

# Protokoll zur Laborübung Akustische Holografie und Holofonie, SS 2016

Gruppe 1

Christoph Baumgartner  
Rüdiger Fasching  
Maximilian Giller  
Martina Kreuzbichler

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 20. - 24. Juni 2016



institut für elektronische musik und akustik



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung/Motivation</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Eigenmike</b>	<b>4</b>
2.1	Implementierung . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Kugellautsprecher</b>	<b>9</b>
3.1	Bau . . . . .	9
3.2	Messung . . . . .	12
3.3	Auswertung . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>18</b>

# **1 Einleitung/Motivation**

In diesem Protokoll zur Laborübung akustische Holografie und Holofonie wird die Arbeit der Laborgruppe 1 vom 20. Juni bis zum 24. Juni 2016 dokumentiert. Auf allgemeinen Wunsch der Teilnehmer haben wir uns in der LU auf das Ambisonische konzentriert, wobei in den ersten beiden Labortagen im IEM-Cube ein Ambisonics-System (Encoder/Decoder) mittels Matlab und Puredata implementiert, sowie mit verschiedenen Mikrofonen experimentiert wurde. In diesem Protokoll legen wir dabei das Hauptaugenmerk auf das Eigenmike der Firma mh acoustics. In den verbleibenden drei Labortagen bauten wir einen kompakten Kugellautsprecher mit sechs Chassis zusammen, den wir anschließend im Messraum am IEM in der Petersgasse bezüglich seiner Richtwirkung vermessen haben. Der Bericht dazu findet sich in Kapitel 3 dieses Protokolls.

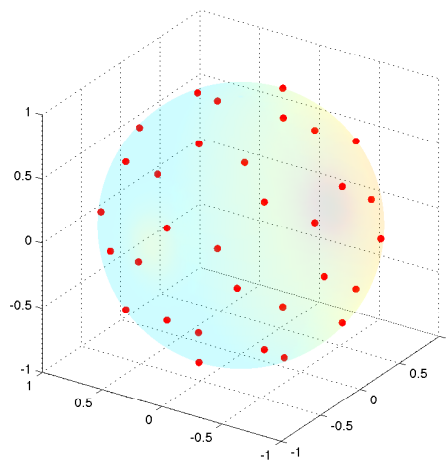
## 2 Eigenmike

In diesem Teil des Labors haben wir räumlichen Schall mit dem Eigenmike aufgenommen und im IEM CUBE wiedergegeben.

Das Eigenmike (s. Abb. 1(a)) ist ein kugelförmiges Mikrofonarray mit 32 Mikrofonkapseln, welche fest im Kugelkörper verbaut sind. Es dient dazu, Surround-Aufnahmen mit hoher Richtungsauflösung aufzunehmen. Die benötigten Koordinaten für die Mikrofonpositionen, die in Abb. 1(b) dargestellt sind, wurden aus [1, S. 45 ff.] übernommen.



(a) Eigenmike



(b) Mikrofonpositionen

Abbildung 1: Eigenmike der Firma mh acoustics und Darstellung der Mikrofonpositionen auf der Kugeloberfläche.

## 2.1 Implementierung

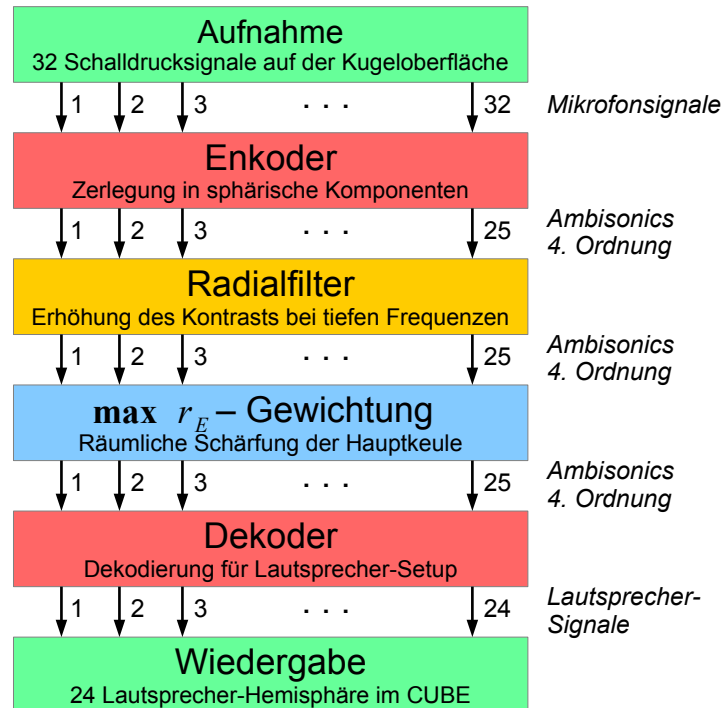


Abbildung 2: Blockdiagramm

In Abb. 2 sind die Schritte, welche zur Wiedergabe einer Aufnahme mit dem Eigenmike im CUBE nötig sind, abgebildet. Die 32 Mikrofonsignale des Eigenmike werden auf ein Ambisonicsystem 4. Ordnung, bestehend aus 25 richtungsabhängigen Komponenten, übertragen.

### Enkodierung

Um die mit dem Eigenmike aufgenommenen Signale auf der Lautsprecherhemisphäre im CUBE wiederzugeben, müssen die Signale mittels Kugelflächenfunktionen in Richtungskomponenten zerlegt werden. Dieser Schritt entspricht der Enkodierung in Ambisonics (s. Glg. 1). Mit 32 Eingangskanälen kann man maximal Ambisonics 4. Ordnung erreichen. Die Kugelflächenfunktionen der Ordnungen 0-4 werden an den Positionen der Mikrofone des Eigenmikes ausgewertet. Diese Gewichte werden in einer Matrix gespeichert und in den Encoder geladen. Die encodierten Schalldrücke berechnen sich mit dieser Matrix aus den Mikrofonsignalen  $\vec{p}(t)$  zu

$$\vec{\psi}(t) = (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{Y}^T \cdot \vec{p}(t). \quad (1)$$

## Radialfilter

Bei tiefen Frequenzen beugt sich der Schalldruck um die Kugel, was zu schlechtem Kontrast des Schalldrucks führt. Um jedoch eine bessere Lokalisation bei tiefen Frequenzen zu erhalten, werden Radialfilter implementiert [2]. Diese bewirken eine Anhebung im tieffrequenten Bereich, wobei Signale mit höherer Ordnung stärker gewichtet werden (s. Glg. 2) und Abb. 3).

Ein weiteres Problem tritt auf, wenn die Richtungsauflösung frequenzabhängig wird. Zu viele Lautsprecher erzeugen bei niedriger Ordnung nämlich eine Bassanhebung, während zu wenige zu Signalverlusten bei bestimmten Richtungen führen. Aus diesem Grund sind verschiedene Richtungsauflösungen für die unterschiedlichen Frequenzbänder notwendig was mit der zusätzlichen Implementierung eines Hochpasses gelöst wird (s. Abb. 5). In Abb. 4 sehen Sie die Hochpassfilterkurven bezüglich der unterschiedlichen Ordnungen. Die Radialfilter  $h_n(\omega)$  bzw.  $\tilde{h}_n(\omega)$  inklusive Hochpass, ergeben sich aus den differenzierten sphärischen Hankelfunktionen  $h_n^{(2)}(kR)$  zu

$$h_n(\omega) = k^2 \cdot \frac{h_n^{(2)}(kR)}{i^{n+1} \cdot 300} \quad (2)$$

$$\tilde{h}_n(\omega) = g_{hp}(\omega) \cdot k^2 \cdot \frac{h_n^{(2)}(kR)}{i^{n+1} \cdot 300}. \quad (3)$$

Der Faktor  $1/300$  führt zu einer 0 dB Verstärkung für tiefe Frequenzen bei 0. Ordnung und ist empirisch ermittelt worden.

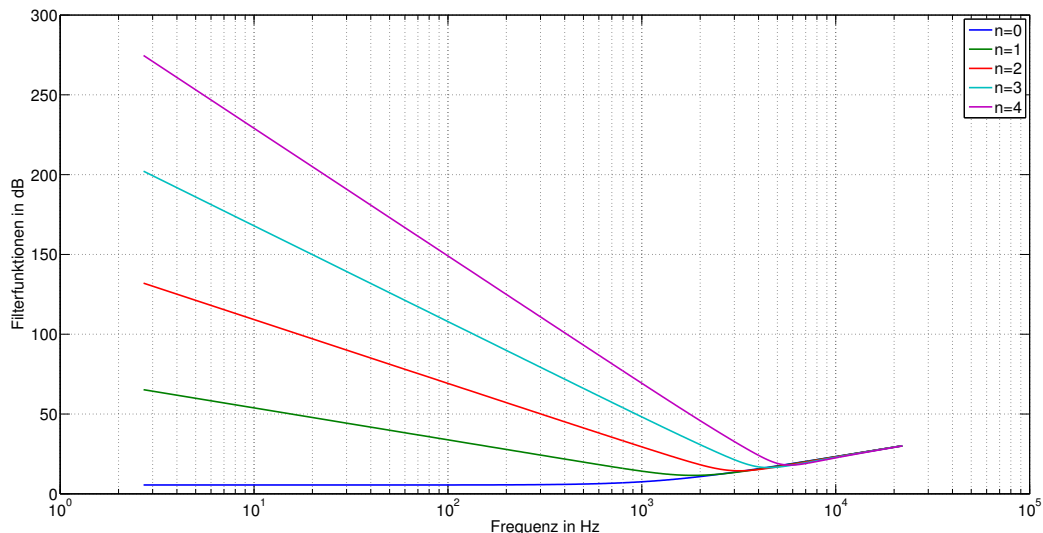


Abbildung 3: Radialfilterkurven für verschiedene Ordnungen

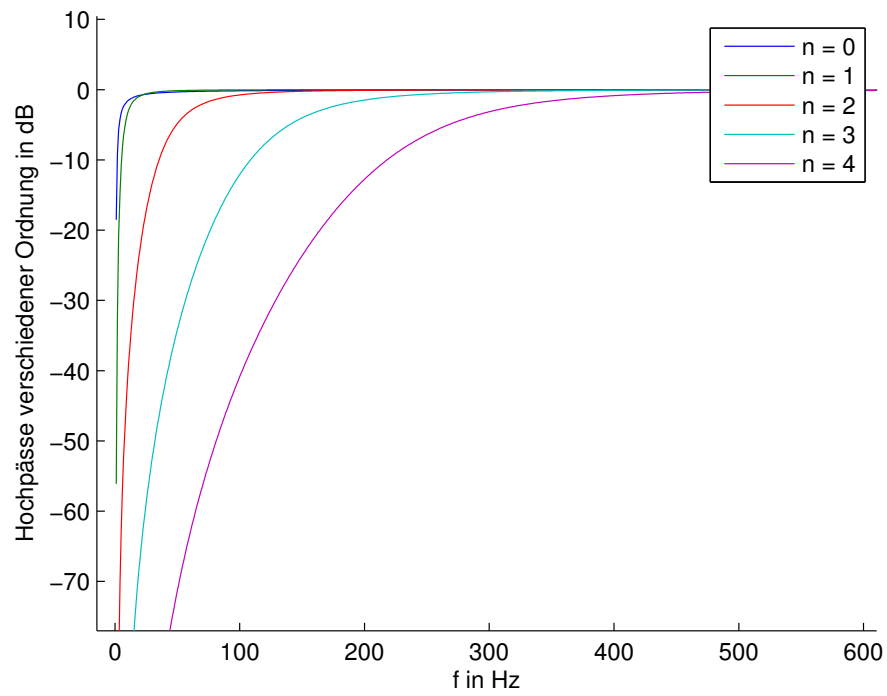


Abbildung 4: Hochpassfilter für verschiedene Ordnungen

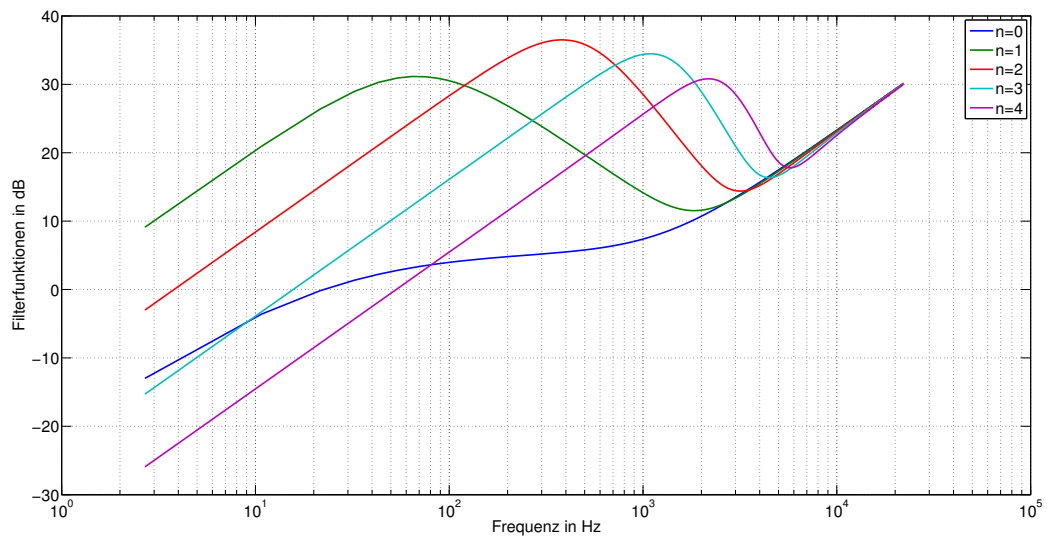


Abbildung 5: Radialfilterkurven mit Hochpassgewichtung

### **MAX-RE Gewichtung**

Ziel der  $\max-r_E$  Gewichtung ist es, eine möglichst starke Bündelung zu erhalten, indem die Nebenkeulen gedämpft und der Richtungsvektor  $r_E$  maximiert werden. Im Labor wurden die  $\max-r_E$  Gewichte zur Vereinfachung breitbandig für die 4. Ordnung eingesetzt und auf die bandweise Abstufung in [?] verzichtet.

### **Dekodierung zur Wiedergabe im CUBE**

Bei der Dekodierung werden aus der räumlichen Zerlegung der Schalldrucksignale die Lautsprechersignale für die gewählte Anordnung zusammengesetzt. Dafür wird die Allrad-Implementierung verwendet, welche in [3] beschrieben wird. Die dekodierten Lautsprechersignale werden anschließend mittels Reaper im CUBE wiedergegeben.



## 3 Kugellautsprecher

### 3.1 Bau

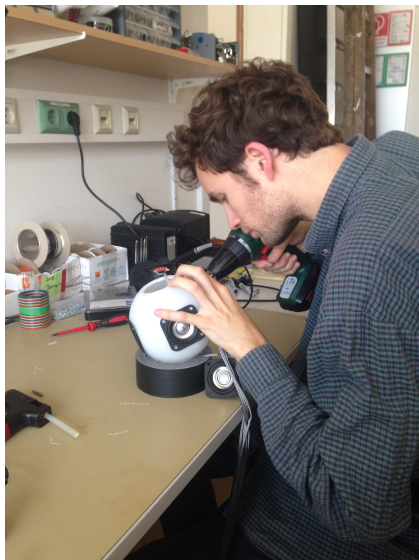
In diesem Teil der Laborübung wurde ein kleiner Kugellautsprecher mit 6 würfelförmig angeordneten Chassis gebaut. Der Durchmesser der Kugel beträgt ungefähr 14 cm. Als Chassis sind FOUNTEK FR58EX Chassis verbaut, welche ein Impedanz von  $8 \Omega$  und eine Leistung von 15 W haben. Der Hohlraum der Kugel wurde mit Absorbermaterial gefüllt, um die Ausbreitung von Wellen im inneren der Kugel und dadurch auftretende destruktive Interferenzen zu vermeiden. Die Chassis wurden mit Schrauben auf der Kugel befestigt und mit Acryl abgedichtet.



(a) einzelne Komponenten



(b) Absorbermaterial



(c) Fertigung



(d) Ergebnis

Um den Kugellautsprecher testen zu können, implementierten wir eine erste Ansteuerung in PD (s. Abb. 7). Diese enthält das Aufrufen einer Audiodatei, die Implementierung der Dekodermatrix, die Richtungsansteuerung und die Wiedergabe mittels Kugellautsprecher. Später ergänzten wir diesen Patch bei Hörproben um einen empirisch ermittelten Filter,

der Frequenzen unter 250 Hz anhebt, um Auslöschungseffekte auszugleichen. Außerdem ist die Rotation der Schallquelle um die Kugel automatisiert (s. Abb. 8).

Die Dekodermatrix

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.732 & 0 & -1.732 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.732 & 0 & -1.732 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.732 & -1.732 \end{bmatrix}$$

hat die Form einer 4x6-Matrix. Die erste Zeile enthält die omnidirektionale Ansteuerung, während die weiteren Zeilen die Dipole in die drei Hauptrichtungen darstellen. Die Norm jeder Zeile muss denselben Wert ergeben, um eine normierte Pegelansteuerung zu erhalten. Die Spalten repräsentieren die einzelnen Lautsprecher.

Die Richtungsansteuerung beinhaltet die Rotation um y- und z-Achse, wobei die Lage der LS-Chassis zu beachten ist (s. Abb. 6).



Abbildung 6: Anordnung der Lautsprecher auf der Kugel. LS 1-4 sind gegen den Uhrzeigersinn angeordnet (LS 3-4 sind nicht sichtbar).

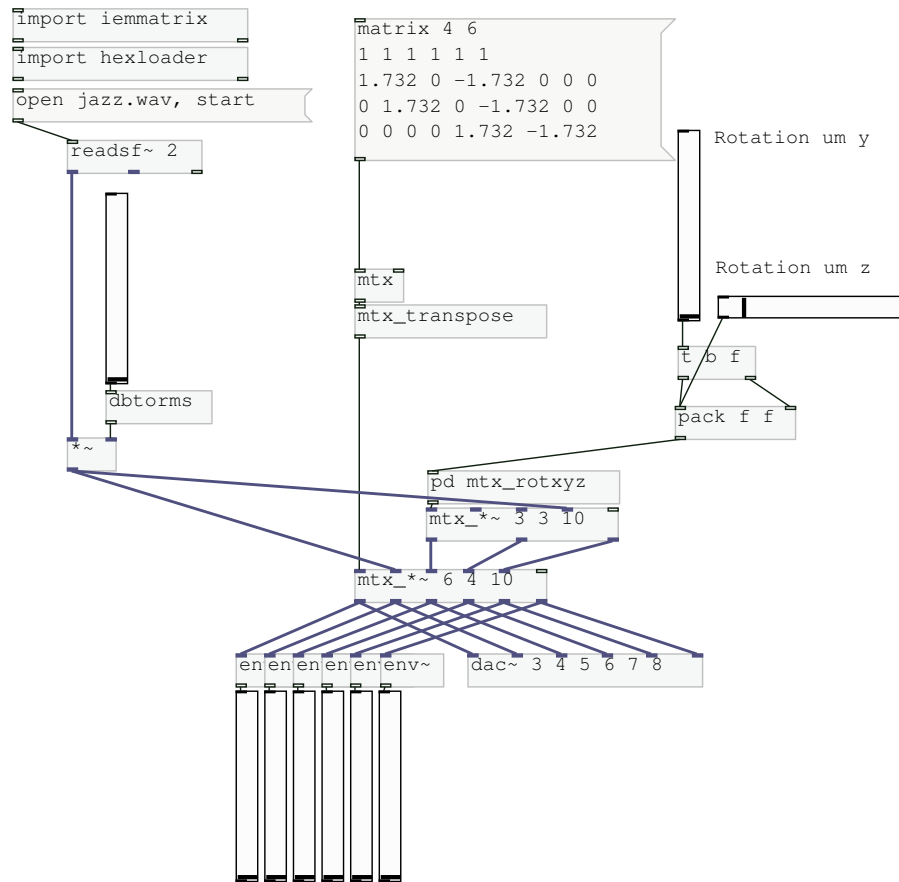


Abbildung 7: Pd-Patch zur Ansteuerung des Kugellautsprechers

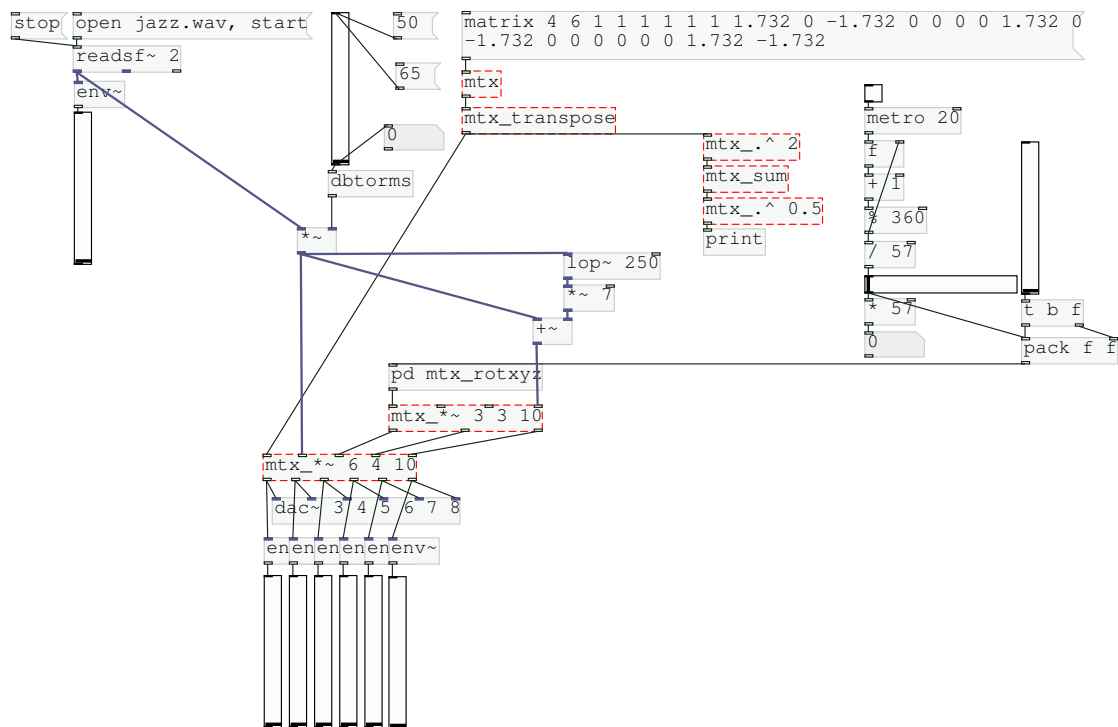


Abbildung 8: erweiterter Pd-Patch zur Ansteuerung des Kugellautsprechers

### 3.2 Messung

Um die Richtwirkung des Kugellautsprechers simulieren und untersuchen zu können, haben wir die richtungsabhängigen Impulsantworten aller sechs Lautsprecher gemessen.

Dazu haben wir im reflexionsarmen Raum am IEM ein halbkreisförmiges vertikales Mikrofonarray aus 18 Messmikrofonen mit kugelförmiger Richtcharakteristik verwendet. Da trotzdem Reflexionen von den Begrenzungsflächen zu erwarten sind, wurden die gemessenen Impulsantworten auf die Zeitspanne begrenzt, bevor die Reflexionen am Mikrofon ankommen. Auf diese Weise erhält man anechoische Impulsantworten, gleichzeitig wird jedoch die Frequenzauflösung reduziert. Der Messaufbau ist in Abb. 9 zu sehen. Der Lautsprecher stand auf einem Drehteller, der in  $10^\circ$ -Schritten gedreht wurde. Somit haben wir

$$6 \text{ Lautsprecher} \times 18 \text{ vertikale Positionen} \times 35 \text{ horizontale Positionen} = 3780$$

Impulsantworten erhalten.

Die Eingangspegel der Mikrofone wurden kalibriert, indem die vom Kalibrator erzeugten Pegel aufgenommen und daraus eine Kalibrationsdatei erzeugt wurde, die in die Messung einging.

Zur Messung der Impulsantworten haben wir logarithmische Sinussweeps verwendet, die in Matlab erzeugt wurden. Die Startfrequenz betrug 20 Hz, die Stopfrequenz 22 kHz

(entspricht der halben Abtastrate), bei einer Sweepdauer von einer Sekunde pro Sweep. Es werden 6 Sweeps (einer pro Lautsprecher) hintereinander abgespielt. Die Impulsantworten wurden im Frequenzbereich durch Entfaltung der Sweep-Antwort des Lautsprechers mit dem ursprünglichen Messsignal berechnet.

In Abb. 10 ist der Pd-Patch zu sehen, den wir zur automatisierten Durchführung der Messung und zur Ansteuerung des Drehtellers verwendet haben. Dieser verwendet das zuvor erzeugte Messsignal, gibt es nacheinander über die sechs Lautsprecher wieder, zeichnet die erhaltenen Signale an den 18 Mikrofonpositionen auf und dreht den Drehteller um  $10^\circ$ . Der verwendete Patch wurde von einer früheren Laborgruppe übernommen.

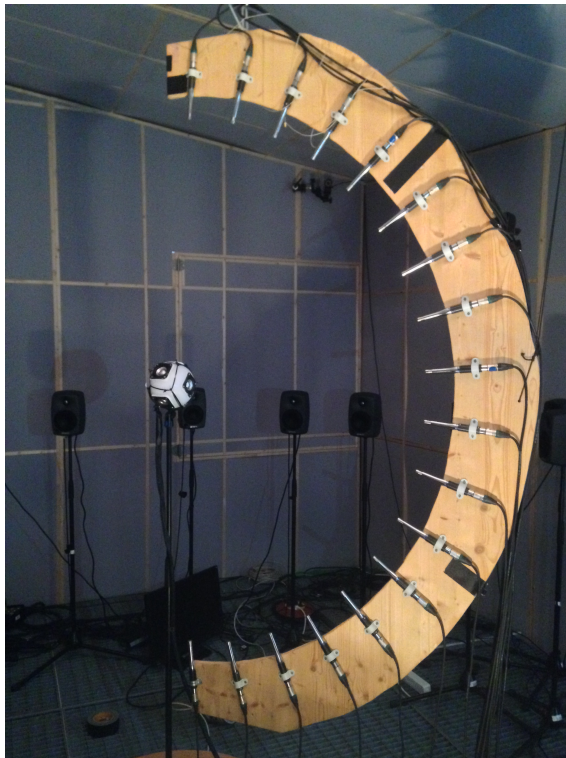


Abbildung 9: Messaufbau.

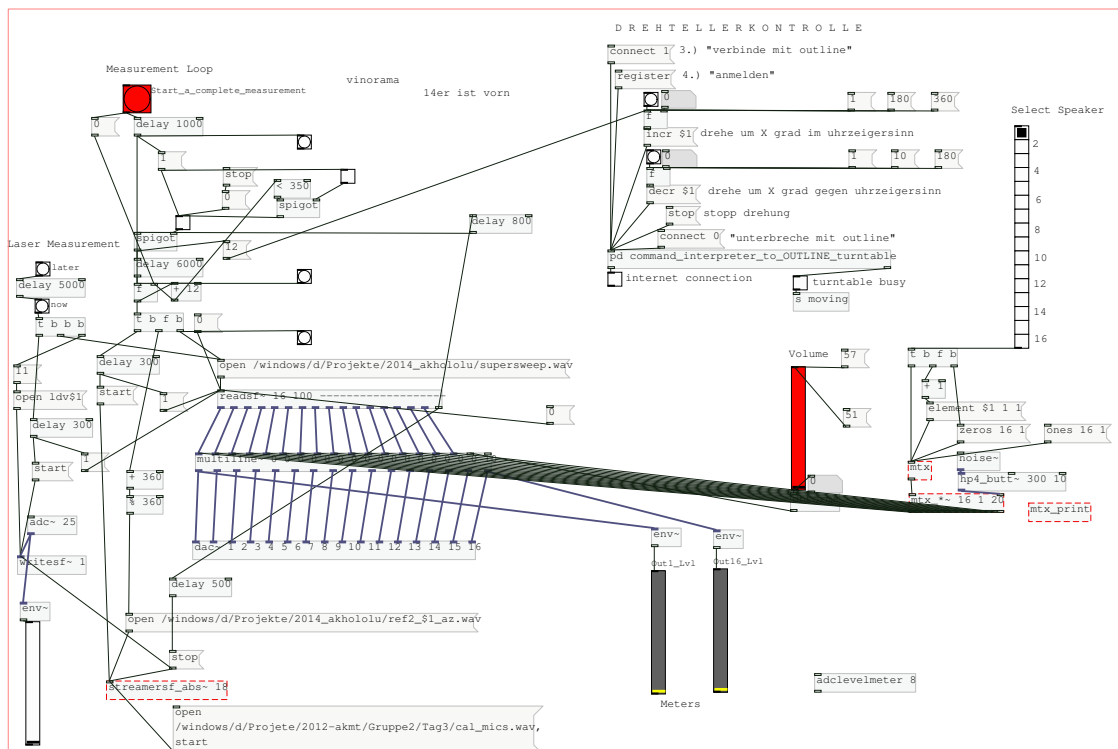


Abbildung 10: Pd-Patch zur automatisierten Durchführung der Messung und Ansteuerung des Drehtellers.

### 3.3 Auswertung

Aus den gemessenen Impulsantworten lassen sich frequenzabhängige Richtmuster sowohl für die Einzellautsprecher als auch Kombinationen erzeugen. Dafür werden die Impulsantworten geladen und für die gewünschte Frequenz demoduliert. Die Monopol/Dipolcharakteristik wird durch Superposition und Gewichtung der gemessenen richtungsabhängigen Impulsantworten erzeugt. Die  $18 \times 36$  Messpunkte werden direkt als Ballondiagramm aufgetragen. Abb. 11 zeigt eine Monopolansteuerung, sowie Dipole in die verschiedenen Richtungen. Zu beachten ist, dass der Lautsprecher bei der Messung gedreht war (s. Abb. 9).

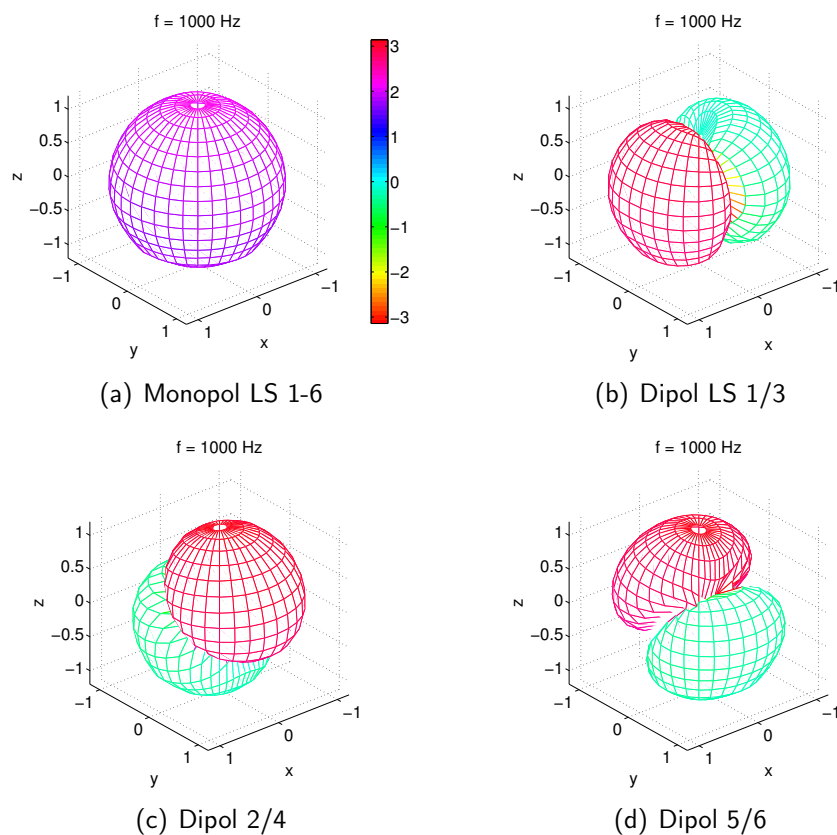


Abbildung 11: Grundlegende Richtmuster des Kugellautsprechers (der Lautsprecher war um die  $y$ -Achse um  $45^\circ$  gedreht) normiert auf 30 dB. Die Farbe kodiert die Phase von  $-\pi$  bis  $\pi$ .

In Abb. 12 sieht man den Monopol bei steigenden Frequenzen und gleichphasiger Ansteuerung. Ab etwa 2000 Hz beginnt die Kugel aufzubrechen, da die einzelnen Lautsprecher bei höheren Frequenzen stärker richten und die räumliche Auflösung bei hohen Frequenzen durch den großen Abstand zwischen den Lautsprechern nicht mehr gegeben ist (vgl. Abtasttheorem). Der Maximalabstand für eine saubere Schallabstrahlung ergibt sich durch

$$d_{max} < \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

Bei einem ungefähren Abstand von 10 cm ergibt sich daraus eine Grenzfrequenz von 1700 Hz, was mit obigen Beobachtungen übereinstimmt. Der Effekt der Richtwirkung der einzelnen Lautsprecher beginnt auch in diesem Frequenzbereich, kommt jedoch erst bei höheren Frequenzen wirklich zum Tragen (ab ca. 5 kHz). Das ist auch aus der Bedingung für die Kolbenmembran

$$k_{R,Membran} > 1 \quad (5)$$

ersichtlich.

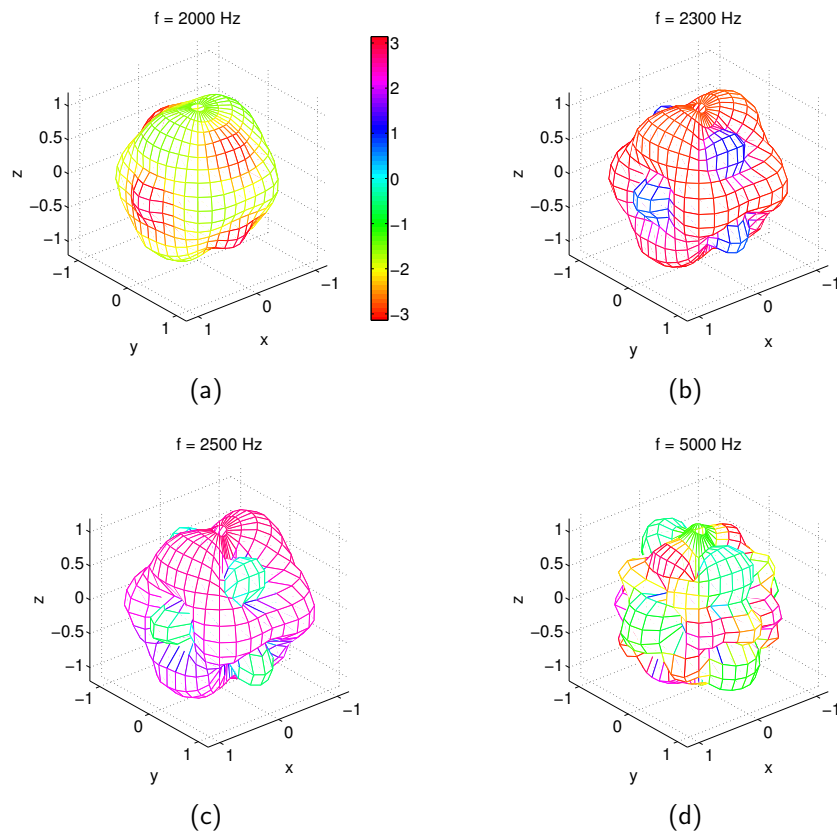


Abbildung 12: Gleichphasige Ansteuerung (Kugelcharakteristik) für steigende Frequenzen. Die Farbe kodiert die Phase von  $-\pi$  bis  $\pi$ .

Bei tiefen Frequenzen lässt sich ebenfalls kein definiertes Richtmuster durch Überlagerung von Monopol und Dipolen erzeugen. Wie aus Abb. 13 entnommen werden kann, ist der Pegel der Dipole bei tiefen Frequenzen gering. Ein Grund dafür ist, dass bei großen Wellenlängen im Vergleich zum Kugeldurchmesser ein großer Teil des abgestrahlten Schalls auf der Dipolachse durch gegenphasige Überlagerung ausgelöscht wird. Dieser Effekt ist eigentlich nur in der Normalrichtung erwünscht.



Ein weiterer Effekt ist der nicht konstante Frequenzgang der Lautsprecher an sich.

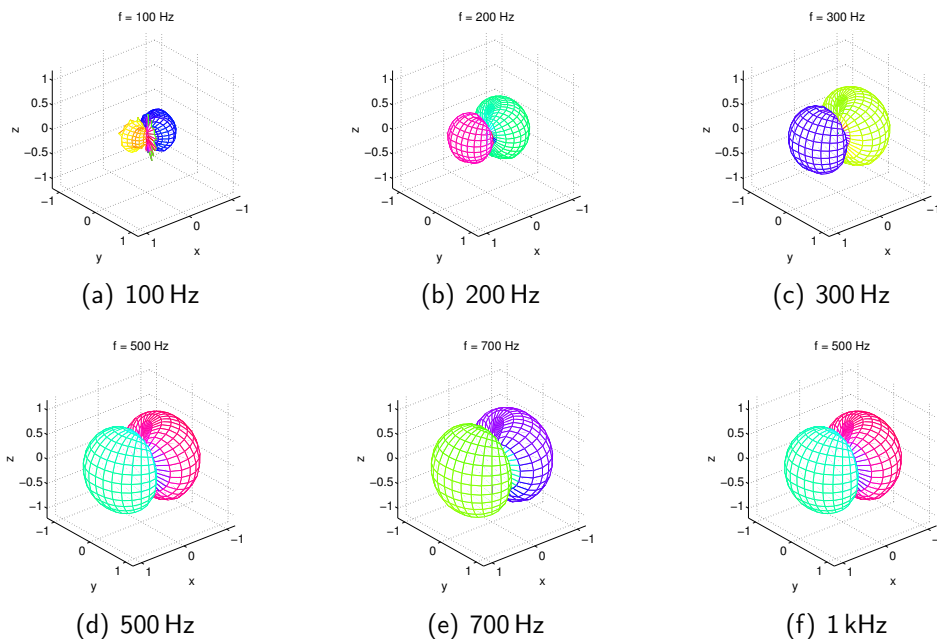


Abbildung 13: Dipolcharakteristik bei steigender Frequenz.

Abb. 14 kann entnommen werden, dass in Richtung einer Lautsprecherachse Beamforming zur Erzeugung eines Richtmusters mittels Überlagerung von Monopol und Dipolen mit dem Kugellautsprecher, sowohl für tiefe als auch für hohe Frequenzen, gut funktioniert (linke Seite). Lässt man das Richtmuster jedoch nicht in Richtung einer Lautsprecherachse zeigen, wird das Richtmuster mit steigender Frequenz zunehmend ungenauer und man erkennt die Positionen der einzelnen Lautsprecher im Richtdiagramm, wie in Abb. 14(d) zu sehen. Um, wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, Auslöschungseffekten entgegenzuwirken, wird ein Radialfilter implementiert, der zu einer Verstärkung der Dipolfrequenzgänge unter 250 Hz führt. Für tiefe Frequenzen funktioniert Beamforming auch off-axis gut, wobei natürlich immer noch oben genannte Einschränkungen bei tiefen ( $< 100$  Hz) und hohen Frequenzen ( $> 2$  kHz) gelten.

Zum Kugellautsprecher ist außerdem anzumerken, dass bei Monopol/Dipol Ansteuerung nur relativ geringe Pegel möglich sind, da der Hub der Membranen hierbei schnell an Grenzen stößt. Im Vergleich zu einer Kugelcharakteristik geht hier einiges an Ausgangsleistung verloren, wie wir beim Probehören des Lautsprechers feststellen konnten. Subjektiv war die Richtwirkung des Lautsprechers je nach Abhörposition und Raum stellenweise erstaunlich gut ausgeprägt, vor allem wenn genügend Reflektierende Oberflächen vorhanden waren.

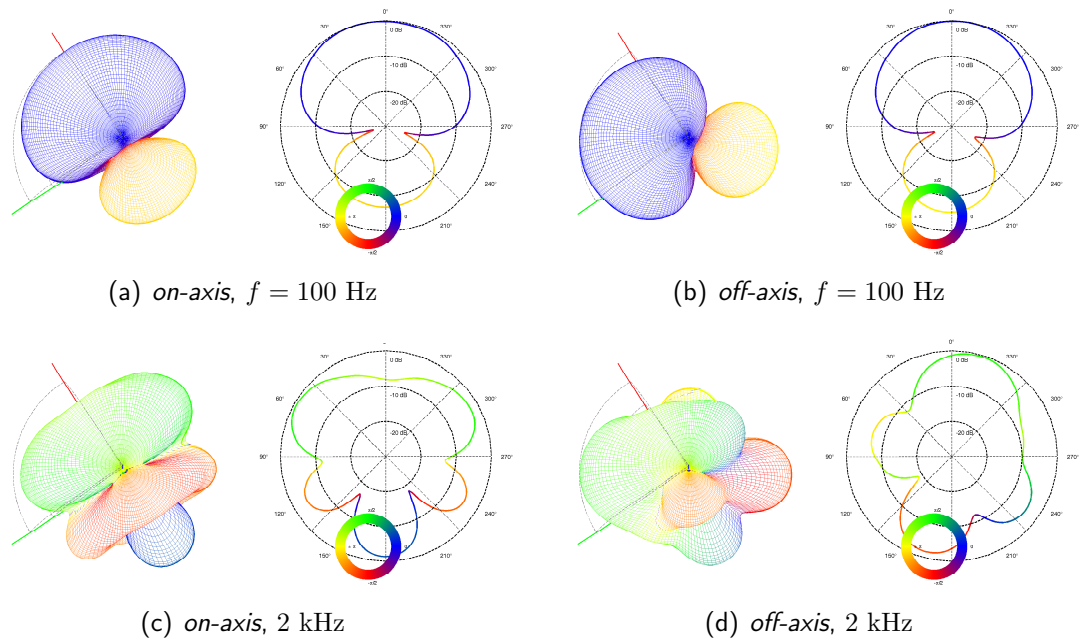


Abbildung 14: Beamforming bei tiefen und hohen Frequenzen. *links*: Abstrahlrichtung liegt in der 1-3-Dipolachse; *rechts*: Abstrahlrichtung in der horizontalen Ebene um ca.  $45^\circ$  zur Dipolachse verschoben.

## 4 Zusammenfassung

Abschließend zusammengefasst: wir haben in dieser Laborübung Möglichkeiten zur Implementierung eines ambisonischen Wiedergabesystems betrachtet und dabei die Vorteile der Radialfilterung und einer  $\max-r_E$  Gewichtung kennengelernt. Außerdem wurde ein Vergleich zwischen Aufnahmen mit verschiedenen 3D-Mikrofonen angestellt sowie ein kompakter Kugellautsprecher gebaut und vermessen. Aus den gemessenen Impulsantworten konnten verschiedene Richtcharakteristiken simuliert werden. Dadurch war es möglich die Grenzen im Frequenzbereich innerhalb derer der Lautsprecher wie gewünscht funktioniert in der grafischen Darstellung zu betrachten. Von der Funktionsweise des Lautsprechers konnten wir uns auch mittels Hörproben von Rauschen und Musiksignalen überzeugen.

## Literatur

- [1] M. Brandner, "Richtungsdetektion mit dem Eigenmike Mikrofonarray - Messung und Analyse," Bachelorarbeit, Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz, 2013.
- [2] S. Loesler and F. Zotter, "Comprehensive Radial Filter Design for Practical higher-order Ambisonic Recording." DAGA, 2015.
- [3] F. Zotter and M. Frank, "All-round ambisonic panning and decoding," *J. Audio Eng. Soc*, vol. 60, no. 10, pp. 807–820, 2012.