impression and directional resolution in the reproduction of reverberation. In: DAGA 2016 - Fortschritte der Akustik. Aachen. Online verfügbar unter https://iaem.at/Members/zotter/2016_frank_spatimpressionresolution_daga.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Fraunhofer Audiotechnologie (28.04.2016): 3D-Sound für das Opernhaus Zürich. Koch, Beate; Hallebach, Julia. Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2016/Mai/3D-sound-fuer-das-opernhaus-zuerich.html>, zuletzt geprüft am 11.1.22.

Fraunhofer IDMT (2.11.21): Besser verstehen. Das Fraunhofer IDMT stellt Lösungen für die Analyse, Bewertung und Verbesserung von Sprachverständlichkeit vor. Colmer, Christian; Rennies-Hochmuth, Jan. Online verfügbar unter https://www.idmt.fraunhofer.de/de/Press_and_Media/press_releases/2021/besser-verstehen.html, zuletzt geprüft am 7.1.22.

Fraunhofer IDMT (2015): Adapt DRC. adaptive dynamic range compression. Echtzeit-Optimierung von Sprachverständlichkeit. Unter Mitarbeit von Jan Rennies-Hochmuth und Christian Colmer. Institutsteil Hör-, Sprach- und Audiotechnologie HSA. Oldenburg. Online verfügbar unter https://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/documents/HSA/AdaptDRC_FraunhoferIDMT_de.pdf, zuletzt geprüft am 8.1.22.

G

Gatzmanga, Ivo (2010): Trennkörper-Mikrofonsysteme. Seminararbeit. Hochschule der Medien, Stuttgart. Audiovisuelle Medien. Online verfügbar unter <https://curdt.home.hdm-stuttgart.de/PDF/Trennk%C3%B6rper-Mikrofonsysteme.pdf>, zuletzt geprüft am 3.1.22.

Geluso, Paul (2021): 3D acoustic recording. Kapitel 12. In: Justin Paterson und Hyunkook Lee (Hg.): 3D Audio. Unter Mitarbeit von Hyunkook Lee. Abingdon, Oxon, New York, NY: Routledge; Taylor & Francis Group (Perspectives on music production), S. 228–255.

Görne, Thomas (2007): Mikrofone in Theorie und Praxis. Mit 23 Tabellen. 8. neue, überarb. und erw. Aufl. Aachen: Elektor-Verl.

Görne, Thomas (2014): Tontechnik. Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis. 4., aktualisierte Aufl. München: Hanser (Hanser eLibrary).

H

Harstad, Johan (2021): Krasnojarsk: Eine Endzeitreise in 360°. aus dem Norwegischen von Elke Ranzinger. Unter Mitarbeit von Tom Feichtinger. Hg. v. Schauspielhaus Graz. Bühnen Graz. Graz. Online verfügbar unter <https://schauspielhaus-graz.buehnen-graz.com/play-detail/krasnojarsk/>, zuletzt geprüft am 12.1.22.

Hautz, Christian (2016): Die Freedman Electronics Group kauft SoundField. Hg. v. Bonedo. Bonedo. Online verfügbar unter <https://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/die-freedman-electronics-group-kauft-soundfield.html>, zuletzt geprüft am 4.1.22.

He, JianJun (2017): Spatial Audio Reproduction with Primary Ambient Extraction. Singapore: Springer Singapore.

Hickson, Ella; Ringham, Ben; Ringham, Max (2019): ANNA. Ein binaurales Stück im Dorfman Theatre. Hg. v. National Theatre. London. Online verfügbar unter <https://www.nationaltheatre.org.uk/shows/anna>, zuletzt geprüft am 12.1.22.

Holters, Martin; Corbach, Tobias; Zölzer, Udo (2009): Impulse Response Measurement Techniques and their Applicability in the Real World. In: *12th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-09)*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/242019358_Impulse_Response_Measurement_Techniques_and_their_Applicability_in_the_Real_World, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Hong, Joo; He, JianJun; Lam, Bhan; Gupta, Rishabh; Gan, Woon-Seng (2017): Spatial Audio for Soundscape Design. Recording and Reproduction. In: *Applied Sciences* 7 (6), S. 627. DOI: 10.3390/app7060627.

Howard, David M.; Angus, Jamie (2016): Acoustics and psychoacoustics. 5th edition. New York, London: Routledge.

I

IEM (2021): IEM Plug-in Suite. a free and Open-Source audio plugin suite including Ambisonic plug-ins up to 7th order. Version v1.13.0. Graz: IEM. Online verfügbar unter <https://plugins.iem.at/>, zuletzt geprüft am 13.1.22.

Iijima, Naoto; Koyama, Shoichi; Saruwatari, Hiroshi (2021): Binaural rendering from microphone array signals of arbitrary geometry. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 150 (4), S. 2479. DOI: 10.1121/10.0006538.

K

KEMAR-Website (1972): KEMAR - Website. Sound & Vibration. Hg. v. G.R.A.S. KEMAR. Online verfügbar unter <http://kemar.us/>, zuletzt geprüft am 3.1.22.

Klein, Florian; Neidhardt, Annika; Speidel, Marius; Sporer, Thomas (2017): Training on the acoustical identification of the listening position in a virtual environment. In: *143 AES Convention Paper* 143 AES Convention (9834). Online verfügbar unter <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19231>, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Kronlachner, Matthias (2014a): MCFX - Multichannel Audio Plugin Suite. Online verfügbar unter <http://www.matthiaskronlachner.com/?p=1910>, zuletzt aktualisiert am 2020, zuletzt geprüft am 5.1.22.

Kronlachner, Matthias (2014b): Plug-in Suite for Mastering the Production and Playback in Surround Sound and Ambisonics. Gold award at the AES Students Design Competition. Hg. v. Audio Engineering Society - AES. Kunstuniversität Graz. Berlin. Online verfügbar unter http://www.matthiaskronlachner.com/wp-content/uploads/2013/01/kronlachner_aes_studentdesigncompetition_2014.pdf.

L

Kuusinen, Antti (2016): Multidimensional perception of concert hall acoustics. Studies with the loudspeaker orchestra. Doctoral Dissertation. Aalto University, Helsinki, Finland. Department of Computer Science. Online verfügbar unter <https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/21228/isbn9789526069043.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Lee, Hyunkook (2021): Multichannel 3D Microphone Arrays: A Review. In: *J. Audio Eng. Soc.* 69 (1/2), S. 5–26. DOI: 10.17743/jaes.2020.0069.

Lerch, Reinhard (2007): Elektrische Messtechnik. Analoge, digitale und computergestützte Verfahren. 4., neu bearb. Aufl. 2007. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-e-pflicht-1491961>.

Li, A. Q.; Jin, C.; van Schaik, A. (2006): Listening Through Different Ears in the Sydney Opera House. In: Angela Qian Li, Craig Jin und André van Schaik (Hg.): Listening through different ears in the Sydney Opera House. 2006 IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing. Toulouse, France, 14-19 May 2006. University of Sydney. Sydney, Australia: IEEE, V-333-V-336.

Lindau, Alexander; Weinzierl, Stefan (2006): FABIAN – Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Fast and Automatic Binaural Impulse response AcquisitioN. Hg. v. VDT International Convention Paper. Technische Universität Berlin. 24. Tonmeistertagung. Online verfügbar unter https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/2006/Lindau_2006b_FABIAN._An_instrument_for_softwarebased_measurement_of_binaural_room_impulse_responses.pdf, zuletzt geprüft am 14.1.22.

M

McCormack, Leo; Delikaris-Manias, Symeon; Politis, Archontis; Pulkki, Ville; Hold, Christoph (2015): SPARTA - Spatial Audio Real-Time Applications. A collection of open-source VST audio plug-ins for producing and reproducing spatial sound scenes. Unter Mitarbeit von Acoustics Lab. Aalto University. Finnland. Online verfügbar unter <https://leomccormack.github.io/sparta-site/docs/plugins/overview/>, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 5.1.22.

McCormack, Leo; Politis, Archontis (2019): COMPASS suite - Website. Hg. v. SPARTA Github. Aalto University. Online verfügbar unter <https://leomccormack.github.io/sparta-site/docs/plugins/compass-suite/>, zuletzt geprüft am 13.1.22.

Meyer Sound (2020): Spacemap Go. benötigt GALAXY Firmware v2.4.2. Version 1.2.0: Meyer Sound. Online verfügbar unter <https://meyersound.com/product/spacemap-go/#release-notes>, zuletzt geprüft am 11.1.22.

Müller BBM (2018): Wiedereröffnung des Sydney Opera House mit eindrucksvollem und lebendigem Raumklang. Online verfügbar unter <https://www.muellerbbm.de/mueller-bbm/aktuelles/wiedereroeffnung-des-sydney-opera-house-mit-eindrucksvollem-und-lebendigem-raumklang/>, zuletzt geprüft am 11.1.22.

N

National Theatre (2019): ANNA: Working with Binaural Sound in Theatre. Sound Design by Ben and Max Ringham. Natalie Abrahami (Regie). Video, Youtube. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=hFM4hPgGZuk>, zuletzt geprüft am 11.1.22.

Nicol, Rozenn (2018): Sound Field. Kapitel 9. In: Agnieszka Roginska und Paul Geluso (Hg.): Immersive Sound. The art and science of binaural and multi-channel audio. New York: Routledge (Audio Engineering Society presents--), S. 276–310.

Novak, Antonin; Lotton, Pierrick; Simon, Laurent (2015): Synchronized Swept-Sine: Theory, Application, and Implementation. In: *J. Audio Eng. Soc.* 63 (10), S. 786–798. DOI: 10.17743/jaes.2015.0071.

O

Opernhaus Zürich (2021): Abschiedskonzert Fabio Luisi. Philharmonisches Konzert im 3D Livestream. Anton Bruckner Sinfonie Nr. 7 E-Dur. Opernhaus Zürich. Online Livestream. Online verfügbar unter <https://www.opernhaus.ch/spielplan/kalendarium/abschiedskonzert/>, zuletzt geprüft am 12.1.22.

P

Partlow, William (2015): Time Delay Spectrometry. TDS Measurement Techniques. Beyond Discovery. Online verfügbar unter <https://www.beyonddiscovery.org/listening-rooms/timedelay-spectrometry-tds-measurement-techniques.html>, zuletzt aktualisiert am 15.06.2015, zuletzt geprüft am 01.01.2022.

Pätynen, Jukka; Lokki, Tapio (2008): A loudspeaker orchestra for concert hall studies. In: The Seventh International Conference On Auditorium Acoustics, 3.-5.10. Institute of Acoustics, S. 45–52. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/236169414_A_loudspeaker_orchestra_for_concert_hall_studies, zuletzt geprüft am 14.1.22.

Pfanzagl-Cardone, Edwin (2020): The Art and Science of Surround and Stereo Recording. Vienna: Springer Vienna.

Podbregar, Nadja (2019): Notre Dame hatte einzigartige Akustik. Vor dem Brand erstellte Klanganalysen können nun bei der Rekonstruktion der Kathedrale helfen. Hg. v. scinexx. American Institute of Physics (AIP). Online verfügbar unter <https://www.scinexx.de/news/technik/notre-dame-hatte-einzigartige-akustik/>, zuletzt geprüft am 12.1.22.

Politis, Archontis; Tervo, Sakari; Pulkki, Ville (2018): COMPASS: Coding and Multidirectional Parameterization of Ambisonic Sound Scenes. In: 2018 IEEE (Hg.): International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). ICASSP 2018 - 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Calgary, AB, Canada, 15.04.2018 - 20.04.2018: IEEE, S. 6802–6806. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/document/8462608>, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Pulkki, Ville (2015): *Communication Acoustics. An Introduction to Speech, Audio and Psychoacoustics*. Unter Mitarbeit von Matti Karjalainen. 1st ed. New York: John Wiley & Sons Incorporated.

R

RØDE (2018): SoundField by RØDE. Version 1.0.2: RØDE. Online verfügbar unter <https://de.rode.com/soundfieldplugin>, zuletzt geprüft am 16.1.22.

Roginska, Agnieszka; Geluso, Paul (Hg.) (2018): *Immersive Sound. The art and science of binaural and multi-channel audio*. New York: Routledge (Audio Engineering Society presents--).

Rudrich, Daniel (2021): BinauralDecoder. Plug-In Description. Version v1.13.0: IEM. Online verfügbar unter <https://plugins.iem.at/docs/pluginDescriptions/#binauraldecoder>.

S

Schörkhuber, Christian; Zaunschirm, Markus; Höldrich, Robert (2018): Binaural Rendering of Ambisonic Signals via Magnitude Least Squares. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Hg.): DAGA 2018. 44. Jahrestagung für Akustik, vol. 44. DAGA. München, 19.-22.03., S. 339–342. Online verfügbar unter https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2018/data/articles/000301.pdf, zuletzt geprüft am 16.1.22.

Sofaconventions (2013): SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics). a file format for storing spatially oriented acoustic data like head-related transfer functions (HRTFs). Hg. v. Austrian Academy of Sciences. Acoustics Research Institute. Online verfügbar unter [https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php?title=SOFA_\(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics\)&oldid=2434](https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php?title=SOFA_(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics)&oldid=2434), zuletzt aktualisiert am 5.1.22, zuletzt geprüft am 8.1.22.

Soundfield: ST450 MKII Portable Microphone System. User Guide. Online verfügbar unter <http://cdn.soundfield.com/assets/downloads/manual/ST450%20MKII%20-%20manual.pdf>, zuletzt geprüft am 17.11.21.

Sridhar, R.; Choueiri, E.; Tylka, J. G. (2021): The 3D3A Lab Head-Related Transfer Function Database. 3D Audio and Applied Acoustics Lab. Unter Mitarbeit von 3D Audio and Applied Acoustics Lab. Princeton University. Online verfügbar unter <https://www.princeton.edu/3D3A/HRTFMeasurements.html>, zuletzt geprüft am 06.01.22.

SSA Plugins (2018): aXMonitor. Ambisonic Monitor. Online verfügbar unter <https://www.ssa-plugins.com/product/axmonitor/>, zuletzt geprüft am 13.1.22.

Staatstheater Darmstadt (2019): Am Boden (Grounded). 3D Sound von Anne Marie Himmelmann. von George Brant / Deutsch von Henning Bochert. Unter Mitarbeit von Yana Robin La Baume, Wagner, Richard, Hoefler, Karoline und Anne Marie Himmelmann. Darmstadt. Online verfügbar unter <https://www.staatstheater-darmstadt.de/veranstaltungen/am-boden-grounded.445/?spielzeit=2018-2019>, zuletzt geprüft am 11.1.22.

Stitt, Peter (2017): aXMonitor. Ambisonic Monitor. Paris, Frankreich: SSA Plugins. Online verfügbar unter <https://www.ssa-plugins.com/product/axmonitor/>, zuletzt geprüft am 8.1.22.

Stitt, Peter (2018): aXPlugin Suite: SSA Plugins. Online verfügbar unter <https://www.ssa-plugins.com/>, zuletzt geprüft am 13.1.22.

Sunder, Kaushik (2021): Binaural audio engineering. Kapitel 7. In: Justin Paterson und Hyunkook Lee (Hg.): 3D Audio. Unter Mitarbeit von Hyunkook Lee. Abingdon, Oxon, New York, NY: Routledge; Taylor & Francis Group (Perspectives on music production), S. 130–159.

T

Thomann (2002): Soundman OKM II Classic/Studio Elektretmikrofone A3. Soundman. Online verfügbar unter https://www.thomann.de/at/soundman_okm_ii_studio_incl_adapter_a3.htm, zuletzt geprüft am 03.01.22.

V

Vorländer, Michael (2008): Auralization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

W

Weinzierl, Stefan (Hg.) (2008): Handbuch der Audiotechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Wenzel, Elizabeth M.; Begault, Durand R.; Godfroy-Cooper, Martine (2018): Perception of Spatial Sound. Kapitel 1. In: Agnieszka Roginska und Paul Geluso (Hg.): Immersive Sound. The art and science of binaural and multi-channel audio. New York: Routledge (Audio Engineering Society presents--), S. 5–39.

Wisse, Elke (2021): Live-Stream aus der Oper. Locktown im Opernhaus Zürich. In: *vdM Magazin* (1), S. 31–35.

Wright, Matt; Freed, Adrian (2021): Open Sound Control. Hg. v. Stanford University. CNMAT Berkeley. Online verfügbar unter <https://opensoundcontrol.stanford.edu/>, zuletzt aktualisiert am 13.8.21, zuletzt geprüft am 6.1.22.

Z

Zaunschirm, Markus; Frank, Matthias; Zotter, Frank (2018): BRIR synthesis using first-order microphone arrays. Unter Mitarbeit von Kunstuniversität Graz und Institut für elektronische Musik und Akustik. In: AES (Hg.): 144th International Pro Audio Convention. The Power of Sound. Mailand, Italien, 23.-26.05. Audio Engineering Society - AES. Online verfügbar unter <https://www.aes.org/tmpFiles/elib/20220115/19461.pdf>, zuletzt geprüft am 15.1.22.

Zaunschirm, Markus; Zagala, Franck; Zotter, Franz (2020): Auralization of High-Order Directional Sources from First-Order RIR Measurements. In: *Applied Sciences* 10 (11), S. 3747. DOI: 10.3390/app10113747.

Zotter, Franz; Frank, Matthias (2019): Ambisonics. A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality // A practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement, and virtual reality. Cham: Springer International Publishing; Springer (Springer Topics in Signal Processing, 19). Online verfügbar unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-17207-7>.

Anhang

Im Anhang befinden sich die Ergebnisse der Kontaktanfragen der Tonschaffenden an Opernhäusern in Form von E-Mail oder LinkedIn Antworten und Interviewtranskriptionen. Die Interviews wurden alle von der Autorin dieser Masterarbeit, Hanna Brühwiler (H.B.) geführt. Zudem sind die Ohrenvergleiche der Probanden, wie auch die originalen Antworten aus den Hörversuchen beigelegt.

15.04.2021 – *Anthanasios Rovakis, Cheftonmeister – Wiener Staatsoper (E-Mail)*

Fragen:

1. Wie ist die Abhörsituation in Ihrer Tonregie für Vorstellungen?
2. Falls diese suboptimal sein sollte, haben Sie bereits versucht diese zu optimieren?
3. Gab es bereits Experimente an Ihrem Opernhaus bezüglich „binauraler Techniken zur Echtzeitabhöre“ oder Ähnlichem?

Antworten:

1. „Man sitzt mittig (horiz. als auch vertikal - Wiener Staatsoper ist ein Logen-Teater mit vielen Stockwerken) an einem offenen Fenster. Verglichen mit anderen Opernhäusern ist die Abhörsituation gut.“
2. „Klar, es gibt mehrere alternative Zusatz-Abhören und einige wenige bauakustische Test-Maßnahmen (Lärmvermeidung innerhalb der Audio-Regie, Reflexionsflächen zur Verbesserung der "Umhüllung")“
3. „Ja, ich habe einige Versuche gemacht. Auf 80% der Hörplätze befinden sich im Diffusfeld. Daher hatten sämtliche Kunstkopfaufnahmen keine verwendbare Aussage und waren als Abhör-Alternative nicht brauchbar. Interessant fände ich eine Echtzeit-Fern-Bewegung eines Kunstkopfes in Verbindung mit Head-Tracking dessen am Misch-Platz.“

20.04.21 – Oleg Surgutschow, Cheftonmeister – Oper Zürich (Zoom-Interview)

O. S.: Das Problem, das sie gerade mir in Ihrer Mail geschrieben haben, hat mich natürlich sehr angesprochen, weil das Problem ist mir schon lange bekannt – eigentlich seit meinen ersten Tagen im Theaterleben, in meinem Theaterberuf. Und ich habe mehrere Theater in meiner Karriere schon gehabt, wo ich gearbeitet hab und dann war, egal wo, aber das Problem war immer da. In manchen Theatern war es besser, in manchen schlechter, aber das Problem besteht immer und ich kenne von meinen Kollegen aus vielen Theater, auch nicht nur in der Schweiz – auch in Deutschland, auch in Österreich. Ich hab sehr viele Kontakte in meinem Berufsleben schon und alle sagen „Ja, das ist wirklich ein Problem“ und jeder löst das Problem für sich selbst, aber keine richtige Lösung gibt es. Eigentlich die beste Lösung wäre, wenn man mitten drin im Zuschauerraum sitzt ohne jegliche Einschränkung, aber ist natürlich immer ein Problem wegen der Beleuchtung, wegen der Präsenz und Störung von den Zuschauern, das ist klar. Das ist immer ein Kompromiss. Aber das Problem, das Sie geschildert haben, ist sehr akut und ich freue mich, wenn Sie das Problem angehen wollen und möchte Sie auf diesem Weg auf jeden Fall unterstützen.

H.B.: Super, danke. Also das finde ich schon mal sehr gut. Das heißt Ihre Tonregie hat auch keine optimale Abhörsituation, höre ich jetzt hier durch.

O.S.: Keine optimale Abhörsituation. Also sie hat schon gewisse Größe, das ist auch so nicht schlecht. Wir haben diese Tonregie auch akustisch optimiert, soweit wie es geht. Also wir haben Bassreflektoren eingebaut, wir haben praktisch die Bassfalle entzerrt, soweit wie es möglich ist. Eigentlich akustisch schon gut gedacht, aber die Tonregie befindet sich eigentlich unter dem Balkon in so einem Raum, das man eigentlich kein optimalen Abhörposition nennen darf. Es gibt zwar eine offene Scheibe, also ist motorisierte Scheibe. Also d.h. wir können Scheibe auch motorisch fahren lassen und uns abtrennen von dem Saal, um das in Ruhe abzuhören und zu arbeiten. Und in Live Produktionen, natürlich wird Scheibe runtergemacht, sie fährt einfach runter, und dann hören wir praktische ersten Signal von den Portallautsprechern, also d.h. was von der Bühne direkt bei uns ankommt, kommt auch Live an, aber das ist keine Rauminformation in dem Fall, also so eine begrenzte Rauminformation. Wir haben direkten Schall von den Lautsprechern, von den Portallautsprechern, ersten, zweiten – also wir haben drei Ebenen – und von der Bühne. Also soweit so viel, das bei uns ankommt, aber das ist nicht vergleichbar mit dem Hörerlebnis im Zuschauerraum,

weil das dort ist natürlich anders und bei großen Produktionen, z.B. Musical oder wo wir viele Microports haben, also die Funkstrecken, dann haben wir so ein mobiles Pult im letzten Reihe vom Parkett in der Mitte. Dann sperren wir diesen Platz und von dort machen wir die Abmischung, weil nur dort ist möglich wirklich Live einzugreifen und abzuhören.

H. B.: Ok, das finde ich schon mal sehr spannend, weil das dann – zumindest von der Aufstellung her, von der Tonregieposition – ähnlich ist wie in der Oper Graz hier, die ich als Beispiel nehme, also hier werde ich es ausprobieren, ob meine Theorien funktionieren. Aber genau, das finde ich interessant mit eben der Scheibe, die man zwar ablassen kann, aber man hört halt nicht das Orchester im Orchestergraben mit der Reflektion von der Decke und wie es sich im Raum verteilt, generell-

O. S.: Absolut, absolut.

H. B.: Und ist schon mal gut, dass Sie für sich in Zürich sagen „Wir müssen in den Zuschauerraum für ein Musical“, weil das ist in der Oper Graz, die dürfen das gar nicht. Die haben das bis zur letzten General- und Hauptprobe dürfen sie und dann zurück in die Tonregie und das ist halt – da habe ich schon mit Christian Komp, dem Leiter, voll oft gesprochen und er meinte es ist einfach unfassbar. Man muss sich so dran erinnern wie das klingt und die Verhältnisse sind sehr schwierig.

O. S.: Ja natürlich, das ist ein sehr großes Offset. Man muss diese Offset immer im Auge behalten oder in den Ohren behalten, um das überhaupt machen zu können. Und das ist, ich sage nicht, dass es unmöglich ist, aber das ist wirklich eine sehr große Anstrengung und unnötige Energievergeudung, also von dem Personal. Also ich denke, wir haben auch, wir dürften auch nur im Saal sitzen nur bei solchen Produktionen, bei großen Produktionen, wo wirklich viele – wie im Musical gerade – dann. Ansonsten bei der Oper, wo wir nicht so viele Funkstrecken haben, dann machen wir schon aus der Regie, das kann man schon machen. Aber gerade wenn ganze Vorstellung davon abhängt wie es wirklich verstärkt wird, da finden wir auch schon Verständnis auch bei unserer Geschäftsleitung und die opfern diese, ich weiß nicht, 10 Plätze, die auch natürlich sehr kostbar sind, aber trotzdem – wegen der Qualität ist ganz wichtig und da finden wir schon Verständnis bei uns in Zürich.

H. B.: Ok, das ist schon mal sehr gut, aber das heißt, haben Sie schon mal versucht dieses Problem anzugehen, wenn Sie meinen Sie haben das Problem schon öfters besprochen mit anderen Kollegen, dass da halt die Abhörsituation doch suboptimal ist?

- O.S.: Ja, also was wir natürlich versucht haben und das ist noch keine richtige Lösung, aber das ist schon Schritt in die Richtung. Ich weiß nicht, ob Sie kennen, wir arbeiten seit sechs/sieben Jahren schon zusammen mit Fraunhofer IDMT.
- H.B.: Ja da hab ich gelesen, dass Sie (genau) die Spatial Soundwave haben, find ich schon mal sehr beeindruckend.
- O.S.: Genau. Und wir haben dieses Pilotprojekt damals gestartet, weil wir eigentlich die Lösung gesucht haben für uns und wir haben auf dem Markt keine passable Lösung, die für uns in Frage käme. Also es waren schon mögliche Lösungen, aber das waren so marktfertige Produkte, die angepasst werden müssen und keine der Entwickler wollte sich damit richtig befassen. Dann haben wir wirklich der Fraunhofer IDMT mit diesem Problem uns gewandt und sie haben uns sehr großes Interesse bekundet und praktisch wir haben zusammen dieses Projekt auf die Beine gestellt. Und wir arbeiten nach wie vor zusammen. Also die haben für uns extra Sachen entwickelt, angepasst. Also das ist, ich muss sagen das ist kostenspielige Projekt, es kostet viel Geld, aber das lohnt sich. Das lohnt sich wirklich, weil das ist so wie maßgeschneiderte Anzug.
- H.B.: Der lohnt sich dann auch, der sitzt dann auch wie angegossen.
- O.S.: Genau. Wir haben diese Möglichkeit Gott sei Dank finanziell, deswegen können wir uns das erlauben, und wir freuen wirklich uns sehr über die Ergebnisse. Das klingt auch sehr gut, weil wir haben natürlich die Möglichkeit die Raumakustik zu verändern und einzugreifen mit Hilfe von SSW, also ich sage einfach kurz SSW.
- H.B.: Ja, das macht mehr Sinn.
- O.S.: Genau. Und was wir jetzt glaub ich letztes Jahr oder vor zwei, also nicht so lange her, was wir uns überlegt haben und mit Fraunhofer zusammen entwickelt haben, wir haben sogenannte SSH. Das ist spatial sound headphones. Das heißt, sie simulieren den Raum in binaurale Abbildung und es ist aber nicht noch unsere Raum, sie waren noch nicht so weit mit der Rechnerleistung dass sind glaub ich neun oder elf Lautsprecher da die simuliert sind. Nächste Schritt, dass wir wirklich unser Raum simulieren, unser Raum hat 66 Lautsprecher plus noch auf der Bühne welche. Ich hoffe dass sie jetzt zum jetztigen Zeitpunkt oder bald soweit sind dass die Rechnerleistung reicht das auszurechnen für die Kopfhörer. Und wir wollen auch das Projekt demnächst angehen, dass Sie praktisch in Kopfhörer egal wo wir sitzen, also z.B. in unserer Tonkabine, und hören was im Saal eigentlich ankommt.

- H.B.: Das wär natürlich das Optimum. Das überleg ich, das ist ja auch mein Ziel in dem Sinne, zumindest sozusagen an unterschiedlichen Positionen. Die werden in meinem Fall halt festgelegt, aber
- O.S.: Ja ja, klar, also ich finde auch gut, dass man auch verschiedene Hörpositionen hat, das ist also ideale Fall, dass man auch verschiedene Hörpositionen simuliert und praktisch per Knopfdruck umschalten kann und wir wollen erstmal bei Hotspot, also die Reihe, wo die Regie sitzt, wo man das abnimmt und abhört. Wir wollen erstmal in Auftrag geben unserem IDMT Kollegen, dass sie praktisch das ausmessen und simulieren, ich muss noch mit den Kollegen besprechen aus Fraunhofer, ob sie so weit sind das zu machen. Ersten Schritt haben wir gemacht, wir haben das extra gemacht, um praktisch Vormischung zu machen im Tonstudio. Weil wir natürlich auch sehr wenig Tonproben haben, im normalen Betrieb, jetzt natürlich haben wir sehr viel Zeit.
- H.B.: Ungewöhnlich viel, ja.
- O.S.: Aber im normalen Betrieb haben wir eigentlich kaum Probenzeit für Ton, also ganz wenig, also wir müssen natürlich immer drum kämpfen. Und in diese Zeit müssen wir natürlich unsere Surroundeffekte, unsere Beschallungseffekte mit SSW so einstellen, programmieren, das einfach Zeit braucht, einfach diese Vorgänge. Und deswegen haben wir gesagt: ok, wir können schon so eine Rohsamples vorbereiten, auch im Tonstudio mit SSH mit Kopfhörer und das ist dieselbe Software, die Objekte die wir dort abbilden, die sind kompatibel, komplett kompatibel mit den SSW. Das heißt das ist dieselbe Software, wird praktisch eins zu eins, also mit kleine Anpassung, übernommen und dann macht man im Saal schon kleine Korrekturen und man braucht nicht so viel Zeit wie gewöhnlich. Man fängt nicht von null an, sondern man hat schon so 70/80 Prozent gemacht. Und diese 20/30 Prozent macht man dann später im Zuschauerraum. Und das war unser Ziel und das hat auch gut funktioniert. Ich muss sagen, das geht schon gut. Es ist nicht so, dass wir uns vorgestellt haben, es ist nicht so präzise, aber man kann auch diese Feinheiten, diese Korrekturen in gewissen Sinne viele im Zuschauerraum machen. Also das ist schon richtige Richtung aber es bedarf noch Optimierung.
- H.B.: Aber das ist ja schon mal ein großer Schritt zur Anpassung. Immerhin wahrscheinlich mehr als andere Opernhäuser bisher investiert haben, um das Problem anzugehen. Das ist schon mal sehr gut.

- O.S.: Ja ja, also wir sind uns bewusst, was wir wollen und welche Richtung wir gehen. Es ist noch nicht vollendet, aber wir sind auf dem Weg. Sagen wir so. Wir sind jetzt momentan durch die technische Entwicklung oder durch Softwareentwicklung natürlich bisschen behindert, gehindert, aber wir hoffen und IDMT hat uns zu verstehen gegeben dass sie auch dran sind das Problem auch zu lösen und sie entwickeln sich weiter.
- H.B.: Sehr gut. Aber das heißt, darf ich eine Frage zu dem Projekt stellen? Ist das binaural statisch oder dynamisch? Also wenn Sie das über Kopfhörer abhören, das SSH.
- O.S.: Also wir wollen das dynamisch machen. Natürlich. Also wir wollen live-Erlebnis praktisch was wie im SSW hören, hier auch im Zuschauerraum genauso in binaurale Variante auch abhören.
- H.B.: OK, sehr gut. Ja ich finde das Dynamische auch wichtig.
- O.S.: Ja, eben. Also statisch ist natürlich auch interessant, das ist so ein Teil davon, aber eigentlich unser Ziel ist dynamisch zu machen.
- H.B.: Ja, weil ich hab mit einem Kollegen aus Wien aus der Oper geschrieben gehabt, und er meinte, sie hatten das mit Kunstkopf eben ausprobiert, und das ist ja sozusagen die statische Variante, nenn ichs jetzt mal, und da hat das eben nicht funktioniert. Aber halt auch aus anderen Gründen noch, aber nur der Kunstkopf statisch funktioniert nicht als realistische Abhöre, was Sinn macht, aber auch trotzdem interessant ist, weil es ja eigentlich den Kopf und alles simuliert, aber die Drehung wohl doch notwendig ist wie anderes auch noch, aber das auch.
- O.S.: Ja ja ich weiß, dass die Kollegen, viele Kollegen sind dran an diesem Problem, sie gehen auch von verschiedenen Seiten und wir haben auch Austausch manchmal. Tonmeistertagung oder einfach in privaten Chats. Das Problem ist, es ist, bleibt ein Problem.
- H.B. Wenn ich da fragen darf, was für Kollegen sind das, die ich vielleicht auch kontaktieren könnte? Um zu sagen, die haben das Problem auch? Und da ist das Problem auch?
- O.S.: Ja, also, wir kontaktieren mit Kollegen aus der Volksoper, dann Athanasios aus der Staatsoper aus Wien, da gibt es im Burgtheater auch sehr sehr nette Kollegen, also der David Müller in Burgtheater, dann Rupi Derschmidt aus Akademietheater. Und ja in Deutschland gibt es auch sehr interessierte Kollegen in Darmstadt. (16:30)
- H.B.: Spannend. Weil in Darmstadt hab ich studiert, also meinen Bachelor gemacht. Im Staatstheater dann vermutlich.

- O.S.: Ja, genau! Staatstheater, genau. Im Staatstheater gibts sehr interessierter Kollege, mit dem haben wir auch ganz oft Austausch. Also ja, sehr interessiert an solchen Sachen und ja dann in Berlin habe ich lange nicht mehr gehört, also früher in der Schaubühne hab ich dann viele Kontakte gehabt, die jetzt, ich weiß nicht wie es sich weiterentwickelt, glaube das ist auch, hat sich ein bisschen andere Richtung bewegt, aber sie haben auch sehr an diesem Problem, sehr interessiert, ja ja.
- H.B.: Ich find das super, dass das wirklich ein größeres Problem ist, weil ich hatte das nur in der Oper in Graz eben kennen gelernt und weiß bestimmt das ist schon ein riesen Unterschied aber nicht nur von Tonregie zu Innenplatz sondern auch Platzunterschiede, wo man sitzt. Das heißt man muss sich eigentlich erinnern wo es überall klingt. Was halt dann schon wieder sehr schwierig ist.
- O.S.: Ja, ich meine bei SSW ist natürlich so ein Prinzip, also es gibt kein Hotspot, also egal wo sie sitzen, Signale kommen von dort wo sie kommen, also das heißt dass es auch so wird gerechnet und sollte auch so bleiben bei binaurale Lösung, denke ich. Das ist auch das Ziel, dass man auch wirklich, egal wo man sitzt, aber wenn man sich wirklich so virtuell bewegt dahin, das ist auch, da bewegt sich alles. Genau sie rechnen auch die Reflexionen von den Effekten auch, wenn Objekt sich bewegt, werden sich Reflexionen auch bewegen. Also das ist genau so der Prinzip.
- H.B.: Wahrscheinlich ist das was die Rechenleistung momentan blockiert, weil das Raytracing in nem Raum ja dann doch recht aufwendig ist.
- O.S.: Genau. Also momentan SSW kann auch maximal 16 Objekte mit den Rauminformation, mit dynamischen Rauminformation berechnen. Also sie können 32 Objekte verwalten mit Hallen, aber so mit dynamischen Rauminformationen, das heißt mit Effekten, die auch dynamisch bewegt sind ist auf 16 eingegrenzt, weil sonst steigt das exponentiell (18:55) wenn man dann weitergeht. Das ist sehr... obwohl ich mein ok, das ist jetzt die Version 4, was wir haben, die ist seit zwei Jahren oder zweieinhalb Jahren schon auf dem Markt. Inzwischen hat sich auch schon Rechenleistung geändert und entwickelt. Also wir hoffen auch sehr dass auch in Bezug auf binaurale Lösung das auch uns hilft.
- H.B.: Da bin ich auf jeden Fall sehr gespannt, ob die vor mir fertig werden, oder ob ich vorher irgendwas mach was hoffentlich funktioniert, also, bin ich sehr gespannt. Aber haben Sie angedacht, also ihre Kollegen, dass sie mit HRTFs mitarbeiten, oder ist das kein relevanter Punkt für SSH?
- O.S.: HDF, was ist das?

- H.B.: Ich hab mich glaub ich falsch... also HRTF, also für die Ohr...
- O.S.: Ah ja. Nein, das von dieser Seite haben wir noch nicht angeschaut das Problem, nein. Muss ich sagen, nein, das ist wäre auch interessant, ja.
- H.B.: Ja ,weil wir hatten das zumindestens, also mit meinem Masterbetreuer besprochen, ob das relevant sein könnte und eben habens so mit aufgemacht, aber es ist halt noch relativ umständlich eine HRTF von einem Menschen zu erstellen, aber es gibt einfache Versionen schon, aber ob die dann so optimal das optimieren... aber ja, interessant dass das generell gar kein Punkt ist.
- O.S.: Nein, also bis jetzt noch nicht, aber ich meine man kann das natürlich anbringen und ich muss sagen, ich muss, ich hab schon seit paar Jahren mit, seit einem Jahr bestimmt haben wir nicht mehr gesprochen mit Fraunhofer, sie waren natürlich jetzt sehr auch traurig mit ganzen Sachen was passiert ist, aber ja ich wollte eigentlich demnächst wieder Kontakt aufnehmen wegen der Weiterentwicklung von SSH, sofern werd ich auch einbringen diesen Punkt vielleicht, sollen sie auch in diese Richtung schauen. Warum nicht?
- H.B.: Also ich weiß noch nicht, ob wir das so umsetzen können, weil wir erstmal die anderen Dinge sag ich jetzt mal umsetzen, aber in meiner Vorstellung ist es halt doch relativ wichtig. Ich hab einmal den Unterschied von drei unterschiedlichen Ohren zu meinen gehört und da hab ich schon gehört, welche meine sind, aber ich glaube das macht vielleicht im Endeffekt nur 5 % aus oder so, aber es ist schon ein Unterschied da und wenn man sich dann auswählen kann, in der Abhöre nochmal sagt: „ich höre“, ist es vielleicht tatsächlich die Sahne vielleicht oben drauf, aber vielleicht auch nicht. Also fänd ich auf jeden Fall interessant, falls Sie das da auch angehen oder angehen wollen. Das ist sicher spannend.
- O.S.: Ja, ganz bestimmt. Also ganz bestimmt und ja, ich werde diesen Punkt auch Kollegen von Fraunhofer auch anbringen, ja.
- H.B.: Spannend. Ich bin auch froh dass Sie da die Kooperation haben und da also fortschrittlich sind eigentlich, mit dem ganzen.
- O.S.: Ja, wir brauchen natürlich jemanden der auch praktisch von Fach ist und in diese Richtung forscht, weil wir sind natürlich, sagen wir so Exekutive und man braucht natürlich noch Leute die wirklich sich mit Theorie befassen und Entwicklung. Die wirklich auch nur damit beschäftigt sind und wir sind praktisch, so Versuchskaninchen. Was gut ist, weil wir profitieren auch davon, muss ich sagen.

- H.B.: Ja, ihr wollt ja Versuchskaninchen sein. Das ist ja absichtlich (genau). Aber das ist ja auch super wenns funktioniert.
- O.S.: Ja, also mit SSW muss ich sagen, das funktioniert auch ganz gut und inzwischen hat sich auch ziemlich mächtiges Werkzeug entwickelt, also man kann auch mit DAWs kommunizieren sie auch ganz gut. Man kann schon fertige Produkte praktisch in den Player einsetzen und das praktisch demonstrieren oder abspielen auch mit Timecode oder mit OSC und OSC-Befehlen geht das auch ganz problemlos. Auch fern, gibt es auch simulierte Fernbedienungen QLab, also diese Abspielsoftware, die im Theater auch ganz oft benutzt wird. Also ist schon gute Entwicklung, ich muss sagen. Von der ersten Version, also wir haben mit Version 2 angefangen und bis Version 4 schon sehr viel passiert. Sehr viel passiert und
- H.B.: Aber ist dann Also ich hab zumindest den Artikel gelesen vom VDT wo sie das Orchester eigentlich komplett eigentlich einmikrofoniert haben und dann über die Lautsprecher im Saal abgespielt haben und da ist mir die Frage aufgekommen ob das bei der SSW oder SSH dann auch notwendig ist, dass man das Orchester sozusagen abnimmt, weil wenn die mit Impulsantworten arbeiten ist das vermutlich notwendig oder ist das... Ich weiß nur dass wir in der Oper Graz das Orchester eigentlich sehr selten mikrofonieren, eigentlich nur wenn wirklich aufgezeichnet wird oder irgend ein Instrument verstärkt werden muss. Aber ist das notwendig sozusagen für SSW?
- O.S.: SSW praktisch, also wir haben zwei Setups vorbereitet. Das Wiedergabe direkt, ohne SSW und weil wir haben in Graben so zehn Lautsprecher aufgestellt. Extra. Und dann haben wir die Gruppen gerichtet, geroutet praktisch auf diese Lautsprecher und dann haben wir auch... ist natürlich mehr Instrumente als zehn Lautsprecher, das ist klar, muss natürlich noch zusammenlegen und mit SSW und ohne SSW. Ich muss sagen mit SSW klang sehr elektrisch. Klar, man hört auch die Gruppen von dort wo sie reproduziert werden, aber das, es war keine, auch mit Halleffekten, das klang auch sehr digital und sehr elektrisch, sehr quantisiert irgendwie, das war kein richtiger Klang, die ich von diesem Raum kenne. Und mit SSW hat sich auch völlig verändert. Weil SSW natürlich rechnet der Signal der auch an diese Lautsprecher ankommt, der wird nicht nur auf diese Lautsprecher gerechnet, sondern auch auf alle 66 Lautsprecher. Das heißt die alle Reflexionen von natürlich von dem, von dieser Harfe zum Beispiel, Harfe spielt aus diesem Lautsprecher, aber SSW rechnet praktisch auf ganze Anlage die Reflexion. Das heißt es war ganz andere Hörerlebnis mit SSW. Man sitzt praktisch wie im Saal, man hört direkt Instrumente, wo sie kommen müssen, aber

man hört wirklich die umgehüllt im Raum. Also die ganze Umhüllung von Raum ist da und man hört, wenn man so Augen zuschließt, dachte ok, Orchester sitzt im Graben und spielt so wie immer. So war der Eindruck. Also SSW macht schon Sinn. Und dann die Klang, die Verfärbung von Klang war auch ähnlich wie bei live. Es ist nicht wie live, ich muss sagen es ist nicht 100 %, aber schon viel näher dran.

H.B.: Ja, das find ich super spannend, das klingt bestimmt, also man kann da bestimmt viel rumexperimentieren.

O.S.: Ja, absolut. Also wir haben bei jeder Produktion, ich, wir haben zwar fertigen Setup, jede Produktion, ich muss die Objekte bisschen verschieben. Je nachdem wo sie sitzen, wie viel Instrumente in einer Gruppe spielen und es ist immer dynamisch, es ist nicht so, dass man einfach diesen Setup immer verwenden darf und kann. Also darf man schon, aber man muss sich natürlich in Klarem bleiben, das ist auch Bedarf, dass es gibt Bedarf an diese Anpassungen.

H.B.: Maßgeschneidert.

O.S.: Ja, absolut, klar. Aber das ist auch verständlich, weil die Musik ändert sich, die Musiker sind auch anders und ja Dynamik ist anders. Insofern...

H.B.: Stimmt. Aber das heißt vor Corona-Zeiten, wo das Orchester noch im Graben sitzen durfte hat das SSW-System auch ohne Mikrofone sozusagen im Orchestergraben funktioniert?

O.S.: Genau. Die SSW hat auch nur dazu gedient, also es war zwei Funktionen. SSW war als Effekt, wurde benutzt als wirklich Soundeffekt mit vorgefertigten Sounds und zweite Funktion war praktisch die Raumakustikveränderung. Das hatten die eigentlich nur über zwei Mikrofone die über Orchestergraben hängen, das sind so zwei Kugelmikrofone, die wurden als auf die Position gebracht und SSW hat gerechnet praktisch diese Klang auf die Anlage. Das heißt der Raum wurde praktisch gerechnet mit Impulsantwort der eingemessen hat, wurde praktisch damit gerechnet und der Raum wurde dementsprechend vergrößert. Je nachdem. Das heißt man arbeitet mit SSW als raumakustisches Instrument.

H.B.: Das find ich spannend, dass da nur zwei Mikrofone notwendig sind, um sozusagen den Raum zu verändern.

O.S.: Ja ja, man kann auch mehrere Mikrofone benutzen, also es gibt in Berlin in der Staatsoper auch so ähnliche Anlage, die auch so arbeitet, also sie haben in Amsterdam im Theater auch, die praktisch auch auf diesen Basis aufgebaut sind, sie nutzen mehr

Mikrofone. Das heißt die verschiedenen Positionen werden abgemessen. Das funktioniert vielleicht bisschen sauberer als unsere, aber der Aufwand ist mit dem Ertrag...sagen wir so

H.B.: rechnet sich nicht

O.S.: Ja, sagen wir so. Das ist Aufwand viel größer mit ganz kleinen Häppchen drauf. Sagen wir so. Und für uns als Repertoiretheater, das ist natürlich schwierig, wir haben einfach gesagt mit zwei Mikrofone kriegen wir fast gleiche mit Standardlösung, wenn man immer die Mikrofone halt installiert und verschiebt und neu rechnet. Das ist also für uns war das auch diese Lösung nicht praktikabel. Aber ja, klar, natürlich, Sie haben recht, es gibt solche Ansätze mit verschiedenen Positionen von Mikrofonen und das funktioniert noch sauberer. Ja.

H.B.: Ok, weil ich hab mich nur gewundert, dass da nur zwei notwendig sind, aber es ist ja super dass man das auch runterbrechen kann und trotzdem ein Ergebnis hat, das zufriedenstellend ist.

O.S.: Ja. Ist so. Das ist komisch. Ist nicht allgemein, es ist natürlich von Raum abhängig, vielleicht in anderen Theatern braucht man wirklich mehr, bei uns hat sich so gezeigt, dass wir...wir waren auch bei diesem Experiment auch dabei. Also falls Sie das experimentiert haben, das war ein holländisches Ingenieurbüro, Akustikbüro, die haben Auftrag damals bekommen für die Staatsoper unter den Linden in Berlin und das bei dieser Generalsanierung auch zu installieren und als Referenz waren wir natürlich genannt, sie waren bei uns paar Tage und haben so dieses Experiment gestellt, aufgestellt mit mehr Mikrofonen, gemessen und wir waren dabei und deswegen kann ich sagen, was da rausgekommen ist, bei uns.

H.B.: Wow. Das klingt sicher sehr beeindruckend.

O.S.: Ja ja, das war sehr interessant, ja.

H.B.: Ich hab bisher nur von Amadeus gehört, hier in Österreich, die machen wohl auch eben mit vielen Mikrofonen, also das wäre wahrscheinlich bei vielen einfach nicht praktikabel das zu hängen, weil dann Video und Licht kommt und sagt: „Nein, nein, da hängt nichts!“ Aber die haben sehr viele Mikrophone und verändern den Raum, das fand ich auch recht interessant und ich glaub Meyer Sound hat da auch ein System, wo sie dann Lautsprecher in den Wänden verbaut haben und aber auch sehr viele Mikrofone hängen im Raum. Und das ist zwar sehr beeindruckend, aber ob das wirklich umsetzbar ist dann in...

- O.S.: Ja, Meyer Sound hab ich auch gehört, das System gehört, das funktioniert ganz gut, aber Kostenfaktor ist natürlich enorm, wenn man das umsetzt.
- H.B.: Ja, Meyer Sound ist ordentlich.
- O.S.: Ja, eben, es ist erstmal das und zweitens ist natürlich die ganze Installation, Installationskosten und ganze Rechnung es ist schon ganz kostenspielig. Also in dem Fall SSW passt sich an den vorhandenen Lautsprecher an. Es heißt sie arbeiten mit den vorhandenen Hardware, das ist, die messen das ein, jeden Lautsprecher und passen die Software an. Ich finde das ist einfach marktgerechte Lösung.
- H.B.: Ja, das macht definitiv mehr Sinn anstatt zu sagen man braucht den und den Meyer-Sound Lautsprecher, damit das funktioniert.
- O.S.: Absolut. Aber ist klar dass ist so ein Verkaufsargument natürlich für Meyer Sound, sie wollen ihre Lautsprecher verkaufen, das ist klar.
- H.B.: Sie wollen dann alles verkaufen. Ich weiß noch bei Idee & Klang war ich bei nem Projekt dabei in Doha und da war alles Meyer Sound, alles. Ein paar nicht, weil die zu groß waren, für ein paar Löcher waren die Lautsprecher zu groß, da waren dann K-Array, so vier oder fünf, aber der Rest Meyer Sound, D-Mitri, Cuestation,... das ist so verrückt. Aber ja, Kostenfaktor ist schon richtig. Muss man aufpassen.
- O.S.: Es gibt noch eine Lösung die eigentlich von Fraunhofer abgewandt ist bei d&b, Soundscape, das kennen Sie auch bestimmt. Genau, das ist eigentlich der Entwickler von IDMT auch dahin gegangen und hat auch für die d&b das auch gemacht.
- H.B.: Aber da funktioniert es wahrscheinlich auch nur mit d&b-Lautsprechern.
- O.S.: Mh, klar, er hat das an..., aber ich muss sagen er hat auch für IDMT eigentlich das SSW entwickelt. Und ich weiß das funktioniert nicht nur damit.
- H.B.: Aber vielleicht sagt man dann, am besten funktioniert es so. Dann ist es wieder ein Verkauf.
- O.S.: Natürlich. Ne, also ich muss sagen das funktioniert eigentlich mit allen Lautsprecher, bedarf aber auch natürlich so feine Einstellungen. Weil das muss praktisch jede Lautsprecher eingemessen werden, entzerrt werden, und dementsprechend abgespeichert werden, aber letztendlich das ist nur die Einstellungssache.
- H.B.: Das stimmt. Und es lohnt sich ja dann im Endeffekt auch. (Ja). Und vermutlich werden Sie jetzt in ner Zeit wo hauptsächlich gestreamt wird vielleicht noch ein bisschen Experimente mit Fraunhofer machen, wenn die Zeit haben, weil wenn dann der Betrieb irgendwann hoffentlich mal wieder auf Normalität springt, da wird wahrscheinlich auch nicht mehr viel Lücke sein um so Tests zu machen, oder?

- O.S.: Eben. Ich meine das ist momentan ist eigentlich die Zeit, die uns geschenkt ist, für solche Sachen.
- H.B.: Experimente mit Sound, find ich immer gut. (Zustimmung) Ja super, also ich glaube das beantwortet auf jeden Fall schon mal alles so und stützt meine Relevanz auf jeden Fall.
- O.S.: Ja, absolut. Wie gesagt, wenn ich Ihnen weiter helfen kann in Ihren Forschungen in auf diesem Gebiet dann können Sie mich jederzeit anschreiben und dann können wir auch nochmal austauschen.
- H.B.: Das ist super.
- O.S.: Und normale Betrieb hoffe ich im... weiß ich nicht, also wir hoffen natürlich alles auf nächste Spielzeit, das es dann weiter geht. Dann können Sie auch vor Ort mal anhören. Würde ich Sie gerne fragen.
- H.B.: Das wäre beeindruckend, das wäre super, weil das klingt, also ich habs ja noch nicht gehört, aber Ihre Erzählung, das klingt einfach super spannend.
- O.S.: Ja, muss man natürlich dann Zeit finden und Produktion finden wo man das demonstrieren kann, wo halt einfach so Zeiten, Zeitfenster, wo man einfach zeigen kann, weil ansonsten... ja. Wir schauen optimistisch nach vorne.
- H.B.: Eben, ohne Optimismus kommt man auch nicht voran. Man darf auch optimistisch bleiben. Ja, cool. Also ich kann Sie auch gerne auf dem Laufenden halten, wenn, also ich bin jetzt noch in der Recherchephase und wir werden noch Ausmessungen in der Oper Graz eben machen, weil das hier halt nah ist und aber ich kann Sie gerne auf dem Laufenden halten wenns funktioniert hat, ob das funktioniert, also dann kann man das vergleichen mit der SSH oder so, ich find das interessant, dass Sie das auch angehen mit den Kopfhörern, weil meine Idee war ja das auch als zusätzliche Abhöre zu nutzen, dass man sagt, ok ich brauch jetzt mal den Raum noch, ich will noch hören wie es da an der Position klingt. Es ist ja nicht als komplett zum mischen gedacht, also man kann das sicher auch so machen, aber ich denk, zumindestens mit dem Christian Komp hab ich gesprochen und er meinte so ja als zusätzlich ist super, ob er es dann ganz mit Kopfhörern mischen schafft, das weiß er noch nicht, weil er liebt halt das offene ohne was auf dem Kopf, aber find ich auf jeden Fall kann man mal ausprobieren und kann ich Sie gerne auf dem Laufenden halten, was da voran geht.
- O.S.: Mhm, ja gerne.
- H.B.: Ja dann vielen lieben Dank für das Gespräch.

27.05.21 – Sarah Black, Tontechnikerin - Nationaltheater London und
Sydney Opera House (LinkedIn)

H.B.: Dear Sarah Black, I just read the article at the soundgirls-blog about you and your work at the Sydney Opera House and I was wondering if you could answer some questions for me regarding my master thesis in the sound department. Also your current work is really interesting. Best wishes, Hanna

S.B.: Hi, Hanna, Oh that's from a while back! Yes, sure I'd be happy to answer any questions. What is your master thesis regarding? Best, Sarah

H.B.: Hi Sarah,

Thank you so much for your fast answer! I'm writing my master thesis about the opportunity to create a realistic dynamic binaural listening experience in an opera house at the best listening position in the hall, so that this could be used as a separate listening method over headphones in the sound control room.

My questions for you are based on your experience in theatre or opera houses. In your SoundGirls interview you say that the Joan Sutherland theatre in the Sydney Opera House has a Euphonix System 5 in the control room but for FOH you can remove seats at the centre rear of the stalls for a better listening, I guess.

1. How is the listening position for you as an audio engineer during live events? Is there at every event the option to remove seats for the perfect listening in the room?

2. Have you ever experimented with 3D/spatial/binaural audio techniques in your opera house?

You can also answer this for both, the Sydney Opera House and your current working place, the National Theatre in London. It would be really awesome to include your experiences at such prestigious Opera Houses.

Thanks already for your nice text and I hope to hear from you again :)

Cheers from Graz, Hanna

S.B.: Hi Hanna,

Apologies for my delayed response. I have recently had a baby so my days (and nights!) can be quite full.

The National Theatre is about to reopen, with planned shows to resume in June, fingers crossed.

I've actually been on maternity leave and sadly will finish up at the NT officially next month. With the Coronavirus situation and having a baby, my partner and I have decided to remain in Australia (we returned just before the bub was born).

I haven't been to Graz, but I was lucky to visit Vienna a few times and the opera house there once. You have a very beautiful country!

Do you mean by realistic dynamic binaural listening experience, for the sound engineer in the auditorium? Or that the audience would have a binaural experience through headphones?

At the SOH JST, shortly after I wrote that piece they replaced the Euphonix console with a Midas Pro X, and used a Pro1 for FOH additional mixing. I'm not sure if that is still the set up as it is almost 5 years now since I left. What we would do in the past, was to extend the console with an extra euphonix fader bank (using cat 5 as the system was modular). So there are cat 5 tie lines in the control room and in the auditorium. Then the engineer would sit in the auditorium for tech/rehearsals so that levels could be set which were then recalled once the show had opened. The engineer would return to the control booth at this time. With the Midas system, a similar set up would be used for tech, where the Pro 1 would be in the auditorium - sharing inputs with the Por X in a standard FOH/Monitors split manner - and a mix could be set. For the performance run however, the Pro 1 would return to the control room but the engineer could remain in the auditorium using the mixtender app on an iPad. Usually this would be discretely standing somewhere in the circle, so not the optimum mix position but better than the control room!

Hopefully that makes sense. This was for both the opera and ballet seasons. As the pit was open to the room, the mix was really an enhancement rather than amplification (usually). As I mentioned though, I haven't worked there for some time so it may be different now.

And to your questions:

1. How is the listening position for you as an audio engineer during live events? Is there at every event the option to remove seats for the perfect listening in the room? Not at every event. The optimum position has traditionally been in the centre stalls position, as this is where traditional LCR or LR systems has the best coverage. However, this is often also the best position for sightlines and as such, can command the

best ticket prices! So often that is a compromise that is made between producers/creatives/promoters etc.

With the move to soundscape, vivace, Lisa, Sound Mapp and more immersive sound systems, however, perhaps this central position is no longer the one optimum spot? It's something to consider, perhaps. D&B's slogan is 'democracy for listeners' which ties in with the idea that everyone has the best experience, no matter what seat! And in an ideal world, these systems may give a better and more even coverage across the space (though you would still want imaging/located sounds for effects - especially in theatre design).

I think most engineers want an opportunity to walk the room during tech to ensure that the system has a cohesive sound and listening experience.

2. Have you ever experimented with 3D/spatial/binaural audio techniques in your opera house?

Yes, we used a system called Iosono for *Die tote Stadt* in 2012. The orchestra was too big for the pit for that show, so they were set in another venue in the building. If you google you should find some reviews - or let me know and I can find them.

Iosono was bought out by D&B and the technology used for Soundscape (I am pretty sure - this may need fact checking!!).

Prior to the JST being refurbished in 2017 I worked on an electroacoustic trial system, which used Vivace as the processor. We had 96 discrete outputs (from memory). It was awesome. I left after the trial, but I'm pretty sure during the refurbishment they ended up purchasing both soundscape and vivace. I could probably put you in touch with someone who could tell you about what happened more than me, as I had left prior to the install.

At the NT we use Soundscape in the Lyttleton Theatre. Currently investigating SpaceMapp for the Olivier and Soundscape for the Dorfman.

For more theatre based application reference, my HOD Dom Bilkey is also a sound designer and has used Soundscape on several shows including the Lehmann Trilogy. For binaural reference, we did a fantastic show called *Anna* at the NT, which had the actors/stage enclosed in a sound proof glass box. The audience all wore headphones. I thought it was a great show, hopefully it will be revived at one point. The sound designers were Ben and Max Ringham. Maybe have a quick google of it.

Theatre has already been ahead of the game I think when it comes to immersive/spatial sound systems as they have always had that element of imaging and locating sounds specific to actions/objects as part of the storytelling, and not relying on a traditional left/right system.

Hopefully that helps? Please let me know if you want some more info/detail. I'm happy to chat.

It would be great to read your thesis when you are done. Who else are you speaking with? Will it be written in German?

Best, Sarah

Links: <https://bachtrack.com/review-opera-australia-die-tote-stadt-sydney>

<https://www.youtube.com/watch?v=-SnVrMh6S4M>

<https://www.dbaudio.com/global/en/applications/theatre-and-opera/a-whole-new-world/>

actually, one of the pictures here is my pit plan :)

<https://www.youtube.com/watch?v=hFM4hPgGZuk>

08.06.21 – Sal Distefano, Tontechniker – Teatro alla Scala (Zoom-Interview)

H.B.: First, I want to ask you about your audio team, how many people are working there and how is this working?

S.D.: Yes, now we are about 8 people and normally we cover all that regard the stage, I mean our production are very big, huge sometime with a lot space and location. So, the main work is to help the singer to hear or when we have some special effect or maybe we outer enforcement the choir. Sometime even we do recording, yes recording but the main thing is to help the stage because there are a lot of people even sometime depending on the Opera. So we, we even use the video, so we help the singer and the choir to see the conductor to the monitor. Then, we have even some conference in the foyer, where they do some introduction to the Opera. They speak, there is a teacher, some, that speak about, talk about the Opera that is coming to perform. Then, we have a concert, so we cover a lot of the audio of the little video

audio on the Opera, so people can see on the screen in the office. We cover a lot of this stuff there. So we are 8 people, sometime we maybe need even to be more but for now it is transition. The news of this year with the Meyer, Dominique Meyer, that I think you now as the new general director. He was in Vienna, in Staatsopera. He wanted to start for this year a new streaming, broadcast department – like in Vienna. So, we start the process to put camera everywhere. For this, we have the help of Widauer, Christopher Widauer from Vienna Saatsopera, and Galmitsch *Robert Galmitschbundosch*, they are a really big media company. So they follow us to start up this streaming department. So we built a new video control room with camera and – it's a big project. This is the big change. Because in this year, we only do that. Sometime, we do recording even. Only a few of us, they care about recording of the opera or concert or recital but generally, in this year we never approach the streaming. I think with that Covid was new, I mean a new idea to start. And this new director wanted to do that streaming or line and on demand. You know, I think that you saw so.

H.B.: I guess that now with Covid everyone kind of get more sensitive to this online streaming stuff. Because before it was a few videos, a few recordings online but mostly like the live experience but now there are like weekly streams and everything. It's so cool.

S.D.: Si, Si. Theatre, Opera is from live, no other.

H.B.: It lives from the experience, not from the recording.

S.D.: Yes, but we built this new broadcast department, no? It's like we split in two.

H.B.: Ah, and you are joining the broadcast or some other department?

S.D.: Broadcast and we continue the audio video department for the stage. So that we will be both.

H.B.: So there will be lots of audio, that's cool. Also, I looked on the website and there is not so people standing there on audio. It's only a name, maybe you know him or – *Nicola Uro* or something?

S.D.: Nicola Uro is my old boss that is going pension now. But Sí, and he's from very old, lot of time there but actually now he's going in pension in December so we are – me and some others, that will be the change.

H.B.: I was just confused that there was only one person standing, so I'm really glad you have 8 people there and not one only.

S.D.: Actually, Nicola Uro now is relaxing at all, he is old, he is pension, from another era. So he don't know about new technology.

- H.B.: So then I'm glad that I reached you. Cause my master is also about the new technology stuff. Because my master thesis, I'm writing about a realization of a real-time dynamic binaural listening experience.
- S.D.: I see, I see in your LinkedIn. Wow, you do a lot. Mamma Mia. Brava.
- H.B.: I try. And I hope it works out because that could be an – so if you have an optimized listening position in the auditorium and you can have there kind of a binaural listening experience you could use that for supporting the audio engineer in the, who is not inside the auditorium. I'm not sure if this is the case for you but this is why I'm asking the questions afterwards. Because in Graz, the listening position for the audio engineer is not that good, that sucks. So if that works, I want to use this to have like a listening opportunity to check over headphones how the balance is inside the auditorium while you are somewhere else.
- S.D.: Ah, because we are somewhere else.
- H.B.: That's why I'm asking because I want now to support the relevance of my thesis or of my topic to kind of optimize that position. And that's why I want to ask you: how is your listening position as an audio engineer while live events?
- S.D.: The listening position is absolutely out of the stage, so we, our control room is very far from the stage, so we just listen from the speaker and now, as I told you, we don't take care about recording till now, cause. And we just have two microphones hanging from the ceiling – that's all. So if I want go to hear I should go on the audience and listen in real. We don't have a so perfect, I mean so real.
- H.B.: So you can't sit in the auditorium for mixing?
- S.D.: Yeah.
- H.B.: This is mostly the problem because that would be fine if you could sit in the auditorium while you mix, hear all the reflections and everything.
- S.D.: All the reflections in La Scala are incredible. This is not good, there are lot of early reflections. Just for Opera, maybe, there are some positions that are good but for symphony concert, that's not so, the acoustic is not so good actually. There are a lot of reflection. It's opera theatre, not concert hall absolutely.
- H.B.: But are you also doing musicals there? Because that is also difficult with the microphones and everything.
- S.D.: Yeah, Musical, we had some Musical. Sometime, we do the enforcement. And now, my old boss, I mean he bought some speaker of k-array. It's a long speaker that you can hang on the roof. Even if I would be fp with L-acoustics or d&b. But that's it

and now we have that k-array. Not bad, its, they are in Italia even, that speaker. But I think, we in La Scala should do a real computing starting of acoustic, to hang the speaker the right way. Otherwise, it will be a mess. And L-Acoustic and d&b technology, maybe they even could be happy to be sponser and help to put a good sound enforcement in La Scala. But now, we only have that. It's a problem sometime. And imagine, I, when we do some Musical or enforcement, I, my position was in the box. I mean the little box. So you can imagine how you can hear.

H.B.: Yeah, its basically really shit.

S.D.: You can go always out of the box to hear, then go to the audience to hear and then be back inside the little box. You know, La Scala is with all boxes.

H.B.: Yes, I saw pictures.

S.D.: So we have reserved the one on the first level and we put mixer inside but very difficult to do a nice sound from there live.

H.B.: So, have you ever tried to optimize that kind of or is that already the optimum which you could reach?

S.D.: No, to optimize, we only, we should go on the parterre. How to say it in English? Where people stand down. We put on the last row. But actually, during the show, we can't stay there for security reason, so we should be back on the box. You can listen in parterre and then back, just for rehearsal you can stay on the parterre. And then you should go back in the box and do the show from there.

H.B.: Yeah, then it is basically the same like in Graz, they also have the rehearsals, they can do in the parterre the rehearsals and then they kind of have to remember the levels and then go back where it sounds completely different.

S.D.: It's really different. But to your binaural, you want to do everything, so you can put some microphone on the stage and listen.

H.B.: Yes, it should be kind of – I will try it out in Graz, so in Graz on the gallery is the best position to listen. So we will put some soundfield microphone on that and have some room microphones in the room just for the reverb, ambient. And then try to have a realistic pin point to the stage, we will try it out with some plugins we have already to use, I'm not sure if you know the IEM with the ambisonic plugins here in Graz?

S.D.: Ambisonics, yes. I heard about.

H.B.: They have huge research here and I will try out some stuff like that and if it works, you have then the opportunity to have a realistic loudness feeling of that position for

the live event so that you could listen to it in real-time. I hope it also works, I'm not sure, we haven't tried it yet. But if it works, it could support the shitty position you have in the box, kind of.

S.D.: Of course, it's beautiful. But the listening should be only on the headphones or also with speaker?

H.B.: It's only on headphones so it's only like for checking if it's still because I talked already to some of my colleagues of Opera Graz and they said like "No, I can't mix only with headphones on, it's not possible." So it's only for checking if the loudness is fine so far. It's not meant for the whole mixing, if you are fine with mixing over headphones, that's also cool, that's up to you but it's not main reason. I mean you could also use it then to stream it, like a binaural mix. That's also possible then. But my intension is more to optimize the sucky position of the audio engineer. Have you ever tried or experimented with 3D audio or binaural in your Opera House, now?

S.D.: No, never. Binaural, no. I mean I listen to something binaural recording but we never do in our Opera. Because I mean we don't even have the time to do and we have a lot of stuff to do and video, audio, camera, rehearsal with piano, no piano – so you should mic everything.

H.B.: Yeah, I can imagine, there is no time for such, let's say "playing around".

S.D.: Yes, that's the problem. But very beautiful that you do that and very interesting to try.

H.B.: Yeah, I really hope that it works. If it works, it would be like awesome.

S.D.: I want to see Graz if it works, I want to go to Graz.

H.B.: Yes, sure. If it works, I could give you a text and then you can come over and listen to it. So I will develop it in the next months so I hope.. And if it is not working, I can still say – there is a problem and we should solve it somehow.

S.D.: You will solve the problem, I think.

(..) Monolog Hanna bis 19:44, nicht relevant

S.D.: Everybody has the same problem. (...) I think all Opera House don't have a good position for listening because of the people, the audience, or you are on the box. Maybe in the luckily way you are on the box and then you can have a glass and then you can open this windows but always you should do like that. I mean in Shanghai, I

had the same problem. The Opera, Flauta mágica (Zauberflöte von Mozart), in Shanghai, and they have a beautiful Opera House, very modern, very new. But the problem was the same. What I hear was not the same, I should go out to hear and then back inside, even if we had the windows. But then, I should be with headphones. I mean its cause you can't do like so. This is the problem of many opera house.

H.B.: I mean the glass, the moving glass, we have here in Graz as well, but it's like still, you can't hear the reflection of the orchestra in the pit. That's not, you can only hear from the stage some stuff but you can't hear the balance between the music and them. So it might be better than in others but it still is not a good position. But it's interesting that you say in Shanghai is it the same. You worked there too?

S.D.: Yes, we were there with La Scala, on tour. And we bring Flauto Mágico (Zauberflöte), and Director was Peter Stein and we made Flauto Mágico all with microphones of the singer, with the PA. Because it was a lot of speaking and music. So to enforcement a little, to have a little enforcement for the audience, we put some microphones and it was very *notice*, because it should not be too loud because then you can't hear, all you hear is no natural sound. If it is too less, people don't hear, because they sing and then they speak. So you should close up close on, off, on off. Then the balance.. In Shanghai, it was a lucky position, at least not like in La Scala. In La Scala, we should move the desk. With this system like yours, maybe we could stay then in a different position, it don't care where you are and where you monitoring.

H.B.: If that would be like that. My chef here is always saying, that he wants to see the stage at least or have a visual connection to it. I mean it's also for some who really can't basically see it, like in Bolshoi. Because that's a really crappy position, just it makes more sense to listen to something else then. But yeah, it could work like that.

08.06.21 – Christian Komp, Leitung Tonabteilung – Oper Graz (persönliches Interview)

H.B.: Wie ist denn die Abhörsituation für dich und deine Tonleute in der Live Vorstellung?

C.K.: Bei uns ist es sehr schwierig in der Tonregie, dadurch, dass wir nicht im Saal direkt sitzen, sondern zum einen unterm Balkon, also deutlich tiefer – auf ähnlicher Höhe wie die Stehplätze – und noch dazu in einem kleinen Raum, der sehr kompakt ist und akustisch nicht sehr ideal ist und wir haben da viele verschiedene Faktoren, weshalb es zum Teil sehr schwer ist einzuschätzen wie es tatsächlich im Zuschauerraum klingt. Das liegt zum einen daran, dass wir das Orchester – würden wir auf der Position wo wir sind, das Orchester im Graben ist bei den normalen Opernvorstellungen nur indirekt über die Decke hören und genau diese Reflektionen werden aber vom Balkon abgefangen, weil wir tief unterm Balkon sitzen. Gleichzeitig, das heißt die Lautstärke vom Orchester ist sehr schwer einzuschätzen und bei uns deutlich leiser im Verhältnis als sie tatsächlich im Saal ist. Gleichzeitig spielen aber die Lautsprecher, je nachdem welche Situation, aber sehr häufig, spielen die Lautsprecher halt direkt bei uns rein, das heißt die Lautsprecher – alles was zum Beispiel über Mikrofone und so kommt – ist dann wiederum bei uns hinten drin deutlich lauter, weils eben nicht in dem gesamten Raum untergeht und überdeckt wird von dem diffusen Orchester, das über die Decke reflektiert, als es tatsächlich im Zuschauerraum ist. Und das macht Balancen abschätzen sehr schwierig, dadurch, dass wir auch sehr viele verschiedene Zuspieldirectionen haben, je nachdem welche Anforderungen - der Engelschor, der von oben kommt, der aus der Lusterkuppel rauskommt, den ich hinten ‚de facto‘ überhaupt nicht höre – und viele andere Situationen, wenns irgendwie von der Hinterbühne kommt, ist es sehr schwer einzuschätzen wie es tatsächlich im Zuschauerraum klingt und wir können uns eigentlich nur damit behelfen, dass immer bei solchen Produktionen mindestens ein Kollege im Zuschauerraum selbst sitzt oder, dass wir das Mischpult raus bauen in den Zuschauerraum, um das Ganze von den Proben einzustellen und bei den Vorstellungen dann zu hoffen, dass schon irgendwie so passt wie man es eingestellt hat. Oder dass man es lernt einzuschätzen, wie muss es, wie muss zum Beispiel die Balance bei mir in der Tonregie klingen, damits im Zuschauerraum passt. Also nicht, dass ich dann sag ‚Ok, jetzt klingts bei mir in der Tonregie gut‘, sondern dass ich sag ‚Ok, in dem Verhältnis müssen z.B. Stimmen zu Orchester stehen, damits im Zuschauerraum passt‘ und dass man es versucht sich das anzueignen und zu gewöhnen pro Produktion. Und sonst eben während den Proben sitzt

jemand im Zuschauerraum und gibt einem Feedback ‚Das muss lauter sein – das muss leiser sein‘ und man versucht das dann so irgendwie einzustellen. Aber nur über die Tonregie wär schwierig.

H.B.: D.h. ich höre raus, dass es suboptimal ist dahinten zu sitzen und nicht einen Platz im Zuschauerraum zu haben. Eine Art und Weise das zu optimieren war bisher nicht möglich, oder?

C.K.: Das wird auch nicht möglich sein, aus zwei verschiedenen Gründen. Der Hauptgrund ist, dass es ein Denkmalsgeschütztes Haus ist, wo man keine wirklichen baulichen Veränderungen vornehmen kann und d.h. schon allein deswegen dürfte mans gar nicht, dass ich jetzt sag ‚Ich bau jetzt da im Zuschauerraum groß was auf‘ oder ‚Ich reis den Balkon ein‘ oder ... Es wären auch sehr drastische Maßnahmen möglich. In neuen Häusern wird das zum Teil, z.B. in Linz haben sie es so gelöst, dass sie das Parterre in zwei Ebenen geteilt haben – also vorne und hinten und dazwischen so ein Halbstock quasi, also der hinter Teil des Parterres ist etwas höher als der vordere Teil vom Parterre und sie haben da relativ mittig im Saal dadurch einen Mischplatz draußen gebaut, der nach Bedarf – im Wechsel zur eigentlichen Tonregie, die eine ähnliche Position hat wie bei uns – z.B. bei Musicals verwendet werden kann. Das wäre bei uns aber undenkbar, weil wir das komplette Haus umbauen müssten dafür. Und der nächste Punkt ist, dass es auch schwierig wäre mitten im Zuschauerraum zu sitzen bei einer Vorstellung, weil man ja selber ein ziemlicher Störfaktor ist - weil nämlich die Leute, die hinter mir sitzen, sehen ja dann auf einmal nur noch das Mischpultleuchten, gar nicht mehr die Bühne. Das ist bei einem Rockkonzert ist das eine andere Situation und es wäre, gibt's glaub auch in keinem Theater, das mitten im Saal ein Mischplatz ist.

H.B.: Ist auch schwierig so die Kommunikation mit den Anderen irgendwie aufrecht zu halten, wenn was auf der Bühne wäre oder so.

C.K.: Ja, das ist eine Diskussion, die man auch immer wieder mit anderen führen muss, wie es überhaupt ist während der Vorstellung zu kommunizieren, weil wir ja – im Gegensatz zur Beleuchtung – gleichzeitig hören müssen und aber trotzdem unter Umständen in irgendeiner Form kommunizieren, d.h. ich kann nicht mit einem Funkheadset dasitzen, weil dann hör ich ja nichts mehr, während ein Beleuchter das sehr wohl machen kann, weil der muss ja nur die Anweisungen, die übers Headset kommen, befolgen und muss sehen, dass es leuchtet. Hilft mir natürlich nichts, wenn ich

in einem Ohr einen Stöpsel hab, dann kann ich ja nichts mehr mischen. Das ist sowieso schon schwierig, wenn man in der Tonregie sitzt, aber da ist man doch noch zu einem gewissen Grad abgeschirmt vom Publikum und deutlich hinterm Publikum. Wenn ich mitten drin sitz, wäre das natürlich ein Ding der Unmöglichkeit, sobald ich da nur anfangen zu flüstern oder irgendwas, hörts um mich rum der ganze Zuschauerraum.

H.B.: (Ja, sollte man in der Tonregie anfangen mit Lichtzeichen zu arbeiten, so wie die Lichtleute mit dem Ton arbeiten - SOS.)

Gabs bereits Experimente? Du hast mal erzählt Kunstkopf habt ihr ausprobiert?

C.K.: Das war tatsächlich vor meiner Zeit. Vor meiner Zeit gabs einen Kunstkopf auf der, am Balkon befestigt - an und für sich ein günstiger Hörplatz. Das hat aber wohl, aber da kann ich nur auf die Berichte der Kollegen zurückgreifen, das hat wohl nicht besonders gut funktioniert. Und was ich grundsätzlich schwierig find bei solchen Sachen ist dann die absolute Lautstärke einzuschätzen, weil ich kann mir natürlich meinen Kopfhörer auf eine angenehme Lautstärke stellen und da dann irgendwas mischen und es ist aber dann schwer einzuschätzen, Ist es jetzt vielleicht massiv zu laut im Zuschauerraum – ist es vielleicht viel zu leise und ich hörs zwar am Kopfhörer schön, aber draußen – gerade auch das ältere Publikum – versteht kein Wort mehr. So stell ichs mir vor, aber ich habe das selber nie erlebt wie das war mit dem Kunstkopf, aber das Experiment gabs, ja.

H.B.: Wie schätzt du die Relevanz der Masterarbeit ein, so ein Problem zu behandeln?

C.K.: Ich finde die Relevanz relativ hoch und zwar eigentlich sogar in den meisten Häusern noch höher als bei uns, weil wir haben zwar eine sehr ungünstige Abhörsituation. Ich kenne aber sehr viele, sehr große Opernhäuser, die noch eine erheblich ungünstigere Abhörsituation haben, also wirklich große renommierte Häuser wie die Wiener Staatsoper oder das Bolshoi Theater in Moskau, die Pariser Nationaloper – die haben alle wesentlich schlechtere Abhörsituationen noch als wir. Weil oft die Tonregie nicht mal, also noch wesentlich weiter weg – irgendwie hinterm ersten oder zweiten Rang – ist, es nur so ein kleines „Guckfenster“ gibt, das oft nicht mal in Achse zum Mischpult ist, wo man irgendwie seitlich am Mischpult sitz und dann ausm Fenster rauschaut – sehr weit weg von der Bühne. Ich glaub das da die Situation noch erheblich schlechter ist als bei uns, so ungünstig sie ist bei uns. Es kommt auch immer drauf an was für Vorstellungen es sind, es ist natürlich besonders beim Musical und bei Ton-intensiven Produktionen ist es natürlich sehr relevant, dass man irgendwie nen

Eindruck hat wie es tatsächlich klingt im Zuschauerraum und z.B. auch wie es mit vollem Publikum klingt. Das ist ja was, was wir so gut wie nie nachvollziehen können, weil während den Proben kann man zwar herumgehen - also kann der, der denjenigen unterstützt, der in der Tonregie sitzt – im Haus herumgehen und verschiedene Plätze ausprobieren und sagen ‚Ok, auf den Plätzen funktioniert gut. Hier müssen wir noch irgendwie schauen. Dem Eck geht’s gerade schlecht‘. Das ist aber eine Situation, die habe ich natürlich nie bei einer Vorstellung. Bei einer Vorstellung kann ich natürlich nicht sagen ‚Entschuldigen Sie, darf ich mal kurz? Könnten Sie kurz aufstehen? Ich müsste mich da mal hinsetzen – aha, ja hier klingt ganz gut.‘ – geht ja nicht. D.h. wenn ich da auch eine Möglichkeit hätte auch bei vollem Haus verschiedene Abhörpunkte zu haben und zu sagen ‚Jetzt schauen wir mal, wie klingt es überhaupt bei vollem Haus überhaupt auf der Galerie? Wie klingt denn jetzt in irgendeiner Loge? Wie klingt denn jetzt im Parterre?‘ – wäre das sicher eine Hilfe und dann gibt’s Produktionen, wo das extrem hilfreich wäre. Da fällt mir insbesondere unsere Operndouche ein, wo es einfach sehr sehr laut ist und man sehr weit weg ist vom Geschehen und viele Reihen Leute vor sich stehen hat und eigentlich nur sehr entfernt erraten kann, wie es gerade im Saal klingt und relativ im Blindflug mischt. Wenn ich da eine Möglichkeit hätte wirklich reinzuhören in den Saal und zu beurteilen ‚Wie klingt denn jetzt wirklich im Saal?‘ – das wäre eine große Hilfe. Also ich sehe das durchaus sehr relevant und bin gespannt was dabei rauskommt.

14.06.21 – Philippe Taberlet, Leitung Ton/Bild – Nationaloper Paris, Bastille (E-Mail)

Questions:

1. How is the listening position for your sound engineers during live Events at your opera house?
2. If the listening position isn't optimal (not in the auditorium on a sweetspot), have you ever tried to optimize it and if yes how?
3. Have you already experiment with 3D/ spatial/ binaural audio techniques at your opera house?

Answers:

1. "We have a closed booth at the bottom of the 1st balcony, the large window can be opened during rehearsals"
2. "We have a small remote control system of the desk that we use in the auditorium for precise adjustments. When a total amplification of the show is required (rarely), the desk is located in the hall, blocking 2 rows of seats."
3. "Never"

02.01.22 – Josh Marks, Leitung Ton – The Metropolitan Oper New York (LinkedIn)

Questions:

1. How is the listening position for your audio engineer during live events?
2. If your listening position isn't optimal, have you ever tried to optimize it and if yes how?
3. Have you ever experiment with 3D audio/ binaural technology in your Opera House?

Answers:

1. “We don’t have a proper FOH position. On occasion we will create a mix position in a box seat with an actual mixing desk. This is our best option but there isn’t much interest in creating a permanent mixing position by anyone other than the sound department. Other times we use an iPad remote to control our console which is backstage. The operator will sit in a seat in the orchestra level. Finally, we may run sound effects from our backstage control room.”
2. “see previous answer”
3. “We have yet to try any 3d/ binaural technology. We definitely have interest in this and may be the best option since the opera house resists the idea of a permanent FOH position. Of course we would need a dedicated audio room for this.”

Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz.

Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden. Falls sich die Wertung von den beiden Hörpositionen unterscheidet, bitte bei den Anmerkungen vermerken,

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

MAN HÖRT ZU VIEL LAUTSTÄRKE MÜSSTE
IN ENTFERNUNG ANNEHMEN (AMBIENTE)

2. Ist die empfundene Lautstärke für die Hörpositionen realistisch?

Zu leise zu laut

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

Zu wenig zu viel

ZU VIEL AMBIENCE STÖRT DEN FOKUS

4. Empfindest du den Raumklang als Abbild des Opernsaals realistisch?

unrealistisch realistisch

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

HP	FOKUS	RAUM	VOLUME
1	42	-22	-10
2	31	-22	-10

Wünsche an ein solches Abhörsystem:

LÄUTUNG SOCL ~ 0 SEIN

Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz.

Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden. Falls sich die Wertung von den beiden Hörpositionen unterscheidet, bitte bei den Anmerkungen vermerken,

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

• Latenzen zwischen den Mits hörbar • räumliche Auflösung unnatürlich
• Position 1 viel zu breit + Mittenloch (150%)

2. Ist die empfundene Lautstärke für die Hörpositionen realistisch?

Zu leise zu laut

→ Referenz Orchester! Bühne im Verhältnis zu
leise.

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

Zu wenig zu viel

Bühne deutlich zu diffus

4. Empfindest du den Raumklang als Abbild des Opernsaals realistisch?

unrealistisch realistisch

s. Punkt 1, zu groß / zu breit, Auflösung unnatürlich

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Höregebnis führen:

HP	FOKUS	RAUM	VOLUME
1	+50	-30	-19
2	+40	-10	-15

Wünsche an ein solches Abhörsystem:

Latenzfreie realistische Abbildung der Klangsituation im Raum, insbesondere die Balance zwischen Bühne, Orchester und den verschiedenen Lautsprecherwegen.
Anmerkung: Deutliches Echo auf Bühnen und v.a. Lautsprechersignal auf Pos. 2

Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz.

Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden. Falls sich die Wertung von den beiden Hörpositionen unterscheidet, bitte bei den Anmerkungen vermerken,

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

*Frequenzverlauf suboptimal
siehe Anm.*

2. Ist die empfundene Lautstärke für die Hörpositionen realistisch?

Zu leise zu laut

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

Zu wenig zu viel

4. Empfindest du den Raumklang als Abbild des Opernsaals realistisch?

unrealistisch realistisch

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

circa

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

HP	FOKUS	RAUM	VOLUME
1	-10	0	-18
2	-4	-	-16/-17

Wünsche an ein solches Abhörssystem:

Annahme
 Tiefe Bässe zu viel
 Obere Mitten / Höhen zu wenig

Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz.

Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden. Falls sich die Wertung von den beiden Hörpositionen unterscheidet, bitte bei den Anmerkungen vermerken,

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

2. Ist die empfundene Lautstärke für die Hörpositionen realistisch?

Zu leise zu laut

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

Zu wenig zu viel

4. Empfindest du den Raumklang als Abbild des Opernsaals realistisch?

unrealistisch realistisch

nur der Laufzeitunterschied zwischen den Mikros
stört ein wenig

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

HP	FOKUS	RAUM	VOLUME
1	Preset	Preset	Preset
2	32	19	-12

Wünsche an ein solches Abhörssystem:

Keine Latenz
Geschlossene Kopfhörer (elicht)

2. Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz. Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden.

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

2. Welches der drei Beispiele klingt für dich am Natürlichsten?

1 2 3

2 und 3 klingen sehr mutig/nasal

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

zu wenig zu viel

v.a. im großen Tutti-Stellen verschwimmt alles

4. Verwendest du bei diesem Hörversuch den Headtracker?

Ja

Nein

wenn ja, verbessert sich das Hörerlebnis?

Wenn nein, wieso nicht?

Ja

Nein

- deutliche Verschlechterung
der Klangqualität

- Tracking ist irritierend

- Nachwort nicht erkennbar

5. Welches der Hörmöglichkeiten entspricht für dich am ehesten der Sitzposition am Balkon?

- 1 2 3 4

6. Wie empfindest du die aktuelle Klangabbildung im Vergleich zum ersten Hörversuch?

- schlechter gleich besser viel besser

warum? aber nicht gut, Balancen und Klangfarbe sind nach wie vor sehr schwer abschätzbar

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

FOKUS	RAUM	VOLUME
+ 12	- 15	- 1

Wünsche an ein solches Abhörsystem und weitere Anmerkungen:

- Deutliche Verbesserung zum ersten Hörversuch
- Beurteilung der Klangergebnisse rein auf Grund des Systems aber kaum möglich. (Lautstärke, EQs, Ds)
- Grundsätzliche Vorstellung des Klangbildes im Zuhörerraum aber möglich.

2. Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz. Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden.

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

2. Welches der drei Beispiele klingt für dich am Natürlichsten?

1 2 3

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

zu wenig zu viel

4. Verwendest du bei diesem Hörversuch den Headtracker?

Ja Nein

wenn ja, verbessert sich das Hörerlebnis?

Ja Nein

Wenn nein, wieso nicht?

VERWIRRT MICH

5. Welches der Hörmöglichkeiten entspricht für dich am ehesten der Sitzposition am Balkon?

1

2

3

4

6. Wie empfindest du die aktuelle Klangabbildung im Vergleich zum ersten Hörversuch?

schlechter

gleich

besser

viel besser

warum? AUS GEWO GENEH

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

FOKUS	RAUM	VOLUME
3,038	-6	-6

Wünsche an ein solches Abhörsystem und weitere Anmerkungen:

2. Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz. Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden.

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

2. Welches der drei Beispiele klingt für dich am Natürlichsten?

1 2 3

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

zu wenig zu viel

4. Verwendest du bei diesem Hörversuch den Headtracker?

Ja

wenn ja, verbessert sich das Hörerlebnis?

Ja

Nein

Nein

Wenn nein, wieso nicht?

5. Welches der Hörmöglichkeiten entspricht für dich am ehesten der Sitzposition am Balkon?

1

2

3

4

6. Wie empfindest du die aktuelle Klangabbildung im Vergleich zum ersten Hörversuch?

schlechter

gleich

besser

viel besser

warum? _____

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

FOKUS	RAUM	VOLUME
- 1	- 10	- 7

Wünsche an ein solches Abhörsystem und weitere Anmerkungen:

2. Hörversuch an der Oper Graz

Dies ist ein subjektiver Hörversuch, der die Plausibilität der klanglichen Raumnachbildung des Opernsaals in Graz überprüfen soll. Durchgeführt wird dieser Hörversuch mit den Tonleuten der Oper Graz. Bitte pro Frage jeweils nur ein Kreuz setzen, Anmerkungen können auf die Zeilen geschrieben werden.

1. Wie bewertest du den Klang?

künstlich natürlich

2. Welches der drei Beispiele klingt für dich am Natürlichsten?

1 2 3

3. Wie ist der Fokus auf die Bühne?

zu wenig zu viel

4. Verwendest du bei diesem Hörversuch den Headtracker?

Ja Nein

wenn ja, verbessert sich das Hörerlebnis?

Ja Nein

Wenn nein, wieso nicht?

finde ich eher
irritierend

5. Welches der Hörmöglichkeiten entspricht für dich am ehesten der Sitzposition am Balkon?

1

2

3

4

6. Wie empfindest du die aktuelle Klangabbildung im Vergleich zum ersten Hörversuch?

schlechter

gleich

besser

viel besser

warum? keine ideale nicht beurteilen

Du kannst die folgenden Parameter nun verändern. Sobald du zu einem zufriedenstellenden Ergebnis gekommen bist, kannst du die Parameter unten eintragen.

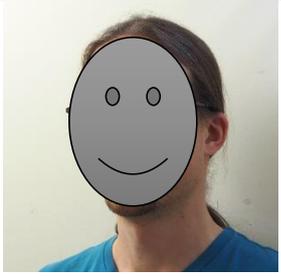
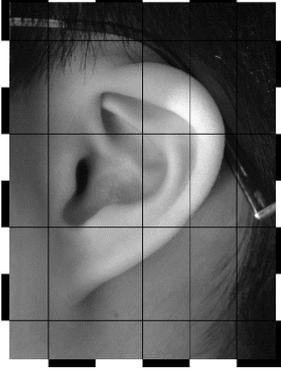
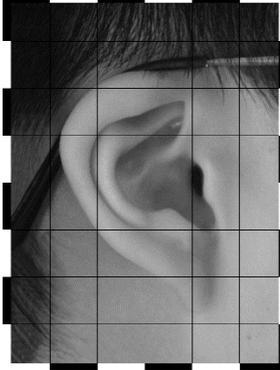
Änderungen der gegebenen Parameter, die zu einem besseren Hörergebnis führen:

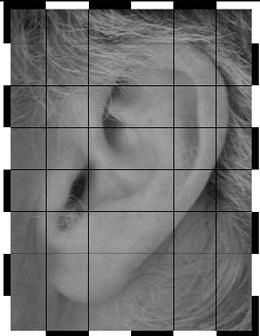
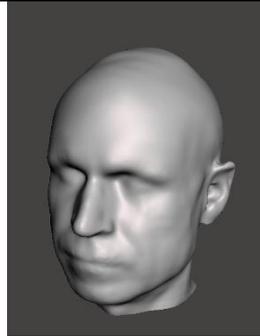
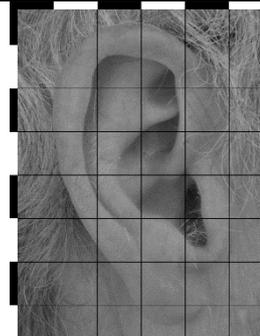
FOKUS	RAUM	VOLUME
12	-14	+6,5

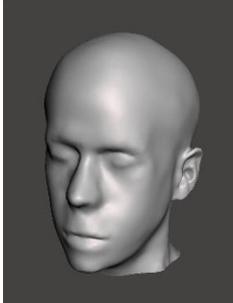
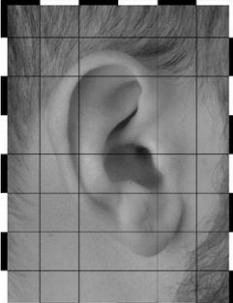
Wünsche an ein solches Abhörssystem und weitere Anmerkungen:

Geschlossene Kopfhörer (vielleicht Noise cancelling)

Anpassungen der Binauralen Dekodierung durch Ohrvergleich für individuellere HRTF

	LINKES OHR	KOPF	RECHTES OHR
ORIGINAL PROBAND			
SADIE H10			
TU BERLIN pp77			

	LINKES OHR	KOPF	RECHTES OHR
ORIGINAL PROBAND			
SADIE H17			
TU BERLIN pp62			

	LINKES OHR	KOPF	RECHTES OHR
ORIGINAL PROBAND			
SADIE H5			
TU BERLIN pp8			