

Richtwirkungen von Ambisonic Arrays 1. Ordnung

Akustische Holografie und Holofonie, LU

Patrick Ziegler
Eric Kurz

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 27. Juni 2014



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Ambisonische Mikrofonarrays der ersten Ordnung ermöglichen es im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren bereits mit vier Kanälen ein dreidimensionales Schallfeld aufzunehmen. Wegen der leichten Handhabung und hohen Stabilität bei relativ geringer Kanalanzahl stellen sie ein interessantes Werkzeug zur Aufnahme eines Schallfeldes dar. In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Mikrofonarrays hinsichtlich ihrer Richtcharakteristik vermessen. Dafür werden sie über diskrete Punkte auf einer einhüllenden Kugeloberfläche mit Sinus-Sweeps bespielt und die Signale aufgezeichnet. Alle vier Kanäle des jeweiligen Mikrofonarrays werden anschließend so ausgewertet, dass dreidimensionale Richtdiagramme erstellt werden können. Diese Richtdiagramme werden anschließend entsprechend der theoretischen Annahmen analysiert.

Abstract

In difference to other conventional recording techniques, with first order ambisonic microphone-arrays it is possible to record a three-dimensional soundfield with only four channels. Because of a simple handling and a good stability of the recorded environment they seem to be a interesting option for recording those soundfields. This paper deals with measurement of directivity of two different microphone-arrays. Sine-sweeps are played back on discrete points of a sphere, which surrounds the microphone. All four channels are recorded for each sine-sweep. With these signals it is possible to generate three-dimensional directivity-plots, which are compared with theoretical assumptions afterwards.

1 Einleitung

In dieser Arbeit sollen die verschiedenen Richtcharakteristika der untersuchten Mikrofonarrays dargestellt und beurteilt werden. Hierfür wurden das Soundfield ST450 und zwei Oktava 4-D Ambisonic A-Format Mikrofone mit einem kreisförmigen Segment aus 16 tropfenförmigen Lautsprechern vermessen. Die beiden Oktava 4-D Ambisonic A-Format Mikrofone stellen eine Tetraeder-förmige Anordnung von vier separaten Mikrofonkapseln, die mit einem vierkanaligen Vorverstärker verbunden ist, dar (Abbildung 1). Die beiden Mikrofone wurden mit unterschiedlichem Absorbermaterial ausgestattet, um für andere Studien Reflexionseigenschaften des Mikrofonkörpers betrachten zu können. Die Mikro-



(a) Oktava



(b) Soundfield

Abbildung 1: Oktava 4-D Ambisonics A-Format-Mikrofon mit Absorbermaterial und Soundfield ST450

fonkapseln besitzen Nierencharakteristik. Wie schon der Name der Mikrofone andeutet, liefern diese das Ambisonics A-Format. Es werden die vier Kanäle der Tetraeder-förmigen Anordnung direkt und ohne Matrizierung ausgegeben. Das Soundfield ST450 hingegen gibt vier Kanäle im sogenannten First-Order Ambisonics B-Format aus. Das verwendete Mikrofon ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei diesem Mikrofon setzt sich die Kapsel aus vier kreisrunden Membranen zusammen, die tetraederförmig angeordnet sind (siehe Abbildung 2). Die vier im A-Format aufgenommenen Kanäle werden in der ST450-Kontrolleinheit in das B-Format umgerechnet. Das First-Order Ambisonics B-Format

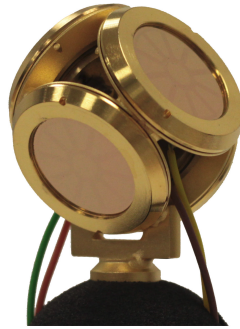


Abbildung 2: Mikrofonkapsel des ST450 [ST4]

beschreibt ein dreidimensionales Schallfeld durch die Überlagerung von einer Kugelcharakteristik mit Achtercharakteristiken in drei Raumrichtungen. Die Kugelcharakteristik (W) gibt den absoluten Schalldruck p des Schallfeldes an. Die Achtercharakteristiken (X , Y , Z) hingegen stellen in ihrer Superposition den Schnellevektor \vec{v} dar (siehe Abbildung 3). Die Berechnung des B-Formats wird mittels folgendem Formelapparat [Rum01]

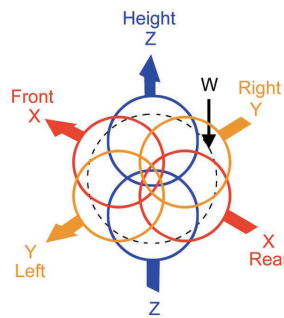


Abbildung 3: Ambisonics B-Format [ST4]

durchgeführt.

$$\begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} LV \\ LH \\ RV \\ RH \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} LV \\ LH \\ RV \\ RH \end{pmatrix} \quad (1)$$

Hierbei sind mit LV , LH , RV und RH die Schalldrücke der Mikrofonkapseln links vorn, links hinten, rechts vorn und rechts hinten gemeint. Eine umgekehrte Rechnung von dem B-Format in das A-Format ist so mit auch möglich. Sie wird mittels des umgestellten Gleichungssystem durchgeführt.

$$\begin{pmatrix} LV \\ LH \\ RV \\ RH \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Bei der Vermessung der ambisonischen Mikrofone erwarten wir uns im Idealfall nun, dass wir bei den Oktava-Mikrofonen die Nierencharakteristiken der einzelnen Mikrofonkapseln über einen großen Frequenzbereich hinweg messen können. Die Ausrichtung der Hauptkeulen der Kapseln soll den Normalvektoren der Tetraederflächen entsprechen. W, X, Y und Z des B-Formats sollen fehlerfrei aus den vier Kanälen matrizierbar sein. Die vier Kanäle des ST450 sollten uns hingegen sofort die Kugel und die drei Achter-Charakteristiken liefern. Die Umrechnung zurück in das A-Format soll die Nierencharakteristik der Kapseln des ST450 zeigen. Im Idealfall natürlich auch über einen möglichst großen Frequenzbereich.

2 Messanordnung

Zur Messung der Schalleinstrahlung auf die ambisonischen Mikrofone bedienen wir uns einer diskreten, halbkreisförmigen Anordnung von 16 Lautsprechern. Diese sind in der Elevation in $180^\circ/16 = 11.25^\circ$ -Schritten verteilt. Die Mikrofone befinden sich am Mittelpunkt der Halbkreisordnung und werden, drehbar gelagert, in 12° -Schritten 30 mal in Azimutrichtung gedreht. Somit erreichen wir eine nahezu gleichwinklige, diskrete Zerlegung einer Kugeloberfläche mit insgesamt $16 \cdot 30 = 480$ Lautsprecherpositionen (Abbildung 4) anhand derer die Richtcharakteristika für alle Raumrichtungen analysiert werden können.

Über die grafische Programmieroberfläche Pure Data [PD] werden exponentielle Sinus-Sweeps nacheinander einzeln über jeden der 16 Lautsprecher ausgegeben. Um die Impulsantworten für sämtliche Lautsprecherpositionen zu erlangen, wird für jedes Winkelpaar (ϑ, φ) entsprechend des aktuellen Lautsprechers (ϑ) und Winkel des Drehtellers (φ) der Sinus-Sweep ausgespielt. Die von den ambisonischen Mikrofonen vierkanalig aufgenommene Systemantwort dient anschließend zur Berechnung der Impulsantwort für die entsprechende Position in Kapitel 3.

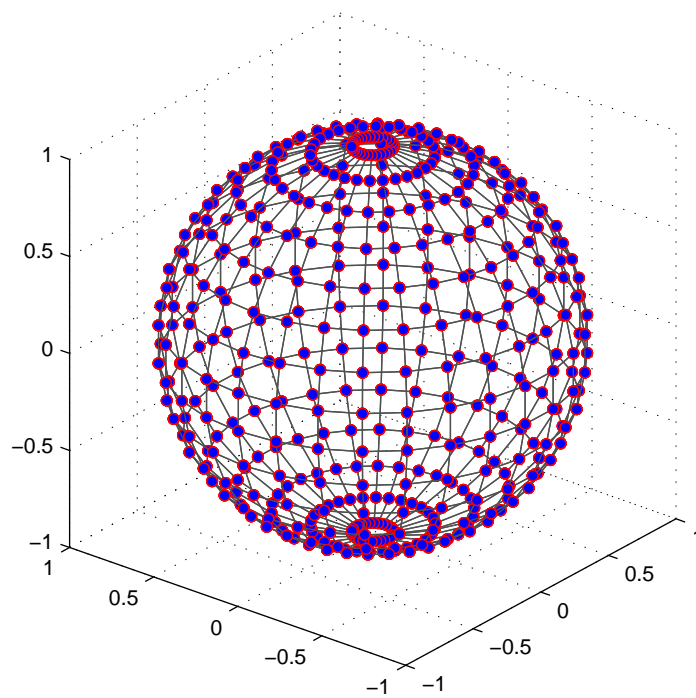


Abbildung 4: Messanordnung aus 16 Lautsprechern und die resultierende diskrete Zerlegung der Kugeloberfläche der vermessenden Mikrofone mittels Drehteller, der zwischen den Messungen schrittweise Drehungen im Azimut erlaubt

Referenzmessung Durch den vorliegenden Messaufbau kommt es zu Pegelunterschieden und Reflexionen, welche die Messergebnisse beeinflussen können. Zur Unterdrückung der Pegelunterschiede wird die Messanordnung zunächst mit einem Referenzmikrofon an Stelle der geprüften ambisonischen Mikrofone erfasst. Die Impulsantwort jedes einzelnen Lautsprechers dient später zur Entzerrung in Kapitel 4. Da die Position der Lautsprecher nicht verändert wird, genügt es die Messung nur in den Elevationswinkeln durchzuführen. Akustische Reflexionen können nicht entzerrt werden und werden weggeschnitten.

3 Entfaltung der Impulsantworten (Referenz)

Im Folgenden werden alle Signale als quantisierte, zeitdiskrete Signale betrachtet. Zur Entfaltung der Impulsantwort dient der generierte Sinus-Sweep als Quellsignal $x[n]$ und das vom Referenzmikrofon aufgenommene Messsignal $y[n]$. Über die einfache Beziehung

$$h_{ref}[n] = iFFT \left\{ \frac{FFT \{y[n]\}}{FFT \{x[n]\}} \right\} \quad (3)$$

kann die Impulsantwort $h_{ref}[n]$ für einen Lautsprecher ermittelt werden. Das Quellsignal $x[n]$ wird nacheinander über $L = 16$ Lautsprecher ausgegeben, weshalb auch 16 Impulsantworten berechnet werden. Um jede Impulsantwort separat betrachten zu können, wird die Aufnahme in 16 gleich große Blöcke zu je $M = 35000$ Samples (Länge des Quellsignals) aufgeteilt und als Vektor dargestellt:

$$\mathbf{h}_{ref}[n] = \begin{pmatrix} h_{ref,1}[n] \\ h_{ref,2}[n] \\ \dots \\ h_{ref,L}[n] \end{pmatrix} \text{ für } n = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \quad (4)$$

Um vom Mikrofon aufgenommene Reflexionen von der Berechnung möglichst auszuschließen, werden die Impulsantworten bis zur 1. Reflexion nach etwa 3ms auf $N = 140$ Samples begrenzt. Zur Vermeidung eines harten Schnittes, werden die Impulsantworten mit Fensterfunktionen gewichtet. Die ersten $n_{in} = 20$ Samples jeder Impulsantwort werden mit einer \sin^2 -Funktion und die letzten $n_{out} = 80$ Samples mit einer \cos^2 -Funktion multipliziert. Die Breite der Fensterfunktionen wurde grafisch geschätzt und für diese Anwendung als akzeptabel erachtet. Die Fensterfunktion $w[n]$ ist somit definiert durch:

$$w[n] = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{n}{n_{in}} \cdot \pi/2\right), & \text{für } 0 \leq n \leq n_{in} \\ 1, & \text{für } n_{in} < n < (N - n_{out}) \\ \cos^2\left(\frac{n - (N - n_{out})}{n_{out}} \cdot \pi/2\right), & \text{für } (N - n_{out}) \leq n \leq N - 1 \end{cases} \quad (5)$$

Daraus werden die gefensternten Impulsantworten $\mathbf{g}_{ref}[n]$ wie folgt berechnet:

$$\mathbf{g}_{ref}[n] = \mathbf{h}_{ref}[n] \cdot w[n] \quad (6)$$

4 Entfaltung der Impulsantworten (Ambisonic)

Die Vorgehensweise der Entfaltung der Impulsantworten für die ambisonischen Mikrofone entspricht der der Referenzmessung mit Gleichung 3. Zusätzlich findet jedoch eine Entzerrung durch die Referenzsignale auf einen Bandpassfrequenzgang statt. Außerdem werden die Lautsprecher sowohl 4-kanalig (X,Y,Z,W) als auch für alle 30 Azimutwinkel aufgenommen. Dadurch ergibt sich für die Matrixierung der Mikrofonkanäle eines ambisonischen Mikrofons:

$$\mathbf{h}_{\text{Amb,X}}[n] = \begin{pmatrix} h_{X,1,1}[n] & \dots & h_{X,1,A}[n] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{X,L,1}[n] & \dots & h_{X,L,A}[n] \end{pmatrix} \quad (7)$$

wobei die Indizierung der Impulsantworten durch

$L = 16$...Anzahl der Lautsprecher
 $A = 30$...Anzahl der Azimutwinkel

definiert ist. Der Frequenzgang zur Entzerrung ist mit H_{BP} als Frequenzgang des Bandpassfilters folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{H}_{\text{EQ}} = H_{BP} \cdot FFT \{ \mathbf{g}_{\text{ref}}[n] \}^{-1} \quad (8)$$

Damit ergeben sich die gefensterterten und entzerrten Impulsantworten eines Kanals zu

$$\mathbf{g}_{\text{Amb,X}}[n] = iFFT \{ FFT \{ \mathbf{h}_{\text{Amb,X}}[n] \} \cdot \mathbf{H}_{\text{EQ}} \} \cdot w[n] \quad (9)$$

Diese Art der Berechnung gilt auch für die Mikrofonkanäle Y, Z und W. Dadurch ergibt sich eine Gesamtmatrix aller gefensterterten und entzerrten Impulsantworten mit $16 \cdot 30 \cdot 4 = 1920$ Einträgen zu:

$$\mathbf{g}_{\text{Amb}}[n] = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_{\text{Amb,X}}[n] \\ \mathbf{g}_{\text{Amb,Y}}[n] \\ \mathbf{g}_{\text{Amb,Z}}[n] \\ \mathbf{g}_{\text{Amb,W}}[n] \end{pmatrix} \quad (10)$$

5 Bestimmung der Richtwirkung

Bei gegebener Abtastrate von $f_s = 44100\text{Hz}$ können durch die Fourier-Transformation der Impulsantworten an einer Frequenz f die komplexen Schalldrücke $\underline{\mathbf{p}}_{\text{Amb}}$ für sämtliche Winkelpaare (φ, ϑ) und Mikrofonkapseln mit bestimmt werden

$$\underline{\mathbf{p}}_{\text{Amb}} = \mathbf{g}_{\text{Amb}} \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot \frac{f}{f_s} \cdot n} \quad \text{für } n = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (11)$$

Für die Darstellung in den Diagrammen repräsentiert der normierte Schalldruckpegel \mathbf{R}_{Amb} eines Winkelpaares die relative Verstärkung des Mikrofons in die gemessene Richtung,

$$\mathbf{P}_{\text{Amb}} = 20 \cdot \log \left(|\underline{\mathbf{p}}_{\text{Amb}}| \right) \text{ dB}, \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Amb}} = 1 + \frac{\mathbf{P}_{\text{Amb}} - p_{\text{max}}}{30} \text{ dB}. \quad (13)$$

In Gleichung 13 entspricht p_{max} dem maximalen Pegel der Matrix \mathbf{P}_{Amb} . Wir lassen für eine verbesserte Darstellung nur eine maximale Dynamik von 30dB zu. Durch eine entsprechende Wahl oder Kombination der normierten Schalldrücke können die Richtcharakteristika für einzelne Kapseln oder deren Kombination berechnet werden. Um die Ergebnisse im kartesischen Koordinatensystem darstellen zu können, werden die Pegel und Phasen umgerechnet

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{R}_{\text{Amb}} \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{R}_{\text{Amb}} \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi \\ \mathbf{Z} &= \mathbf{R}_{\text{Amb}} \cdot \cos \vartheta \\ \mathbf{C} &= \mathbf{R}_{\text{Amb}} \end{aligned}$$

Um die Richtwirkung der ambisonischen Mikrofone besser vergleichen zu können, rechnen wir mit den Formeln (1) und (2) aus Kapitel 1 das A-Format der Oktava-Mikrofone in das B-Format, entsprechend B-Format in A-Format für das ST450, um. Bei der Darstellung der Richtwirkungen werden die Phaseninformationen mittels einer Farbcodierung dargestellt.

Weiterhin wird für eine verbesserte Anschauung die im Laufe der Lehrveranstaltung entwickelte BalloonGUI genutzt. Zur Vorbereitung für die Darstellung in Kugelflächenfunktionen werden zunächst die exakten Positionen (Azimut- und Elevationswinkel) der Mikrofonkapseln bestimmt und in eine Matrix geschrieben. Anschließend werden auch die Azimut- und Elevationswinkel der Lautsprecherpositionen festgehalten. Zusammen mit den Messdaten werden diese dann der BalloonGUI übergeben.

6 Richtwirkungen und Polardiagramme

6.1 A- und B-Format der Mikrofonarrays

Die Abbildungen 5, 6, 9, 10, 14 und 13 zeigen die Richtwirkungen des Oktava Mikrofons mit Absorbermaterial auf dem Vorverstärkergehäuse (M1) und des Oktava Mikrofons mit Absorbermaterial auf dem Vorverstärkergehäuse und zwischen den Kapseln (M2) sowie des Soundfield ST450 im A- und B-Format ausgewertet bei einer Frequenz von 1kHz. Alle dargestellten Richtwirkungen sind auf 1 normiert. In den Abbildungen 7, 8, 11, 12, 16 und 15 sind die Polardiagramme der entsprechenden Richtwirkungen des A- und B-Formats bei einer Frequenz von 1kHz ohne Normierung dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Oktava-Mikrofone für eine bessere Darstellung im Pegel um 10dB angehoben wurden.

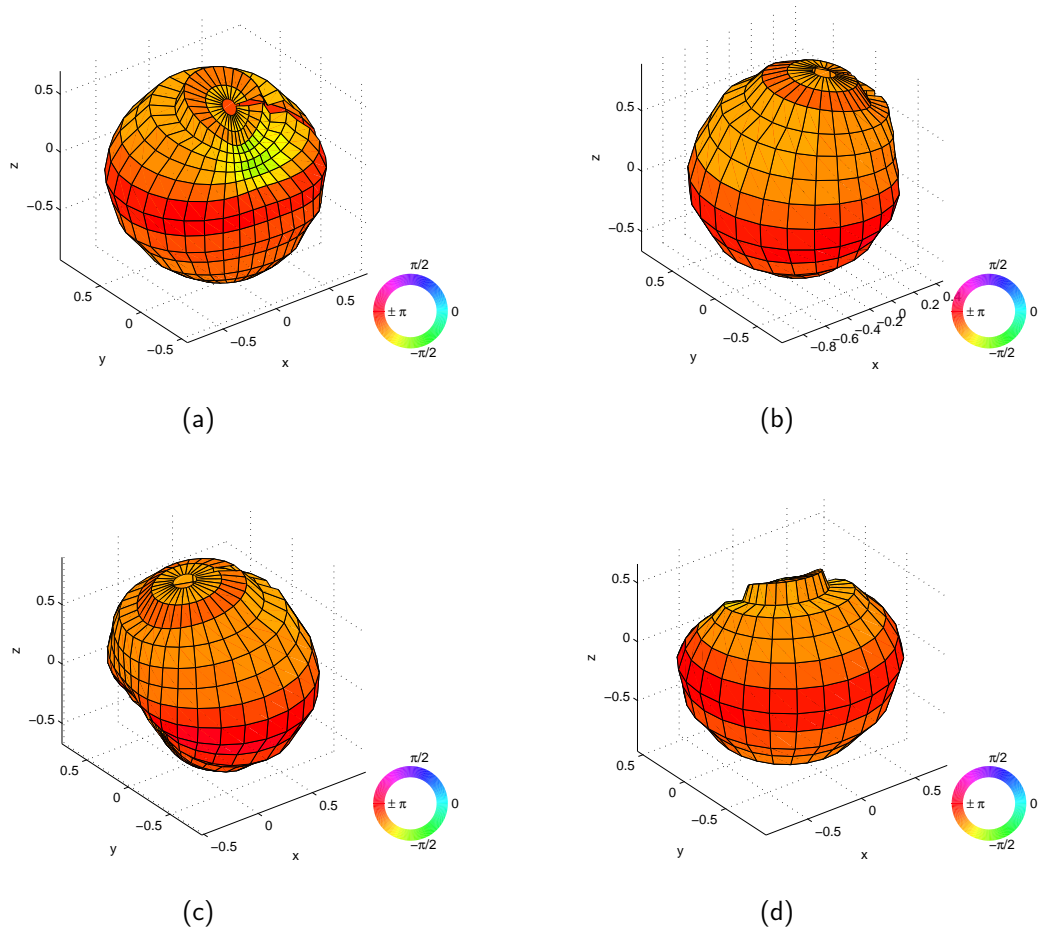


Abbildung 5: A-Format Richtwirkungen des Oktava M1, breite Nierencharakteristiken (a,b,c,d), bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

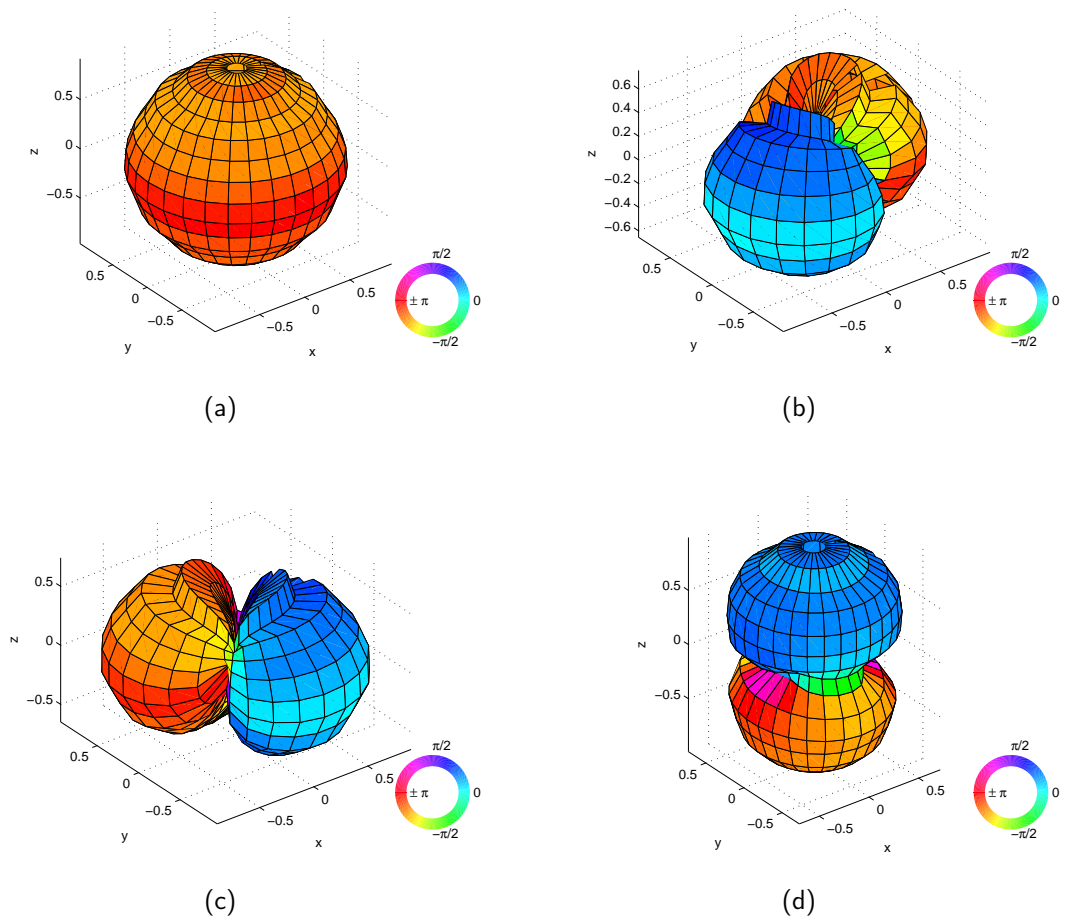


Abbildung 6: Richtwirkungen des berechneten B-Formats des Oktava M1, Kugelcharakteristik (a) und 3 Achtcharakteristiken (b,c,d), bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

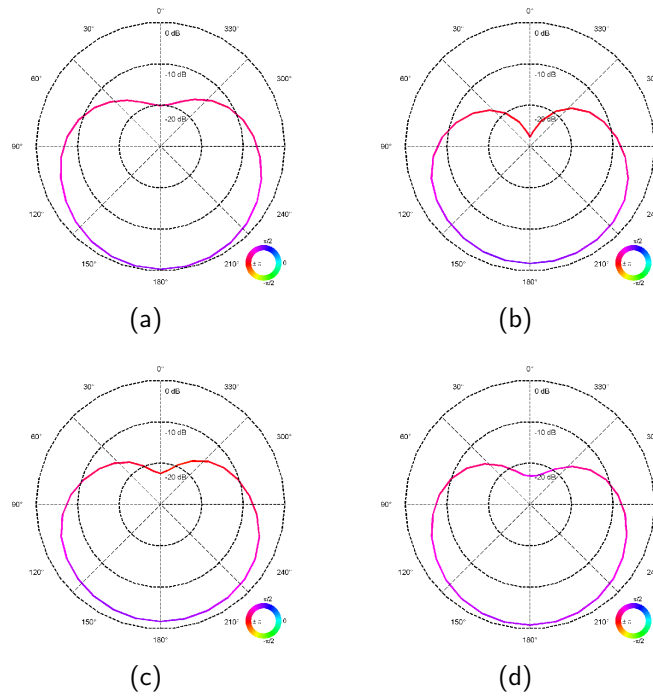


Abbildung 7: Polardiagramme des A-Formats des Oktava M1, breite Nierencharakteristiken (a,b,c,d), bei 1kHz, Schnitte in der Hauptachse der Richtwirkung

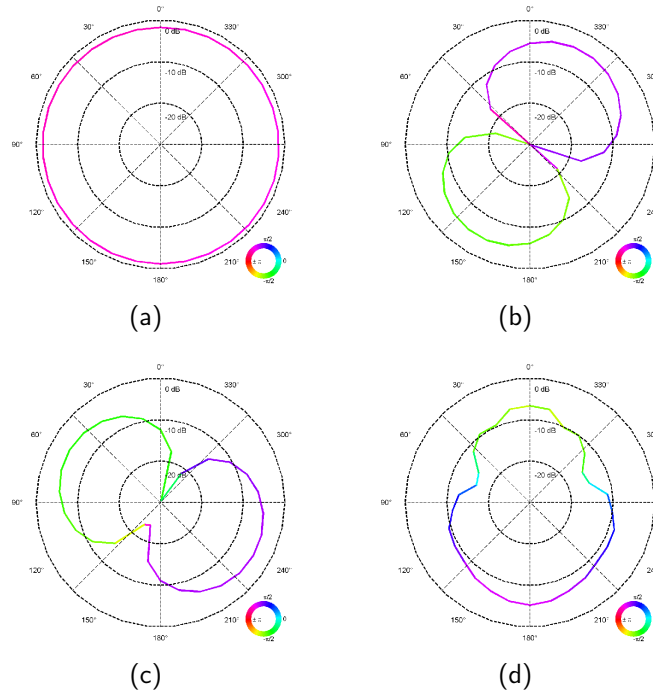
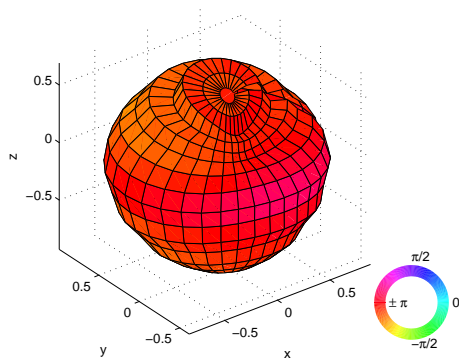
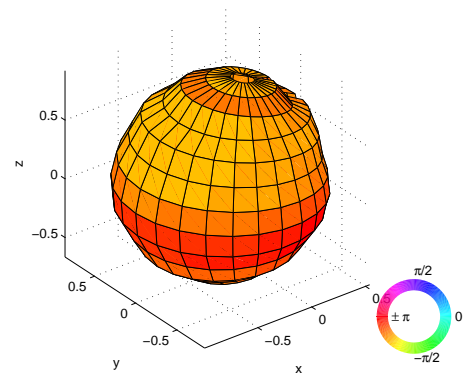


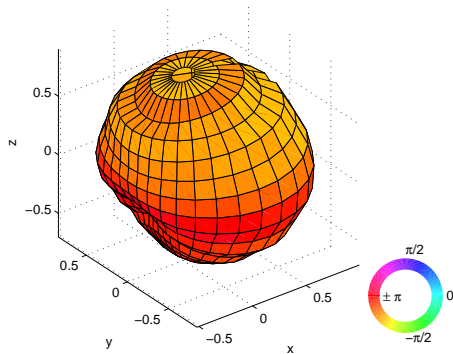
Abbildung 8: Polardiagramme des berechneten B-Formats des Oktava M1, Kugelcharakteristik (a) und 3 Achtcharakteristiken (b,c,d), bei 1kHz, Schnitte in der x-y-Ebene (a,b,c) und der y-z-Ebene (d)



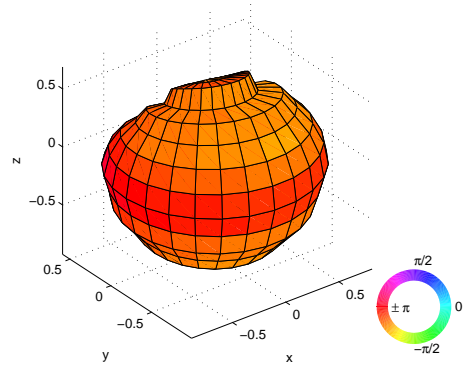
(a)



(b)

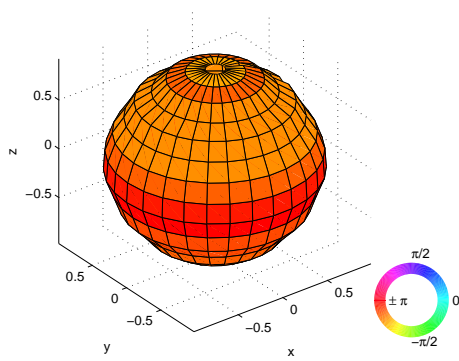


(c)

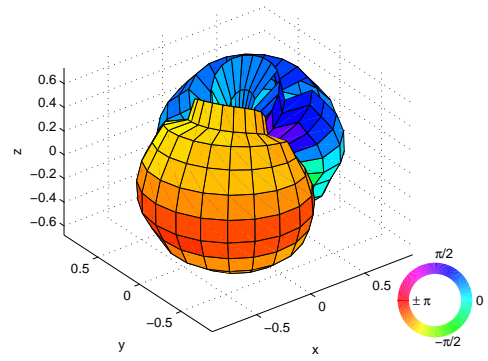


(d)

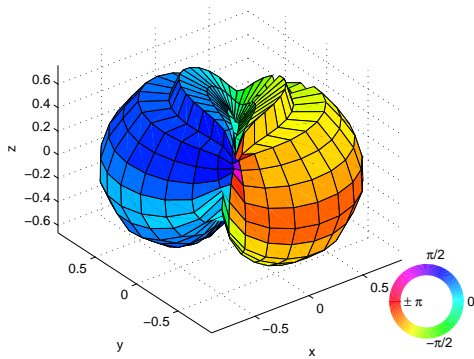
Abbildung 9: A-Format Richtwirkungen des Oktava M2, breite Nierencharakteristiken (a,b,c,d), bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik



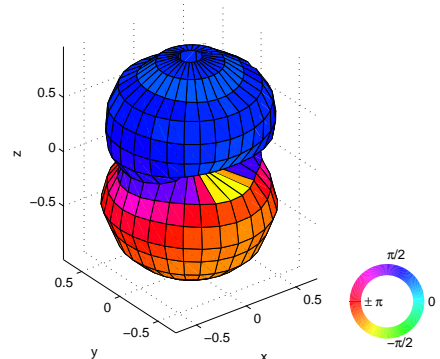
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 10: Richtwirkungen des berechneten B-Formats des Oktava M2, Kugelcharakteristik (a) und 3 Achtcharakteristiken (b,c,d), bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

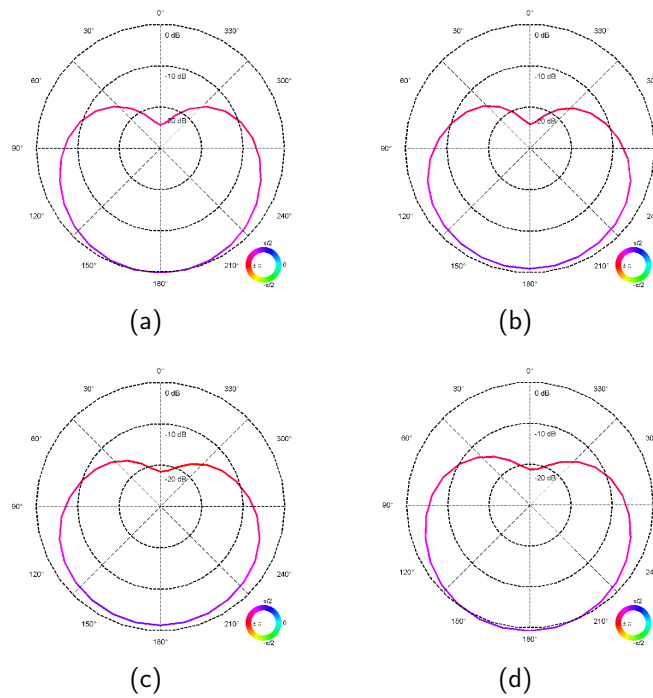


Abbildung 11: Polardiagramme des A-Formats des Oktava M2, breite Nierencharakteristiken (a,b,c,d), bei 1kHz, Schnitte in der Hauptachse der Richtwirkung

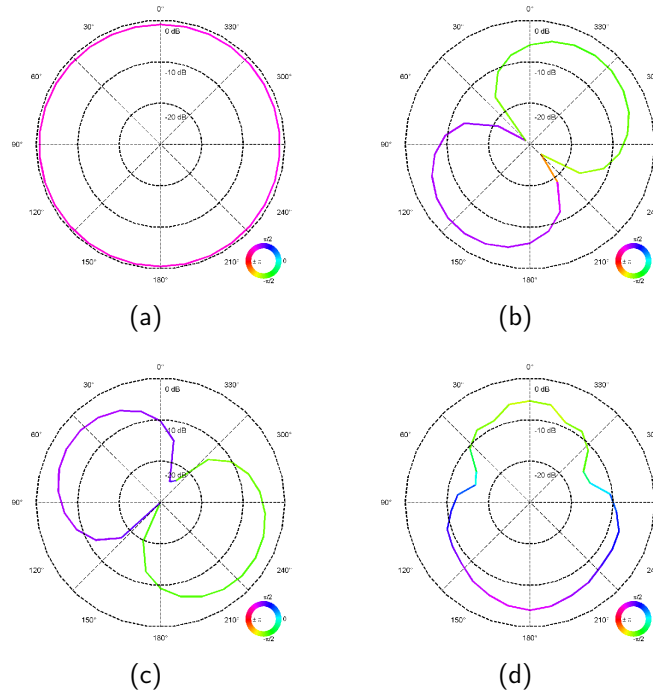
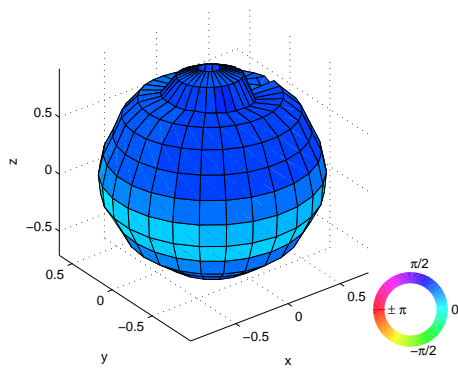
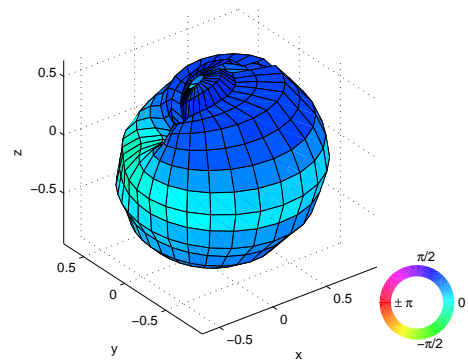


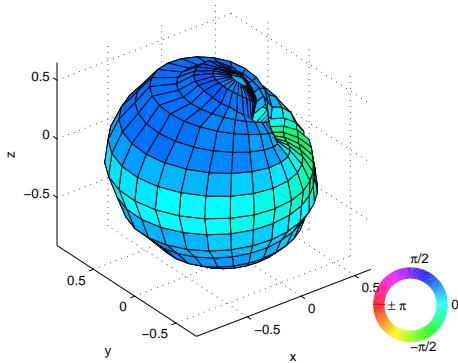
Abbildung 12: Polardiagramme des berechneten B-Formats des Oktava M2, Kugelcharakteristik (a) und 3 Achtcharakteristiken (b,c,d), bei 1kHz, Schnitte in der x-y-Ebene (a,b,c) und der y-z-Ebene (d)



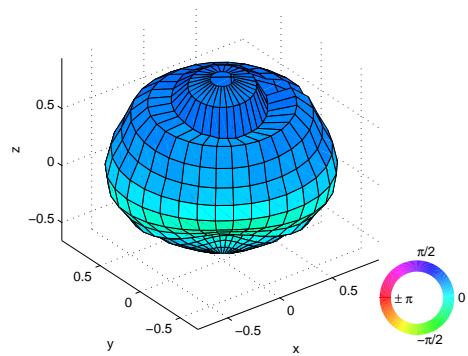
(a)



(b)

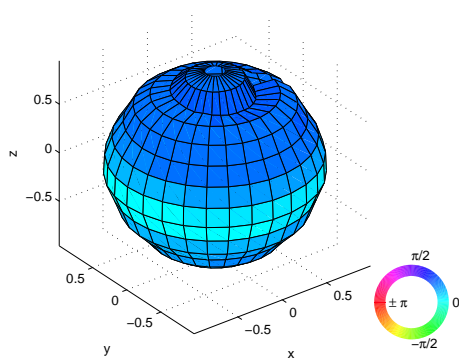


(c)

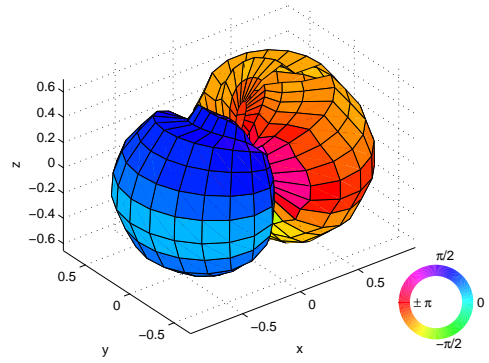


(d)

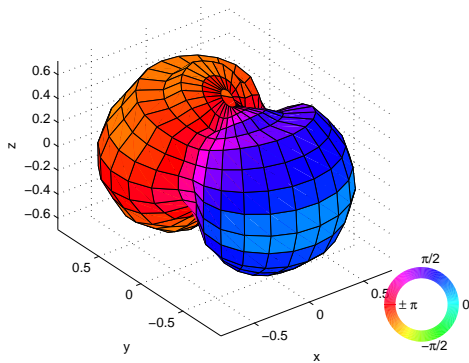
Abbildung 13: Richtwirkungen des berechnetes A-Format des ST450, Nierencharakteristik (a,b,c,d), bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik



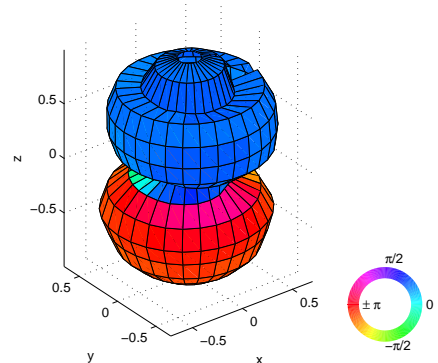
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 14: B-Format Richtwirkungen des ST450, Kugelcharakteristik (a) und 3 Achtcharakteristiken (b,c,d), bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

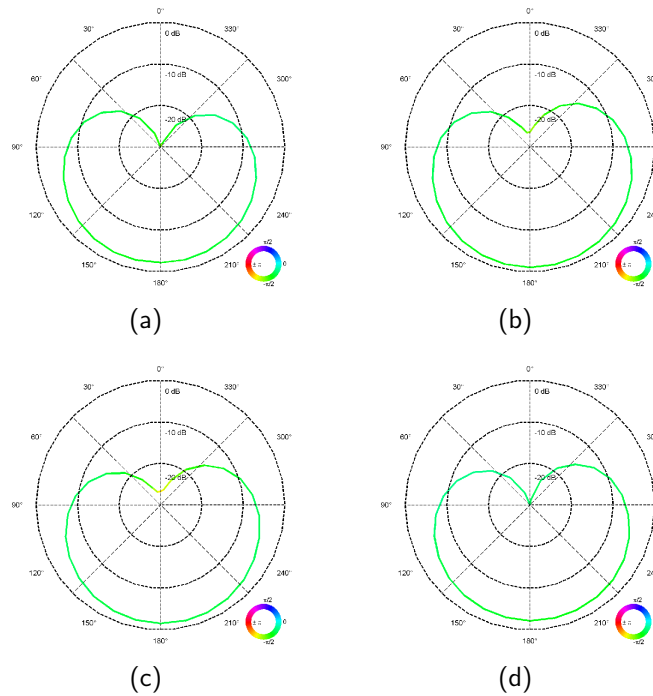


Abbildung 15: Polardiagramme des berechneten A-Formats des ST450, Nierencharakteristik, bei 1kHz, Schnitte in der Hauptachse der Richtwirkung

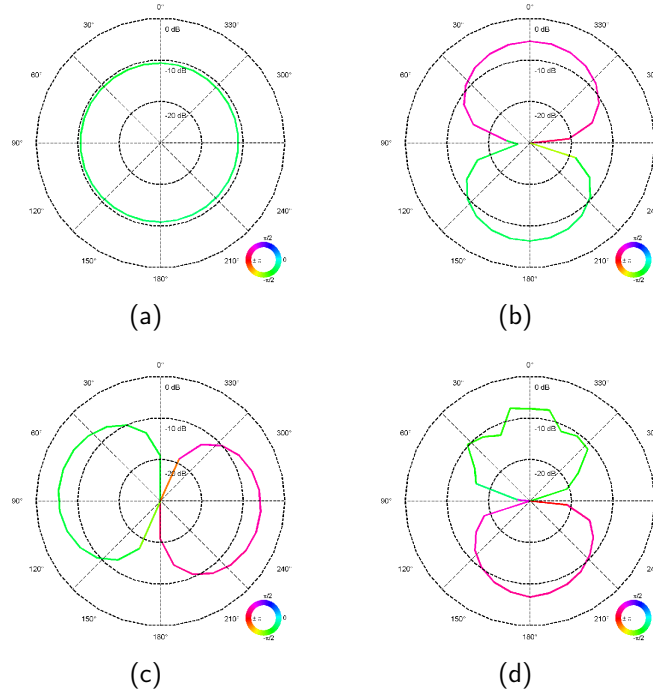


Abbildung 16: Polardiagramme des B-Formats des ST450, Kugelcharakteristik (a) und 3 Achtcharakteristiken (b,c,d), bei 1kHz, Schnitte in der x-y-Ebene (a,b,c) und der y-z-Ebene (d)

6.2 Richtwirkungen bei verschiedenen Frequenzen

Um die Frequenzabhängigkeit der Richtwirkungen darzustellen, wurde bei allen vermessenen Mikrofonen exemplarisch die Z-Komponente bei den Frequenzen 250Hz, 630Hz, 1600Hz und 4000Hz grafisch veranschaulicht. Hierbei sind in den Abbildungen 17, 18 und 19 die Richtwirkungen der Mikrofone dargestellt. Die Abbildungen 20, 21 und 22 stellen die Polardiagramme dar. Die Oktava-Mikrofone sind um 10dB angehoben. Überhalb von 4000Hz werden die Richt- und Polardiagramme grafisch nur mehr stark verzerrt dargestellt.

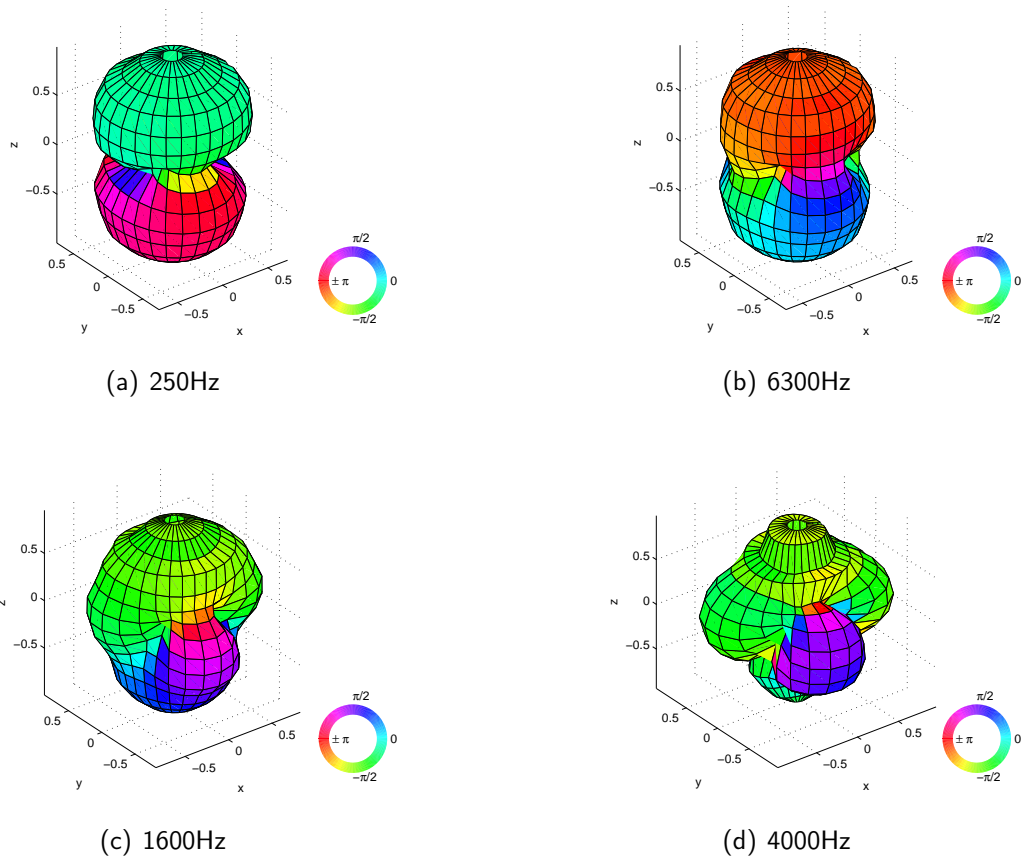
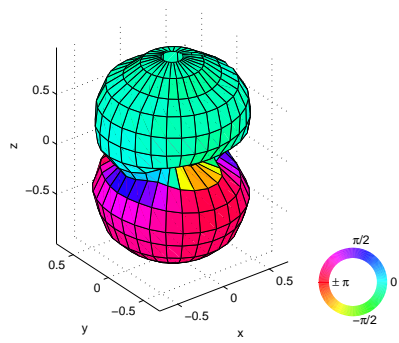
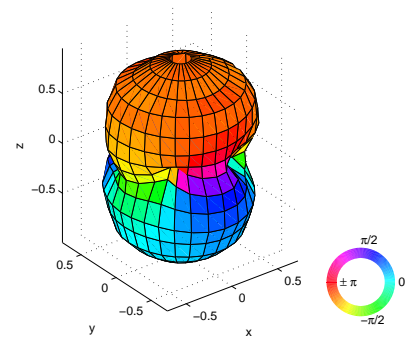


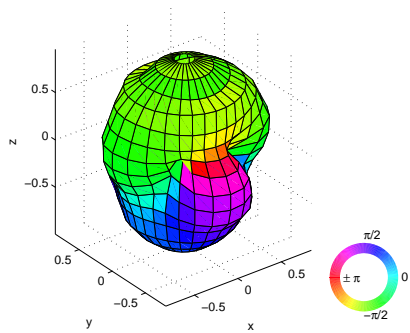
Abbildung 17: Oktava M1: berechnete Z-Komponente, 250 bis 4000 Hz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik



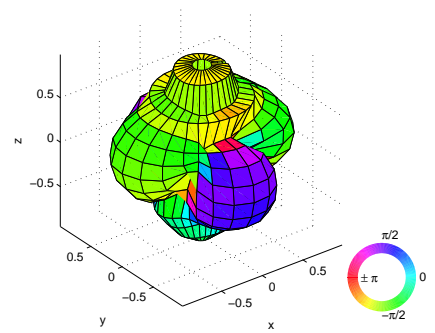
(a) 250Hz



(b) 6300Hz



(c) 1600Hz



(d) 4000Hz

Abbildung 18: Oktava M2 berechnete Z-Komponente, 250 bis 4000 Hz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

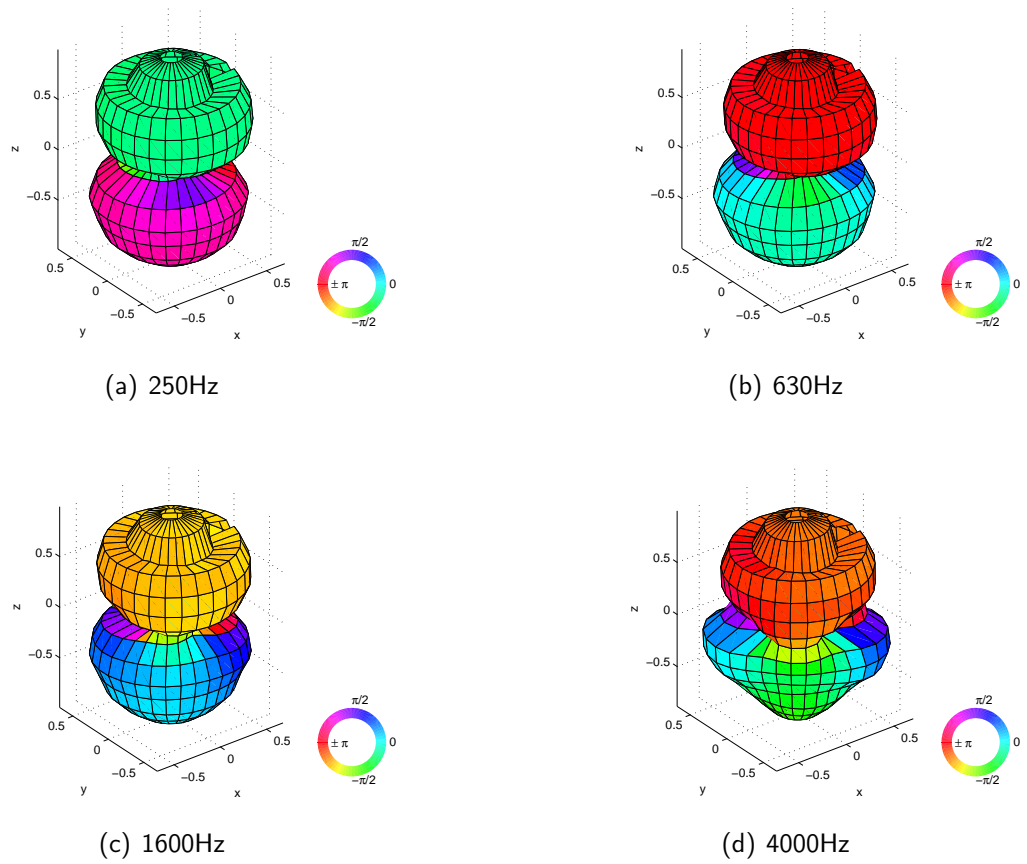


Abbildung 19: ST450 Z-Komponente, 250 bis 4000 Hz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

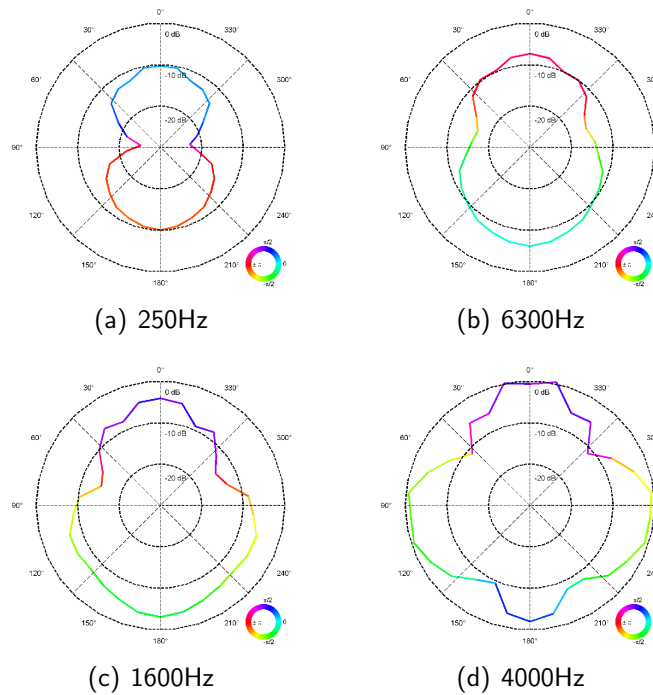


Abbildung 20: Oktava M1: Polardiagramme der berechneten Z-Komponente, 250 bis 4000 Hz, Schnitte in der y-z-Ebene (a,b,c,d)

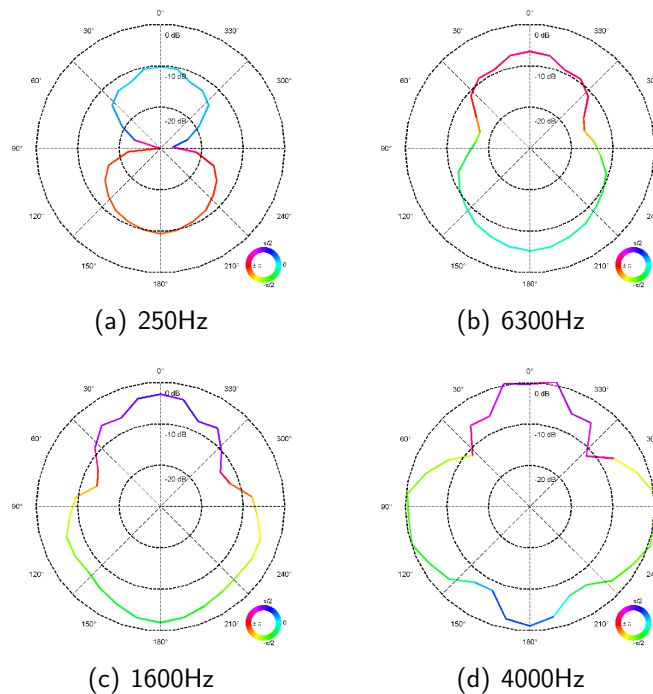


Abbildung 21: Oktava M2: Polardiagramme der berechnete Z-Komponente, 250 bis 4000 Hz, Schnitte in der y-z-Ebene (a,b,c,d)

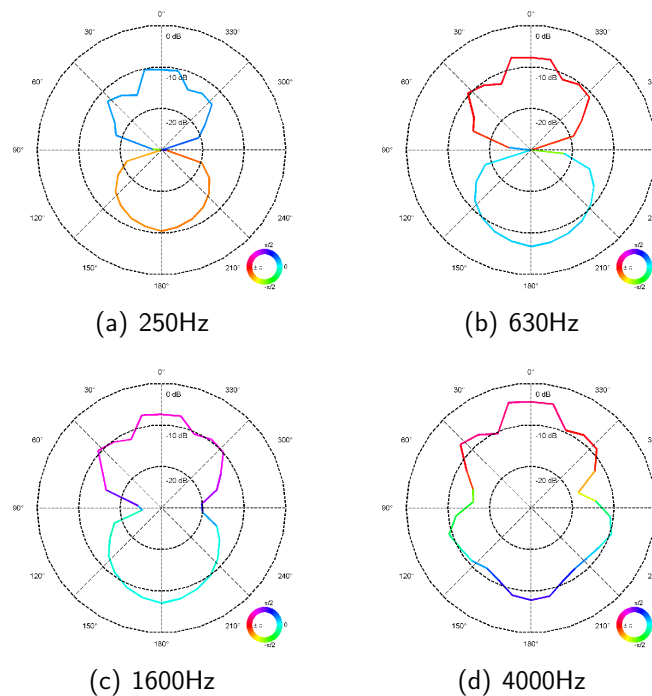


Abbildung 22: ST450: Polardiagramme der Z-Komponente, 250 bis 4000 Hz, Schnitte in der y-z-Ebene (a,b,c,d)

7 Auswertung

Betrachtet man die Abbildungen 5 und 9 ist festzustellen, dass die Richtwirkung der einzelnen Kapseln der Oktava-Mikrofone breiten Nieren entsprechen. Der Schalleinfall besitzt bei allen Mikrophonkapseln näherungsweise gleiche Phase. Auch die Umrechnung in das B-Format liefert bei tiefen Frequenzen gute Ergebnisse (Abbildungen 6 und 10). Die Kugelcharakteristik sowie die Achten in den drei Raumrichtungen und auch die Gegenphasigkeit der Achten ist im Farbschema deutlich zu erkennen. Die Ausrichtung der Achten in X- und Y-Richtung sind durch die Umrechnung um ca. 45° gedreht. Die errechnete Kugelcharakteristik ist um ca. 3dB empfindlicher als die Achten. Dieses Verhalten kann durch die breiten Nierencharakteristiken der einzelnen Kapseln begründet werden. Die Ausrichtung der Kapseln der Oktava-Mikrofone entspricht einem in der Z-Richtung leicht gestauchten Tetraeder. Dieser Umstand ist auf die Bauform des Mikrofons zurückzuführen und hat zur Folge, dass die Achtcharakteristik in z-Richtung ein wenig gestaucht erscheint (Abbildungen 17, 20, 18 und 21). Weiterhin kann aus diesen Abbildungen entnommen werden, dass in der Z-Komponente räumliches Aliasing auftritt. Die Achtcharakteristik scheint zu verschmieren. Dieser Effekt nimmt mit steigender Frequenz zu. Dabei sieht man auch, dass die Gegenphasigkeit der beiden Komponenten der Achten nicht mehr aufrecht erhalten werden kann.

Vergleicht man nun das vom Soundfield ST450 erzeugte B-Format (Abbildung 14) mit dem berechneten des Oktava M1 und M2 (Abbildungen 6 und 10) lässt sich feststellen, dass die Achtcharakteristiken besser geformt sind. Gerade bei der Acht in Z-Richtung

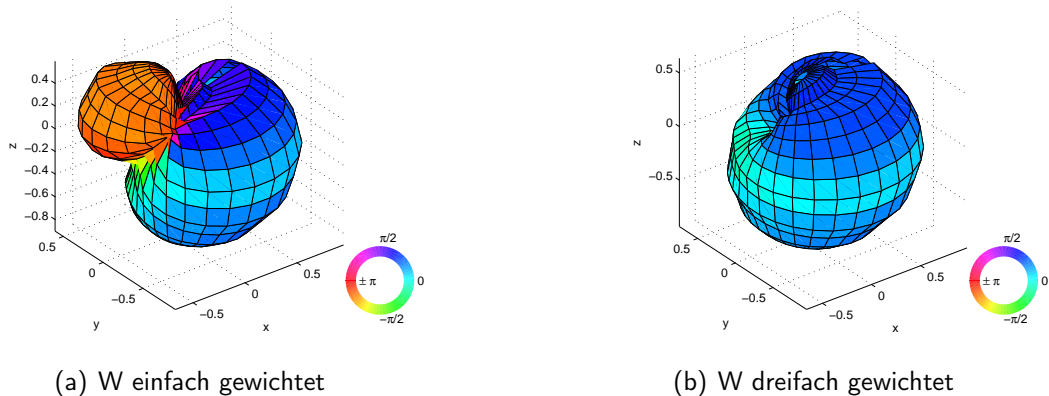


Abbildung 23: Ergebnisse verschiedener Umrechnungen des ST450-B-Formats, bei 1kHz, Ballondiagramme mit 30dB Dynamik

ist die Trennung der beiden Komponenten ausgeprägter. Die Anordnung der Membranen der ST450 Kapsel ist wesentlich kompakter. Deshalb tritt räumliches Aliasing erst bei höheren Frequenzen auf. Auffällig ist beim ST450, dass die W-Komponente des B-Formats im Pegel um ca. 6dB abgesenkt ist. Auch die Z-Komponente ist um ca. 2dB unempfindlicher. Rechnet man nun zunächst auf das A-Format mittels der Formel (2) um, zeigt sich ein erstaunliches Ergebnis. Es ergibt sich eine Supernierencharakteristik der einzelnen Membranen der Mikrofonkapsel des ST450 (Bsp.: siehe Abbildung 23). Die Steuereinheit des ST450 schwächt die W-Komponente also um ca. $\frac{1}{3}$ ab. Bei der Umrechnung muss dieser Umstand berücksichtigt werden. Es ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} LV \\ LH \\ RV \\ RH \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} +3 & +1 & +1 & +1 \\ +3 & -1 & +1 & -1 \\ +3 & +1 & -1 & -1 \\ +3 & -1 & -1 & +1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (14)$$

Es fällt leider in allen Richtwirkungen und Polardiagrammen auf, dass es einen Einbruch auf Höhe des vierten Lautsprechers gibt. Leider kam es in diesem Kanal des Verstärkers zu einem zeitvarianten Verstärkungsfehler, der zu spät bemerkt wurde. Eine weitere Messunsicherheit könnte die ungenaue Ausrichtung der Mikrofone auf dem Drehteller gewesen sein. Diese erwies sich als relativ schwierig. Hinzu kommt, dass das verwendete Messmikrofon eine andere Geometrie als die Ambisonics-Mikrofone besitzt und der Messpunkt somit nicht identisch eingestellt werden konnte.

Literatur

- [FPL11] H. J. Fernando Puente León, Uwe Kiencke, *Signale und Systeme*. Oldenbourg, 2011.
- [PD] “Pure data open source visual programming language,” <http://puredata.info/>.
- [Rum01] F. Rumsey, *Spatial Audio*. Focal Press, 2001.
- [ST4] “Tsl products, st450 mkii manual,” <http://www.tslproducts.com/>.