

Messung des Abstrahlverhaltens eines 16-kanaligen kugelförmigen Lautsprecher Arrays

Protokoll vom 6. Mai 2011, Akustische Messtechnik 2 Labor

Benjamin Weis, 0630744

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 21. August 2011



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Das Ziel dieser Laborübung war, das Abstrahlungsverhalten der einzelnen Lautsprecher einer kompakten kugelförmigen Lautsprecheranordnung (Abbildung zu vermessen. In weiterer Folge konnte mit den gewonnenen Messdaten die Reproduzierbarkeit von vorgegebenen Richtwirkungen untersucht werden. Für ein optimales Ergebnis müssen die Frequenzgänge der einzelnen Lautsprecher zusammenstimmen. Dieser Zusammenhang soll anhand der Messwerte in einer kleinen Studie gezeigt werden.



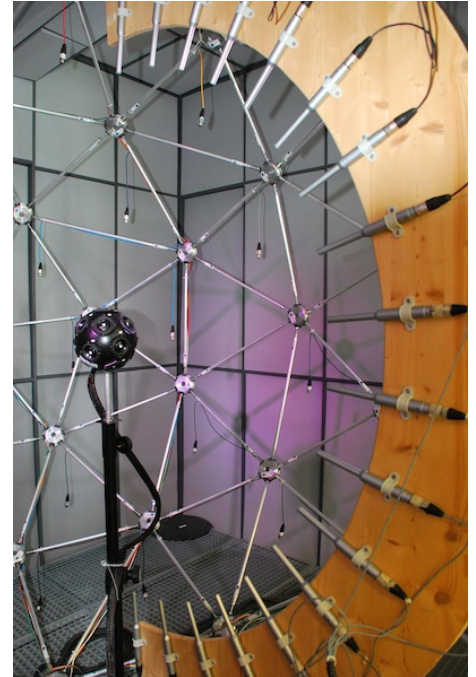
Abbildung 1: Die zu vermessende Lautsprecheranordnung

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Messaufbau	4
2	Messvorgang	4
3	Auswertung	5
3.1	Abstrahlmuster	5
3.2	Fokussierte Abstrahlung	17
4	Schlussfolgerung	21

1 Aufgabenstellung und Messaufbau

Die Aufgabenstellung und Hinweise sind in [Zot10] zu finden. Um die Lautsprecheranordnung zu vermessen, wurde eine halbkreisförmige Mikrofonanordnung (siehe Abbildung 1) verwendet. Es wurde hängend und seitlich abgespannt, damit es nicht umherschwingt. In die dafür vorgesehenen Halterungen wurden 18 Mikrofone eingespannt. Der Abstand zwischen den Mikros beträgt ca. 10cm. Das Abstrahlverhalten eines jeden Kanals des 16-kanaligen Lautsprechers soll vermessen werden. Der Lautsprecher wurde an einem elektronisch ansteuerbaren Drehteller montiert und im Mittelpunkt des Halbkreises positioniert. Das heißt, die Kugelmitte befindet sich fast im Zentrum (so exakt das Aufstellen eben möglich war). Die Mikrofone waren über einen A/D-Wandler mit einem Computer verbunden. Ein Pd-Patch¹ diente der Kalibrierung. Mit einem Schallpegelkalibrator wurde jedes Mikrofon bei 1kHz, 94dB eingestellt. Der Vorverstärker wurde für jeden Kanal grob angepasst und die restliche Differenz wurde in ein Textfile `calibration.txt` eingetragen. Damit wurden später in Matlab die Mikrofonsignale noch exakter angepasst.



2 Messvorgang

Der Messvorgang wurde ebenfalls in Pd durchgeführt. Der Drehteller war elektronisch über Pd ansteuerbar. Nach jedem Messvorgang für eine Position wurde er um 10° weitergedreht. Als Messmethode wurde die *Multiple Exponential Sweep Method* verwendet, welche in [Maj07] vorgestellt wird. Als Anregungssignal dienen dabei exponentielle Sweeps, die zeitversetzt von den Lautsprechern abgespielt werden. (Abbildung 2), die jeweils bis 22kHz laufen. Die Sweeps der einzelnen Lautsprecher müssen einen zeitlichen Mindestabstand von der Länge der Impulsantwort haben. Konkret wurden auf 16 Kanälen Sweeps mit einer Länge von 1s in einem Abstand von jeweils 0,68s abgespielt. Das heißt, dass nach jeweils 0,68s bereits der nächste Lautsprecher seinen Sweep aussenden konnte, obwohl der vorige Sweep noch nicht fertig abgespielt war. Durch diese Methode wird die Messdauer verkürzt. Ein vollständiger Messvorgang dauerte nun $(16 \cdot 0,68s + 1s + 7) \cdot 35 = 660,8s = 11\text{min}$. Die Werte sind folgende: 16 Kanäle vom Lautsprecher
0,68s Abstand zwischen den Sweeps
1s Nachhall
7s Wartezeit, bis der Drehteller weitergedreht hat
35 Drehungen á 10° für eine volle Umdrehung

1. <http://puredata.info> - Pd (Pure Data ist eine grafische Programmiersprache für Audio- und Videoanwendungen, in der sehr einfach kleine Programme (sog. Patches) erstellt werden können.

Die einhüllende Messoberfläche hatte $36 \cdot 18 = 648$ Messpunkte. Mit 16 Kanälen ergeben sich somit $648 \cdot 16 = 10.368$ aufgezeichnete Impulsantworten.

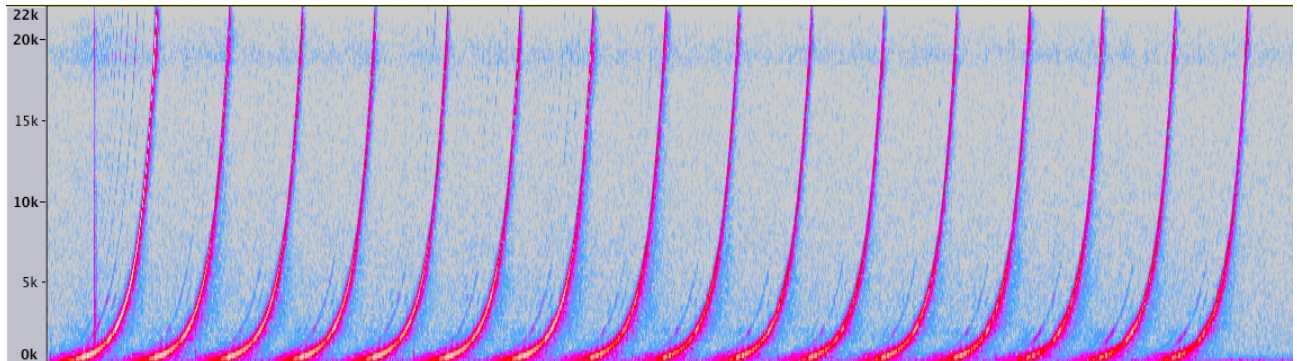


Abbildung 2: Verschachtelte Sweeps, Aufnahme von Mikrofon 1

3 Auswertung

3.1 Abstrahlmuster

Die Auswertung erfolgte in Matlab. Gewünscht war eine Darstellung in einem 3D-Ballon-Diagramm, in dem die Richtcharakteristik für jede Frequenz und für jeden Kanal darstellbar ist. Zuerst mussten die Impulsantworten entfaltet werden. Das geschah in einem eigenen Matlab-Skript. Dort wurde auch der Korrekturfaktor der Kalibrierung mit eingerechnet. Pro Winkelstellung erhält man $16 \cdot 18 = 288$ einzelne Impulsantworten. Die gesamten Impulsantworten wurden in einer $210 \times 16 \times 18 \times 36$ Matrix gespeichert.

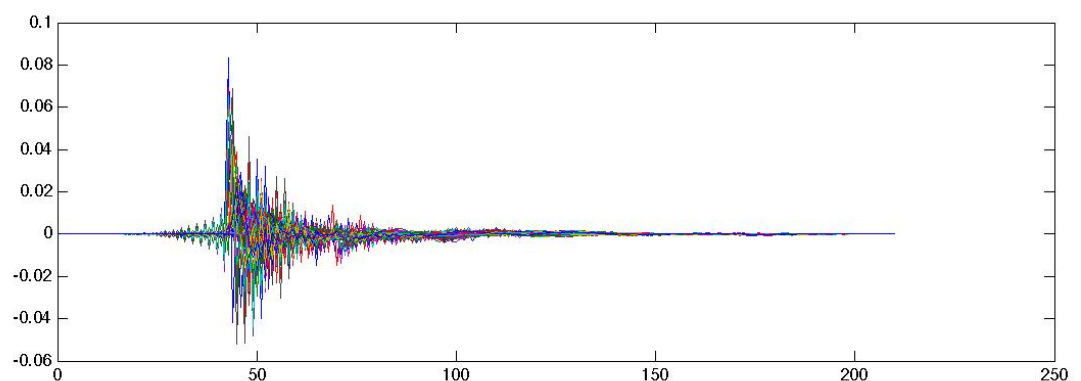


Abbildung 3: 288 Impulsantworten bei der 0°-Stellung

Es wurde mit einem Hann-Fenster über 30 Samples eingeblendet und über 110 Samples ausgeblendet. Insgesamt erhalten dabei die Impulsantworten eine Länge von 210 Samples. Zur Verbesserung der grafischen Darstellung wurde die Anzahl der dargestellten Punkte

im Vergleich zu den physikalischen vorhandenen Messpunkten erhöht. Somit werden die Ballonfiguren engmaschiger gezeichnet. Die Theorie der Auswertung wird in [?, HoHo]n Kapitel 2.5 beschrieben. Glg. (159) in Kapitel 5.6 beschreibt diese Art der Kugelflächen-Interpolation.

Nachträgliche Kalibrierung Das nachträgliche korrekte Kalibrieren war mit einer bereits aufgenommenen Messung möglich. In dieser 16-Kanal Aufnahme wird nacheinander auf jedes Mikrofon die Referenzschallquelle gesteckt. Was zu Beginn von Hand durch Eintragen der Pegeldifferenzen erledigt wurde (Ablesen im Pd-Patch) erledigt nun Matlab: Es können alle Pegeldifferenzen berechnet werden. Dazu wurde eine FFT der ersten 16000 Samples aller Kanäle berechnet. In diesen 16000 Samples befindet sich in allen Kanälen der Referenzton. Danach wurde das Maximum (bei Sample 362) herausgesucht. Das lauteste Kanal wurde als Referenz herangezogen, von den restlichen wurde die Pegeldifferenz dazu gebildet.

```
cal_sig=wavread('cal_cut.wav',[1 16000]);
cal_sig=dB(fft(cal_sig));
cal_sig=cal_sig(362,:);
cal_gain=min(cal_sig)-cal_sig;
```

Kugelflächenfunktionen Das hier behandelte dreidimensionale Problem wird in Polarkoordinaten berechnet, da sich im kartesischen Koordinatensystem ungünstige und aufwändige Darstellungen ergeben. Der Schalldruck ist abhängig von Radius r , Azimutwinkel $\phi \in [0, 2\pi]$ und Zenitwinkel $\theta \in [0, \pi]$. Die dreidimensionale Helmholtzgleichung in kartesischen Koordinaten

$$(\Delta + k^2) = 0$$

hat in Polarkoordinaten die Form

$$\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2}$$

Die radiale Lösung ergibt sphärische komplexwertige Hankel-Funktionen, die Lösung in den Winkeln ergibt Legendre-Funktionen. Die Gesamtlösung kann angeschrieben werden als

$$p(r, \varphi, \vartheta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (b_{nm} j_n(kr) + c_{nm} h_n^{(2)}(kr)) Y_n^m(\varphi, \vartheta)$$

Dabei sind $Y_n^m(\varphi, \vartheta)$ die sogenannten Kugelflächenfunktionen. Das sind Basislösungen, auf die der Schalldruck abgebildet wird (Abbildung 3.1). $b_{nm} j_n(kr)$ und c_{nm} sind die Wellenspektren, mit denen alle Arten von homogenen Schallfeldern dargestellt werden können.

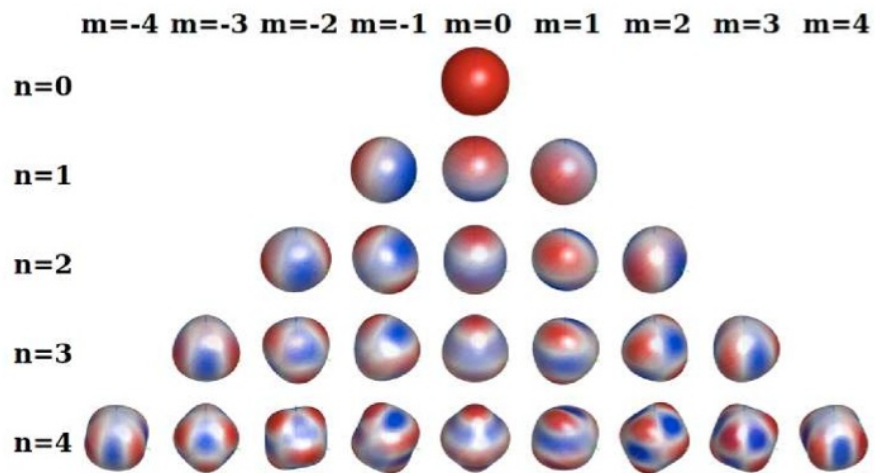


Abbildung 4: Kugelflächenfunktionen

Grafische Auswertung Bei genauerer Betrachtung ist ersichtlich, dass der dritte Lautsprecherkanal während der Messung phasenverdreht angesteuert wurde. Im Gegensatz zu allen anderen Kanälen weist er eine Phasenverschiebung von 180° auf (Abbildung 5).

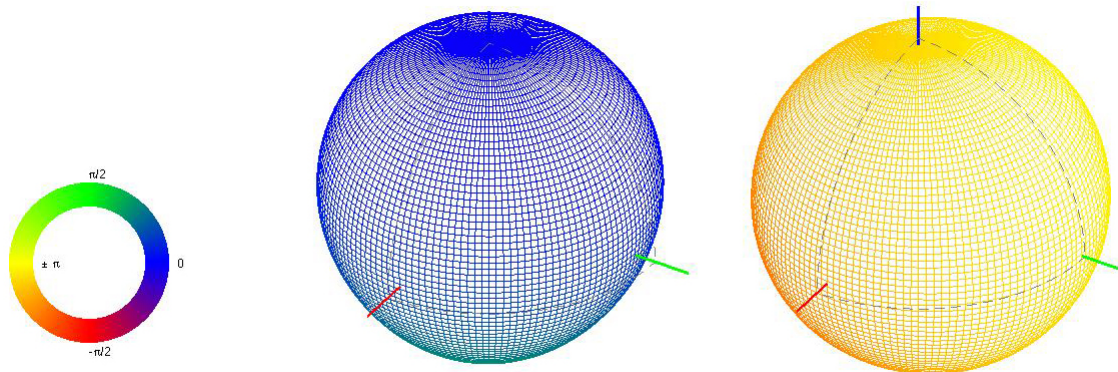


Abbildung 5: links: 1. LS, rechts: 3. LS (Phasenverschiebung um 180°)

Zum Vergleich aller LS zeigt Abbildung 6 sehr schön, dass bei ca. 1kHz alle LS gleiche Abstrahlcharakteristik haben (bis auf LS 3, welcher verpolt ist).

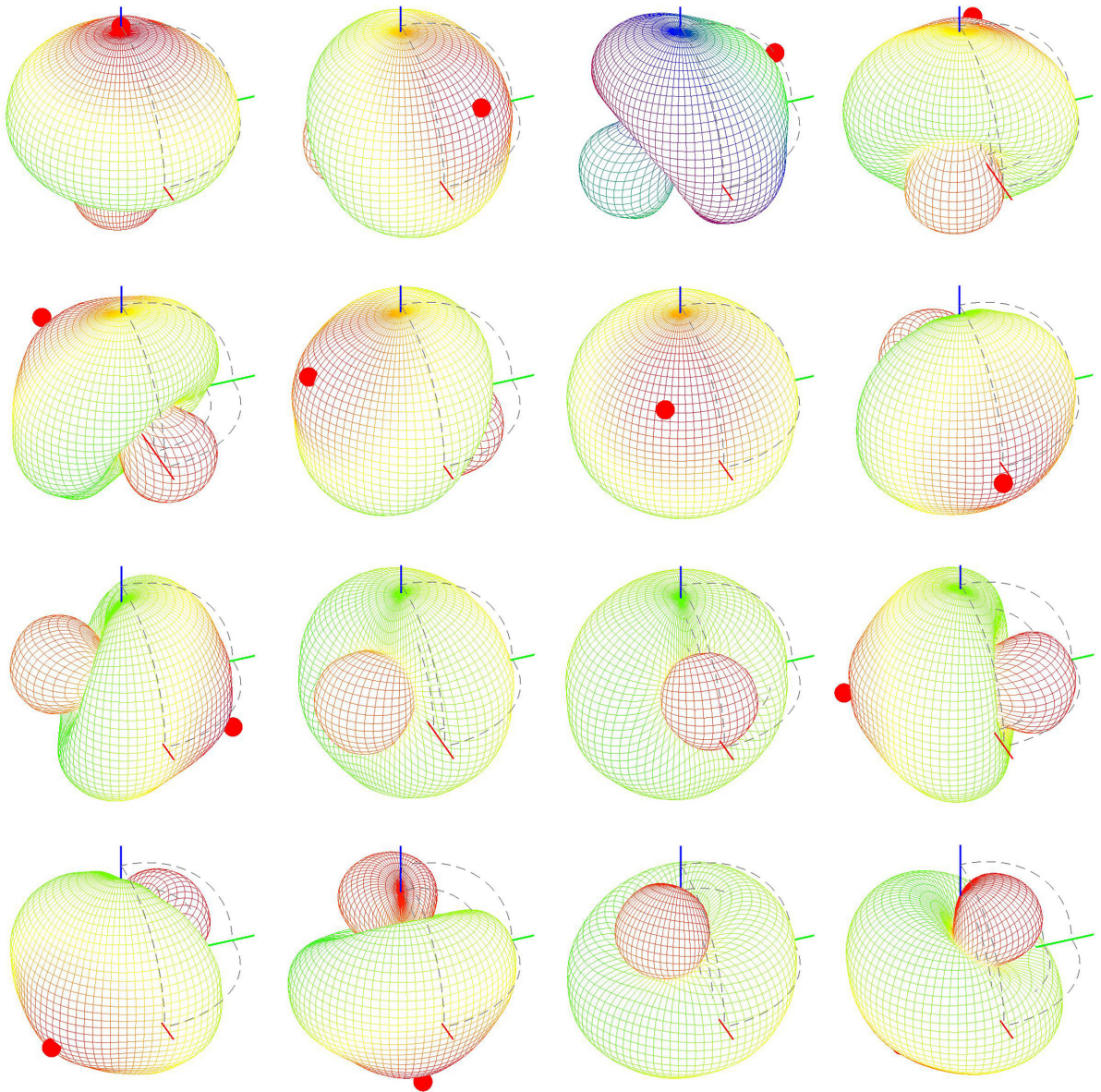


Abbildung 6: Plot der Abstrahlcharakteristiken bei ca. 1kHz, beginnend l.o. mit LS 1, zeilenweise

Die Bedeutung der Kalibrierung wird in Abbildung 7 gezeigt. Unkalibrierte Mikrofonpegel verursachen ringförmige Muster in der Abstrahlung.

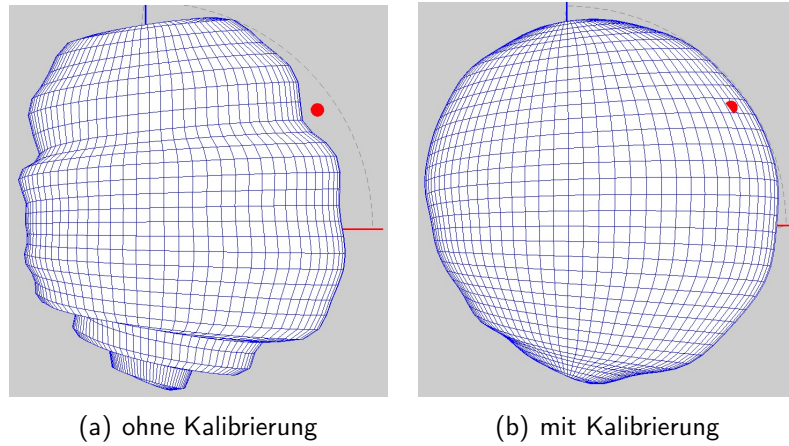


Abbildung 7: Vergleich mit und ohne Kalibrierung der Mikrofonpegel

Nachfolgend sind die Abstrahlmuster des 1. LS bei den Frequenzen 205Hz, 800Hz, 1500Hz, 3000Hz, 5000Hz, 8000Hz und 15000Hz dargestellt (von links oben zeilenweise). In Abbildung 3.1 sind schöne Abstrahlmuster zu erkennen, während zu höheren Frequenzen hin sich einige Nebenkeulen ausbilden. Bei 15000Hz ist das Abstrahlmuster sehr inhomogen, eine eindeutige Hauptkeule existiert wegen Aliasfehlern bei der Zerlegung nicht.

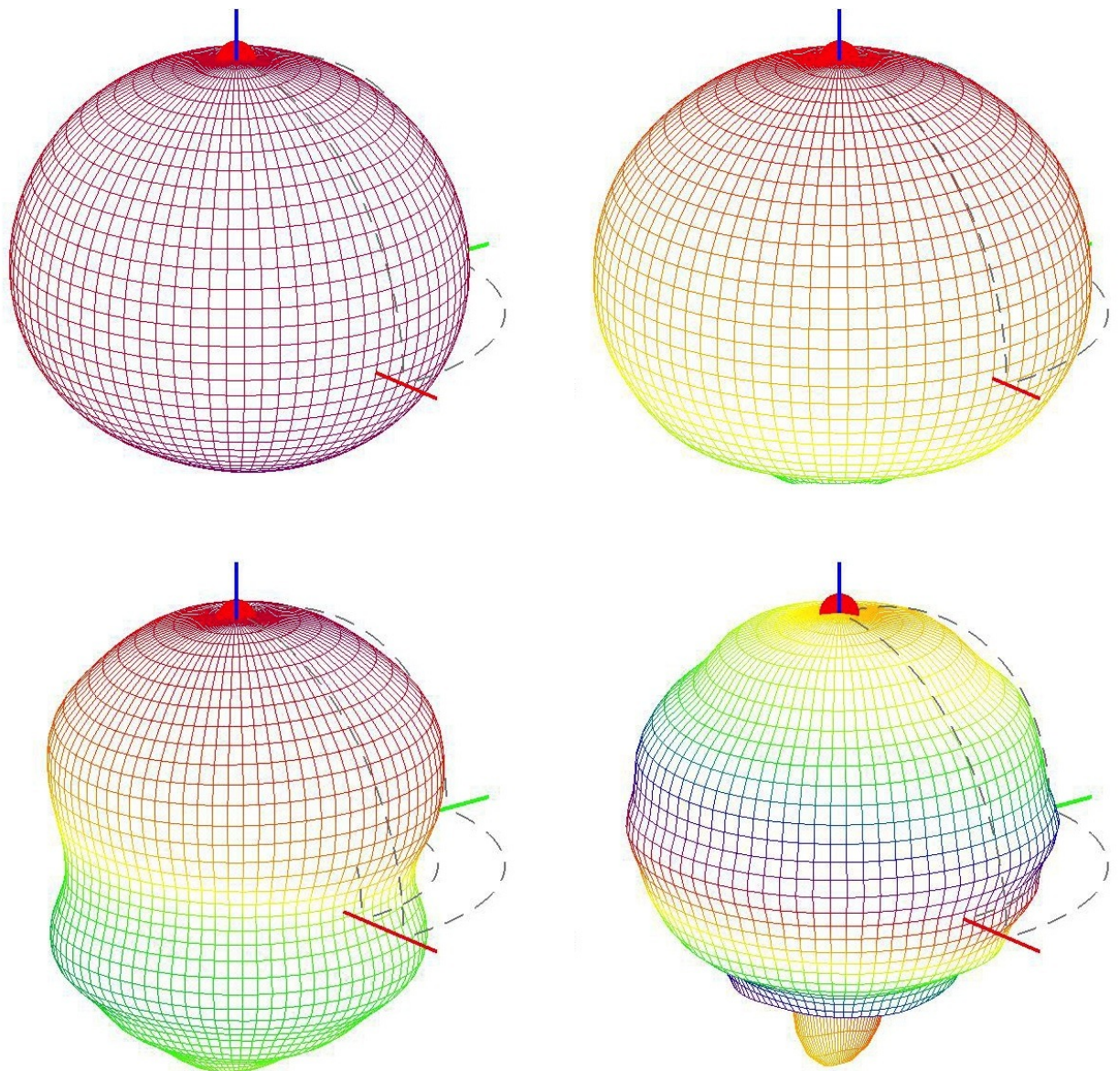


Abbildung 8: Abstrahlmuster des 1. LS bei 205, 800, 1500 und 3000Hz

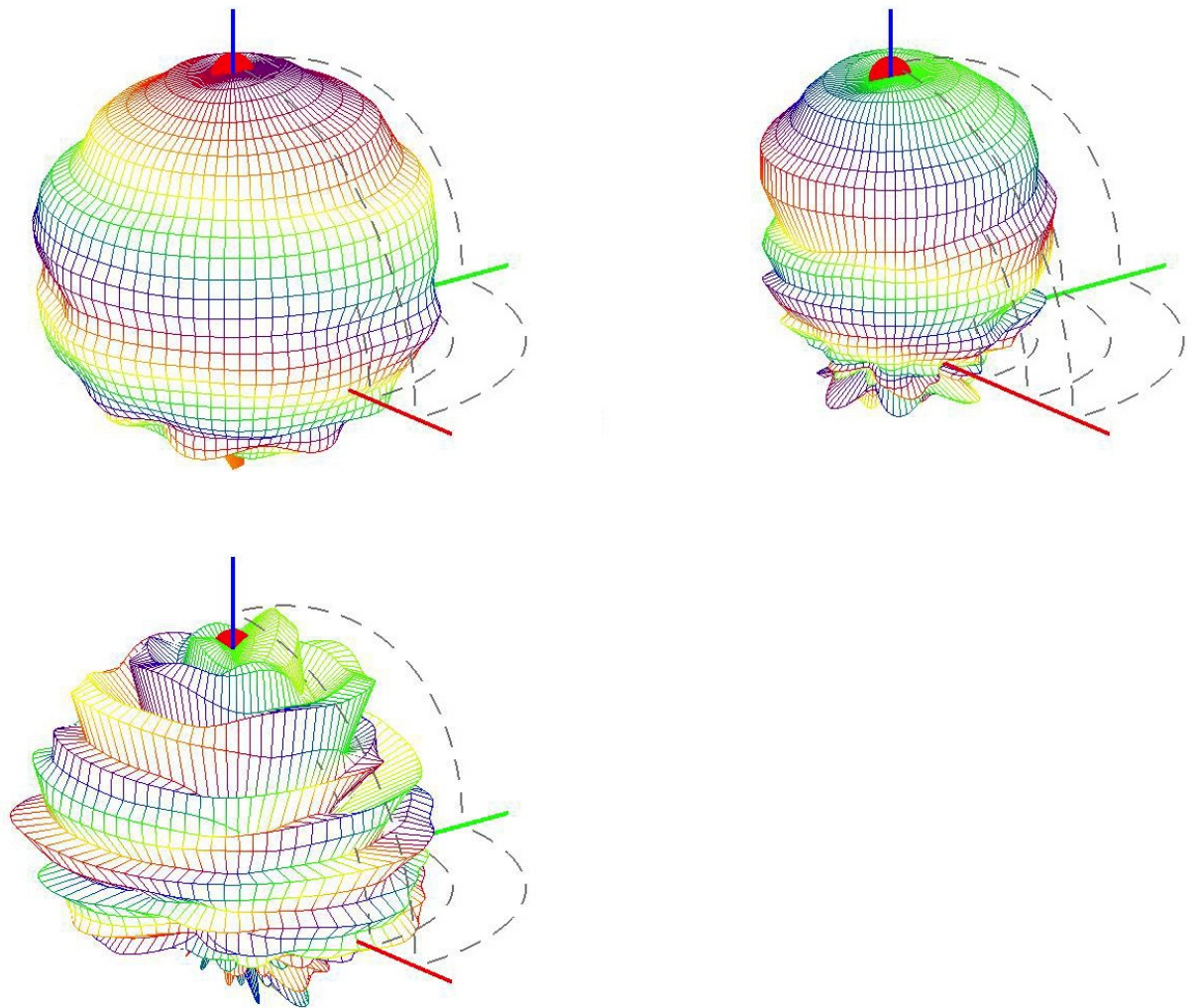


Abbildung 9: Abstrahlmuster bei 5000, 8000 und 15000Hz

Frequenzgänge und Impulsantworten der Lautsprecher Um mit diesem Lautsprecherarray Beamforming betreiben zu können, müssen alle LS gleiche Frequenzgänge aufweisen. Bis jetzt wurden nur die direkt gemessenen Impulsantworten (am Ort der Mikrophone) betrachtet. Interessanter sind jedoch die Impulsantworten gemessen auf den Hauptabstrahlrichtungen eines jeden Lautsprechers. Indirekt waren diese schon bei der Holografie der Ballonfiguren vorhanden. Hier wurde für jeden Maschenpunkt der Kugel ein frequenzabhängiger Betragsvektor gezeichnet. Lässt man nun alle Frequenzen durchlaufen und wertet den Betrag nur am Ort des Lautsprechers aus, so erhält man den Frequenzgang des Lautsprechers. Dazu wird der Fourier transformierte Schalldruck mit den Kugelflächenfunktionen an den Mikrophon-Positionen entfaltet und anschließend kugelflächeninterpoliert am richtigen Winkel ausgelesen (Matrixmultiplikationen „von links“). Als Ergebnis erhält man einen Betragsvektor.

$$\vec{\psi} = \mathbf{Y}^{-1} \vec{\mathbf{p}}$$

$$\vec{p}(\varphi, \vartheta)|_R = \sum_{n=0}^{17} \sum_{m=-n}^n \mathbf{Y}_n^m(\varphi, \vartheta) \vec{\psi}_n^m$$

$$\vec{p}(\theta_{LS}) = \mathbf{Y}(\theta_{LS}) \vec{\psi}$$

θ_{LS} ist die Hauptabstrahlungsrichtung, an dem der Schalldruck ausgewertet werden soll.

In Abbildung 10 sind die Frequenzgänge aller LS gezeichnet. Alle Kanäle weisen gleiches Frequenzverhalten auf. Man erkennt, dass im Bereich 200Hz bis 600Hz die Frequenzgänge maximal um ca. 2dB auseinanderliegen. Zu niedrigeren und höheren Frequenzen hin steigt diese Differenz auf ca. 6dB. In Abbildung 11 ist im unteren Drittel der Amplitudenunterschied zum 1. LS aufgezeichnet.

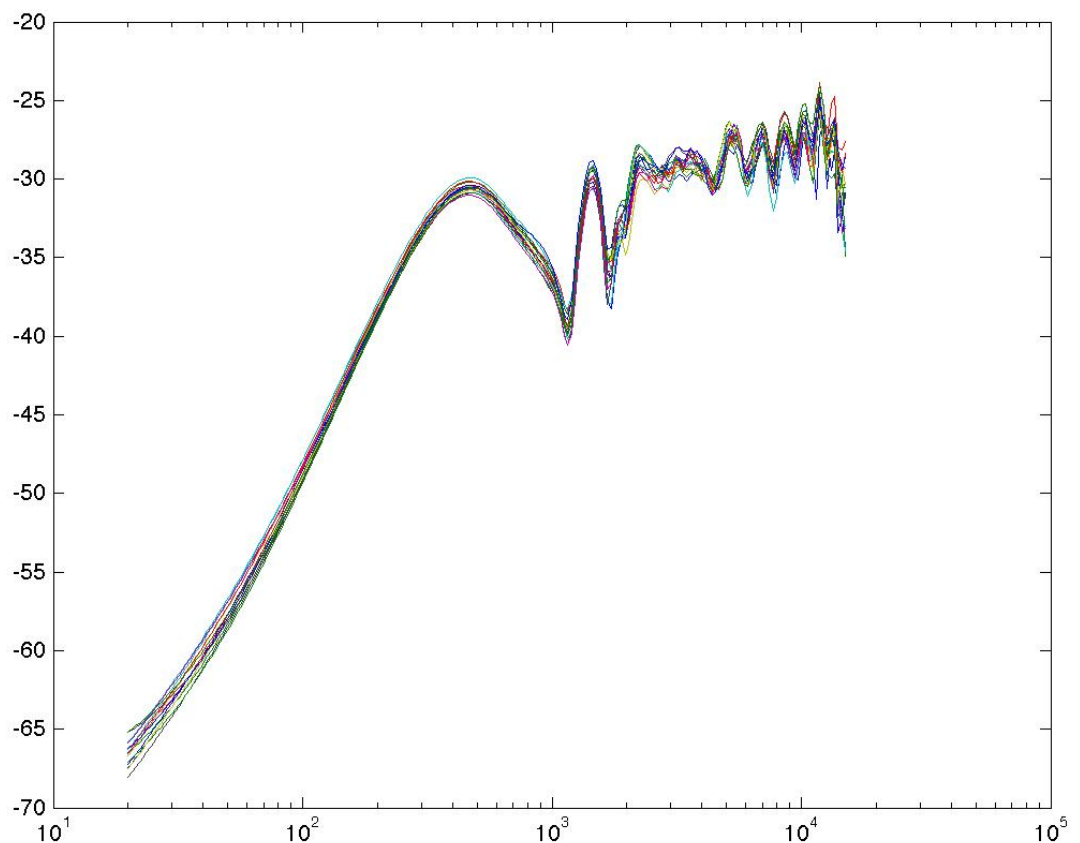


Abbildung 10: Plot aller 16 Frequenzgänge

Die Matrizen der Kugelflächenfunktionen sind reel und frequenzunabhängig. Um die Impulsantworten im Zeitbereich zu erhalten, werden wieder die Impulsantworten (im

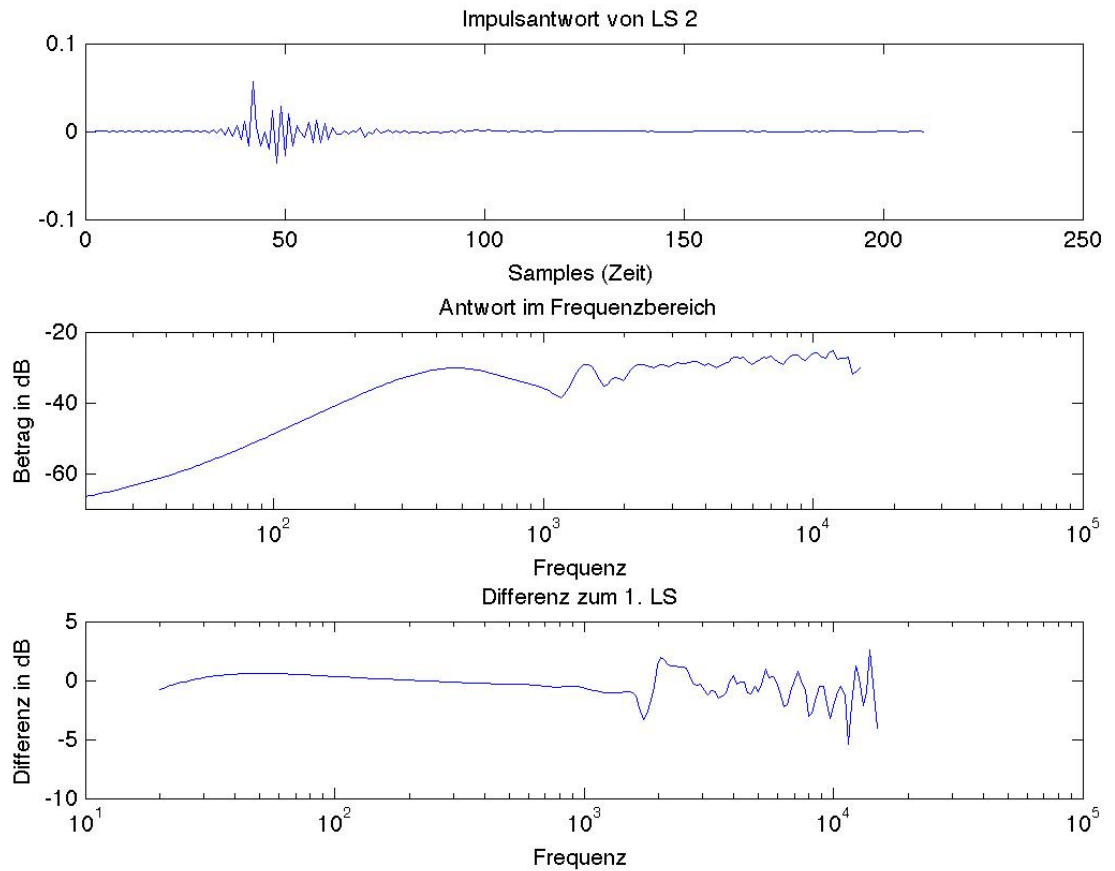


Abbildung 11: LS 2: Impulsantwort, Frequenzgang und Abweichung zum LS 1

Zeitbereich - vorhin waren diese bereits Fouriertransformiert) mit den Kugelflächenfunktionen an den Orten der Mikrofone entfaltet und mit den Kugelflächenfunktionen an den Hauptabstrahlrichtungen der Lautsprecher ausgewertet. Allerdings erfolgen die Matrixmultiplikationen nun von rechts und können im Zeitbereich erfolgen. In Abbildung 11 ist die Impulsantwort im Zeit- und Frequenzbereich des 1. Lautsprechers abgebildet sowie die Abweichung zum Pegel des 1. LS.

In Abbildung 12 sind die Abweichungen aller LS eingezeichnet. Zum exakteren Reproduzieren eines Beams können die unterschiedlichen Amplituden in Form einer zusätzlichen Gewichtung in den Berechnungen berücksichtigt werden. Für eine einfache Implementierung wird der Wert bei einer Frequenz verwendet und als Gewichtungsfaktor verwendet. In Abbildung 13 wurde die Frequenz bei 797 Hz gewählt. Es ergeben sich maximale Unterschiede von -3,5 dB bei dieser Frequenz.

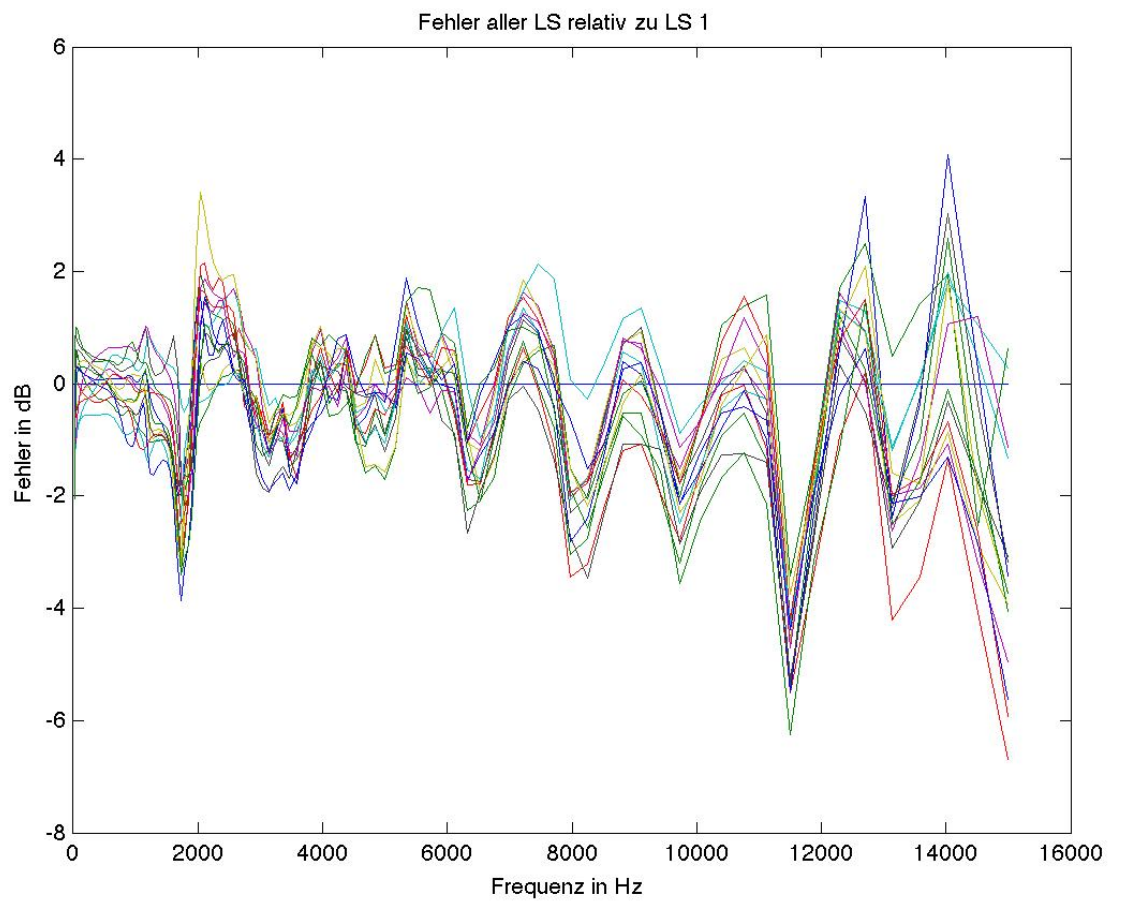


Abbildung 12: Frequenzabweichungen der Einzellautsprecher jeweils auf Achse gemessen (interpoliert) und auf LS 1 referenziert

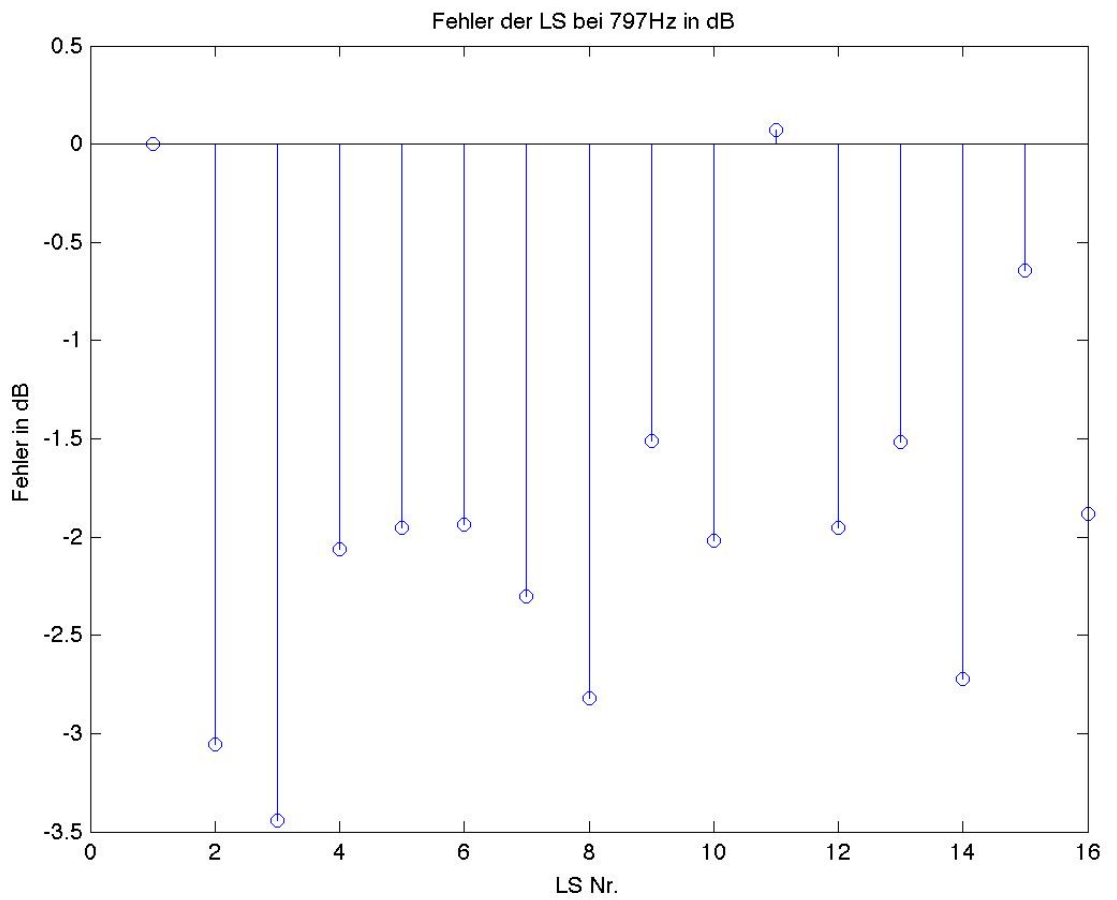


Abbildung 13: Pegelunterschiede der Einzellautsprecher bei 797Hz auf LS 1 referenziert

3.2 Fokussierte Abstrahlung

Es wird nun untersucht, wie exakt eine vorgegebene Abstrahlrichtung bei verschiedenen Frequenzen nachgebildet werden kann. Interessant sind vor allem der Bereich der oberen und unteren Grenzfrequenz, also bis zu welchen Frequenzen hin ein Schallstrahl zufriedenstellend erzeugt werden kann. Die Abstrahlungsmuster in diesem Frequenzbereich sollen annähernd gleich sein.

Erzeugung der Abstrahlung Es wird angenommen, dass die Kugel, in der die LS eingebaut sind, absolut starr ist und keine Schnelle aufweisen. An den Orten l der Membranen jedoch prägen diese eine konstante Amplitude und Phase als Oberflächenschnelle $v(\phi, \theta) = v^{(l)}$. Weiters wird angenommen, dass die Membranschnelle direkt über die Eingangsspannung der Einzellautsprecher steuerbar ist.

Das sphärische Wellenspektrum des Schalldruckes berechnet sich zu

$$\vec{\psi}_Q(R) = \frac{\rho_0 c}{i} \text{diag}_Q \left\{ \frac{h_n(kr)}{h'_n(kR)} \right\} \mathbf{A}_Q \vec{v}. \quad (1)$$

Dies entspricht dem Dekoder, mit welchem die Kugelflächenfunktionen angesteuert werden. Die Steuerbarkeit reicht bis zur 3. Ordnung. Bei hohen Frequenzen kann räumliches Aliasing auftreten. Zur Ansteuerung für ein gewünschtes sphärisches Wellenspektrum $\vec{\psi}_N|_{r_p}$ ergibt sich

$$\vec{v} = \frac{i}{\rho_0 c} \mathbf{A}_N^{-1} \text{diag} \left\{ \frac{h'_n(kR)}{h_n(kr_p)} \right\} \vec{\psi}_N|_{r_p}. \quad (2)$$

Die Gleichungen 1 und 2 zusammengefasst ergeben folgenden Matlab-Code, der die Gewichte zur Ansteuerung der LS liefert.

```
g=data.Dec'*diag(sh_nmtx2nmmtx(sph_hankel2_diff(kr1s,data.N). / ...
sph_hankel2(krmic,data.N),0))*ysh';
```

Das Richtmuster wird anschließend mit

```
pbeam=P*g;
```

berechnet. Darin enthalten sind die Schalldrücke auf diskreten 18x36 Punkten auf der Kugeloberfläche ausgewertet, welche nun wie bei den Ballon-Figuren in 3D aufgezeichnet werden können.

Grenzfrequenzen Die Auswirkung von korrigierten Werten lässt sich grafisch nachvollziehen. Auffällig ist, dass die Amplituden bei 800Hz zunehmen (Abbildung 14 links oben). Allerdings sind die Abstrahlungen bei 800Hz und 1000Hz vor der Anpassung ähnlicher als nach der Anpassung. Eine eindeutige Abstrahlungsrichtung wird bis ca. 2500Hz wiedergegeben (15). Darüber hinaus wird das Abstrahlungsmuster sehr unregelmäßig ohne besondere Vorzugsrichtung. Daher stellt 2500Hz ungefähr die obere Grenzfrequenz der Lautsprecheranordnung dar.

Die untere Grenzfrequenz ist dort zu suchen, wo die Verstärkung der Holografiefilter

$$\frac{h_n(kr)}{h'_n(kR)}$$

ca. 45dB überschreitet. Holografiefilter regen höhere Ordnungen stärker an, um schlechte Abstrahlungseffizienz zu entzerren. In Abbildung 16 sind die Verstärkungen bis zur 3. Ordnung eingezeichnet (grün). Bei tiefen Frequenzen ist eine Entzerrung nicht mehr bis zur 3. Ordnung möglich, welche bei ca. 800Hz die kritische Verstärkung von 45dB überschreitet. Daher gilt 800Hz als untere Grenzfrequenz. Die Abstrahlung wird in Abbildung 17 noch einmal gezeigt.

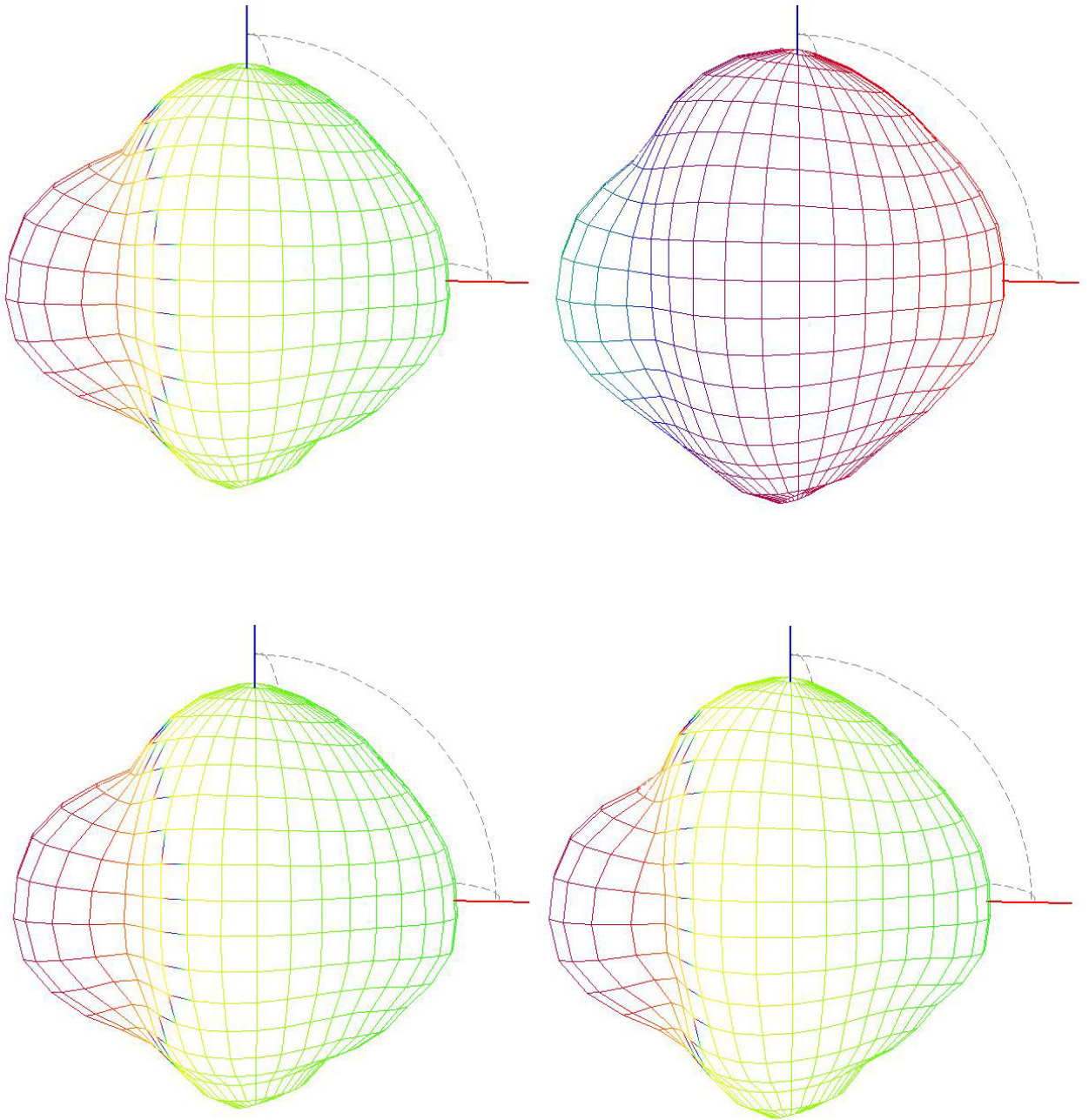


Abbildung 14: Vorgegebene Abstrahlungsrichtungen bei 800 und 1000Hz. links: Daten aus Messung, rechts: mit angepassten Amplituden

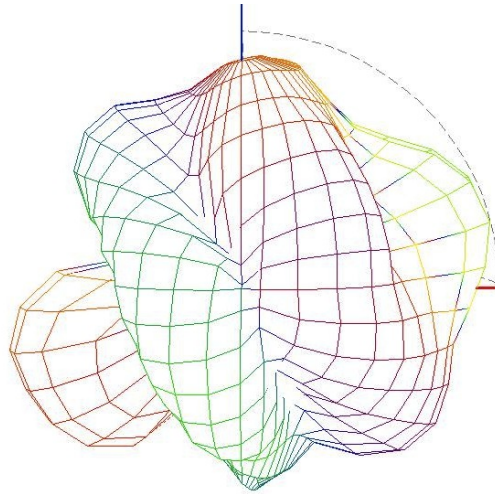


Abbildung 15: Vorgegebene Abstrahlungsrichtung bei der oberen Grenzfrequenz (2500Hz)

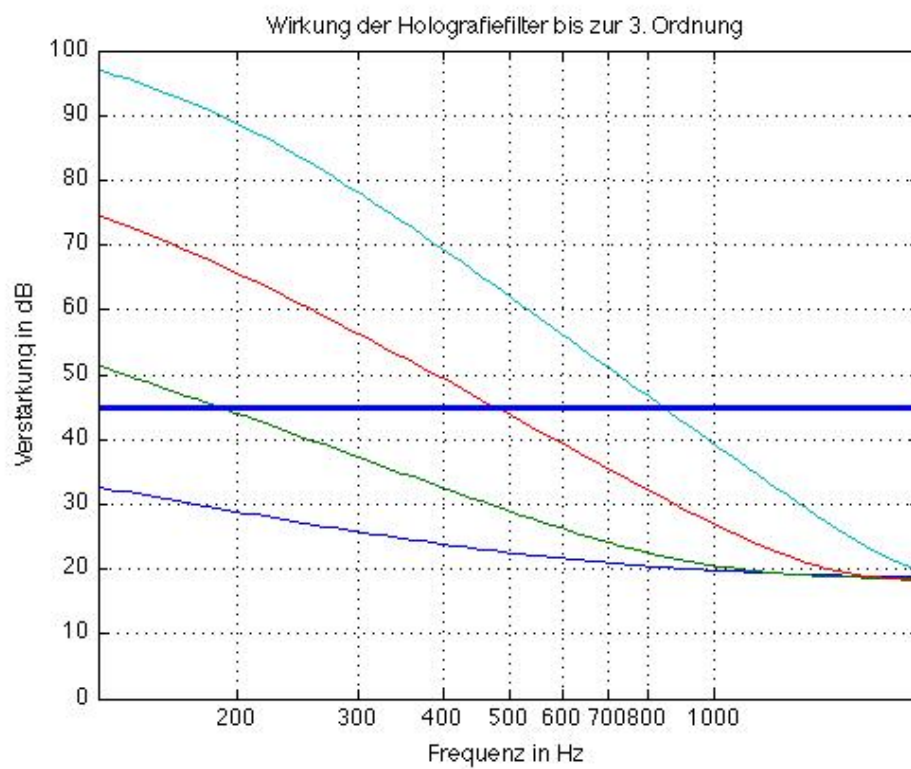


Abbildung 16: Verstärkungen der Holografiefilter

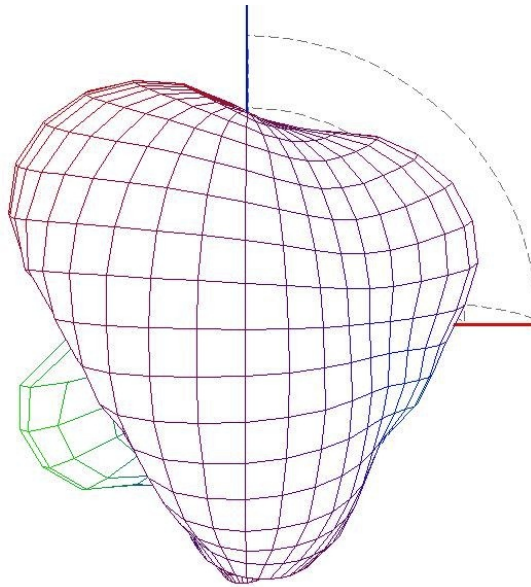


Abbildung 17: Vorgegebene Abstrahlungsrichtung bei 800Hz (untere Grenzfrequenz)

4 Schlussfolgerung

Die Reproduzierbarkeit von vorgegebenen Abstrahlungsrichtungen ist innerhalb der Grenzfrequenzen möglich. Über 2500Hz wird die nächsthöhere, aliasbeinhaltende Ordnung (4. Ordnung) nicht mehr durch schlecht angepasste Schallabstrahlung bedämpft, es kommt zu Aliasing. Wie in der Auswertung sichtbar wurde, ist eine Anpassung der Mikrofonpegel von wesentlicher Bedeutung. Ohne Anpassung treten ringförmige Verzerrungen der Abstrahlung auf. Die Frequenzgänge der Lautsprecher verlaufen beinahe parallel, somit wurde lediglich eine Anpassung mit einem fixen Verstärkungsfaktor angewendet. Diese bewirkt jedoch keine große Verbesserung bezüglich der Abstrahlungsrichtungen bzw. der Grenzfrequenzen.

Literatur

- [Maj07] L. Majdak, Balasz, "Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions," *AES Journal*, 2007.
- [Zot10] F. Zotter, "Laborunterlagen akustische messtechnik 2, lu, s2010," Ausgabe 2010.