

Messung der Richtcharakteristik der Eigenmikekapseln

Laborprotokoll, Akustische Messtechnik 2 LU

Harald Ziegelwanger (0673086)
Christian Sobtzick (0373076)

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, Juni 2011



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Die Richtcharakteristiken der Eigenmikrokapseln werden gemessen und untersucht. Dafür wird ein Messaufbau konstruiert, indem Schalleinfallrichtungen mit einer Auflösung von 10° im Azimut und 11.25° im Polarwinkel möglich sind. Die Lage des Eigenmike wird nach der Messung durch Phasenkorrektur im Zentrum der Messanordnung nachjustiert. Nach der Korrektur erweisen sich die Richtcharakteristiken der einzelnen Kapseln als ziemlich ähnlich bis identisch. Zur Beurteilung der Phasenkorrektur wird die Quellstärkeverteilung für einzelne Schalleinfallrichtungen in Messentfernung mittels akustischer Holografie berechnet und mit den unbearbeiteten Messdaten verglichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Messaufbau	4
3	Equipment	6
3.1	Lautsprecher	6
3.2	Metallkonstruktion	6
4	Durchführung der Messung	6
5	Signalverarbeitung	8
5.1	Messung der Impulsantworten	8
5.2	Aufbereitung der Impulsantworten	9
5.3	Ballondiagramme	11
6	Richtcharakteristik der einzelnen Kapseln	12
7	Holografie	15
8	Fazit	18
A	Überprüfung der zeitlichen Korrektur	18

1 Einleitung

Das Eigenmike ist ein hochwertiges Mikrofonarray, entwickelt von der Firma mh acoustics. An der Oberfläche einer schallharten Kugel befinden sich 32 Mikrofonkapseln. Sowohl der Vorverstärker, als auch der 24Bit D/A-Wandler befinden sich direkt im Gehäuse.

Diese Messung soll zeigen, ob die Richtcharakteriken der einzelnen Kapseln identisch sind und wie gut die holografischen Algorithmen damit funktionieren.



Abbildung 1: Eigenmike¹

2 Messaufbau

16 Lautsprecher wurden äquidistant auf einer Metallkonstruktion befestigt. Diese wurde mit nicht unerheblichem Aufwand mit Hilfe eines Flaschenzuges an der Decke des CUBE (ComputerUnterstützte BeschallungsEinheit) am IEM aufgehängt und mittels eines Lots und zusätzlicher Verspannung zu den Seitenwänden senkrecht zum Boden ausgerichtet. Das Mikrofon selbst wurde im Mittelpunkt des Kreises aufgestellt und war dabei über ein Stativ mit einem Drehteller verbunden, welcher es ermöglichte, das Eigenmike in 10° Schritten zu drehen, um 16 * 36 Messpunkte auf einer Kugeloberfläche zu ansteuern.

1. Quelle: http://www.mhacoustics.com/mh_aoustics/mh_aoustics_files/shapeimage4.png



Abbildung 2: Messaufbau

3 Equipment

3.1 Lautsprecher

IEM-eigene Lautsprecher dienen zur Wiedergabe der Anregungssignale. In einem tropfenförmigen Holzgehäuse sitzt ein etwa 10cm großer Breitbandlautsprecher der Firma Vifa. Insgesamt 16 dieser Lautsprecher werden verwendet. Ein Rack mit 4 Stück 4-Kanal Endstufen dienen zur Verstärkung der Anregungssignale.



Abbildung 3: Tropfenlautsprecher

3.2 Metallkonstruktion

Der mit einem neuen Zweck angefreundete Rahmen eines ausrangierten Trampolins² dient zur Befestigung der Tropfenlautsprecher. Um nicht bei Rotation des Mikrofons 36 Mal aus der Richtung 0° und 180° Polarwinkel zu messen, beginnt die äquidistante Anordnung der Lautsprecher bei $\vartheta = 5.625^\circ$ und endet bei $\vartheta = 174.325^\circ$. Der Abstand der Lautsprecher beträgt 11.25° (siehe Abb. 4).

4 Durchführung der Messung

Die Messung selbst erfolgte vollkommen automatisiert. Dazu wurde das Anregungssignal von einem Linux-Rechner mit der Software PureData abgespielt und das Mikrophon-Signal mit einem Macbook Pro aufgenommen. Die Synchronisation der beiden Rechner erfolgte nicht nur über einen gemeinsamen Systemtakt, sondern auch über einen zusätzlichen Audiokanal, über den ein Dirac als Triggersignal für den Start der Aufnahme gesendet wurde.

Insgesamt wurden $32 \cdot 16 \cdot 36$ (Mikrofonanzahl \cdot Lautsprecheranzahl \cdot Mikrophonwinkel) Messungen durchgeführt. Für jeden Rotationsschritt des Eigenmikes wurden 32 Mikrofon-

² Das Institut für Elektronische Musik und Akustik und die LaborteilnehmerInnen danken DI Boris Müller für die freundliche Leihgabe dieser Vorrichtung.

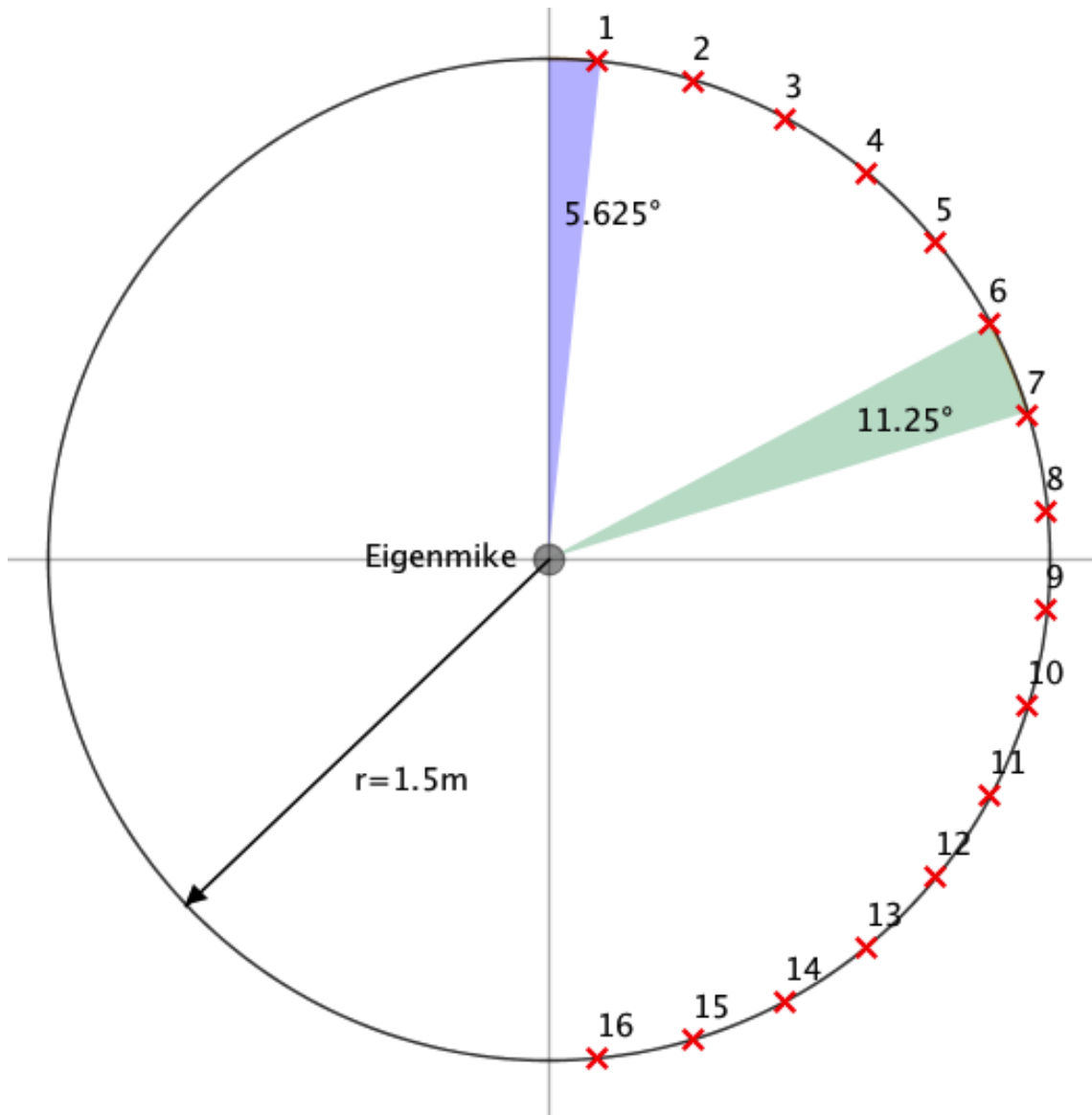


Abbildung 4: Skizze des Messaufbaus

signale für jeden der, über die 16 Lautsprecher, sukzessive wiedergegebenen Sweeps aufgenommen.

5 Signalverarbeitung

Im Folgenden werden die Messung und Aufbereitung der Impulsantworten und die Darstellung der Ergebnisse in Ballondiagrammen kurz erläutert.

5.1 Messung der Impulsantworten

Zur Messung der Impulsantworten der Übertragungswege von den Lautsprechern zu den einzelnen Mikrofonen wurde die Multiple Exponential Sweep Method [MBL07] verwendet. Diese bietet folgende Vorteile:

- das System wird mit mehr Energie angeregt als bei impulshafter Anregung, d.h. man erhält einen höheren Signal-Störabstand,
- die einzelnen Sweeps können überlappen, woraus eine kürzere Messdauer resultiert,
- harmonische Verzerrungen trennen sich bei dieser Messmethode zeitlich von der gesuchten linearen Systemantwort und können durch geeignete Fensterung entfernt werden.

Start- und Endfrequenz der Sweeps wurden mit 50 und 22050 Hz gewählt und eine Sweepdauer von einer Sekunde festgelegt. Abb. 5 zeigt Spektrogramme der aufgenommenen Signale von drei Mikrofonskapseln. Da die verwendete Messmethode robust auf harmonische Verzerrungen ist, können die relativ leistungsarmen und kompakten Tropfenlautsprecher für den komplizierten Messaufbau eingesetzt werden und mit der benötigten Messlautstärke betrieben werden.

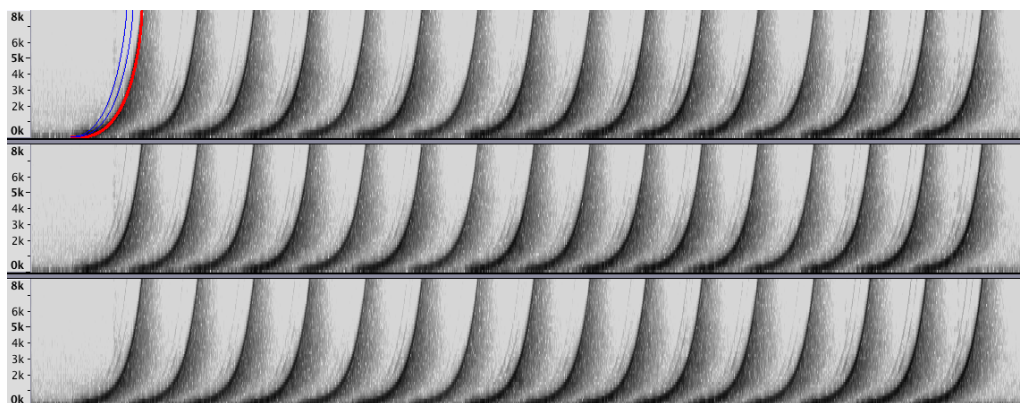


Abbildung 5: Spektrogramme dreier Mikrofonsignale

Die gemessenen Signale wurden entfaltet und mittels zweier halber Hann-Fenster (mit 30 und 100 Samples Länge) von 44100 auf 241 Samples gekürzt. Abb. 5.1 zeigt eine

exemplarische Impulsantwort und das gewählte Fenster³. Aus den 16 Lautsprechern, den 36 Azimutpositionen und den 32 Mikrofonkapseln ergeben sich insgesamt 18432 Filter, abgespeichert in einer vierdimensionalen Matrix (241×32×16×36).

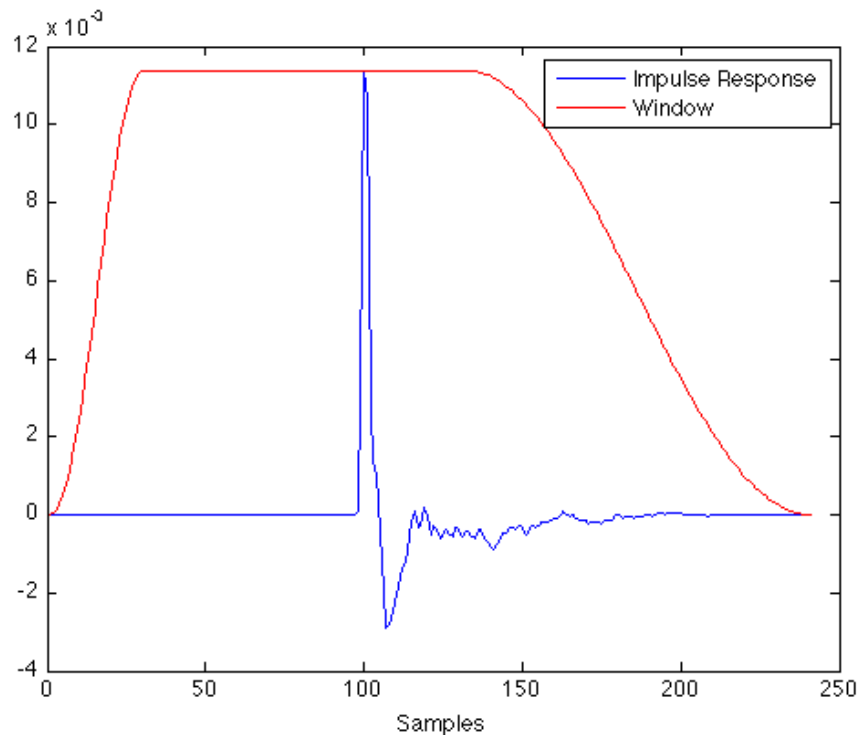


Abbildung 6: Fensterung einer Impulsantwort

5.2 Aufbereitung der Impulsantworten

Die im Zuge der eintägigen Messung gewonnenen Messdaten beinhalten zwei Fehler, die in der Nachbearbeitung ausgeglichen werden müssen:

- Eine Referenzmessung mit einem Messmikrofon, zur Korrektur der unterschiedlichen Pegel der 16 Lautsprecher, blieb aus.
- Die Kreiskonstruktion mit den darauf montierten Lautsprechern hat sich aufgrund des Eigengewichtes leicht verbogen und weist geometrische Abweichungen von der gewünschten Kreislinie auf.

Um die Pegelkorrektur der Lautsprecher trotzdem durchführen zu können, werden die gemessenen Impulsantworten über alle Mikrofone und Azimutpositionen für jeden Lautsprecher in einem Frequenzbereich von 120 bis 500 Hz gemittelt.

Die Korrektur der leicht ungenauen geometrischen Anordnung stellte sich schon als schwieriger heraus. Der Fehler im Messaufbau führt angenähert für tiefe Frequenzen zu

3. Das Fenster wurde zur besseren Darstellung mit dem Maximalwert der Impulsantwort skaliert.

einer reinen zeitlichen Verschiebung der Impulsantworten zueinander. Wäre die zeitliche Position der Impulsantworten bei korrekter geometrischer Anordnung bekannt, könnten die gemessenen Impulsantworten an die zeitlich korrekte Position verschoben werden.

Um diese Positionen zu bestimmen wird ein Modell angenommen, in dem die drei Hauptachsen des Eigenmikros genau auf den Achsen einer idealen Halbkreisordnung von Lautsprechern liegen. Das heißt, die Distanz zwischen Eigenmikro und den einzelnen Lautsprechern ist konstant. Vernachlässigt man die Krümmung der am Eigenmikro auftreffenden Welle, können die Delays zwischen den Impulsantworten wie folgt berechnet werden:

$$\tau_1(\varphi_l, \vartheta_l) = \frac{r}{c} [1 - \sin(\vartheta_m) \sin(\vartheta_l) - \cos(\vartheta_m) \cos(\vartheta_l) \cos(\varphi_m - \varphi_l)] \quad (1)$$

für $\psi \leq 90^\circ$

$$\tau_2(\varphi_l, \vartheta_l) = \frac{r}{c} [1 + \arccos(\sin(\vartheta_m) \sin(\vartheta_l) + \cos(\vartheta_m) \cos(\vartheta_l) \cos(\varphi_m - \varphi_l)) - \frac{\pi}{2}] \quad (2)$$

für $\psi > 90^\circ$

$$\psi = \arccos[\sin(\vartheta_m) \sin(\vartheta_l) + \cos(\vartheta_m) \cos(\vartheta_l) \cos(\varphi_m - \varphi_l)] \quad (3)$$

- r ... Radius des Eigenmikro (4,2 cm)
- φ_m ... Azimutposition der Kapsel
- ϑ_m ... Elevation⁴ der Kapsel
- φ_l ... Azimutposition des Lautsprechers
- ϑ_l ... Elevation des Lautsprechers
- ψ ... Winkel zwischen Richtungsvektor und Koordinaten einer Mikrofonskapsel

Formel 1 beschreibt die Time of arrival (TOA), wenn eine Mikrofonskapsel der Welle zugewandt ist, Formel 2, wenn eine Kapsel bezüglich der eintreffenden Welle auf der Rückseite des Eigenmikros positioniert ist. Formel 1 entspricht einer Wegdifferenz in Ausbreitungsrichtung der Welle, wobei der erste Berührungspunkt der Welle mit der Kugel dem Zeitpunkt Null entspricht. Formel 2 beinhaltet zusätzlich einen Beugungsweg auf der Rückseite der Kugel.

Addiert man zu allen berechneten TOAs noch das Delay der frühesten Impulsantwort, erhält man eine Modell-basierte korrekte zeitliche Ausrichtung jeder einzelnen Antwort, mit möglichst kurzer Verschiebung zu den gemessenen Daten.

Zur Bestimmung der zeitlichen Position einer Impulsantwort wird die Position des Schwerpunkts berechnet:

4. Hier wird im Gegensatz zur Winkelmessung in der Anordnung mit der Elevation gerechnet.

$$\tau_{meas} = \min_k \left\{ \left| E(k) - \frac{E(k)}{2} \right| \right\} \quad (4)$$

$$E(k) = \sum_{n=1}^k h[n]^2$$

$$\tau_{corr} = \tau_{1,2} - \tau_{meas} \quad (5)$$

Nach Subtraktion von vorhergesagter TOA und der gemessenen zeitlichen Position kann die Impulsantwort mit Hilfe einer fraktionellen Verzögerung an die richtige Stelle verschoben werden. Abb. 7 zeigt zwei zufällig gewählte Impulsantworten und deren zeitlich korrigierte Version.

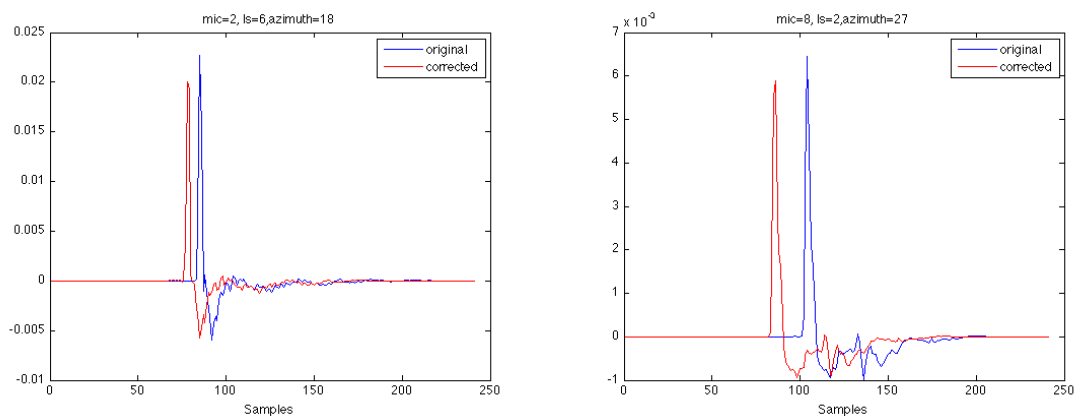


Abbildung 7: Zeitliche Korrektur der geometrischen Anordnung

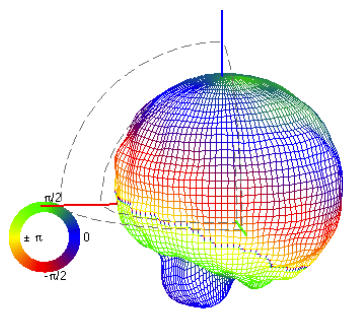
Es ist allerdings zu beachten, dass bei dieser Korrektur, falls es Ungenauigkeiten in der Synchronizität zwischen den einzelnen Kapseln gibt, diese verloren gehen. Von einer Synchronizität in der Elektronik ist aber auszugehen.

5.3 Ballondiagramme

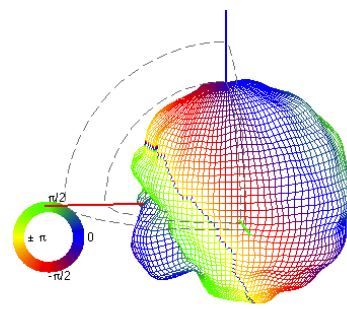
Um die dreidimensionalen Plots mit guter Auflösung zu zeichnen, werden die Messdaten im sphärischen Wellenspektrum mit Ordnung $N=15$ an vielen Stützstellen abgetastet und aufgezeichnet. Anschließend wird die Dynamik auf 30 dB beschränkt, die Amplitude als Radius gezeichnet und die Phase als Farbinformation aufgetragen.

6 Richtcharakteristik der einzelnen Kapseln

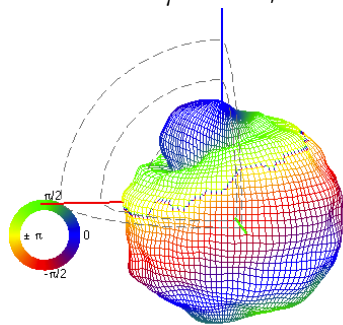
Die Richtcharakteristik der einzelnen Mikrofonkapseln werden als Ballon-Diagramme gezeichnet und mittels visueller Kontrolle miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass alle Kapseln ungefähr die selbe Richtwirkung aufweisen (vgl. Abb. 8 und Abb. 9). Bis 1000 Hz weisen alle noch Kugelcharakteristik auf. Ab dieser Frequenz nimmt jedoch die Bündelung immer mehr zu und die Richtcharakteristik nähert sich einer Art Niere an. Abb. 10 zeigt die Richtcharakteristik der Mikrofonkapsel 3 in Oktavschritten von 250 bis 16000 Hz.



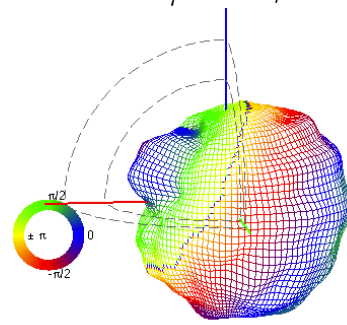
Mic 13: $\varphi = 91^\circ$; $\vartheta = 21^\circ$



Mic 14: $\varphi = 90^\circ$; $\vartheta = 58^\circ$

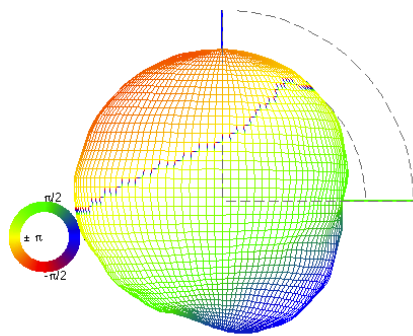


Mic 16: $\varphi = 90^\circ$; $\vartheta = 159^\circ$

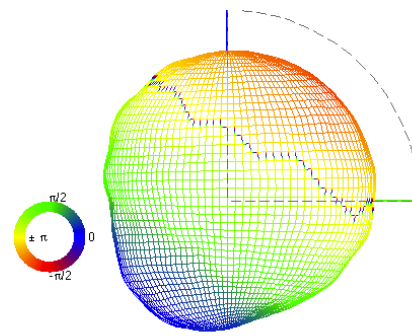


Mic 15: $\varphi = 89^\circ$; $\vartheta = 69^\circ$

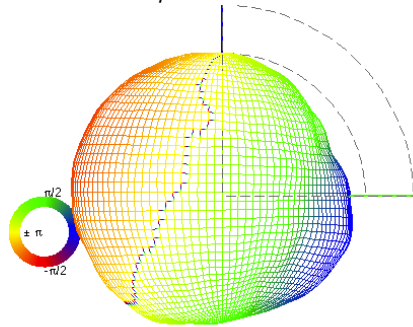
Abbildung 8: Richtdiagramm der Kapseln 13,14,15 und 16 bei 4 kHz



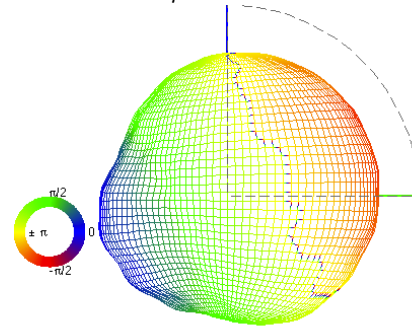
Mic 21: $\varphi = 180^\circ$; $\vartheta = 32^\circ$



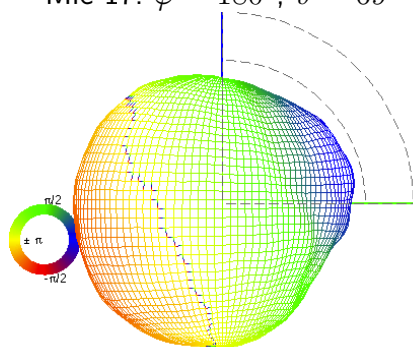
Mic 5: $\varphi = 0^\circ$; $\vartheta = 32^\circ$



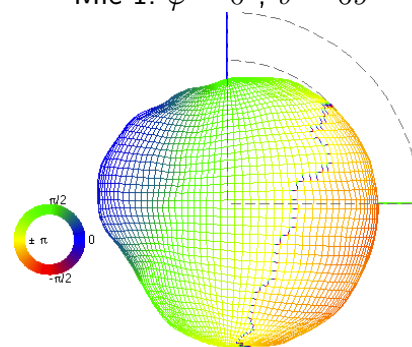
Mic 17: $\varphi = 180^\circ$; $\vartheta = 69^\circ$



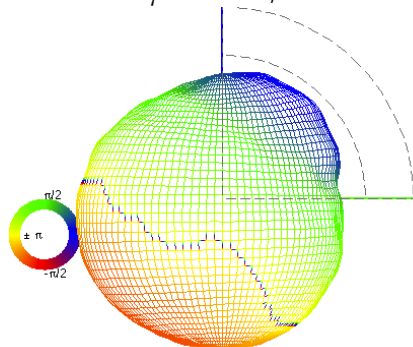
Mic 1: $\varphi = 0^\circ$; $\vartheta = 69^\circ$



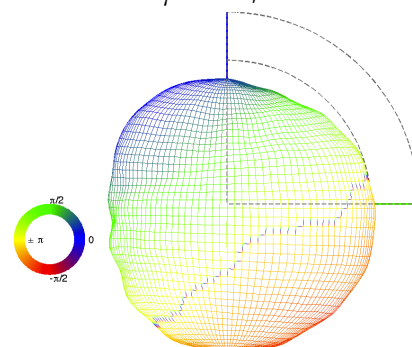
Mic 19: $\varphi = 180^\circ$; $\vartheta = 111^\circ$



Mic 3: $\varphi = 0^\circ$; $\vartheta = 111^\circ$



Mic 25: $\varphi = 180^\circ$; $\vartheta = 148^\circ$



Mic 9: $\varphi = 0^\circ$; $\vartheta = 148^\circ$

Abbildung 9: Richtdiagramm von acht Kapseln in der Medianebene des Eigenmike bei 2 kHz

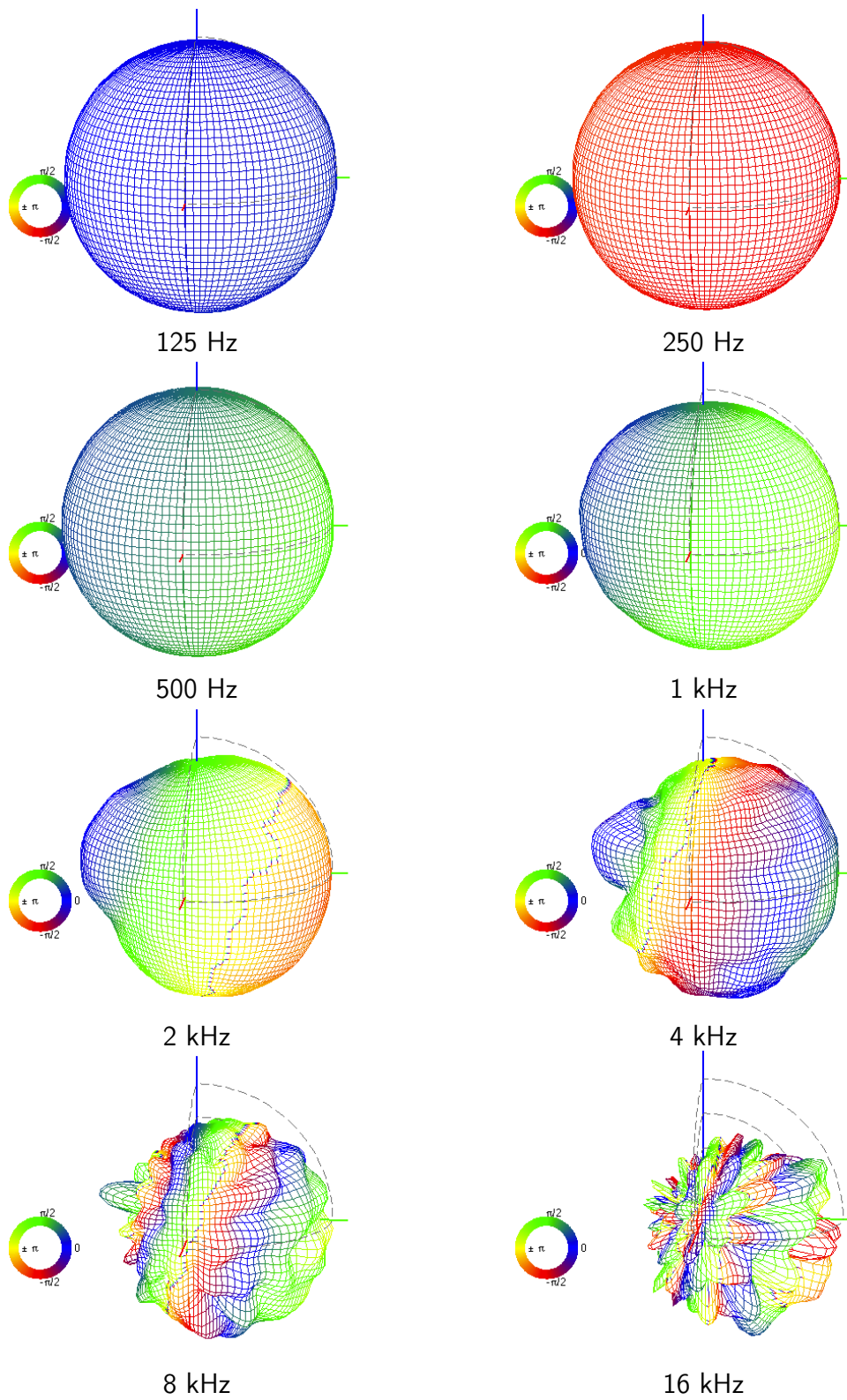


Abbildung 10: Richtcharakteristik der Mikrofonkapsel Nr. 3 des Eigenmike

7 Holografie

Betrachtet man nur die Impulsantworten eines Lautsprechers kann mit Hilfe radialer Scharfstellfilter [Zot10b] [Zot10a] die Quellstärkeverteilung in 1,5 m Abstand (Radius der Lautsprecheranordnung) dargestellt werden.

$$\phi_N = -diag_N \left\{ \frac{(kR)^2 h'_n(kR)}{k h_n(kr_p)} \right\} \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{p} \quad (6)$$

Abb. 7 zeigt die radialen Scharfstellfilter für den Radius des Eigenmike und den Radius der Metallkonstruktion. Aufgrund der steigenden Pegelanhebung zu tiefen Frequenzen kann unter diesen Gegebenheiten z.B. die 2. Ordnung erst ab ca. 1 kHz dargestellt werden. Darunter würde Rauschen zu stark angehoben werden.

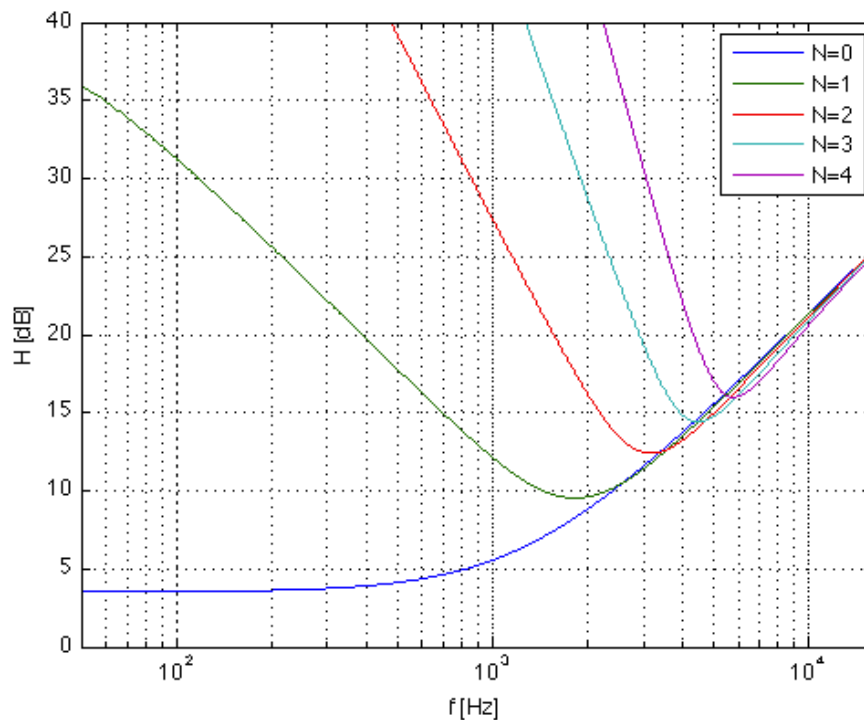
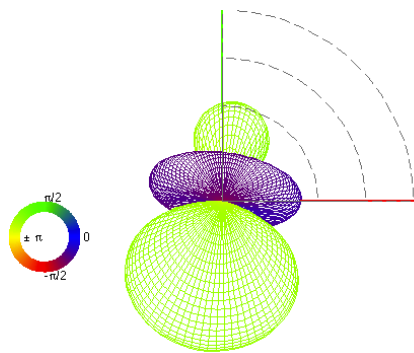
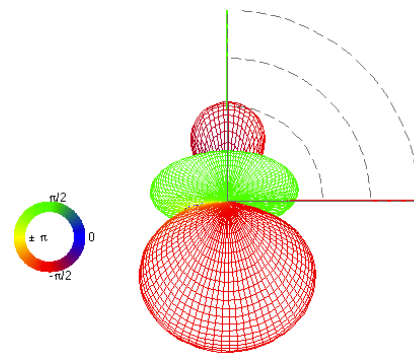


Abbildung 11: Radiale Scharfstellfilter für $R = 4.2\text{cm}$ und $r_p = 1.5\text{m}$

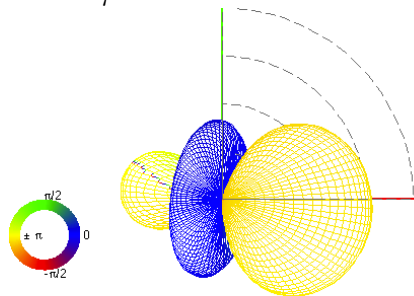
Abb. 12 und 13 stellt die Verwendung der originalen und der korrigierten Impulsantworten gegenüber. In Abb. 12 ist der Fehler der geometrischen Anordnung deutlich erkennbar. Man erkennt auf der linken Seite eine Verdrehung des Eigenmike zur Lautsprecherkonstruktion und eine Ungenauigkeit in der Positionierung, was in einem richtungsabhängigen Phasenfehler resultiert. Bei Ordnung $N=3$ bei 6 kHz wird der Phasenfehler immer noch korrigiert, allerdings ist in den Nebenkeulen ein anscheinend durch die Korrektur erzeugter Fehler erkennbar.



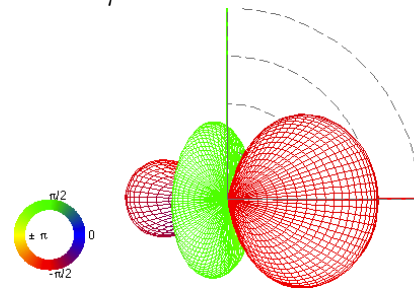
LS: $\varphi = -90^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



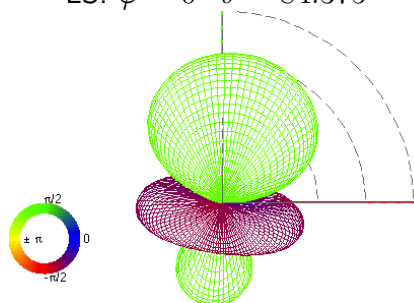
LS: $\varphi = -90^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



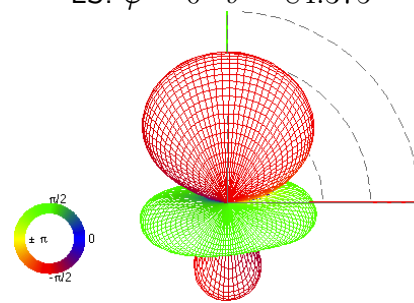
LS: $\varphi = 0^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



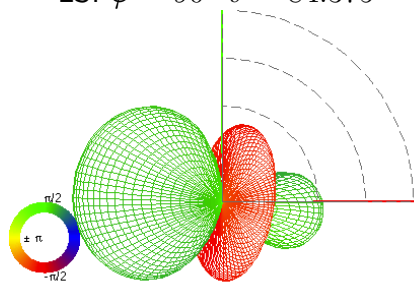
LS: $\varphi = 0^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



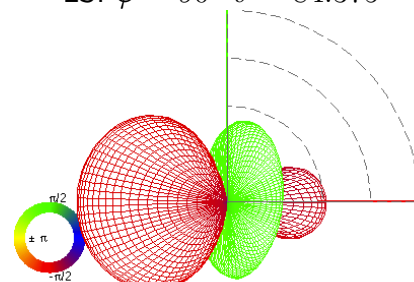
LS: $\varphi = 90^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



LS: $\varphi = 90^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



LS: $\varphi = 180^\circ \vartheta = 84.375^\circ$



LS: $\varphi = 180^\circ \vartheta = 84.375^\circ$

Abbildung 12: Quellstärkeverteilung in 1,5m Entfernung, $N=2$, $f=2000$ Hz (links: originale Impulsantworten; rechts: zeitlich korrigierte Versionen)

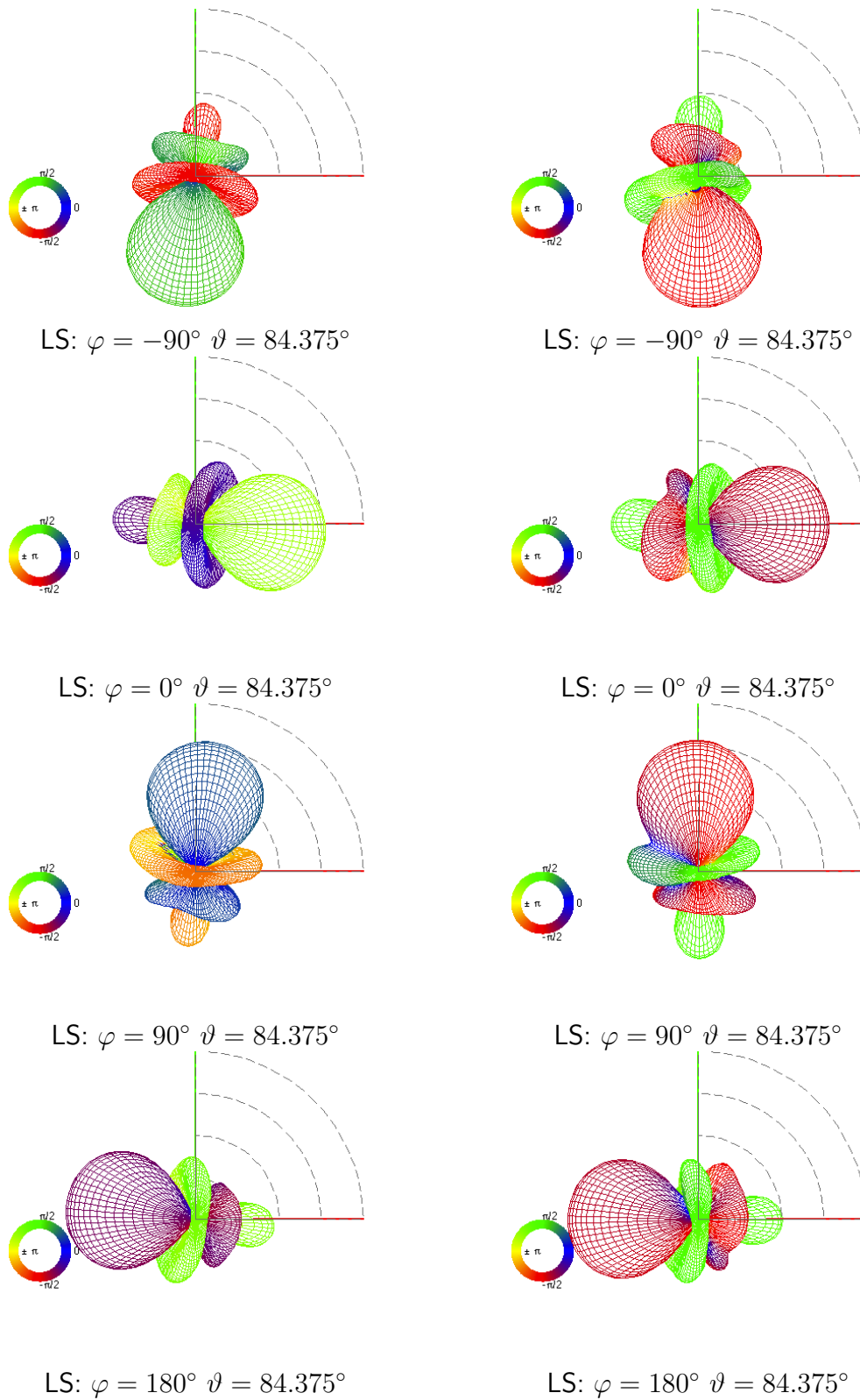


Abbildung 13: Quellstärkeverteilung in 1,5m Entfernung, $N=3$, $f=6000$ Hz (links: originale Impulsantworten; rechts: zeitlich korrigierte Versionen)

8 Fazit

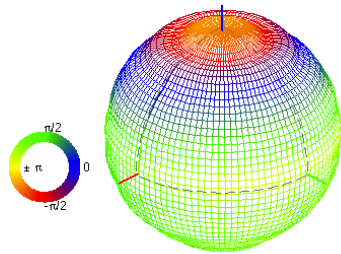
Die Richtcharakteristiken der Eigenmikrekapseln erweisen sich aus rein visueller Kontrolle als ziemlich ähnlich bis nahezu identisch. Bezogen auf die Frequenz entspricht die Richtcharakteristik jeder Kapsel bis 1 kHz einer Kugel und nimmt ab 2 kHz immer mehr die Form einer Niere/Superniere an. Die zeitliche Korrektur mittels TOA auf einer Kugel erweist sich als sehr effektiv bei kleinen Abweichungen in der geometrischen Anordnung. Die Entzerrung der Frequenzgänge der einzelnen Lautsprecher ließ sich im Nachhinein nicht mehr korrekt durchführen, da jedes Signal auch die Systemantwort einer Mikrofongkapsel beinhaltet.

Literatur

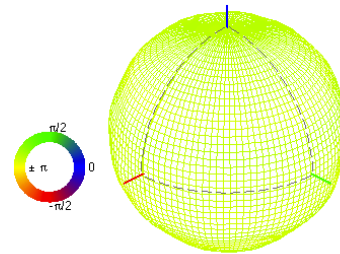
- [MBL07] P. Majdak, P. Balazs, and B. Laback, "Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 7/8, pp. 623–637, 2007.
- [Zot10a] F. Zotter, *Akustische Holographie und Holophonie*. Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2010.
- [Zot10b] —, *Laborunterlagen Akustische Messtechnik 2*. Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2010.

A Überprüfung der zeitlichen Korrektur

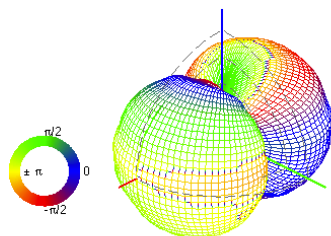
Um die zeitliche Korrektur der gemessenen Impulsantworten werden am Mikrofon Richtwirkungen in Kugelflächenfunktionen vorgegeben und kontrolliert ob sie auch tatsächlich so aussehen wie sie sollten. Abb. 14 bis 17 zeigen den Unterschied der eingestellten Richtwirkungen vor und nach der Korrektur. Die Verbesserung ist daran deutlich erkennbar, dass die Kugelflächenfunktionen der unkorrigierten Impulsantworten bunter sind, was einem Phasenfehler entspricht.



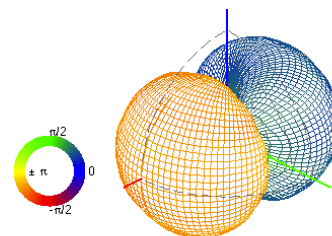
$n=0, m=0, f=2000 \text{ Hz}$



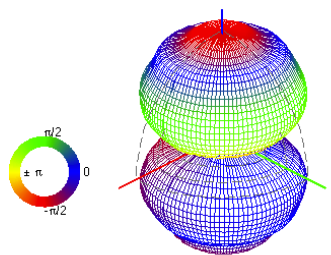
$n=0, m=0, f=2000 \text{ Hz}$



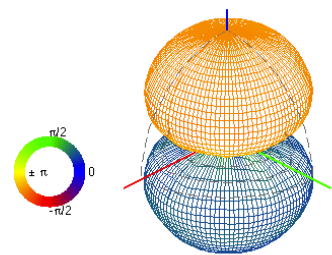
$n=1, m=1, f=2000 \text{ Hz}$



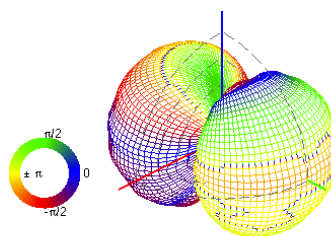
$n=1, m=1, f=2000 \text{ Hz}$



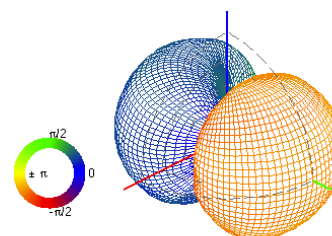
$n=1, m=0, f=2000 \text{ Hz}$



$n=1, m=0, f=2000 \text{ Hz}$

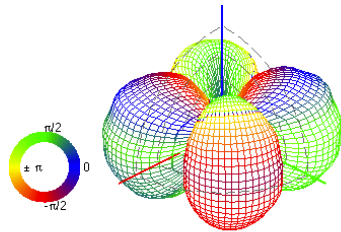


$n=1, m=-1, f=2000 \text{ Hz}$

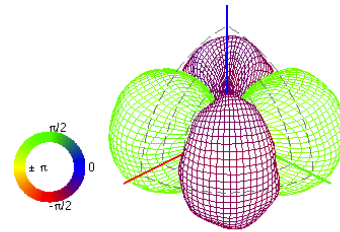


$n=1, m=-1, f=2000 \text{ Hz}$

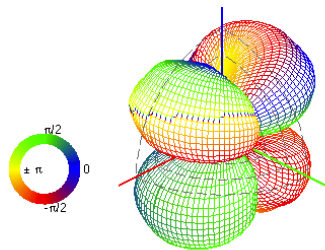
Abbildung 14: Kugelflächenfunktionen der originalen Impulsantworten (links) und nach der Korrektur (rechts)



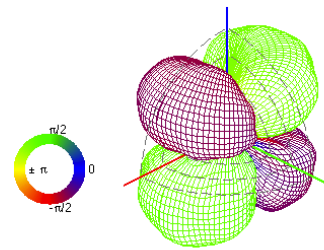
$n=2, m=2, f=2000 \text{ Hz}$



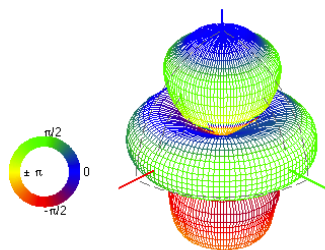
$n=2, m=2, f=2000 \text{ Hz}$



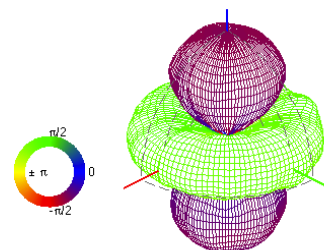
$n=2, m=1, f=2000 \text{ Hz}$



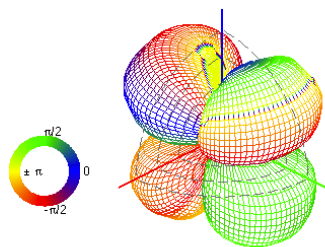
$n=2, m=1, f=2000 \text{ Hz}$



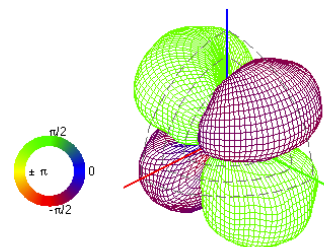
$n=2, m=0, f=2000 \text{ Hz}$



$n=2, m=0, f=2000 \text{ Hz}$

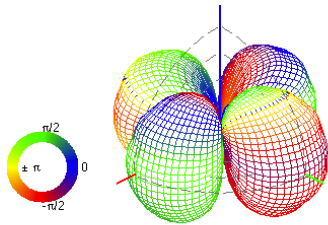


$n=2, m=-1, f=2000 \text{ Hz}$

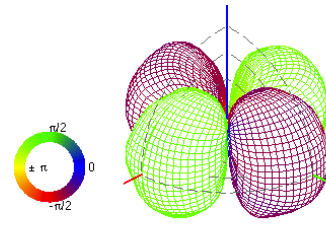


$n=2, m=-1, f=2000 \text{ Hz}$

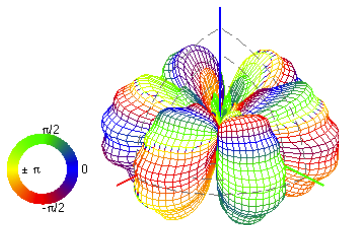
Abbildung 15: Kugelflächenfunktionen der originalen Impulsantworten (links) und nach der Korrektur (rechts)



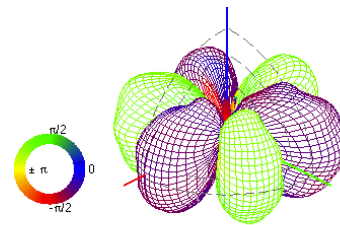
$n=2, m=-2, f=2000 \text{ Hz}$



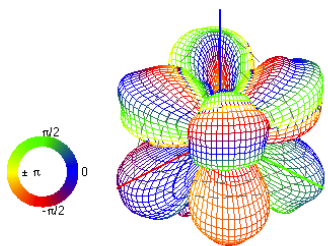
$n=2, m=-2, f=2000 \text{ Hz}$



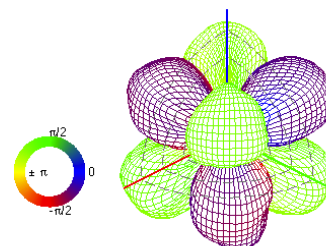
$n=3, m=3, f=4000 \text{ Hz}$



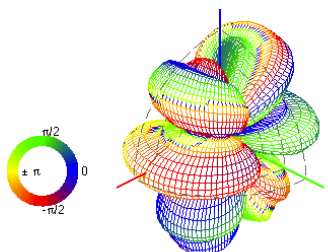
$n=3, m=3, f=4000 \text{ Hz}$



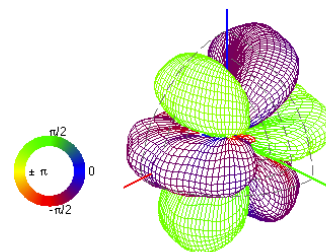
$n=3, m=2, f=4000 \text{ Hz}$



$n=3, m=2, f=4000 \text{ Hz}$

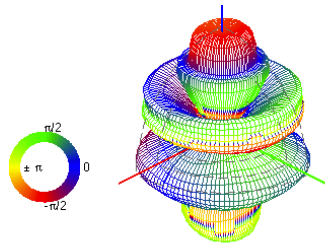


$n=3, m=1, f=4000 \text{ Hz}$

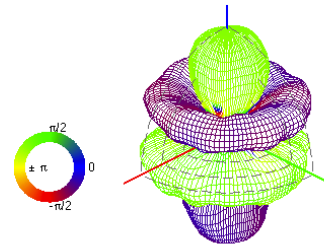


$n=3, m=1, f=4000 \text{ Hz}$

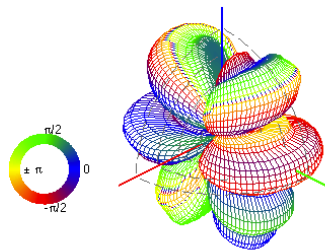
Abbildung 16: Kugelflächenfunktionen der originalen Impulsantworten (links) und nach der Korrektur (rechts)



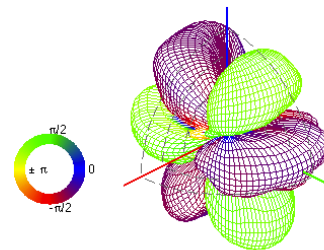
$n=3, m=0, f=4000 \text{ Hz}$



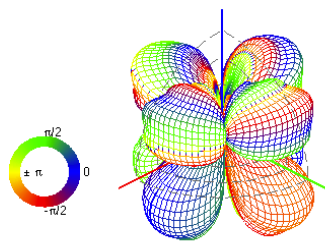
$n=3, m=0, f=4000 \text{ Hz}$



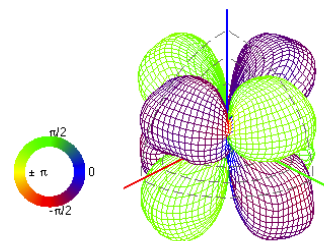
$n=3, m=-1, f=4000 \text{ Hz}$



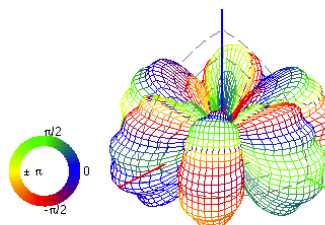
$n=3, m=-1, f=4000 \text{ Hz}$



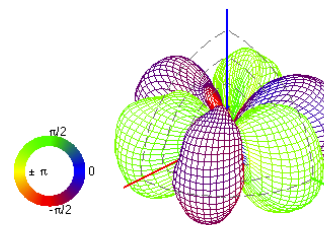
$n=3, m=-2, f=4000 \text{ Hz}$



$n=3, m=-2, f=4000 \text{ Hz}$



$n=3, m=-3, f=4000 \text{ Hz}$



$n=3, m=-3, f=4000 \text{ Hz}$

Abbildung 17: Kugelflächenfunktionen der originalen Impulsantworten (links) und nach der Korrektur (rechts)