

Protokoll zur Laborübung Akustische Holografie und Holofonie, SS2015

Andreas Fuchs, 9773819
Renate Walter, 0673064
Bernhard Zeller, 0673105

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, Mai 2015



institut für elektronische musik und akustik



Inhaltsverzeichnis

1	Planare Holografie	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Versuchsaufbau	3
1.2.1	Kalibrierung	3
1.3	Signalverarbeitung	4
1.4	Auswertung	5
2	Implementierung von Ambisonics	11
2.1	Einleitung	11
2.2	Implementierung und Erkenntnisse	11

1 Planare Holografie

1.1 Einleitung

Im Rahmen der Laborübung Akustische Holografie und Holofonie wurden Fernfeldmessungen mit einem planaren 64-Kanal Mikrofonarray durchgeführt. Mithilfe der Transformation in den Wellenzahlraum (k -space) wurden drei Quellpositionen bei verschiedenen Frequenzen analysiert, um dabei auftretende Effekte zu zeigen. Zusätzlich wurde eine Fensterung der Impulsantwort durchgeführt, um zu verdeutlichen, wie sich die selbst im Messraum unvermeidlichen Reflexionen auswirken. Mit dieser Fensterung ist auch in den Messungen die theoretisch hergeleitete, periodische sinc-Funktion bei endlicher Apertur [2] deutlich zu erkennen. Somit konnte einerseits die Theorie veranschaulicht werden, andererseits konnten die praktischen Einschränkungen beleuchtet werden, die in der Anwendung der Holografie auftreten.

1.2 Versuchsaufbau

Für die Messungen wurde ein planares Mikrofonarray [1] mit 64 Messmikrofonen von NTi Audio bestückt (siehe Abbildung 1), die in einem quadratischen Raster von 8x8 Mikrofonen angeordnet waren. Der Abstand der Mikrofone zueinander betrug 7 cm. Somit ergibt sich eine Arrayfläche von 49cm x 49cm. Die Mikrofonsignale wurden an einen Vorverstärker geführt, Analog-Digital gewandelt und über eine MADI-Schnittstelle mit dem PC verbunden. Die Signalverarbeitung erfolgte in MATLAB[®] und PureData (PD).

Als Schallquellen dienten 3 Lautsprecher (Genelec 8030A), die sich im Abstand von 2m befanden. Einer der Lautsprecher war frontal positioniert, also $\varphi = 0^\circ$, der zweite seitlich links mit $\varphi = 45^\circ$, der dritte seitlich links mit $\varphi = 90^\circ$, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Die Höhe der Lautsprecher war mittig auf das Array ausgerichtet ($\vartheta = 0^\circ$).

1.2.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Mikrofone erfolgte mittels Pistonphon mit einem Referenzschalldruckpegel von 94dB SPL bei 1000Hz. Dabei wurde der Kalibrator den Mikrofonen nacheinander aufgesetzt und die Signale per PureData aufgezeichnet. Anschließend wurde der *fast*-zeitbewertete Schalldruckpegel nach [5] gebildet. Die geringen Abweichungen des stationären Pegels zum Referenzschalldruckpegel wurden in einem späteren Schritt



Abbildung 1: Messaufbau des 64-kanaligen planaren Arrays mit Laserwasserwaage zur geometrischen Einpassung der Lautsprecher im Winkel.

per Hand in MATLAB ausgeglichen.

1.3 Signalverarbeitung

Das Mikrofonarray wurde über die Lautsprecher mit einem logarithmischen Sweep bespielt. Die Sweepantworten aller 64 Mikrofone wurden mit einem PD-Patch für jede Position (3 insgesamt) aufgezeichnet. Diese Aufnahmen wurden später zur Analyse in MATLAB herangezogen.

In Matlab wurden die 64 Aufnahmen und das Quellsignal (Sinussweep) geladen und durch Division im Frequenzbereich deren jeweilige Impulsantworten berechnet. Um die Impulsantworten wurde ein grobes Fenster von 1000 Samples gelegt und die Signale mit den entsprechenden Kalibrierfaktoren gewichtet. Anschließend wurde die DFT bei definierten Frequenzen (500, 1000, 2000 und 4000Hz) berechnet und in einer Matrix entsprechend der Anordnung im Mikrofonarray aufbereitet (8×8). Mithilfe einer 2-dimensionalen DFT über diese Matrix konnte schließlich das Wellenzahlspektrum, mit nötigenfalls periodischen Fortsetzungen, berechnet werden.

In einer zweiten Analyse wurden die Impulsantworten kürzer gefenstert, um auch erste

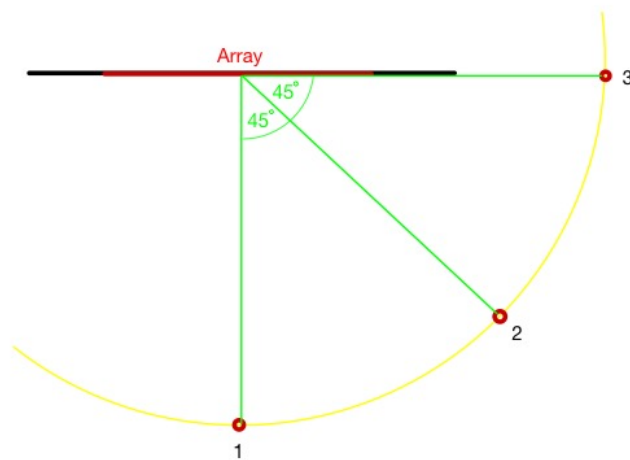


Abbildung 2: Quellenpositionen zum Mikrofonarray

Reflexionen des nicht idealen schalltoten Raumes (Boden!) auszublenden. Dazu wird um das Maximum der Impulsantwort ein 220 Sample langes Fenster mit den Flanken eines Hann-Fenster gelegt, siehe Abbildung 3.

Die Analyse wurde auch versuchsweise ohne Kalibrierung durchgeführt. Es kommt zu einer Verschmierung der sinc-Funktion, wobei der Einfluss der Reflexionen größer ist. Eine Kalibrierung ist daher erwartungsgemäß sinnvoll, auf eine nähere Analyse wurde jedoch verzichtet.

1.4 Auswertung

Abbildung 4 bis 7 stellen die Wellenzahlspektren für zwei Positionen mit und ohne Fensterung bei vier Frequenzen dar. Der dargestellte Kreis kennzeichnet die Grenze zwischen ebenen und evaneszenten Wellen, weiters wurde das Wellenzahlspektrum periodisch fortgesetzt, um die auftretenden Spiegelwellenzahlspektren zu berücksichtigen.

Für tiefe Frequenzen sind die Phasenunterschiede zwischen den Mikrofonen gering, wodurch nur eine ungenaue räumliche Abtastung möglich ist. Erst ab 2kHz ist die genauest mögliche Zuordnung deutlich. Ab einer Frequenz von $f_g = \frac{c}{2\Delta x} = 2450\text{Hz}$ kommt es zu Aliasing und dem Auftreten von (räumlichen) Spiegelfrequenzen. Die Quellposition ganz links (Abbildung 5 und 7) kann bei 4 kHz daher nicht mehr eindeutig bestimmt werden. Es zeigt sich, obwohl ein aufwendiger Aufbau verwendet wurde, dass nur ein beschränkter Frequenzbereich (ohne Aliasing) zur Verfügung steht.

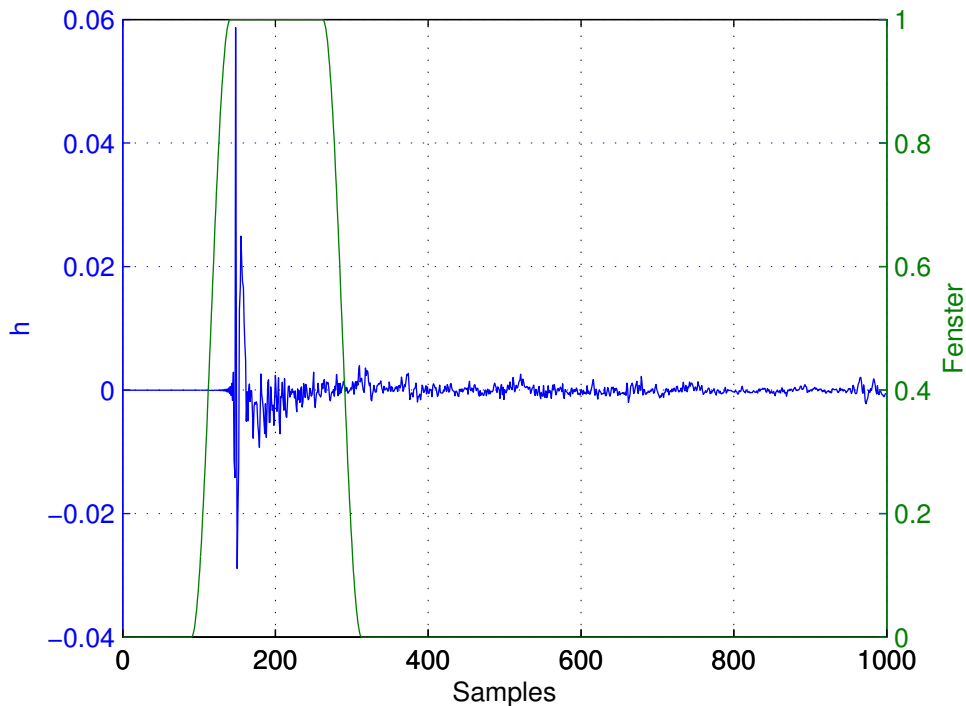


Abbildung 3: Fensterung der Impulsantworten.

Die exakte Fensterung des Direktschalls zeigt eine substantielle Verbesserung in den Grafiken, da unter anderem die vorherrschende Symmetrie bzw. Periodizität deutlicher zur Geltung kommt. Denn durch die Fensterung ist nur die Direktschallkomponente vorhanden, die aus der Richtung der Schallquelle kommt. Aus anderen Richtungen kommende Reflexionen sind nicht mehr im Signal enthalten und die sinc-Funktion einer einzelnen Schallwelle ist sichtbar. Dies kann jedoch nicht als Schwäche des Verfahrens gesehen werden, das Schallfeld abzubilden, denn die Reflexionen (vor allem die erste Bodenreflexion) sind physikalisch vorhanden. Vielmehr muss in der Anwendung darauf geachtet werden, dass Reflexionen Störeinflüsse verursachen können.

Im Rahmen dieses Teils konnte somit die Theorie der planaren Holografie in die Praxis umgesetzt werden. Mithilfe von diskreten Schallquellen in einiger Entfernung und einer genauen Fensterung konnte die theoretische Lösung für eine einfallende, ebene Welle gezeigt werden. Allerdings werden in der Praxis schnell die physikalischen Grenzen sichtbar. Wichtige Einschränkungen sind hierbei der sinnvoll nutzbare Frequenzbereich und das eventuell störende Auftreten von Reflexionen. Mit diesem Wissen sind jedoch die Grundlagen für akustische Kameras vorhanden, denn schließlich kann aus den Abbildungen auf die Position der Schallquellen geschlossen werden.

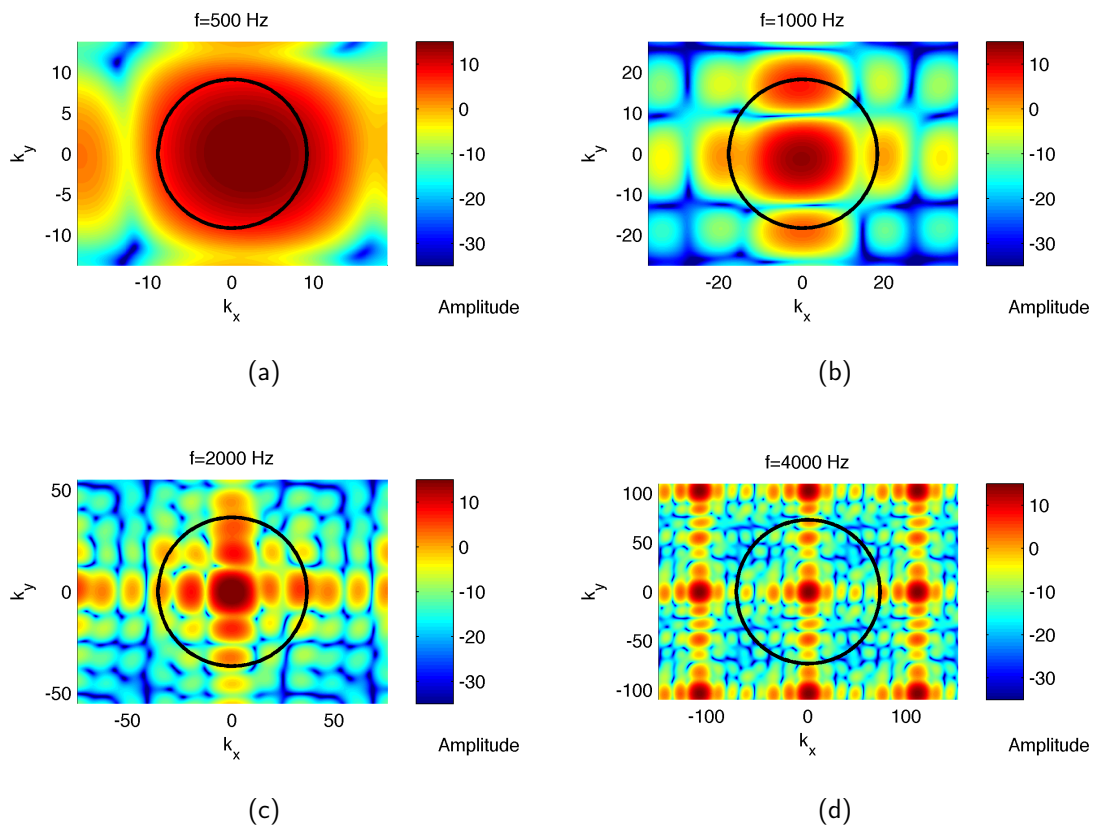


Abbildung 4: Fernfeldmessung bei $\varphi = 0^\circ$ und $\vartheta = 0^\circ$, 1000 Abtastwerte der Impulsantwort.

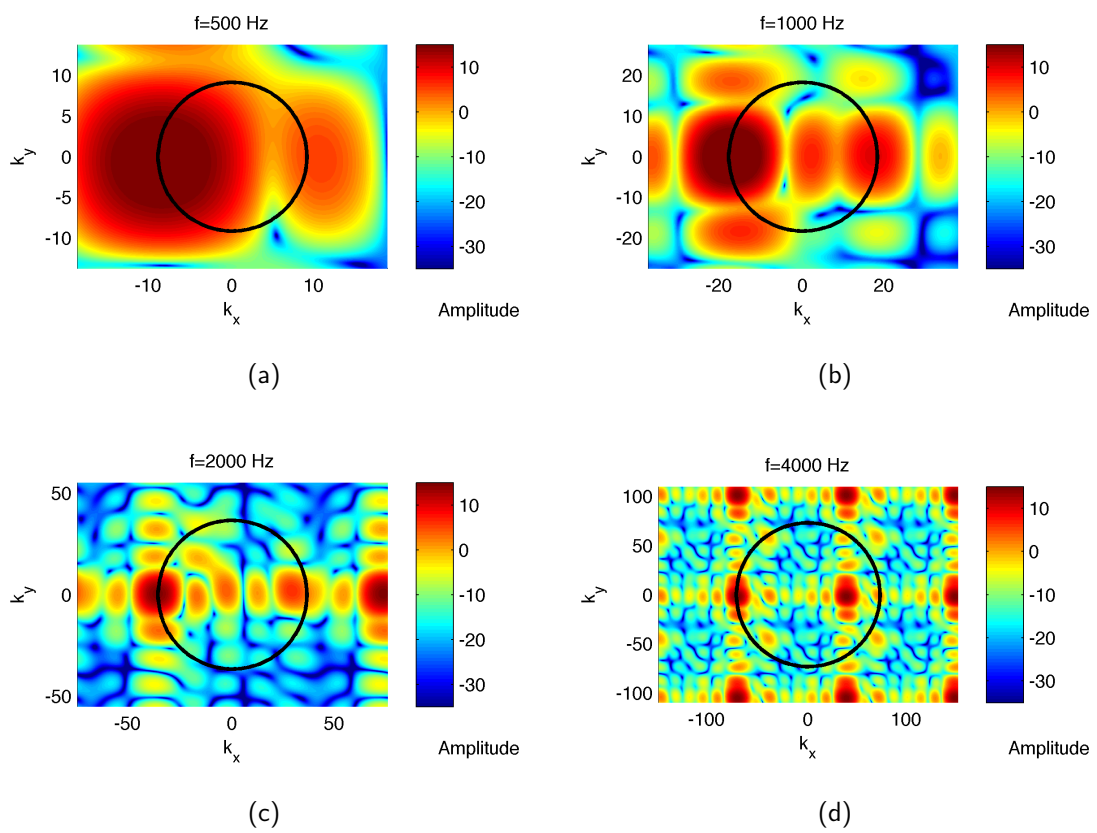


Abbildung 5: Fernfeldmessung bei $\varphi = -90^\circ$ und $\vartheta = 0^\circ$, 1000 Abtastwerte der Impulsantwort.

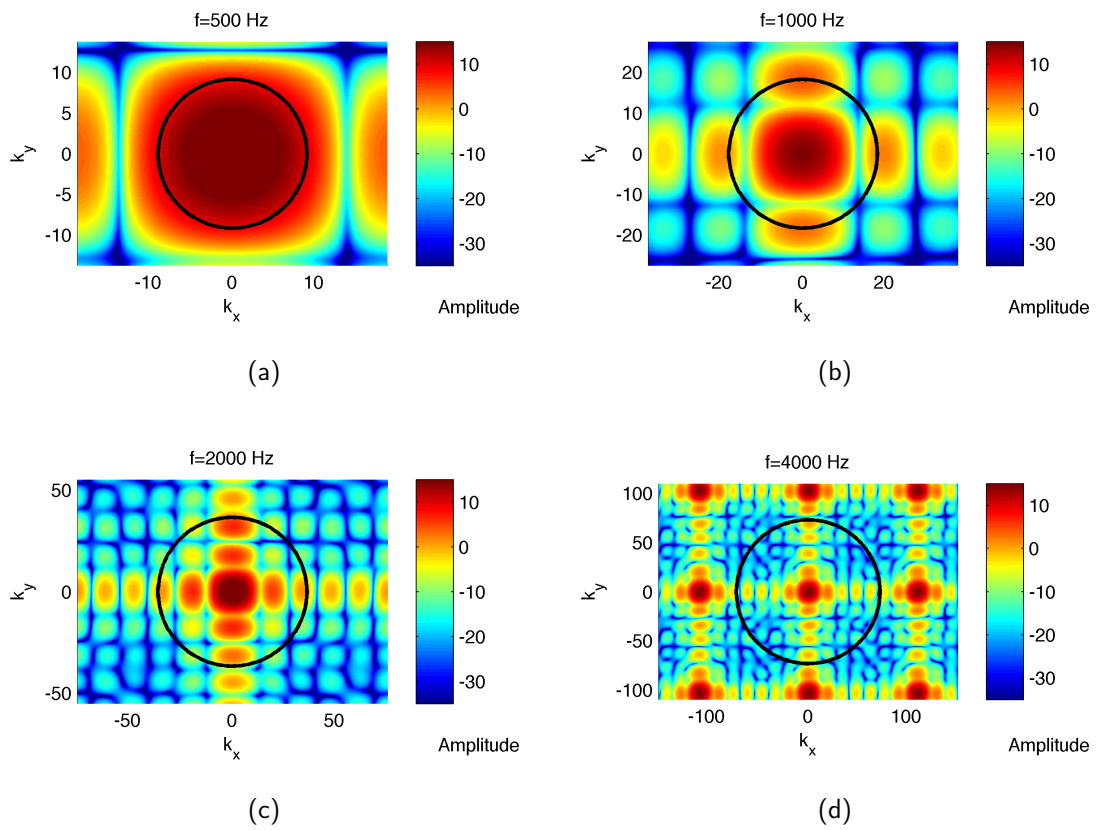


Abbildung 6: Fernfeldmessung bei $\varphi = 0^\circ$ und $\vartheta = 0^\circ$ mit Fensterung, 220 Abtastwerte der gefensternten Impulsantworten.

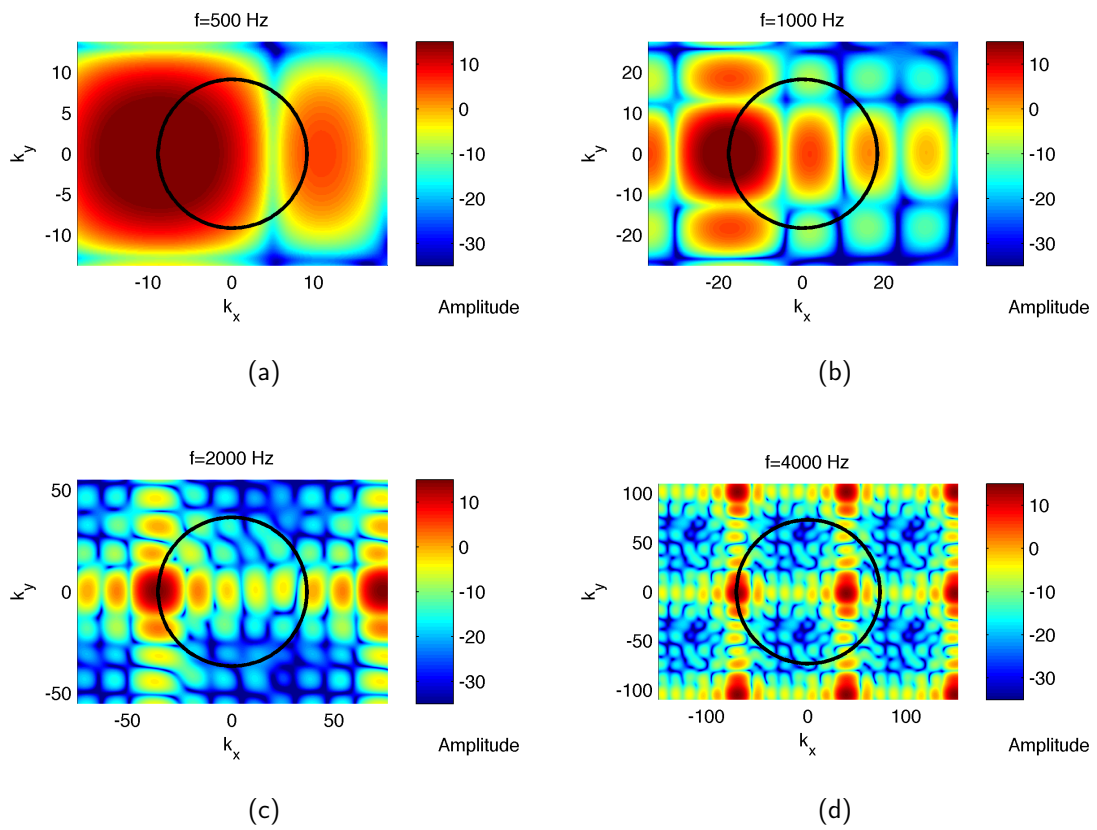


Abbildung 7: Fernfeldmessung bei $\varphi = -90^\circ$ und $\vartheta = 0^\circ$ mit Fensterung, 220 Abtastwerte der gefensternten Impulsantworten.

2 Implementierung von Ambisonics

2.1 Einleitung

Dieser Teil des Labors fand im CUBE des Institutes für Elektronische Musik und Akustik statt. Dieser ist ausgestattet mit 24 Lautsprechern, die auf einer Halbkugel angeordnet sind. Auf diesem System wird eine Implementierung von Ambisonics realisiert. Als Grundlage für unsere Implementierung diente der Artikel *All-Round Ambisonic Panning and Decoding* [3], dessen Ansatz im Rahmen der Einheit ausprobiert werden sollte. Da im Zuge der Umsetzung auch eine Stufe mit VBAP (Vector-Based Amplitude Panning) zu erarbeiten war, konnte auch der Unterschied zwischen räumlichen Pannings mit VBAP und Ambisonics angehört werden. Anschließend wurde die Implementierung verwendet, um Aufnahmen des Eigenmike EM32 klanglich ausgewogen abzuspielen. Dafür wurden die Filter für das EM32 in der Laborübung implementiert.

2.2 Implementierung und Erkenntnisse

Zum leichteren Verständnis wurde mit der Implementierung am Ende der Signalkette begonnen.

Um die 25 Lautsprecher des CUBE¹ zu bespielen, wird ein VBAP-Decoder implementiert. Dieser Decoder hat als Eingang 5200 virtuelle Schallquellen, deren Positionen mit einem sphärischen t -design ($t=100$) berechnet werden [4]. Für jede dieser Richtungen werden nun die VBAP-Gewichte bestimmt, wobei für jede Richtung folgendes zu klären ist:

1. Welche drei Lautsprecher sind aktiv?
2. Wie groß sind deren Gewichte?

Um nur benachbarte Lautsprechertriplets zu berücksichtigen, wurde die konvexe Hülle über die Lautsprecheranordnung des CUBE mit MATLAB[®] berechnet (siehe Abbildung 8).

Eine PD-Implementierung (Abbildung 9) wurde mit rosa Rauschen getestet, da dieses gut lokalisiert werden kann. Die Position des Quellsignals wurde interaktiv mit Vicon-Tracking einer Wii-Spielzeugpistole auf der Lautsprecheranordnung bewegt. Dabei konnten zwei Effekte beobachtet werden:

¹Um die untere Hemisphäre abzudecken, wird ein zusätzlicher, nicht existenter Lautsprecher 4m unter dem Zentrum angenommen.

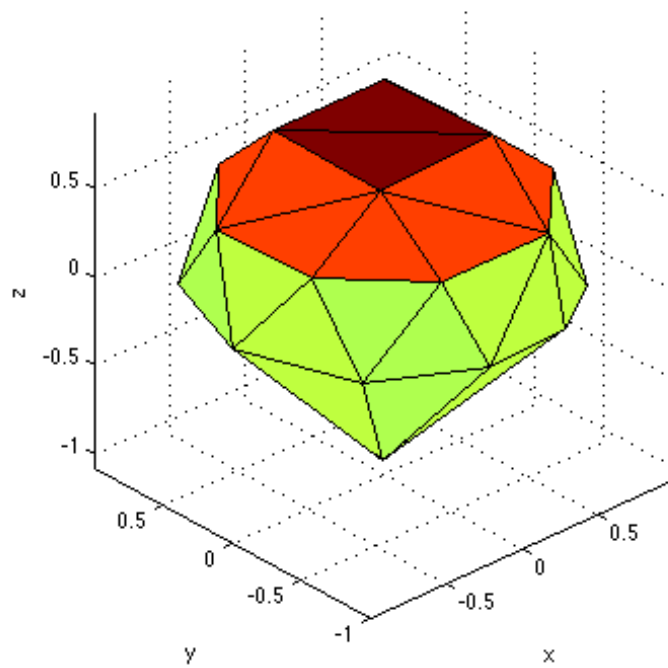


Abbildung 8: Konvexe Hülle über die CUBE-Lautsprecher mit normierter Länge plus virtuellem Lautsprecher 4m unter dem Zentrum.

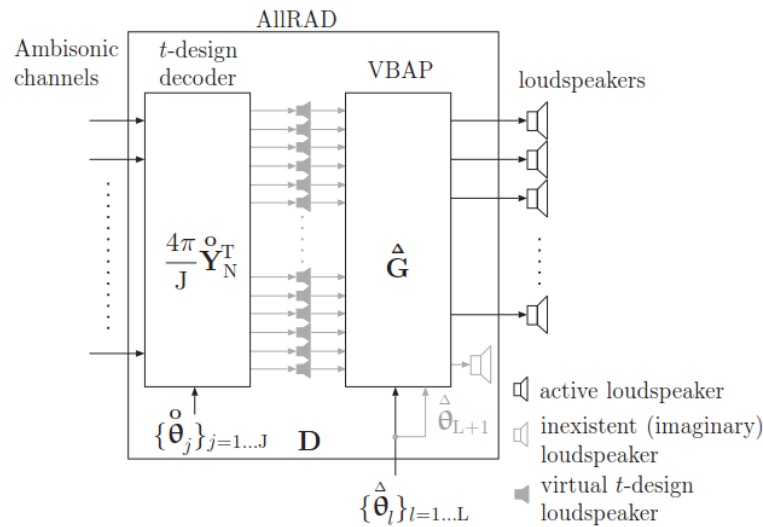


Abbildung 10: Blockdiagramm des AllRAD. [3].

bildung 11). Das Blockdiagramm des Patches ist in Abbildung 12 zu sehen. Der Patch fasst die gesamte En- und Dekodierung in einem Vektor für die Lautsprechergewichte zusammen:

$$\mathbf{g} = \mathbf{D} \text{diag}\{\mathbf{a}_N\} \mathbf{y}_N(\theta_s). \quad (1)$$

Die Gewichte der Ambisonics Kanäle in \mathbf{a}_N liefern eine verbesserte Nebenkeulendämpfung, die auch akustisch nachvollzogen werden konnte.

Eigenmike

Dieser Dekoder wird nun zum Abspielen von Ambisonics Aufnahmen verwendet, die mit dem Eigenmike[®] erstellt wurden. Es werden die unverarbeiteten Kanäle der 32 Mikrofonskapseln mit Ambisonics 4. Ordnung enkodiert. Zur Wiedergabe im CUBE bietet sich jedoch an, den Radius mittels radialem Scharfstellfilter (Holografiefilter) an den Radius der Lautsprecher des CUBE anzupassen [2].

$$H_n(f) = \frac{(ka)^2 h'_n(ka)}{ikh_n(kA)} \frac{1}{A} \quad (2)$$

Wobei $a = 0.042\text{m}$ der Radius des Eigenmike ist, und $A = 5\text{m}$ der ungefähre Radius des CUBE. Die sphärischen Besselfunktionen sind bekannte Funktionen und standen zur Verfügung. Die imaginäre Einheit im Nenner kann in der Implementierung weggelassen

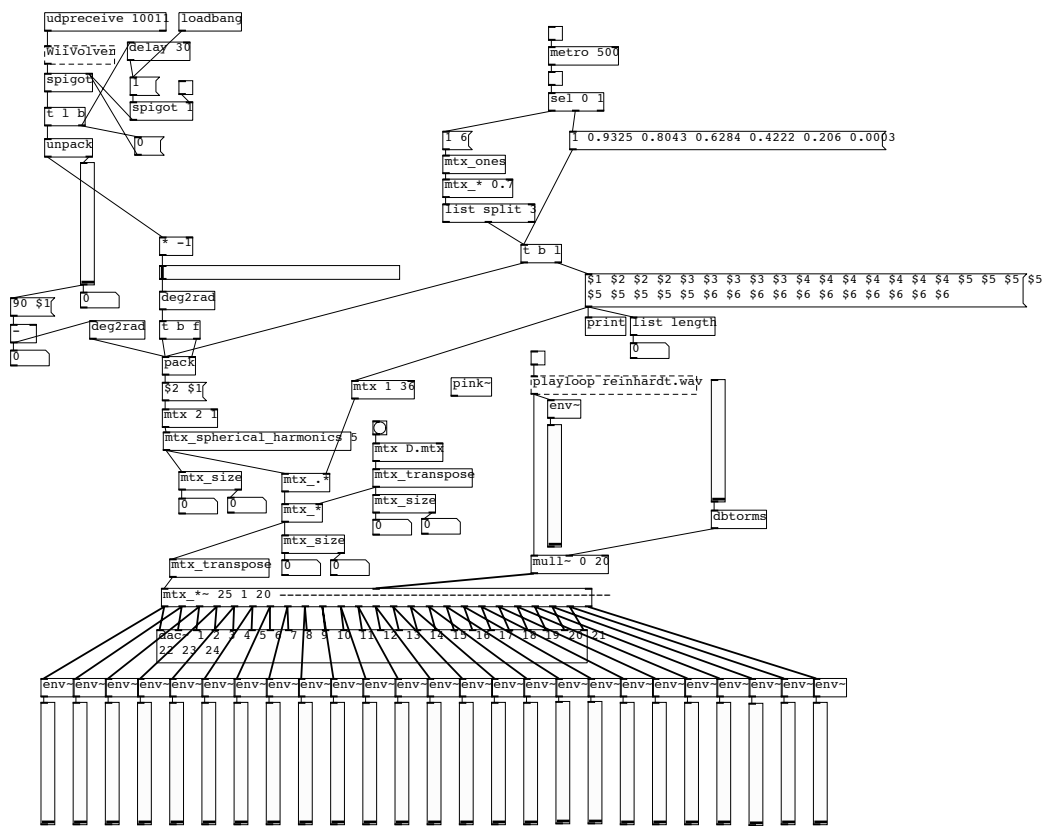


Abbildung 11: PD-Patch mit Ambisonics Encoder und Dekoder.

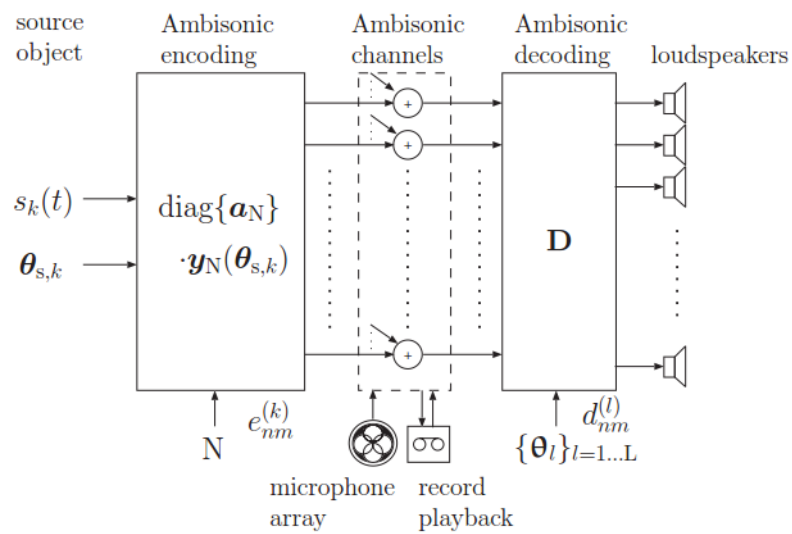


Abbildung 12: Blockdiagramm mit Ambisonics En- und Dekoder [3]

werden, da es sich nur um eine Phasenverschiebung handelt. Der Faktor $\frac{1}{A}$ liefert eine Verstärkung von 0dB bei tiefen Frequenzen für die 0-te Ordnung. Problematisch bei einer unveränderten Implementierung der benötigten Filter ist, dass für höhere Ordnungen bei tiefen Frequenzen hohe Verstärkungen auftreten, die zu lautem, tieffrequentem Störschall aus Abstimmgenauigkeiten und Rauschen führen würden. Daher wurden in der Laboreinheit tiefe Frequenzen linearphasig begrenzt, wobei als neue Idee ein resultierender Frequenzgang in Form eines Hochpasses erster Ordnung mit einer von der Ambisonics Ordnung n abhängigen Grenzfrequenz verwendet wird (siehe Abbildung 13):

$$H'_n = \frac{H_n}{0.03|H_n|^{1+\frac{1}{n}} + 1}, \quad n > 0. \quad (3)$$

Der Faktor $0.03 \approx 30\text{dB}$ im Nenner gibt eine obere Schranke für die maximal auftretende Verstärkung an. Mit der Potenz $1 + \frac{1}{n}$ wird bei 1kHz eine ähnliche Verstärkung für die verschiedenen Ordnungen erreicht. Ohne diesem Hochpassfilter treten hier Differenzen bis zu 140 dB auf.

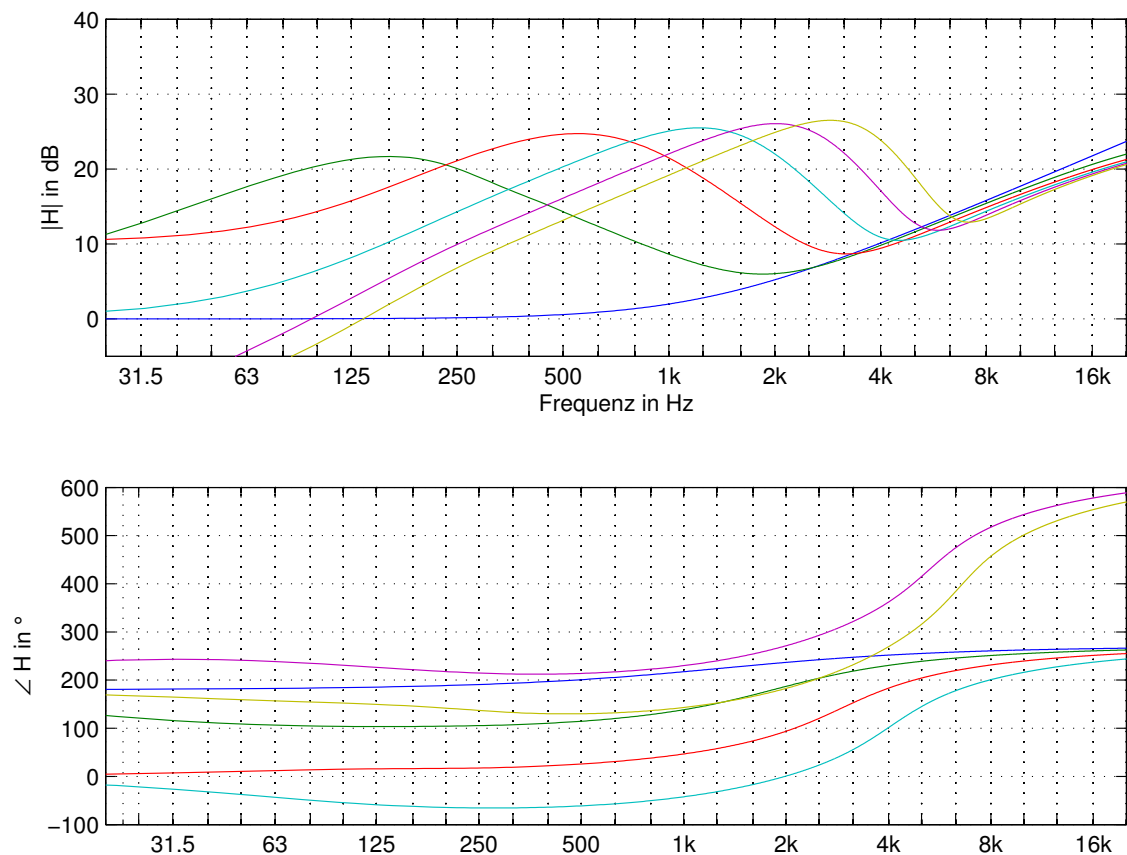


Abbildung 13: Radiale Scharfstellfilter mit Begrenzung für tiefe Frequenzen.

Die Impulsantworten der Scharfstellfilter wurden mit MATLAB berechnet und in PD geladen; der komplette Patch mit ALLRAD ist in Abbildung 14 zu sehen.

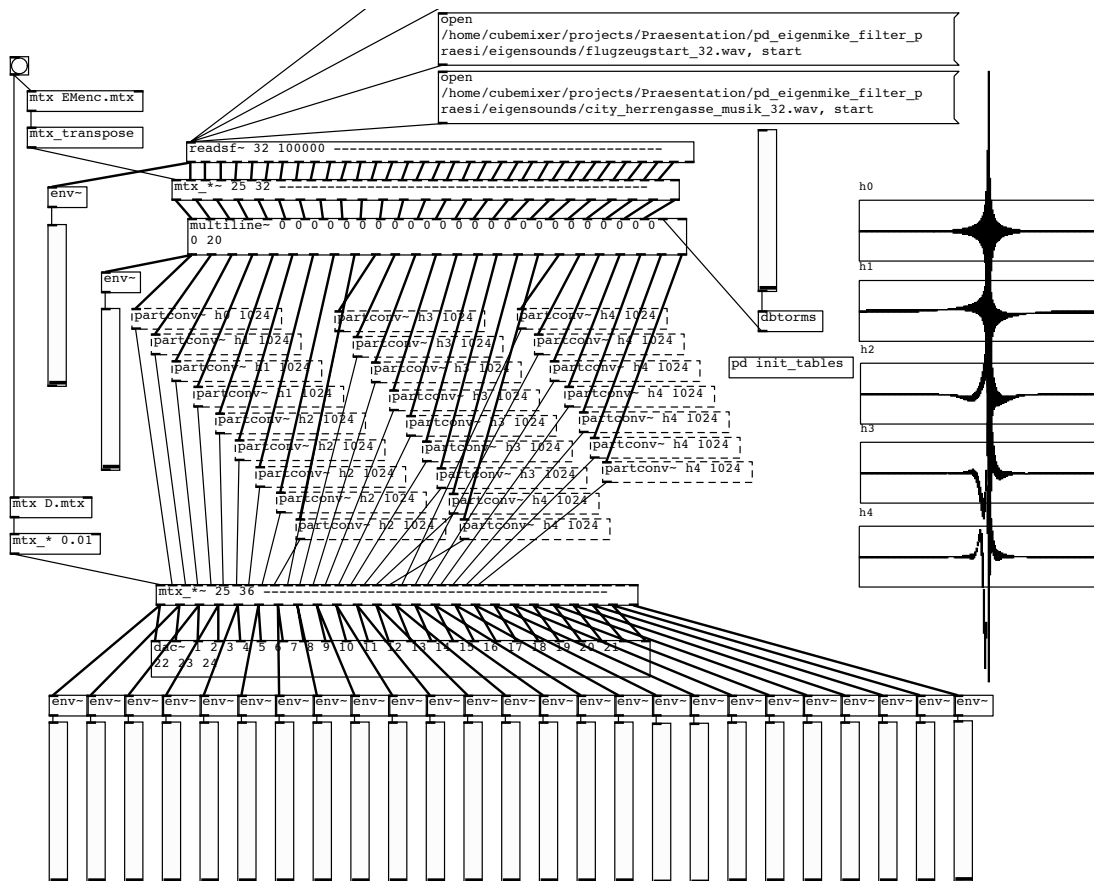


Abbildung 14: Patch zur Wiedergabe der Eigenmike Aufnahme.

Mithilfe des Artikels [3] konnte ein effizienter und realitätsnah klingender Ambisonics-dekoder implementiert werden. Der Vergleich mit VBAP zeigte die prinzipiellen Stärken von Ambisonics (u.a. keine Klangfärbungen bei bewegten Quellen). Da auf die Rohsignale der einzelnen Kapseln des Eigenmike EM32 zurückgegriffen wurde, wurde die gesamte Signalverarbeitung für die Ambisonics En- (Aufnahme) und Dekodierung (Wiedergabe) implementiert. Durch die radialen Scharfstellfilter konnte die Wiedergabe im CUBE verbessert werden, hierbei müssen jedoch höhere Ordnungen bei tieferen Frequenzen in der Amplitude beschränkt werden. Da die menschliche Lokalisation bei tiefen Frequenzen schlechter funktioniert, ist dennoch eine gute räumliche Abbildung möglich, wie anhand der Wiedergabe von vorhandenen Aufnahmen aus der Grazer Innenstadt gehört werden konnte.

Literatur

- [1] Daniel Hofer, *Implementierung eines 64 Kanal Mikrofonarrays*, Diplomarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst Graz und Technische Universität Graz, 2008
- [2] Franz Zotter, *Akustische Messtechnik 2, LU*, Laborunterlagen, Universität für Musik und darstellende Kunst Graz und Technische Universität Graz, 2010.
- [3] Franz Zotter, Matthias Frank, *All-Round Ambisonic Panning and Decoding*, Journal of the Audio Engineering Society, pp. 807-820, vol. 60(10), October 2012.
- [4] Manuel Gräf, Daniel Potts, *On the computation of spherical designs by a new optimization approach based on fast spherical Fourier transforms*, Chemnitz University of Technology, Department of Mathematics, 2010.
- [5] ISO 61672-1, *Elektroakustik - Schallpegelmesser Teil 1: Anforderungen*, 2005.