

Abbildungsverzerrungen bei der ambisonischen Wiedergabe von Eigenmikeaufnahmen.

Darstellung anhand einer 3D Audio- und Videoinstallation.

Bachelorarbeit aus Aufnahmetechnik 1, SE

Kajetan Simon Enge

Betreuung: Dr. Alois Sontacchi

Graz, 30. Juli 2015



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein praxisbezogener Blick auf Abbildungsverzerrungen geworfen, die bei der Übersetzung von Eigenmikeaufnahmen in semiperiphere Wiedergabeeinrichtungen für Ambisonics entstehen. Die Problemstellung wird einerseits empirisch bearbeitet und andererseits anhand einer 3D Audio- und Videoinstallation im CUBE hörbar gemacht. Es werden drei Lösungsansätze präsentiert, die es Anwendern und Anwenderinnen ermöglichen, den systematisch entstehenden Abbildungsverzerrungen entgegenzuwirken.

Danksagung:

Für unermüdliches Engagement und die Bereitschaft sogar nachts, am Wochenende oder per Telefon wichtige Hilfestellungen zu liefern, danke ich Alois Sontacchi ganz herzlich. Auch Stefan Warum, Matthias Frank und Franz Zotter muss für ihre Geduld und ihre Hilfsbereitschaft gedankt werden.

Den lieben Kolleginnen und Kollegen, zu denen sich einige schöne Freundschaften entwickelt haben, will ich besonders danken. Nicht nur für nächtelange gemeinsame Lernsessions im Lernzentrum, sondern auch für konstruktive wie sinnfreie Gespräche abseits der Universität.

Mit Marita, Niki und Oskar habe ich einen mehr als anstrengenden Drehtag im Wald verbracht. Danke Euch für das Durchhaltevermögen und die Motivation, die Ihr drei trotz erschwelter Verhältnisse an den Tag gelegt habt. Danke Marita und Niki für Eure schöne Musik und danke Oskar für die fruchtbare Zusammenarbeit.

In diesem Sinn gilt auch Helmut Fladenhofer ein Dank, der sich viel Zeit genommen hat, mit mir durch Stainzer Wälder zu spazieren, um einen geeigneten Schauplatz für mein Projekt zu finden. Danke!

Ein Dank gilt auch Günter Meinhardt, der mir freundlicherweise Zugang zu einem tollen Vibraphon ermöglicht hat, und der immer einen Rat für mich hat, wenn die Hände und Füße mal wieder nicht so wollen wie ich.

Natürlich muss auch meiner Familie gegenüber ein Dank ausgesprochen werden. Ohne Euch hätte ich wohl nie ein Interesse an der spannenden Schnittstelle zwischen Kunst und Technik entwickelt, und das will ich mir gar nicht vorstellen.

Vielen Dank an meine Großmutter, der ich diese Arbeit nicht nur ein Mal zur Korrekturlesung schicken durfte.

Einen ganz besonderen Dank will ich meinem Vater aussprechen, der in den letzten vier Monaten immer mit Rat und viel Tat an meiner Seite stand und mich nicht selten aus schwierigen Situationen gerettet hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Die Installation	7
2.1	Die Lautsprecheranordnung	7
2.2	Inhalt	7
2.3	Planung	9
3	Ambisonics	11
3.1	Das Koordinatensystem	11
3.2	Eine Einführung in Ambisonics	12
3.3	Die Kugelflächenfunktionen Spherical Harmonics	13
3.3.1	Der φ -Anteil Der r-Anteil	15
3.3.2	Der ϑ -Anteil Die legendresche Differentialgleichung	15
3.4	Ambisonics Einkodierung	16
4	Die Kronlachner Plug-Ins und deren Anwendung in dieser Arbeit	17
4.1	Anwendung	17
4.2	Ambix Rotator	17
4.3	Ambix Warp	17
4.4	Ambix Encoder	18
5	Die Resynthese eines Schallfeldes im CUBE bzw. in einer semiperiphonen Lautsprecheranordnung	20
5.1	Das Eigenmike in der Anwendung	20
5.2	Der Energievektor Die Richtungsabbildung	20
5.3	Grafische Darstellung der Abbildungsfehler	21
5.4	Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Abbildungsrichtung	25
5.4.1	Erste Möglichkeit: Ausrichtung des Eigenmikes	25

<i>Kajetan Simon Enge: Ambisonics Installation</i>	5
5.4.2 Zweite Möglichkeit: Warping Funktion	25
5.4.3 Dritte Möglichkeit: Ausgleich durch Addition eines zusätzlichen Signals	26
6 Conclusio Ausblick	26
Abbildungsverzeichnis	27
Literaturverzeichnis	27



Abbildung 1 – Das Eigenmike der Firma mh acoustics, mit Sitz in San Francisco, hat 32 Mikrofonskapseln an der Kugeloberfläche und kann Ambisonicsignale bis zu vierter Ordnung aufzeichnen. Foto: <http://www.mhacoustics.com>

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird im Sinne der interdisziplinären Ausbildung an der Technischen Universität Graz und an der Kunstuniversität Graz eine Schnittstelle zwischen Kunst und Technik betrachtet. Am Institut für Elektronische Musik und Akustik (IEM) soll eine dreidimensionale Audio- und Videoinstallation für Ambisonics entstehen. Diese Installation wird am Institut im CUBE¹ aufgebaut. Die dabei verwendeten Audio-signale werden mit dem Eigenmike aufgezeichnet. Das Eigenmike ist in Abbildung 1 zu sehen. Bei der Wiedergabe dieser Aufzeichnungen ergeben sich Schwierigkeiten aufgrund von physikalischen Rahmenbedingungen im Wiedergaberaum. So sind der Großteil der Lautsprecheranordnungen, in denen mit Ambisonics gearbeitet werden kann, semiperiphere Anordnungen. Das bedeutet, es sind nicht in wirklich allen Raumrichtungen Lautsprecher vorhanden, sondern beispielsweise nur in der oberen Hemisphäre. Genau so ist auch die Lautsprecheranordnung im CUBE angelegt. Es lässt sich intuitiv erkennen, dass ein Schallfeld, aufgezeichnet mit dem vollperipheren Eigenmike, nicht ohne weitere Behandlung in einer semiperipheren Lautsprecheranordnung wiedergegeben werden kann. Die wichtigsten Schritte, um eine solche Eigenmikeaufnahme in einem Raum wie dem CUBE anhören zu können, wurden schon vom IEM gesetzt. Es wurde ein Encoder entwickelt, der eine solche Aufnahme im CUBE mit Ambisonics abhörbar macht.

Während der Vorbereitungen für die Aufnahmen der Klanginstallation hat sich eine Frage ergeben, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden soll. Nachdem Testaufnahmen mit dem Eigenmike erstellt und im CUBE abgehört wurden, ist folgendes Phänomen deutlich aufgefallen: Das Klangbild wurde nicht von der erwarteten Richtung aus, sondern nach oben verschoben abgebildet. Daher soll folgende Frage zentral beantwortet werden: Wie muss eine Person das Eigenmike bei der Aufnahme ausrichten, damit das Klangbild

1. Der CUBE ist ein Raum am IEM, welcher für die Wiedergabe von semiperipheren ambisonischen Signalen bis zu fünfter Ordnung ausgestattet ist. Das Wort CUBE steht für Computerunterstützte Beschallungsanlage.

bei der Wiedergabe im CUBE minimal verzerrt wird, beziehungsweise wie es mit Hilfe der von Matthias Kronlachner entwickelten Plug-Ins möglich ist solchen Abbildungsfehlern entgegenzuwirken. Diese wurden im Rahmen einer Masterarbeit am IEM entwickelt und werden im Folgenden einfach als Plug-Ins betitelt. [Kro14b]

In den ersten Kapiteln der Arbeit werden inhaltliche Fragen sowie der Planungsprozess der Installation geklärt. Es folgt eine kurze Einführung in Ambisonics und seine mathematischen Grundlagen. Anschließend werden die verwendeten Plug-Ins beschrieben. Das darauf folgende Kapitel stellt das Kernstück dieser Arbeit dar. Hier wird das Eigenmike in seiner Anwendbarkeit besprochen, es werden die Abbildungsfehler im CUBE berechnet, grafisch dargestellt und Lösungsvorschläge für die Anwendung gemacht.

2 Die Installation

2.1 Die Lautsprecheranordnung

Die Installation findet in einer semiperiphonen Lautsprecheranordnung statt. Diese Anordnung von Lautsprechern erzeugt ein dreidimensionales Schallfeld so, dass eine zuhörende Person sich mit geschlossenen Augen nahezu so fühlt, als wäre sie in einer anderen Umgebung. Die einzelnen Lautsprecher bilden eine Kuppel über dem Publikum. Diese Kuppel wird aus mehreren horizontal liegenden Ringen aufgebaut. Der erste Ring aus Lautsprechern hängt auf der Höhe der Ohren der zuhörenden Person. Die weiteren Ringe hängen dann über der Zuhörerschaft. Die zuhörende Gruppe sitzt in der Mitte der Lautsprecheranordnung. Vor ihr hängt eine Projektionsfläche, welche zwei Meter hoch und viereinhalb Meter breit ist. Diese Projektionsfläche ist mikroperforiert. Das bedeutet, in der Leinwand sind viele kleine Löcher, wodurch das Schallfeld von der Leinwand nur geringfügig beeinflusst wird. Diese Löcher kann das menschliche Auge aber schon nach wenigen Metern nicht mehr wahrnehmen, somit ist eine klassische Projektion problemlos möglich. Vorstellen kann man sich diese Fläche dann wie ein Fenster in die reale Umgebung. Auf ihr sieht das Publikum einen Ausschnitt des Waldes, in dem die Audio- und Videoaufnahmen stattgefunden haben. Das reproduzierte Schallfeld ist, im Gegensatz zum Bild, durch die Verarbeitung der Aufnahmen des Eigenmikes und die Wiedergabe mit einem Ambisonicsystem, vollständig.

2.2 Inhalt

Zunächst hören die Teilnehmenden klassische Waldgeräusche wie das Zwitschern von Vögeln. Die zuhörenden Personen sollen zunächst die Möglichkeit bekommen, sich an die akustische Umgebung zu gewöhnen. Man hört jemanden ein Musikstück auf einer Blockflöte spielen. Der Klang bewegt sich anschließend um die Zuhörenden herum, und man erkennt eine junge Frau als Interpretin, sobald sie ins Bild kommt. Diese Dinge sollen den Zuhörenden klar machen, in welcher Situation sie sich befinden. Sie sollen ein



Abbildung 2 – Eine 360-Grad Ansicht des CUBEs am IEM. Foto: © 2004, Alexandre Castonguay



Abbildung 3 – Das Motiv, nach dem in der Planungsphase gesucht wird.

Gefühl für den simulierten Raum bekommen.

Im nächsten Abschnitt hört man außerhalb des Bildes die Geräusche von Arbeitern, die einen Baum umsägen. Die Teilnehmenden sollen denken dieser Baum wird wirklich umgeschnitten, tatsächlich wurde er aber im Nachhinein mit Hilfe der Plug-Ins eingefügt.

Es passieren immer mehr Dinge, die die Teilnehmenden nur hören und nicht sehen. Diese Vorkommnisse stellen eine „Industrialisierung“ des Waldes dar. Während man nach wie vor die wunderschöne Waldlandschaft vor sich sieht, hört man Baustellenlärm, Autobahnen, Züge und Flugzeuge. Es baut sich langsam eine akustische Großstadt um die zuhörenden Personen auf. All diese Geräusche werden mit den Plug-Ins in die Szene eingefügt.

Gegen Ende wird der Lärm von einem Vibraphonsolo unterbrochen, das wieder im Wald stattfindet. So hat die Musik es geschafft die Schönheit der unberührten Natur zurück in den Fokus zu holen.



Abbildung 4 – Marita Gehrer während der Aufnahmen.

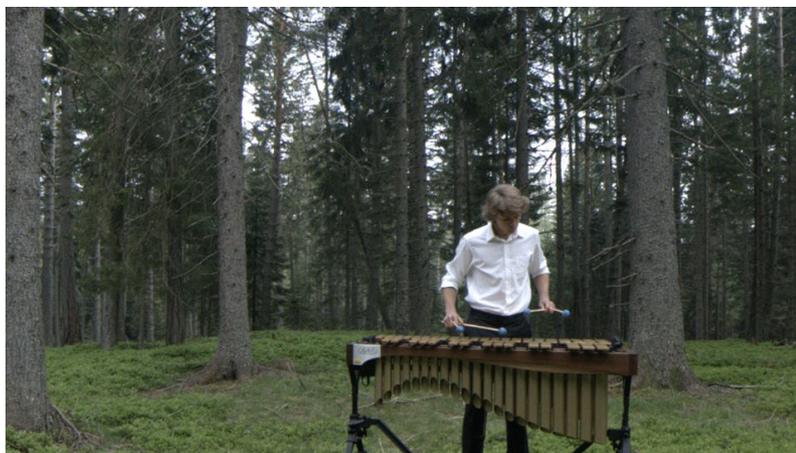


Abbildung 5 – Nikolaus Gehrer während der Aufnahmen.

2.3 Planung

Die seitliche Ansicht der Installation ist in Abbildung 6 dargestellt. Links erkennt man die mikroperforierte Leinwand, auf die von rechts oben projiziert wird. Unterhalb des Projektionskegels befindet sich das Publikum. Die Leinwand - aus der Sicht des Publikums - ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Grundriss des CUBEs ist in Abbildung 8 erkennbar. Diese Skizzen wurden mit Hilfe eigener Messungen und jenen aus einem Messbericht [Zot08] angefertigt. Des Weiteren wurde der Grundriss in Abbildung 8 inklusive der Lautsprecherpositionen aus dem Bericht übernommen.

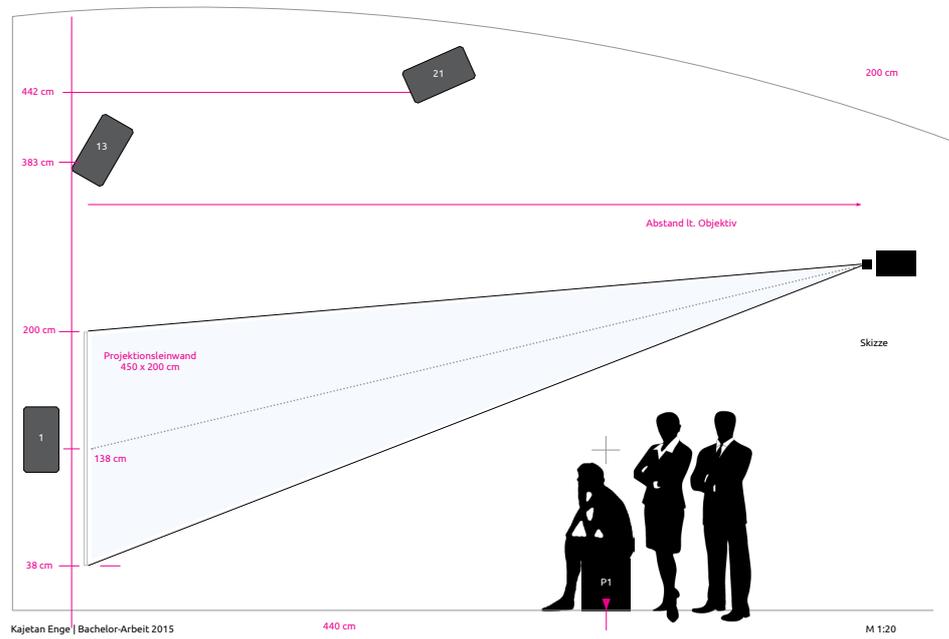


Abbildung 6 – Die Seitenansicht der Installation im CUBE.

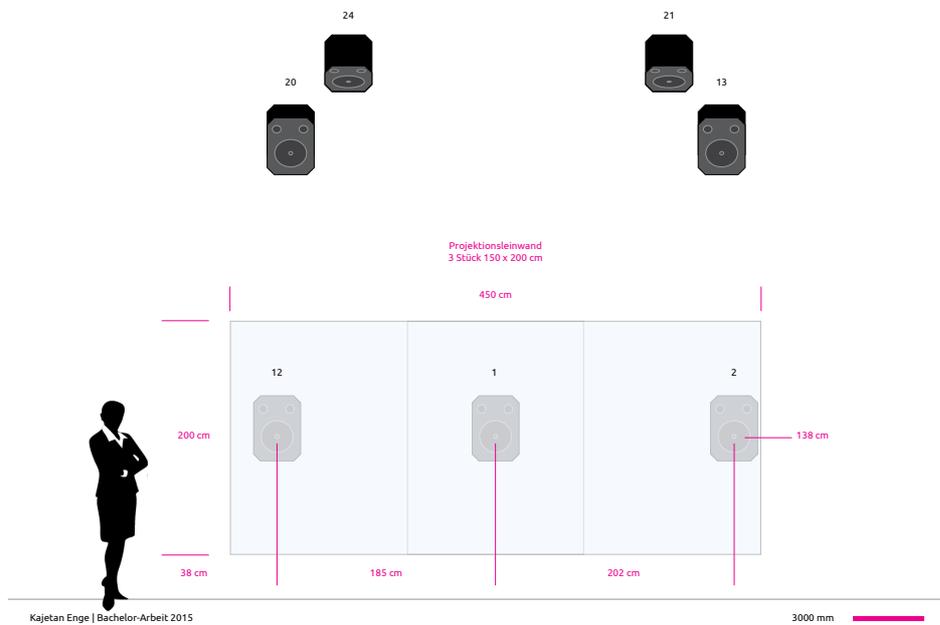


Abbildung 7 – Die Leinwand aus der Sicht der Zuhörerschaft.

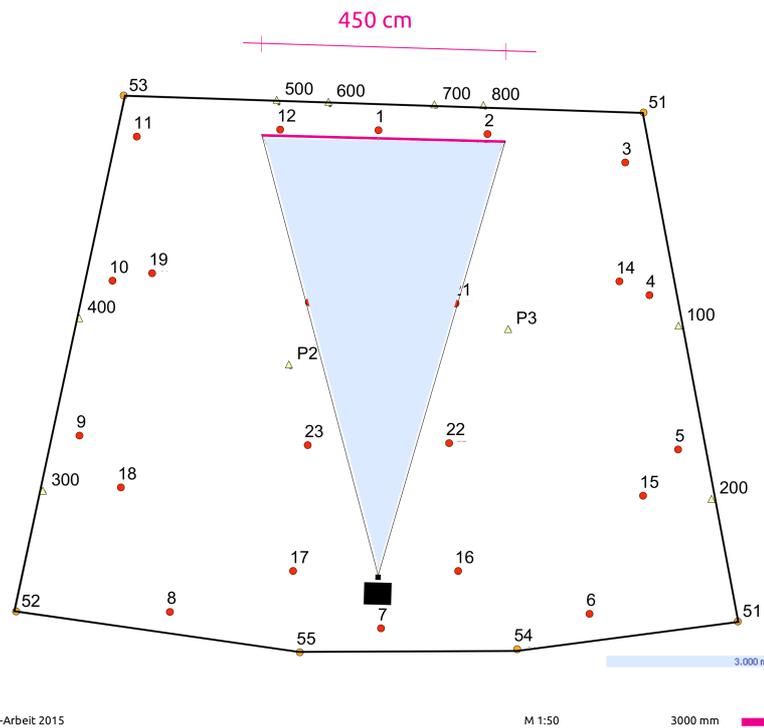


Abbildung 8 – Der Grundriss des CUBEs inkl. der Lautsprecherpositionen.

3 Ambisonics

3.1 Das Koordinatensystem

Das Koordinatensystem wird entsprechend [Kro14b, Figure 1.] auch hier wie in Abbildung 9 gewählt.

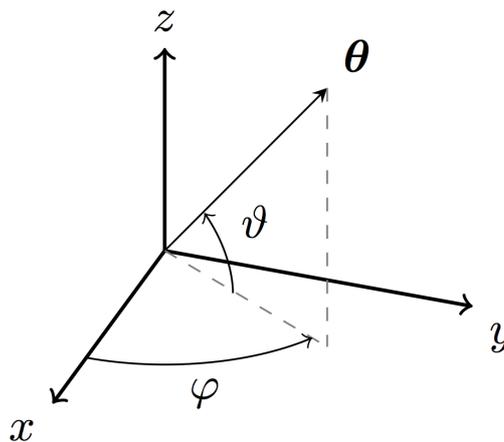


Abbildung 9 – Das Koordinatensystem für die nächsten Kapitel.

3.2 Eine Einführung in Ambisonics

Bei ambisonischen Systemen handelt es sich um ein Verfahren dreidimensionale Schallfelder aufzuzeichnen und zu reproduzieren. Die Aufzeichnungen können dabei mit sogenannten Mikrofon-Arrays erfolgen. Solche Mikrofon-Arrays sind zum Beispiel das SoundField SPS200 Mikrofon¹ oder das Eigenmike. Bei der Wiedergabe solcher Ambisonicsignale wird die Rauminformation gemeinsam mit dem Klang in den Kanälen einkodiert. Zum Zeitpunkt der Einkodierung ist es nicht notwendig die Anzahl der Lautsprecher zu kennen, die im Weiteren dazu verwendet werden das Schallfeld zu reproduzieren. Die Genauigkeit der räumlichen Abbildung ist dabei unter anderem von der Ambisonics-Ordnung abhängig, die das vorhandene Wiedergabesetup erzeugen kann. Für höhere ambisonische Ordnungen sind auch mehr Lautsprecher notwendig, um die höhere Anzahl an Ambisonics-Kanälen abzudecken. Für eine eindeutige Lösbarkeit werden gleich viele Lautsprecher wie Kanäle benötigt. Handelt es sich dabei um eine dreidimensionale Wiedergabe, so müssen mindestens $(n + 1)^2$ Kanäle beziehungsweise Lautsprecher verwendet werden. Dabei bezeichnet der Buchstabe n die Ordnung des ambisonischen Systems. Wird in diese Formel für die Ordnung $n = 0$ eingesetzt, ergibt sich eine notwendige Kanalanzahl von Eins. Hierbei ist erkennbar, dass es sich bei ambisonischer Wiedergabe nullter Ordnung um Monosignale handelt. Erst wenn diese Monosignale von allen Lautsprechern gleichzeitig abgespielt werden, wird der Schalldruck im Zentrum der Wiedergabeeinrichtung richtig rekonstruiert. [Bam95, Neu07]

Das ambisonische Modell basiert auf einem Vergleich zwischen einer Referenzschallwelle und einer resynthetisierten Schallwelle. Die Referenzschallwelle entspricht in diesem Zusammenhang jeder Welle, die auf ein ambisonisches Mikrofon trifft. Eine resynthetisierte Welle entsteht bei der Wiedergabe über Lautsprecher. Für die Modellierung dieser beiden Wellenarten werden folgende Vereinfachungen getroffen: Beide Formen von Schallwellen werden als ebene Wellen angesehen. Die Überlagerung der beiden ergibt im Zentrum der Wiedergabeeinrichtung ein resynthetisiertes (dreidimensionales) Schallfeld. Die Vereinfachung bezüglich ebener Wellenausbreitung gilt nur dann, wenn eine Schallquelle und ihr Empfänger ausreichend räumliche Entfernung zueinander aufweisen [Bam95]. Markus Noistering et al. beschreiben die Thematik hier wie folgt [NSMH03, Seite 1, Kapitel 1.1]:

„The Kirchhoff-Helmholtz integral relates the pressure inside a source free volume of space to the pressure and velocity on the boundary at the surface. Therefore, it is possible to reproduce the original sound field by an infinite number of loudspeakers arranged on a closed contour. The loudspeaker signals are assumed to be plane waves. By using a finite number of loudspeakers arranged on a sphere, a good approximation of the original sound field may be synthesized over a finite area (sweet spot). A lower limit of the number of needed loudspeakers is given by the number of transmit channels which is defined by the ambisonic order. Consequently, it can be shown that higher order ambisonic systems are increasingly accurate.“

1. Das SoundField SPS200 Mikrofon wird von der Firma SoundField (<http://www.soundfield.com>) produziert und kann mit vier Mikrofonkapseln Ambisonicsignale erster Ordnung aufzeichnen.

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass für die Reproduktion eines dreidimensionalen Schallfeldes mindestens vier Lautsprecher vorhanden sein müssen. In den Anfängen von Ambisonics standen für die vier Audiokanäle dabei die vier Buchstaben W , X , Y und Z . Dabei sind die Kanäle X und Y für jene Klänge verantwortlich, die sich in der horizontalen Ebene abspielen. Der Kanal Z übernimmt die Höheninformation. Diese Höheninformation kann übrigens auch negativ sein, wodurch der Schall von unten kommen müsste.

Der Kanal W entspricht Ambisonics nullter Ordnung und ist omnidirektional. Mit ihm wird die Schalldruckinformation aus allen Richtungen übermittelt. Die Kanäle X , Y und Z hingegen sind richtungsabhängig und entsprechen jeweils der Aufnahmecharakteristik einer „Acht“. Mittels dieser Kanäle werden Schallschnelleinformationen übertragen. [Fur90]

3.3 Die Kugelflächenfunktionen | Spherical Harmonics

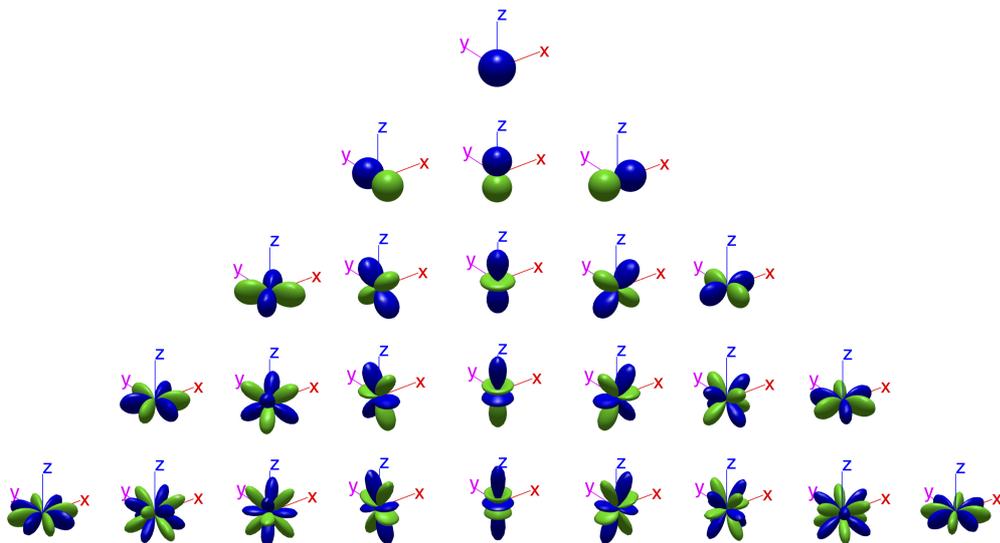


Abbildung 10 – Die Kugelflächenfunktionen bis zur 4. Ordnung entsprechen den ersten 25 Schwingungsmodi einer Kugel. Foto: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/screenshots/24365/original.jpg>

Als Einstieg in das Feld der Kugelflächenfunktionen - engl.: spherical harmonics - soll die knappe Erläuterung von Sebastian Braun et al. dienen [BF11, Seite 1, Kapitel: Ambisonics]:

„Ambisonics is a 3D recording and reproduction method which is based on the representation of the sound field as a superposition of orthogonal basis functions. These basis functions are the solutions of the Helmholtz-equation (lossless, linear wave equation in the frequency domain) in the spherical coordinate system and they are called spherical harmonics.“

Der erste Satz des Zitates erinnert an die Art und Weise, nach der auch klassische Schwingungen mittels der Fourieranalyse untersucht werden. Dort wird eine Schwingung in ihre Bestandteile aus harmonischen Schwingungen zerlegt, indem sie mit einem grundlegenden Vokabular aus eben diesen verglichen wird. Die harmonischen Schwingungen sind dabei die sogenannten Basisfunktionen.

Äquivalent dazu funktioniert auch die Herangehensweise bei Ambisonics. Hier wird entlang einer Kugeloberfläche der Schalldruck eines Schallfeldes mit Hilfe der Kugelflächenfunktionen abgetastet, wobei sichergestellt wird, dass sich keine Schallquellen im Kugelinneren befinden. Aus der Druckverteilung an der Kugeloberfläche resultiert die Information, aus welchen Richtungen Schallereignisse im Kugelinneren eintreffen. Die Kugelflächenfunktionen sind hierbei die entsprechenden Basisfunktionen. Die räumliche Abtastung der Schalldruckverteilung an der Kugeloberfläche entspricht einem Skalarprodukt mit den jeweiligen Basisfunktionen. Für eine diskrete Schallereignisrichtung werden jene Basisfunktionen dominieren, deren räumliche Ausrichtung bestmöglich übereinstimmen.

Aus den Berechnungen der Skalarprodukte bekommt man direkt die Koeffizienten des Winkelspektrums. Dieses gibt weiters an, wie stark eine Kugelflächenfunktion gewichtet werden muss, sodass die Addition aller wieder den ursprünglichen Schalldruck ergibt. Demnach entspricht in der nachfolgenden Gleichung der Ausdruck $\psi_n^m(kr)$ dem Winkelspektrum, der Ausdruck $Y_n^m(\Theta)$ den Kugelflächenfunktionen und $p(kR, \Theta)$ dem Schalldruck.

$$p(kR, \Theta) = \psi_n^m(kR) Y_n^m(\Theta) \quad (1)$$

Die Kugelflächenfunktionen sind die Lösungen der Helmholtzgleichung. Bei der Helmholtzgleichung handelt es sich um die Wellengleichung für harmonische Schwingungen. Die allgemeine Wellengleichung für den Schalldruck lautet:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \cdot \Delta p \quad (2)$$

Hierbei steht c für die Schallgeschwindigkeit, p für den Schalldruck, Δ ist der Laplace Operator und $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ ist die zweite Ableitung nach der Zeit. Die zweite Ableitung des Schalldruckes nach der Zeit entspricht also der Schallgeschwindigkeit multipliziert mit den zweiten partiellen Ableitungen nach den Raumrichtungen.

Des Weiteren gilt für harmonische Schwingungen folgender Zusammenhang:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -w^2 \quad \text{weil:} \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} \cdot e^{jwt} = jw \cdot jw \cdot e^{jwt} = -w^2 \cdot e^{jwt} \quad (3)$$

Demnach lässt sich die Wellengleichung zur Helmholtzgleichung umformen, wenn k für die Wellenzahl, also $\frac{w}{c} = \frac{2\pi f}{c}$ steht:

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad \text{bzw.:} \quad (\Delta + k^2)p = 0 \quad (4)$$

Stellt man die Helmholtzgleichung in Kugelkoordinaten dar, so erhält man folgende Gleichung:

$$\left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial}{\partial \vartheta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + k^2 \right] p = 0 \quad (5)$$

Bei der Lösung dieser partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung erhält man durch den Produktansatz einen Radiusanteil r , einen Elevationswinkelanteil ϑ und einen Azimutwinkelanteil φ . Die Anteile von r und φ ergeben herkömmliche Lösungen, der Anteil von ϑ allerdings ergibt eine legendresche Differentialgleichung. Fasst man die beiden Lösungen für die Winkelanteile φ und ϑ durch Multiplikation zusammen, ergeben sich die sphärischen Harmonischen.

3.3.1 Der φ -Anteil | Der r -Anteil

Nachdem die beiden Winkelanteile mittels Produktansatz separiert wurden, ergibt sich für den φ -Anteil folgende Gleichung, wobei die Funktion $\Phi(\varphi)$ zur Berechnung verwendet wird:

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} = -m^2 \quad (6)$$

Multipliziert man die Funktion Φ nun auf die rechte Seite, so erhält man:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} = -m^2 \cdot \Phi \quad (7)$$

Die Lösung ergibt sich für Φ in Form einer harmonischen Schwingung:

$$\Phi_m = e^{im\varphi} \quad (8)$$

Die Rechenschritte sind hier analog zu jenen für die Berechnung der Helmholtzgleichung. Bei der Lösung des Radiusanteils ergibt sich eine sphärische Bessel'sche Differentialgleichung. Die Lösungen sind die sphärischen Besselfunktionen 1. und 2. Art. Detaillierte Erklärungen hierzu finden sich in den „Lecture Notes“ zur Vorlesung „Acoustic Holography and Holography“ von Franz Zotter. [Zot11]

3.3.2 Der ϑ -Anteil | Die legendresche Differentialgleichung

Bei der Lösung des ϑ -Anteils ergibt sich eine spezielle Form einer Differentialgleichung, die legendresche Differentialgleichung. Der Lösungsweg dieser Differentialgleichung ist deutlich komplizierter und soll hier nicht angeführt werden. Die Lösung der Gleichung ergibt sogenannte Legendre-Polynome. Werden diese Lösungen dann noch mit dem Anteil aus der Φ -Berechnung multipliziert, so ergeben sich die sphärischen Harmonischen:

$$Y_n^m(\boldsymbol{\theta}) = N_n^{|m|} \Phi_m(\varphi) \Theta_n^{|m|}(\vartheta) \quad (9)$$

$N_n^{|m|}$ steht dabei für eine Normalisierungskonstante. In der Gleichung darf der Wert $|m|$ nicht größer werden als der Wert n , weil in der Berechnung der Legendre-Polynome zwei Ableitungen vorkommen, die sonst das Ergebnis zu Null werden lassen. Dieser Zusammenhang erklärt auch die pyramidenartige Form in der Darstellung der sphärischen Harmonischen in Abbildung 10 auf Seite 13. Die Zeilen der Darstellung entsprechen dem Wert von n und die Spalten entsprechen den Werten von $2n - 1$ bzw. $|m|$. Wenn $|m|$ nun größer als n wird, so wird ein Polynom mit Grad n öfter als n mal abgeleitet und die sphärische Harmonische wird zu Null.

Näher interessierten Leserinnen und Lesern seien die Dissertation von Franz Zotter, sowie seine zuvor erwähnten Vorlesungsunterlagen empfohlen. [Zot09, Zot11]

Für einen groben Einblick sei ein YouTube Video von Brant Carlson empfohlen, der diese Thematik gut strukturiert, aber nur einführend erklärt¹. (Abrufdatum: 30. Juli 2015)

3.4 Ambisonics Einkodierung

Zur Erzeugung eines synthetischen dreidimensionalen Schallfeldes mit Ambisonics müssen die Kanäle zunächst entsprechend kodiert werden. [Zm02] Diese Kodierung erfolgt, indem ein Monosignal mit den sphärischen Harmonischen multipliziert wird. So werden dem Monosignal eine gewünschte Richtung und eine gewünschte Verstärkung aufgelegt. Will man nun ein Signal einkodieren, so gibt es vorhandene Funktionen, mit denen es multipliziert werden muss. Diese Funktionen errechnen sich durch das Einsetzen von steigenden n - und m - Werten in die sphärischen Harmonischen.

Repräsentativ sollen hier die ersten vier resultierenden Funktionen angeführt werden. Würde man ein Monosignal mit diesen Funktionen multiplizieren, so würde man Ambisonics erster Ordnung erhalten.

Ambisonics Kanal	Einkodierungsfunktion
W	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
X	$\cos \varphi \cos \vartheta$
Y	$\sin \varphi \cos \vartheta$
Z	$\sin \vartheta$

Tabelle 1 – Die ersten vier Ambisonics Kanäle und deren Einkodierungsfunktionen.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=bqYMUDxD3WQ>

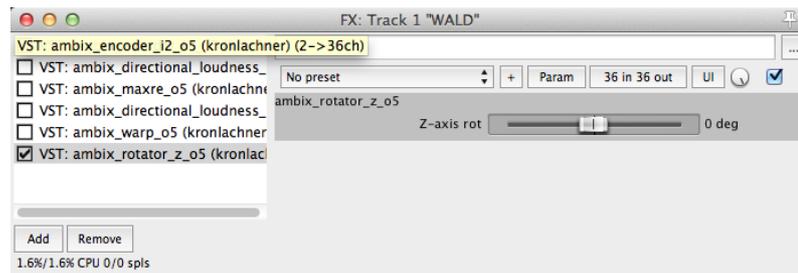


Abbildung 11 – Die Benutzeroberfläche des Plug-Ins für Rotationen um die z-Achse.

4 Die Kronlachner Plug-Ins und deren Anwendung in dieser Arbeit

4.1 Anwendung

Mit den von Matthias Kronlachner entwickelten Plug-Ins³ lässt sich ein von einer ambisonischen Anlage erzeugtes Schallfeld in verschiedenen Weisen manipulieren. Zunächst eine Auflistung der Effekte:

- ambix warp
- ambix rotator
- ambix encoder
- ambix directional loudness
- ambix mirror
- ambix widening

Aus dieser Auswahl wurden für die Installation drei Repräsentanten herausgegriffen: Rotation, Winkelverzerrung und der Encoder. Die beiden Schallfeldmanipulationen und der Encoder werden nachfolgend behandelt.

4.2 Ambix Rotator

In Abbildung 11 ist die Benutzeroberfläche des Plug-Ins zu sehen. An dem Regler lässt sich einstellen, um wie viel Grad ein Schallfeld um die z-Achse gedreht werden soll. Dieser Effekt wird für die Installation genutzt, um eine Kameradrehung auszugleichen.

4.3 Ambix Warp

In seiner Masterarbeit leitet Matthias Kronlachner das Kapitel Warming wie folgt ein [Kro14b, Seite 34]:

3. Frei erhältlich auf <http://www.matthiaskronlachner.com>

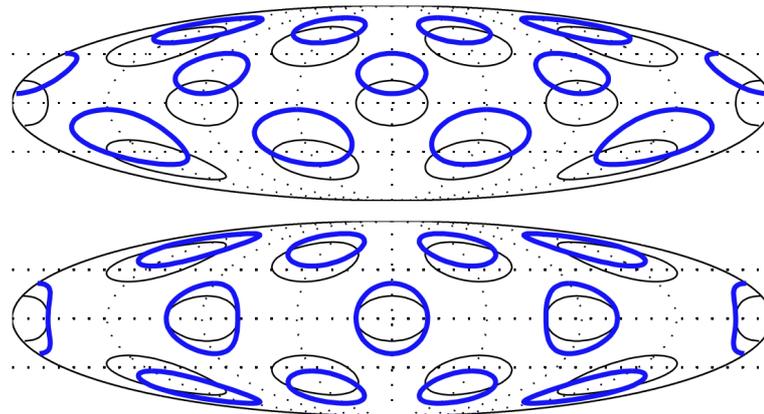


Abbildung 12 – Die Skizze zur Warpingfunktion aus Matthias Kronlachners Beitrag zur AES Convention in Berlin im April 2014. [Kro14a, Figure 4]

„Warping describes an angular transformation for extending and narrowing the sur-round image. This effect is useful in order to adjust the width of a recorded sound scene or to compensate for playback situations with reduced coverage of the sphere.“

Anhand von Abbildung 12 lassen sich die Auswirkungen der Warping Funktion gut erläutern. Eine unveränderte Quellrichtung ist in grauer Farbe dargestellt. Nachdem die Winkeltransformation durchgeführt wurde, erhält man die in blauer Farbe dargestellten Quellrichtungen. Weil eine Klangquelle durch diese Transformation eine Veränderung der Größe ihrer Abbildungsrichtung erfährt, muss berücksichtigt werden, dass sich dadurch auch die Lautstärke verändert. Quellen, die größer gemacht wurden, werden nun lauter sein als gewünscht. Quellen, die kleiner gemacht wurden, werden nun leiser sein als gewünscht. Um eine Lautstärkenänderung zu verhindern, ist in dem Plug-In eine Einstellung vorgesehen, die die veränderten Gewichte ausgleicht. Die Bedieneroberfläche dieser Warping Funktion ist in Abbildung 13 zu sehen. In der Abbildung wird ein Schallsignal um 15 Grad nach unten verschoben. Die Lautstärkenänderung wird ausgeglichen, weil der *PreEmphasis* Regler auf off steht.

4.4 Ambix Encoder

Matthias Kronlachner zu seinem Ambix Encoding Plug-In [Kro14a, Kapitel A, Encoding]:

„Ambisonic recordings can be synthesised by encoding (panning) sound sources to specific azimuth and elevation angles. Each mono or multichannel track in the DAW can be encoded in Ambisonics using ambix encoder and controlled by using the graphical user interface (Fig. 2) or built in automation features of the host.“

Die Anwendung des Ambix Encoders funktioniert wie folgt: Man sieht eine große graue

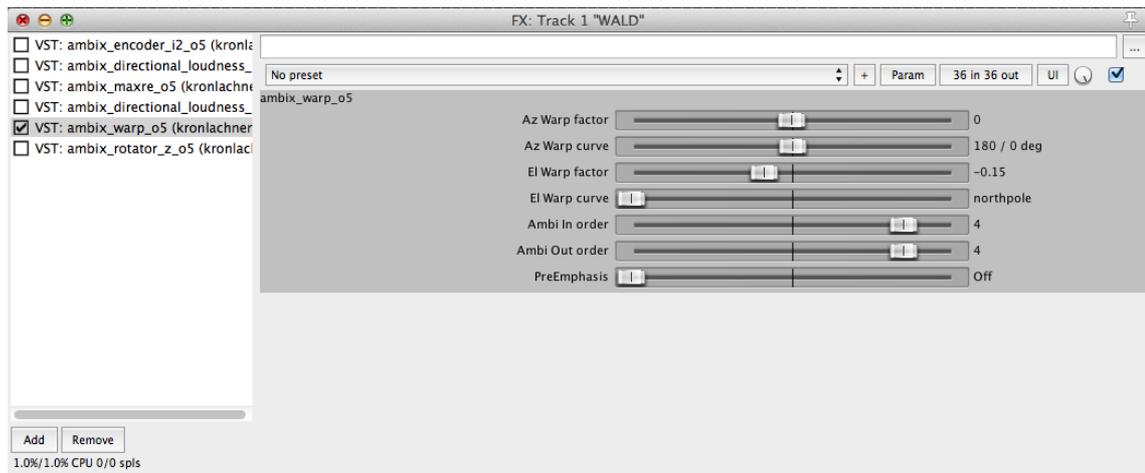


Abbildung 13 – Die Benutzeroberfläche des Warping Plug-Ins.

Kugel von oben und kann einen gelben Punkt an der Kugeloberfläche bewegen. Der gelbe Punkt repräsentiert dabei die Abbildungsrichtung. Bei mehr als einem Kanal werden mehrere gelbe Punkte sichtbar, deren Zusammenspiel dann die Richtung vorgibt, die dann als kleiner roter Punkt dargestellt wird. Außerdem ist es möglich eine konstante Drehbewegung einzustellen, indem man in den Feldern „azimuth move“ und „elevation move“ Werte ungleich Null einstellt. Die Quellbreite bei Stereo- beziehungsweise Multichannelaufnahmen lässt sich über den Regler „multiple source width“ einstellen.

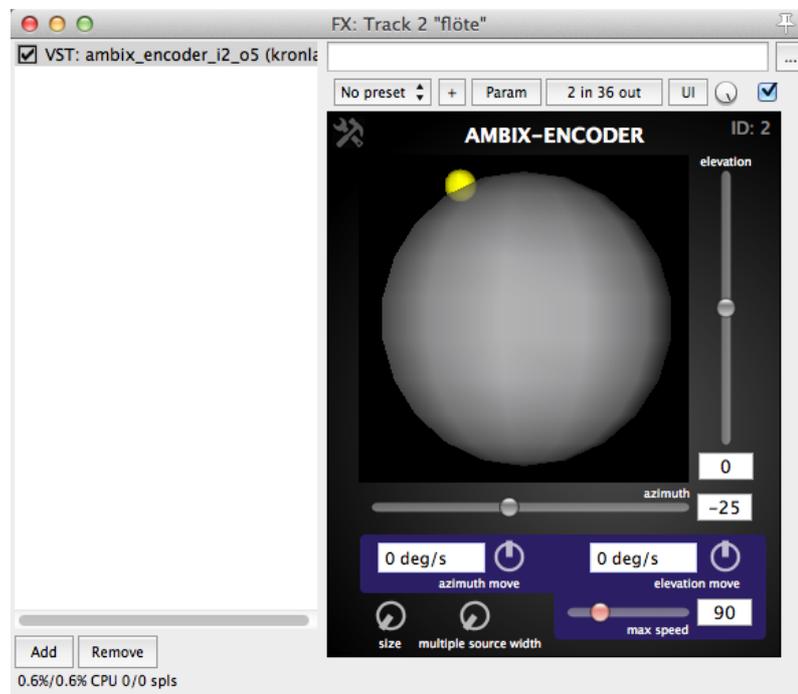


Abbildung 14 – Der Ambix-Encoder kodiert in diesem Fall ein Monosignal ein.

Zum näheren Verständnis dieser und auch noch anderer Plug-Ins sei Matthias Kronlachers Arbeit [Kro14b] direkt zu lesen.

5 Die Resynthese eines Schallfeldes im CUBE bzw. in einer semiperiphonen Lautsprecheranordnung

5.1 Das Eigenmike in der Anwendung

Das Eigenmike ist durch seine physikalische Struktur in der Anwendbarkeit begrenzt. Tiefe Frequenzen beugen sich also um das Mikrofon-Array herum und erzeugen so an allen Mikrofonkapseln den nahezu gleichen Schalldruckpegel. Nachdem Ambisonics mit eben diesen Schalldruckpegelunterschieden arbeitet, werden tiefe Frequenzen zu Problemen bei der Repräsentation führen. Der dafür am IEM entwickelte Lösungsansatz dafür entspricht folgendem Prinzip:

Die Aufnahmecharakteristiken des Eigenmikes für verschiedene Frequenzen werden bei der Wiedergabe durch nicht einheitliche ambisonische Ordnungen berücksichtigt. Tiefe Frequenzen erfahren eine räumliche Ordnungsbegrenzung entsprechend Tabelle 2. [LZ15]

Frequenz	Ambisonics-Ordnung
$150 \text{ Hz} \leq f$	0. Ordnung
$150 \text{ Hz} \leq f \leq 700 \text{ Hz}$	1. Ordnung
$700 \text{ Hz} \leq f \leq 1600 \text{ Hz}$	2. Ordnung
$1600 \text{ Hz} \leq f \leq 3700 \text{ Hz}$	3. Ordnung
$f \geq 3700 \text{ Hz}$	4. Ordnung

Tabelle 2 – Verschiedene Ordnungen für verschiedene Frequenzbereiche.

Zu sehr hohen Frequenzen hin stößt das Eigenmike wieder auf eine physikalische Grenze in seiner Anwendbarkeit: räumliches Aliasing. Dieser Effekt tritt auf, wenn der Abstand zwischen zwei Mikrofonkapseln an der Kugeloberfläche zu groß wird, um eine Frequenz korrekt abzutasten. Dabei wird die Frequenz, die auf das Mikrofon-Array trifft, nicht mehr ausreichend gut aufgelöst. Aus Berechnungen in Manuel Brandners Arbeit „Sound source localization with the Eigenmike Array - Evaluation and Analysis“ [Bra14] geht hervor, dass das Eigenmike eine untere Grenzfrequenz von rund 156 Hz und eine obere Grenzfrequenz von 5,2 kHz hat. Außerhalb dieses Frequenzbereichs sind die Eigenmikeaufnahmen also in Bezug auf die Richtungsabbildung nicht mehr aussagekräftig.

5.2 Der Energievektor | Die Richtungsabbildung

Der Energievektor nach Gerzon [Ger80] prädiziert, aus welcher Richtung der Mensch ein Schallereignis wahrnimmt und bringt damit die Psychoakustik ins Spiel. Es handelt

sich dabei um ein Modell, das Gerzon aufgestellt hat, um die wahrgenommene Richtung in einer ambisonischen Lautsprecheranordnung approximativ vorhersagen zu können. [WFZ13] Wenn g_i die Amplitudengewichte und Θ_i die räumlichen Richtungen der Lautsprecher sind, so ist der Energievektor wie folgt definiert:

$$\mathbf{r}_E = \frac{\sum_{i=1}^L g_i^2 \Theta_i}{\sum_{i=1}^L g_i^2} \quad (10)$$

Bei dieser Berechnung wird also die Summe aller quadrierten Amplitudengewichte aus einer der Lautsprecherrichtungen auf das quadrierte Gesamtgewicht bezogen.

Die Orientierung des vertikalen Winkels im Koordinatensystem wird für den nachfolgenden Teil der Arbeit umgedreht, da die Messungen der Impulsantworten mit dem Eigenmike auf diesem System aufbauen und das somit nahelegen. Wofür diese Impulsantwortmessungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, wird im Folgenden geklärt. Ab sofort kommt also der Zenitwinkel zum Einsatz, sprich: $\vartheta = 0$ Grad ist „oben“ und $\vartheta = 90$ Grad liegt in der horizontalen Ebene.

Will eine anwendende Person ihre Eigenmikeaufnahme zum Beispiel im CUBE wiedergeben, muss sie Folgendes mitberücksichtigen: Das Eigenmike nimmt das Schallfeld aus allen Richtungen auf und im CUBE sind nur in der oberen Hemisphäre Lautsprecher vorhanden. Wenn ein Schallereignis aus $\vartheta = 90$ Grad bzw. $\varphi = 0$ Grad, also genau von vorne, auf das Eigenmike trifft, so wird dieses später in der entsprechenden Richtung enkodiert. Dabei wird ein Zenitwinkel verwendet, somit entsprechen Null Grad einer Einfallrichtung von genau oben. Mit steigendem Zenitwinkel wandert die Einfallrichtung entlang der Kugeloberfläche nach unten. Ein Klang aus horizontaler Richtung kommt also von 90 Grad. Nun wird das Signal im CUBE wiedergegeben und mehrere der Lautsprecher von vorne spielen mit, um das Signal zu reproduzieren. Das Problem in dieser Reproduktion liegt in der Tatsache, dass im CUBE in der unteren Hemisphäre keine Lautsprecher angebracht sind. Die fehlenden Lautsprecher aus der idealen 3D-Anordnung verursachen eine wahrgenommene Klangbildverschiebung nach oben.

Um die später folgenden Darstellungen der Abbildungsfehler zu erstellen, wurde wie folgt vorgegangen. Am IEM waren schon Impulsantworten vorhanden, die mit dem Eigenmike aufgezeichnet wurden. Aus diesen Messungen wurden 16 vertikale Positionen in einer horizontalen Richtung extrahiert. Die 16 Zenitwinkel, unter denen das Eigenmike bei der Messung bespielt wurde, sind in Tabelle 3 angeführt.

5.3 Grafische Darstellung der Abbildungsfehler

In den nun folgenden Grafiken sind die Abbildungsfehler aufgetragen, die entstehen, wenn eine Eigenmikeaufnahme mit Hilfe der am IEM entwickelten Signalverarbeitung im CUBE wiedergegeben wird. In den Abbildungen ist auf der Abszisse jener Winkel aufgetragen, unter dem ein Schallereignis auf das Eigenmike trifft. Dieser Winkel ist entsprechend mit „Richtungsvorgabe in Grad“ beschriftet.

Auf der Ordinate der Darstellungen sind die Abbildungsfehler aufgetragen, die durch die

Lautsprecher	Zenitwinkel in Grad
1	5.6
2	16.9
3	28.1
4	39.4
5	50.6
6	61.9
7	73.1
8	84.4
9	95.6
10	106.9
11	118.1
12	129.4
13	140.6
14	151.9
15	163.1
16	174.4

Tabelle 3 – Die Zenitwinkel, die während der Vermessung des Eigenmikes verwendet wurden.

Wiedergabe im CUBE entstehen. Hierbei stellt ϑ_{Fehler} den Fehlerwinkel bezüglich der Abbildungsrichtung dar. Der Winkel $\vartheta_{Energievektor}$ entspricht der durch den Energievektor prädizierten wahrgenommenen Abbildungsrichtung und $\vartheta_{Lautsprecherposition, Messung}$ dem Winkel, unter dem das Eigenmike bei der Messung beschallt wurde.

$$\vartheta_{Fehler} = \vartheta_{Energievektor} - \vartheta_{Lautsprecherposition, Messung} \quad (11)$$

Wenn man für ϑ_{Fehler} einen positiven Wert erhält, wird die Abbildungsrichtung um diesen Wert im CUBE nach unten verschoben. Ein negativer Wert bedeutet, dass das Klangbild im CUBE nach oben verschoben wird.

Besondere Beachtung verdient der Wertebereich um 90 Grad. Hier treten die deutlich hörbaren Verschiebungen nach oben auf. Deshalb ist der Wertebereich von Null bis 100 Grad Richtungsvorgabe in Abbildung 16 noch einmal extra dargestellt.

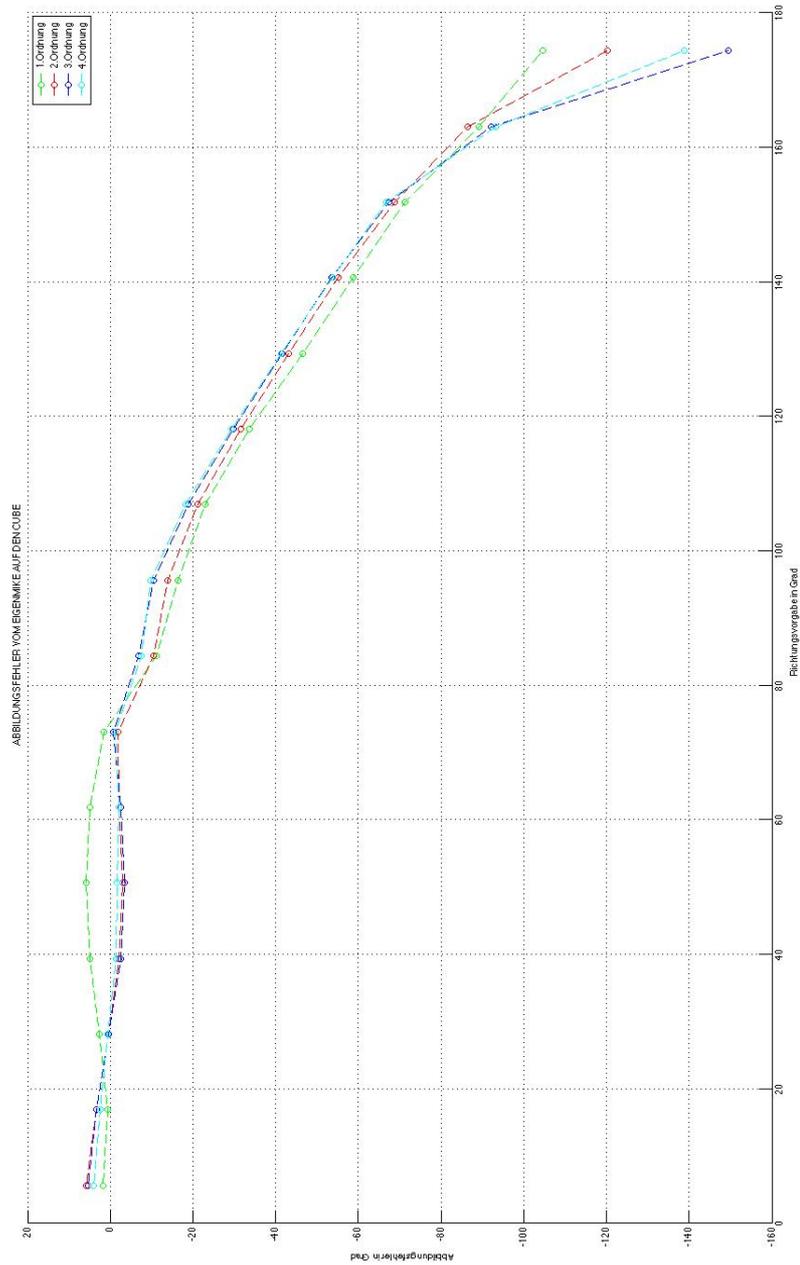


Abbildung 15 – Die Abbildungsfehler ϑ_{Fehler} für Eigenmikeaufnahmen von erster bis vierter Ordnung.

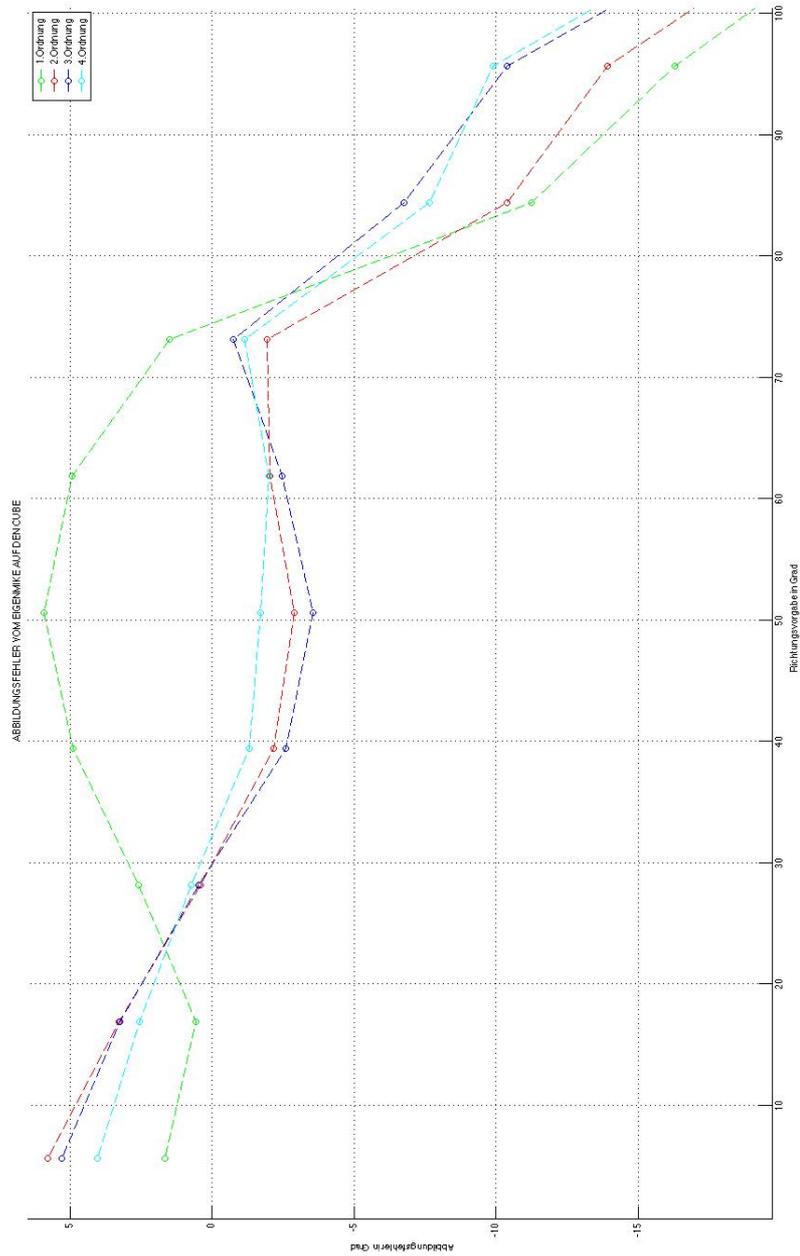


Abbildung 16 – Der Abbildungsfehler ϑ_{Fehler} , vergrößert für den Aufnahmewinkelbereich von 0 bis 100 Grad.

Zur Erklärung der Grafiken:

In den Darstellungen sind die verschiedenen Ordnungen entsprechend Tabelle 2 dargestellt. Die 16 diskreten Werte werden als Punkte dargestellt und ihre Zwischenwerte werden strichliert interpoliert.

Liest man an der Abszisse einen Wert ab, so muss man an der Ordinate nachsehen, ob der Abbildungsfehler für die gesuchte Ordnung negativ oder positiv ist. Der auf der Ordinate abgelesene Wert muss dann zu dem Wert auf der Abszisse addiert werden, um zu erfahren, unter welchem Winkel ein Schallereignis nun abgebildet wird. Ein Beispiel: Gesucht ist der Abbildungsfehler eines unter 80 Grad aufgenommenen Schalls, der mit zweiter Ordnung einkodiert ist. So sucht man den Punkt der roten Kurve bei 80 Grad Richtungsvorgabe und liest den entsprechenden Wert auf der Abszisse ab. In dem Beispiel entspricht das etwa -7 Grad. Diese -7 Grad werden zu den 80 addiert und man weiß, dass der CUBE das Schallereignis auf 73 Grad abbilden wird. Für eine anwendende Person gibt es nun mehrere Möglichkeiten dieser Problematik entgegenzuwirken. Im Folgekapitel werden drei verschiedene Herangehensweisen beschrieben.

5.4 Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Abbildungsrichtung

5.4.1 Erste Möglichkeit: Ausrichtung des Eigenmikes

Eine Möglichkeit der Verzerrung entgegenzuwirken liegt darin, das Eigenmike schon bei der Aufnahme höher auszurichten als es intuitiv richtig erscheint. Die Schallquelle trifft dann unter einem leicht negativen Winkel auf das Eigenmike auf, wodurch die unteren und die mittleren Mikrofonkapseln mehr Schalldruckpegel erfahren als die oberen. Dadurch werden die erhöhten Lautsprecher im CUBE nicht mehr ausreichend Pegel zur Reproduktion beitragen, um das Klangbild nach oben zu ziehen. Unter welchem Winkel man das Eigenmike der Klangquelle gegenüber anordnen müsste ist, auch von der aufgezeichneten Frequenz abhängig. Je höher die Frequenz, desto besser funktioniert die Repräsentation im CUBE (siehe Kapitel 3.3).

Für verschiedene Frequenzen und damit verschiedene Ambisonics-Ordnungen müsste das Eigenmike also in verschiedenen Höhen zur Klangquelle stehen. Das ist in der Praxis aufgrund von meist breitbandig abstrahlenden Quellen nicht sinnvoll. Somit ist diese Möglichkeit wohl nur dazu da, in weiser Voraussicht schon einmal einen Teil des Fehlers im Vorhinein auszubessern.

5.4.2 Zweite Möglichkeit: Warping Funktion

Hier kommt die schon in Kapitel 4.3 eingeführte Warping-Funktion zum Einsatz. Diese macht es möglich, ein in einer bestimmten Richtung einkodiertes Schallsignal so zu verzerren, dass die Quellrichtung um einige Grad verschoben wird. So lässt sich eine Quelle, die im CUBE zu hoch abgebildet wird, im Nachhinein noch nach unten ziehen. Diese Methode ist vielseitiger als die erste Methode, weil sie es möglich macht, das Signal in

mehrere Frequenzbänder zu unterteilen und somit durch unterschiedliche Warping Filter zu schicken. Nachdem die verschiedenen Frequenzbänder dann durch verschiedene Warping Funktionen gelaufen sind, werden sie wieder zusammengesetzt und die Klangquelle wird an der richtigen Stelle abgebildet.

5.4.3 Dritte Möglichkeit: Ausgleich durch Addition eines zusätzlichen Signals

Bei dieser Methode wird das Schallsignal schon während der Aufnahme mit zusätzlichen Mikrofonen aufgezeichnet. So stehen bei der Wiedergabe in der ambisonischen Anordnung noch andere Mikrofonensignale zur Verfügung. Mit deren Hilfe lässt sich das Klangbild an eine erwünschte Stelle bewegen, indem es mittels Encoder auf diese einkodiert wird. Durch ein ausreichend hohes Pegelverhältnis zwischen der Eigenmikroaufnahme und dem Zusatzsignal wird die Quellrichtung verschoben. Diese Vorgangsweise scheint für eher unerfahrene Personen wohl die naheliegendste Möglichkeit zu sein. Ein Vorteil der Methode ist in jedem Fall, dass die Qualität der zusätzlich verwendeten Mikrofone beliebig hoch sein kann. Dadurch lässt sich das Klangereignis mit deutlich besserem SNR wiedergeben als mit dem Eigenmikro und seinem doch eher geringen Dynamikumfang.

6 Conclusio | Ausblick

Das erklärte Ziel der Arbeit war es, eine dreidimensionale Video- und Audioinstallation für Ambisonics mit Hilfe des Eigenmikros zu erstellen, wobei der technische Schwerpunkt auf die Richtungsabbildung im CUBE gelegt wurde. Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dieser Richtungsabbildung wurden empirisch untersucht. Es wurden drei Lösungsansätze vorgestellt und in grafischer Form zugänglich gemacht. Diese beinhalten die richtige Positionierung des Mikrofons während der Aufnahme, um Fehlern vorzubeugen, sowie die Richtungsverzerrung mittels Plug-Ins, um Fehler im Nachhinein zu korrigieren. Natürlich hängt die Richtungsverzerrung nicht per se vom CUBE ab, sondern von der Tatsache, dass akustisch verwertbare Richtungen im Zuge der Signalkette nicht durchwegs die gleichen sind. Das Eigenmikro nimmt ein vollperipheres Schallfeld auf, welches nicht direkt in eine semiperiphere Wiedergabeeinrichtung übersetzt werden kann.

Ein weiterer sinnvoller Schritt wäre es, die Übereinstimmungen bezüglich der Richtungsabbildungen im CUBE nicht nur für einen, sondern für alle azimutalen Winkel zu berechnen und darzustellen. So stünden zur Anwendung noch genauere Informationen darüber zu Verfügung, wie das aufgezeichnete Schallfeld verzerrt wird.

Abbildungsverzeichnis

1	Eigenmike	6
2	CUBE 360-Grad Foto	8
3	Waldvorlage	8
4	Blockflöte Marita Gehrer	9
5	Vibraphon Nikolaus Gehrer	9
6	CUBE seitlich	10
7	CUBE frontal	10
8	Grundriss des CUBE	11
9	Koordinatensystem	11
10	Die Kugelflächenfunktionen	13
11	Rotation um die z-Achse	17
12	Warping-Skizze	18
13	Das Warping Plug-In	19
14	Das Ambix-Encoder Plug-In	19
15	Abbildungsfehler Eigenmike bis 180 Grad	23
16	Abbildungsfehler Eigenmike bis 100 Grad	24

Literatur

- [Bam95] J. S. Bamford, “An analysis of ambisonic sound systems of first and second order,” Master thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1995.
- [BF11] S. Braun and M. Frank, “Localization of 3d ambisonic recordings and ambisonic virtual sources,” in *International conference on spatial audio*, 2011.
- [Bra14] M. Brandner, “Sound source localization with the eigenmike array - evaluation and analysis,” 2014.
- [Fur90] R. K. Furness, “Ambisonics-an overview,” in *Audio Engineering Society Conference: 8th International Conference: The Sound of Audio*. Audio Engineering Society, 1990.
- [Ger80] M. A. Gerzon, “Practical periphony: The reproduction of full-sphere sound,” in *Audio Engineering Society Convention 65*, Feb 1980. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3794>
- [Kro14a] M. Kronlachner, “Plug-in suite for mastering the production and playback in surround sound and ambisonics,” in *AES Students Design Competition 136th AES Convention Berlin*, April 2014.

- [Kro14b] —, “Spatial transformations for the alteration of ambisonic recordings,” Master thesis, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Kunstuni Graz, Technical University Graz, Graz, A, 2014.
- [LZ15] S. Lösler and F. Zotter, “Comprehensive radial filter design for practical higher-order ambisonic recording,” *Fortschritte der Akustik, DAGA*, 2015.
- [Neu07] M. Neukom, “Ambisonic panning,” in *123rd Audio Engineering Society Convention*. Audio Engineering Society, Oktober 2007.
- [NSMH03] M. Noisternig, A. Sontacchi, T. Musil, and R. Höldrich, “A 3d ambisonic based binaural sound reproduction system,” in *Audio Engineering Society Conference: 24th International Conference: Multichannel Audio, The New Reality*. Audio Engineering Society, 2003.
- [WFZ13] F. Wendt, M. Frank, and F. Zotter, *Untersuchung von Phantomschallquellen vertikaler Lautsprecheranordnungen*, 2013.
- [Zmö02] J. M. Zmölnig, *Entwurf und Implementierung einer Mehrkanal-Beschallungsanlage*, 2002.
- [Zot08] F. Zotter, *Bestimmung lokaler Koordinaten eines Lautsprecherfeldes im Akustiklabor Inffeldgasse 10, Institut für Elektrische Musik und Akustik (IEM)*, 2008.
- [Zot09] —, “Analysis and synthesis of sound-radiation with spherical arrays,” PhD Thesis, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Kunstuni Graz, Technical University Graz, Graz, A, 2009.
- [Zot11] —, “Acoustic holography and holophony,” Institut für Elektronische Musik und Akustik, Kunstuniversität Graz, Tech. Rep., October 2011.