

Akustische Holografie und Holofonie

Laborübung Nr. 2

„Eigenmike“

SS 2013

Labortermin:

22.05.2013 – 28.05.2013

Bearbeiter:

Buchegger, Blasius

Hack, Philipp Alexander

Keller, Ben-Daniel

Betreuer:

DI Dr.rer.nat Franz Zotter



INHALTSVERZEICHNIS

1: EINLEITUNG	3
2: MESSAUFBAU	3
3: MESSUNG	6
4: MATLAB-IMPLEMENTIERUNG	6
Entfaltung.....	7
Schneiden und Fenstern	7
Referenzsignal.....	8
Ermittlung des Wellenspektrums.....	8
Holografiefilter	9
SH Interpolation	10
5: Messergebnisse	11
Richtcharakteristik der Mikrofonkapseln.....	11
Beamforming	12
6: SCHLUSSFOLGERUNG	15

1: EINLEITUNG

Ziel dieser Laboreinheit war es, sowohl die Richtcharakteristiken der Eigenmike-Kapseln zu vermessen als auch die Eignung des Arrays für Beamforming zu untersuchen. Es wurde ein Messaufbau erstellt, in dessen Zentrum das Eigenmike in einer Auflösung von 10° im Azimut und $11,25^\circ$ im Polarwinkel vermessen wurde. Ziel der Messung war es, eine Aussage über die Qualität der Mikrofonkapseln zu ermöglichen, sowie die Anwendung holografischer Algorithmen zu untersuchen.

Das Eigenmike stellt ein qualitativ hochwertiges Mikrofonsystem dar, bei dem in einer schallharten Kugeloberfläche 32 Mikrofonkapseln eingearbeitet sind. Auch nachfolgend notwendige Verstärkerschaltungen und A/D-Wandler sind in das Gehäuse eingebettet. Die digitalen Mikrofonsignale werden über Netzwerkkabel und Firewire-Interface einem Rechner zugeführt und in Pure Data aufgezeichnet.



Abb. 1.1: Eigenmike der Firma „mh acoustics“

2: MESSAUFBAU

Die Messung wurde im „CUBE“ des Institutes für Elektronische Musik und Akustik der Kunstuniversität Graz durchgeführt.

Um die Winkelauflösung im Polarwinkel zu erhalten, wurden 16 Tropfenlautsprecher in einem kreisrund geformten Metallgestell befestigt. Der Abstand bzw. der Radius der einzelnen Lautsprecher bezüglich des Zentrums betrug etwa 1,5 m. Mittels zweier Flaschenzüge wurde das Gestell an der Decke des Raumes befestigt.

Um eine lotrechte Ausrichtung der Achse der Halbkreisordnung sicherzustellen, wurde ein Lot verwendet. Die Drehung in der Halbkreisebene wurde mittels der zwei Flaschenzüge und der seitlichen Kippwinkel der Halbkreisebene durch einen am Fußboden befestigten Faden justiert.

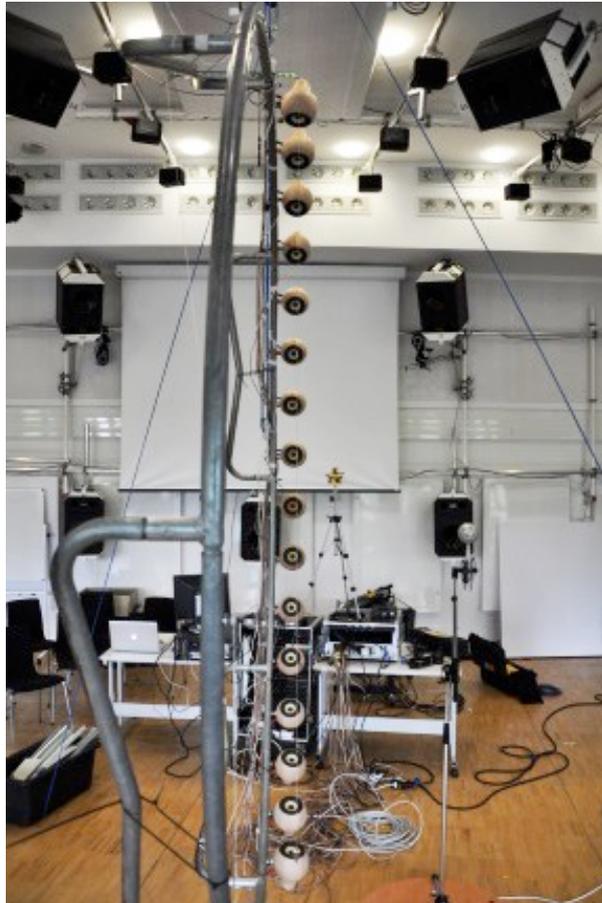


Abb. 2.1: Metallgestell mit monierten Lautsprechern



Abb. 2.2: Ausrichten des Aufbaus mittels Lot

Um die Winkelauflösung im Azimut zu erhalten wurde ein Drehteller der Firma „Outline“ mit der Bezeichnung „ET250-3D“ verwendet. Mit einer Netzwerkverbindung wurden die benötigten Winkel über Pure Data eingestellt.



Abb 2.3: Drehteller der Firma „Outline“

Das Eigenmike wurde auf ein passendes Mikrofonstativ montiert und dieses auf dem Drehteller im Zentrum der Anordnung aufgestellt. Die exakte Ausrichtung erfolgte ebenfalls mittels Lot und Laser-Wasserwaage.

3: MESSUNG

Für die Messung wurden zwei Rechner parallel betrieben. Über einen Linux-Rechner mit Pure Data wurde das Anregungssignal in die Messkette geleitet. Ein dazu synchronisiertes MacBook Pro nahm dann die empfangenen Signale des Eigenmikes auf. Infolge des oben beschriebenen Aufbaus konnten aus 32 Mikrophonkapseln an 16 Elevationswinkel und 30 Azimutwinkel insgesamt 18432 Richtungsimpulsantworten bestimmt werden.

Die Richtungsimpulsantworten wurden mit der exponentiellen Sweep-Methode ermittelt. Diese ist unempfindlich gegenüber harmonischen Verzerrungen.

$$f_{start} = 50 \text{ Hz}$$

$$f_{stop} = \frac{f_s}{2} = \frac{44.1 \text{ kHz}}{2} = 22.05 \text{ kHz}$$

$$x(t) = \sin\left[A(e^{\frac{t}{\tau}} - 1)\right]$$

$$A = \frac{T \omega_1}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})}, \tau = \frac{T}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})}$$

Die resultierenden Impulsantworten können mittels Entfaltung aus den Sweepantworten ermittelt werden.

4: MATLAB-IMPLEMENTIERUNG

Holografie Quellstärkeverteilung Einstrahlung (mit fester Mikrophonkugel)

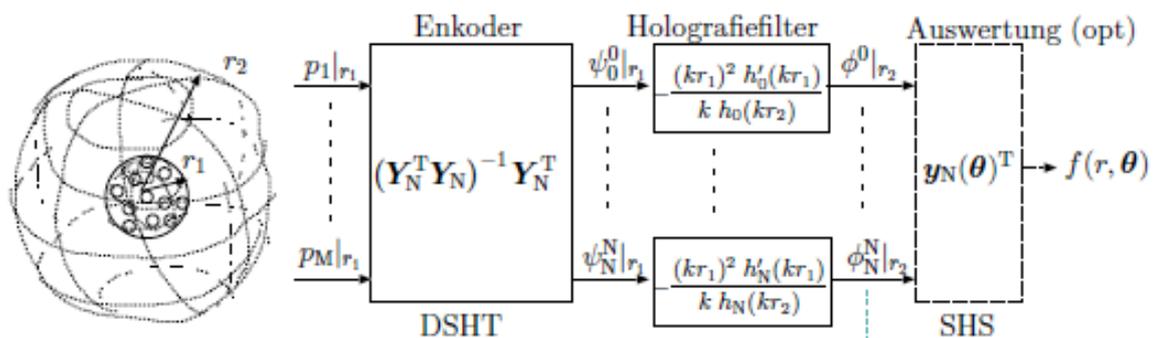


Abb. 4.1: Prinzipschaltbild der Signalverarbeitung

Entfaltung

Die Aufzeichnung der Sweepantworten erfolgt an den 32 Mikrofonen parallel und an 16 Elevationswinkeln pro Azimutwinkel (insgesamt 30). Die aufgenommenen Sweepantworten werden als Matrix H eingelesen. Diese wird Fourier-transformiert und durch eine Matrix der Fourier-transformierten Lautsprechereingangssignale dividiert. Damit werden die Impulsantworten berechnet (Entfaltung).

Schneiden und Fenstern

Die sequentiell gemessenen Impulsantworten pro Aufzeichnung werden auf die 16 Lautsprecher zerstückelt (16x32 Impulsantworten), und auf eine Länge von 160 Samples geschnitten. Es wurde die simulierte Freifeldmessung angewandt: Vor Eintreffen der ersten Reflexion (hier vom Drehteller) wird die Impulsantwort abgeschnitten. Dann wird die Impulsantwort mit einem halben Hann-Fenster ein- und ausgeblendet. Für eine Länge von 160 Samples ergibt sich eine untere Grenzfrequenz von 275 Hz, darunter kommt es zu Abweichungen im Frequenzgang. Diese Impulsantworten werden als Matrix P gespeichert (Dimension: 160x16x32x30).

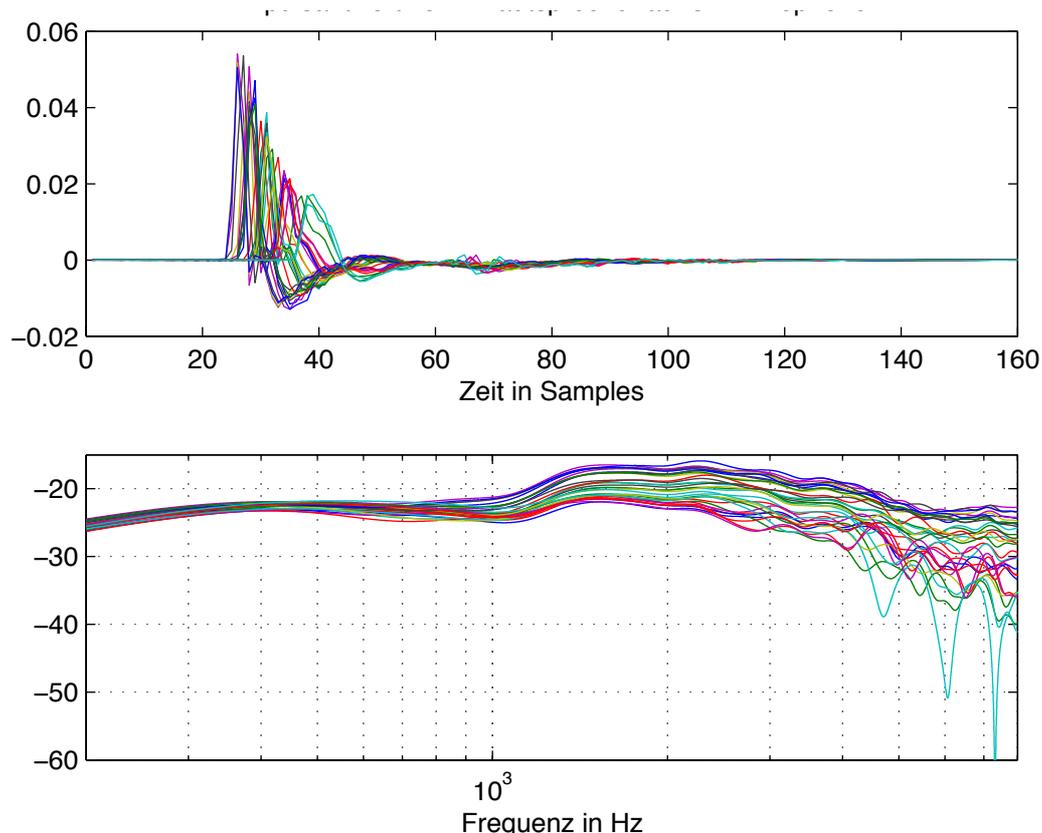


Abb. 4.2: Impulsantworten am Eigenmike für eine Lautsprecherposition.

In Abb. 4.2 sind verschiedene Laufzeit und Frequenzgänge der unterschiedlichen Beugungswege zur und um die Kugeloberfläche der Mikrofonanordnung erkennbar. Die Impulsantworten sind hier noch nicht entzerrt, der Frequenzgang des Lautsprechers ist in den dargestellten Frequenzgängen noch enthalten.

Referenzsignal

Es wurde ein Referenzsignal mit einem Messmikrofon aufgenommen, um den Frequenzgang der Messlautsprecher zu entzerren.

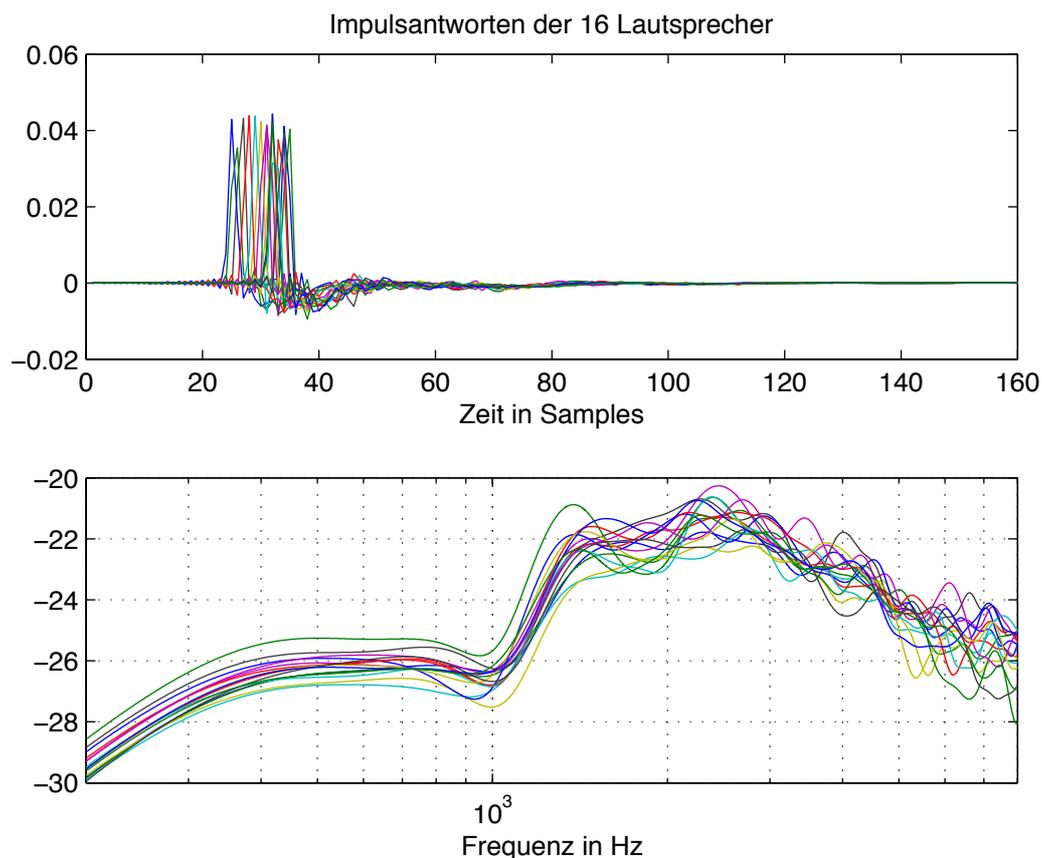


Abb. 4.3: Impulsantworten der 16 Lautsprecher auf das Messmikrofon

Ermittlung des Wellenspektrums

Mit Hilfe der diskreten Transformation in Kugelflächenfunktionen (d.h. spherical harmonics, SH) wird nun für eine gewünschte Frequenz das sphärische Wellenspektrum berechnet. Die Fourier-transformierte der gemessenen Impulsantworten am Eigenmike (Matrix P) wird hierbei durch ein Inprodukt mit einer komplexen Exponentialfunktion an der gewünschten Frequenz erzeugt. Für die ausgewählte Frequenz wird der Wert der Frequenzgänge des Eigenmikes durch den Wert der Referenzmessung (Fourier-Transformation des Referenzsignals) dividiert (spektrale Division). Dies geschieht für jeden Lautsprecher und alle Positionen. Somit sind im

Folgendes die Frequenzgänge entzerrt. Mit der inversen SH-Matrix (enthält die an den Mikrofonwinkeln ausgewertete Kugelflächenfunktionen) kann anschließend von den gemessenen Schalldrücken am Eigenmike (bzw. deren berechneten Fouriertransformierten an einer Frequenz) auf das sphärische Wellenspektrum rückgerechnet werden. Die maximale Ordnung des sphärischen Wellenspektrums ist dabei durch die Anzahl der Mikrofone des Eigenmike bestimmt. Für eine Ordnung N , benötigt man $(N + 1)^2$ Mikrofonpositionen. Für das Eigenmike ergibt sich somit eine maximale Ordnung $N=4$.

Holografiefilter

Mit folgender Filterfunktion kann das sphärische Wellenspektrum an der Außenfläche des Eigenmikes auf ein Quellspektrum umgerechnet werden. Darin treten Hankelfunktionen zweiter Art und ihre Ableitungen auf.

$$G_n(kR) = -\frac{kr_E^2 \cdot h_n'(kr_E)}{h_n(kR)}$$

Bei einem Radius von 1,5 m ergeben sich folgende Betragsfrequenzgänge:

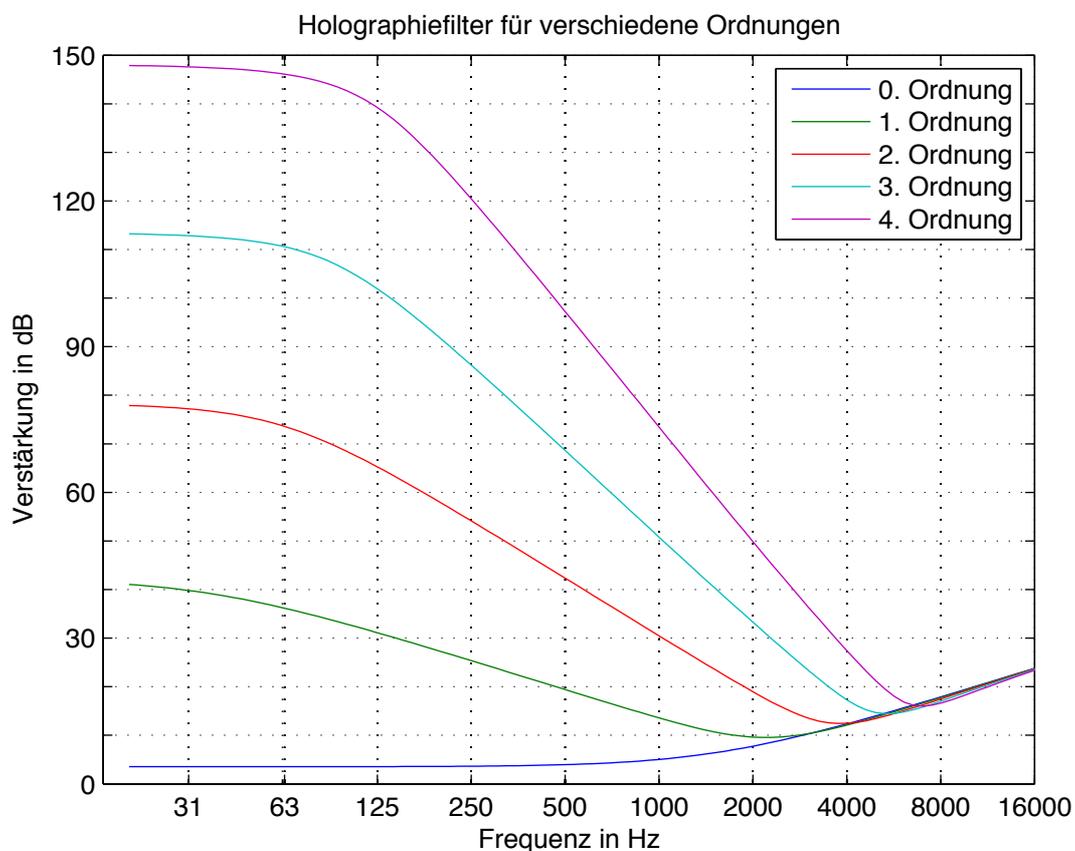


Abb. 4.4: Amplitudengang der Holografiefilter für verschiedene Ordnungen ($N=0, \dots, 4$)

Abb. 4.4 zeigt bei hohen Ordnungen eine unzulässig hohe Verstärkung tieffrequenter Signale. Für stabile Holografiefilter werden hohe Ordnungen bei tiefen Frequenzen ausgeblendet und eine Reduktion der örtlichen Auflösung in Kauf genommen. Sobald die Verstärkung Werte über 30 dB verlangt wird jeweils um eine Ordnung reduziert. Die Frequenzen für die schrittweise von 4000 Hz, 2000 Hz, 1000 Hz und 150 Hz.

Bei Frequenzen größer $k r_M = N$ tritt zudem räumliches Aliasing auf. Das bedeutet, dass die Funktion auf der Kugeloberfläche ab dieser Frequenz in dieser Ordnung nicht mehr korrekt dargestellt werden kann. Die tatsächliche räumliche Auflösung wird in die verwendete Ordnung hineingespiegelt. Das erklärt den Anstieg der holografischen Funktionen (Abb. 1.8) ab bestimmten Frequenzen. Für das Eigenmike mit dem Radius von $r_M = 4,2$ cm ergibt sich mit der 4. Ordnung eine räumliche Aliasfrequenz von 5,2 kHz.

SH Interpolation

Zunächst werden die Werte der 480 Lautsprecherpositionen mit Ordnung 14 in spherical harmonics transformiert. (Die SH-Transformationsmatrix hat eine Konditionszahl von 3,7) Um die Ergebnisse im Ortsbereich zu sehen (Ballondiagramm) wird das sphärische Wellenspektrum rücktransformiert. Für eine schönere Darstellung wird dabei fein interpoliert (80 Punkte in Elevation und 150 in Azimut).

5: Messergebnisse

Richtcharakteristik der Mikrofonkapseln

Die einzelnen Mikrofonkapseln des Eigenmikes weichen zu hohen Frequenzen deutlich von der Kugelcharakteristik ab. Dies ist zu einem großen Teil Ursache des abschattenden schallharten Körpers.

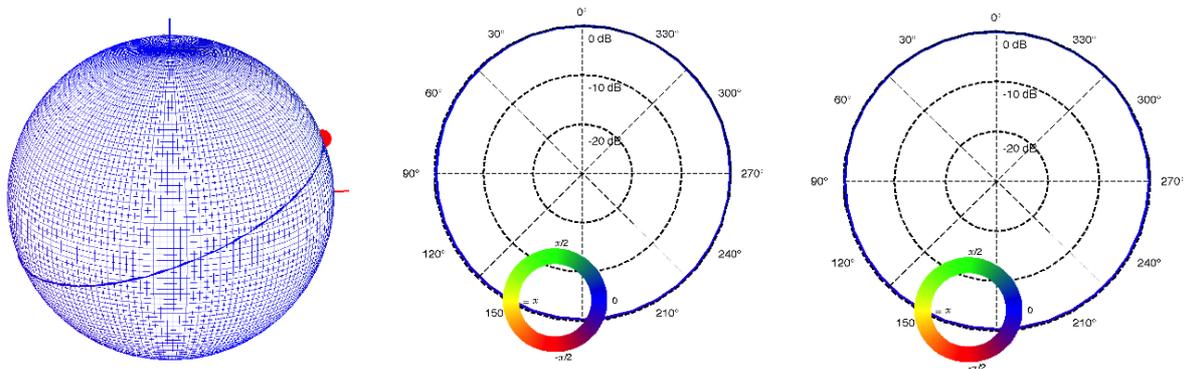


Abb. 5.1: Richtcharakteristik der Mikrofonkapsel 2 bei 300 Hz:
Ballondiagramm (links), Schnitt horizontal (mitte), Schnitt vertikal (rechts)

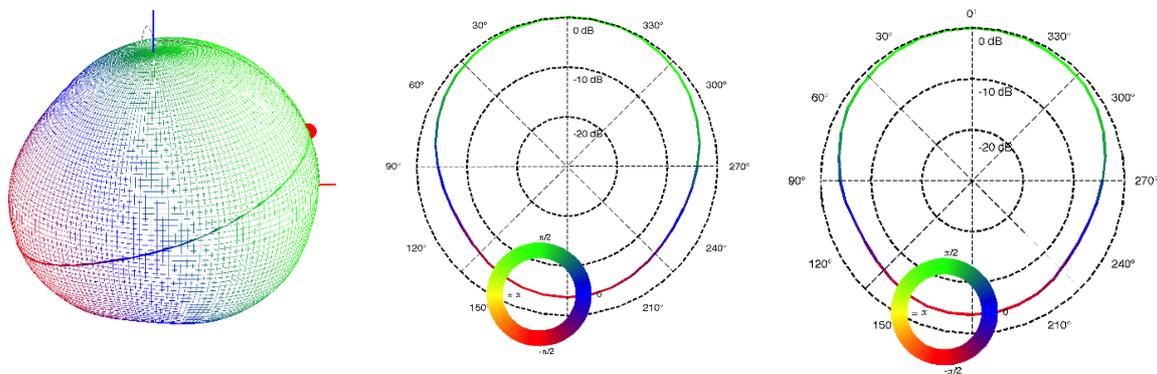


Abb. 5.2: Richtcharakteristik der Mikrofonkapsel 2 bei 1500 Hz:
Ballondiagramm (links), Schnitt horizontal (mitte), Schnitt vertikal (rechts)

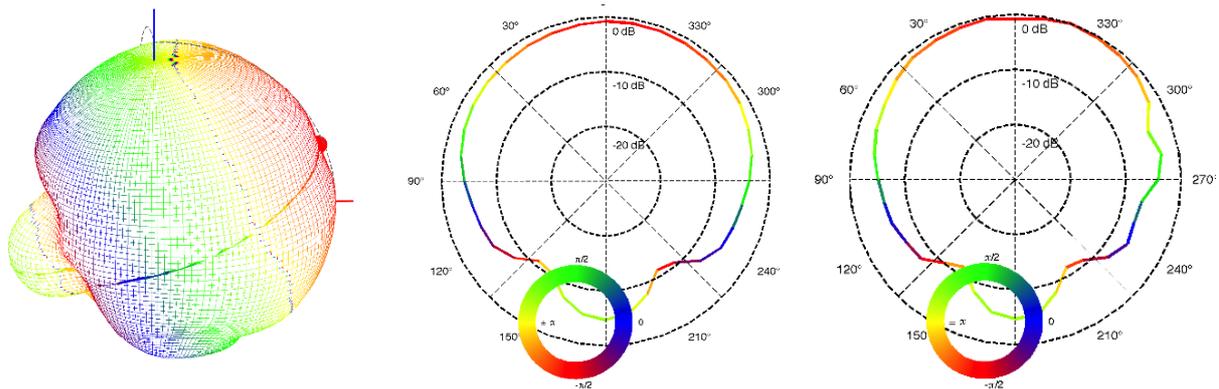


Abb. 5.3: Richtcharakteristik der Mikrofonkapsel 2 bei 4000 Hz:
Ballondiagramm (links), Schnitt horizontal (mitte), Schnitt vertikal (rechts)

Beamforming

Für das sphärische Beamforming wird gezeigt, wie sich die Reduktion der verwendeten Ordnung auf die Richtwirkung auswirkt. Die hohe Verstärkung bei tiefen Frequenzen verstärkt die Unterschiede der Kapseln soweit, dass dieser Fehler die Richtwirkung zerstört.

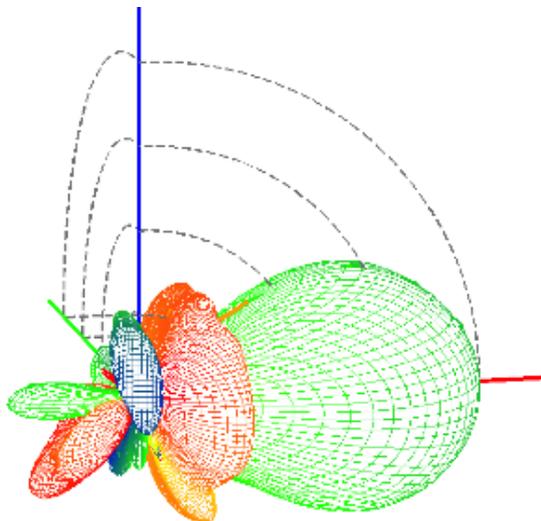


Abb. 5.4: Ballondiagramm des sphärischem Beamformings, erzeugte Richtkeule bei 4000 Hz (N=4)

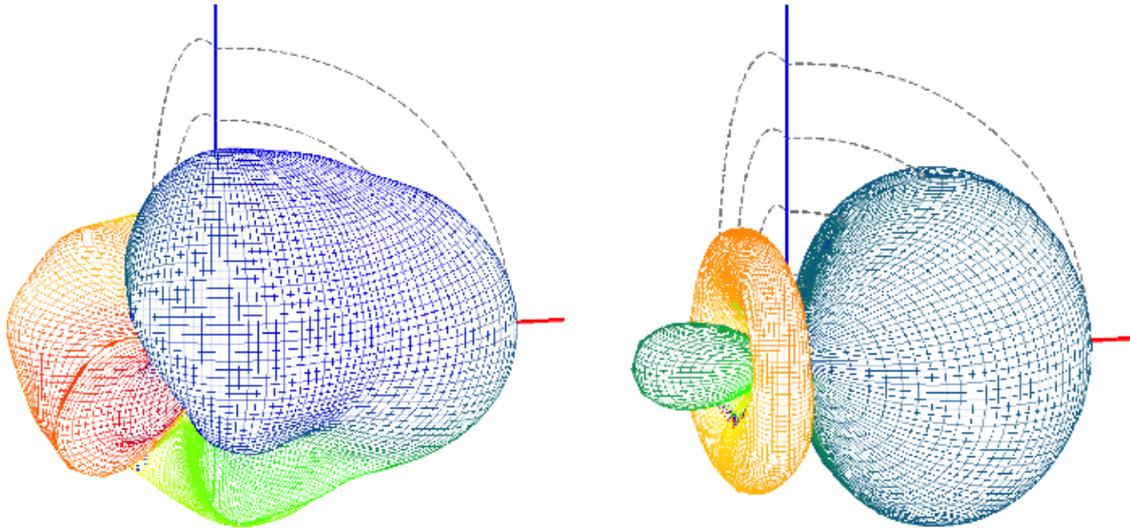


Abb. 5.5: Ballondigramme des sphärischem Beamformings, erzeugte Richtkeule bei 1500 Hz
links: N=4 und rechts: reduziert auf N=2

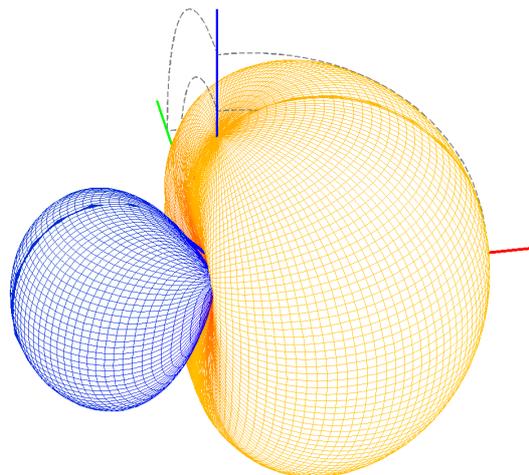


Abb. 5.6: Ballondigramme des sphärischem Beamformings, erzeugte Richtkeulen bei
1150 Hz. Links: N=1

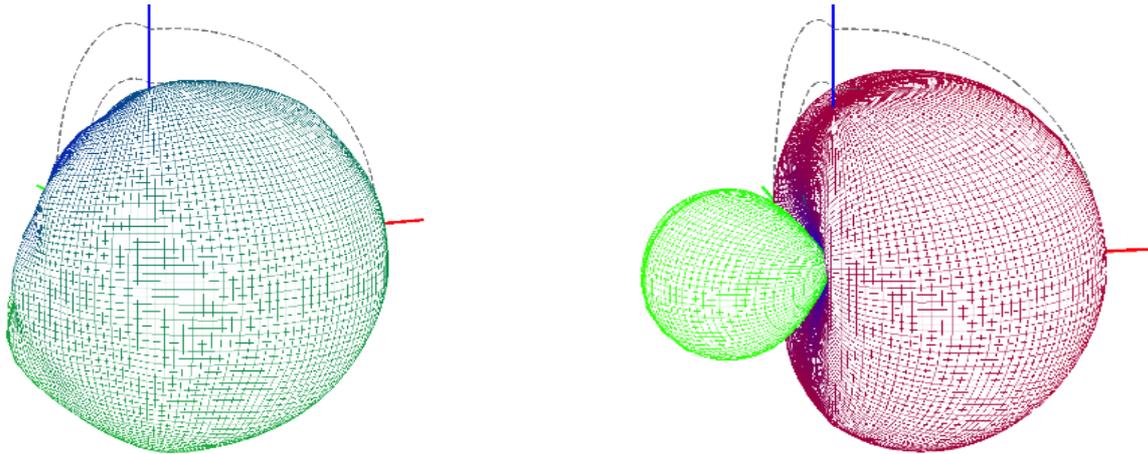


Abb. 5.7: Ballondigramme des sphärischen Beamformings, erzeugte Richtkeule bei 300 Hz
links: $N=4$ und rechts: reduziert auf $N=1$

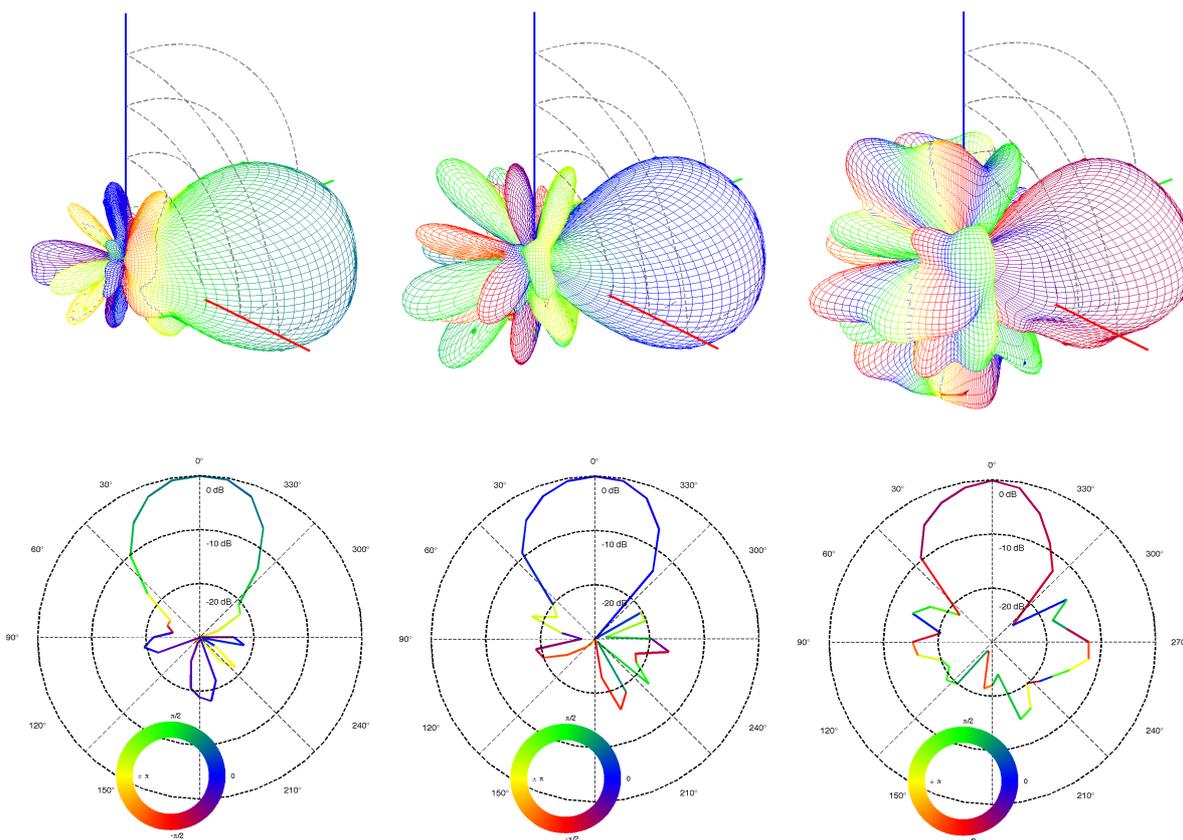


Abb. 5.8: Ballondigramm des sphärischen Beamformings: Einfluss von räumlichem Aliasing bei hohen Frequenzen, $f=6210\text{Hz}$ (links), $f=8190\text{Hz}$ (Mitte), $f=9950\text{Hz}$ (rechts) für Ordnung $N=4$. Ab einer Frequenz von 5200Hz tritt für das Eigenmike räumliches Aliasing auf.

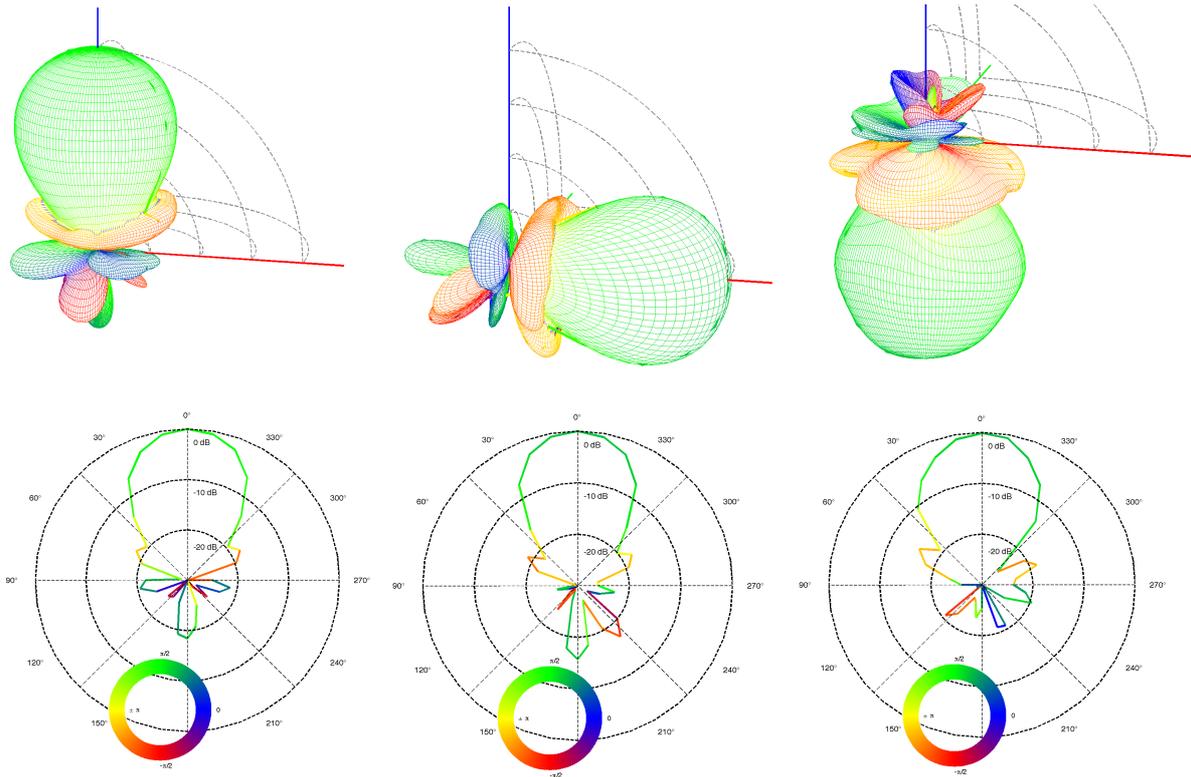


Abb. 5.9: Ballondiagramm des sphärischen Beamformings: Richtkeulen für verschiedene Elevationswinkel für Ordnung $N=4$ bei einer Frequenz von 4450 Hz

6: SCHLUSSFOLGERUNG

Mit dem Eigenmike funktioniert das sphärische Beamforming gut, die Form der Richtkeule bleibt über alle Steuerungsrichtungen erhalten. Die Verstärkung aus den inversen Holografiefiltern könnte sogar auf 40 dB statt der verwendeten 30 dB vergrößert werden. Die Richtkeule zeigt dabei eine noch akzeptable Form. Die Abstimmung der einzelnen Kapseln ist daher nicht so schlecht wie ursprünglich angenommen. Die theoretisch berechnete Grenzfrequenz für räumliches Aliasing konnte in der Messung bestätigt werden.

Das Limit des Eigenmike ist die geringe mögliche Ordnung bei einem relativ großen Radius. Eine höhere Ordnung oder ein geringerer Radius verschiebt die Grenzfrequenz für Aliasing nach oben. Für eine gute räumliche Auflösung bei tiefen Frequenzen braucht man dann aber eine höhere Verstärkung, noch besser abgestimmte Kapseln würden eine mögliche Verstärkung von über 40 dB erlauben.