

Messungen mittels Kugelmikrofonarray

Laborprotokoll, Akustische Messtechnik 2, LU

Stefan LÖSLER (0731140)
Uwe NEUGEBAUER (0430089)
Florian PAUSCH (0573089)

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 14. Mai 2010



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Das folgende Dokument soll die im Labor behandelten Aufgabenstellungen zum Thema 'Messungen mittels Kugelmikrofonarray' (Einheit 3-5) beschreiben. Im Speziellen werden verschiedene Schallquellen und deren Abstrahlcharakteristika untersucht. Hierzu wurde das jeweilige Messobjekt mit einem logarithmischen Sweep über PD angesteuert, um dessen Sweep-Antwort zu messen. Nach der entsprechenden Signalverarbeitung und Zerlegung in Spherical Harmonics (SHs) in MATLAB, wurden diverse GUIs zur raschen Erlangung eines Überblicks über den umfangreichen Datensatz implementiert, die es ermöglichen sphärische Abstrahlungsdiagramme für fixe Frequenzen in einem 3D-Plot darzustellen. Dabei kann man die frequenzabhängige Richtcharakteristik sehr gut beobachten.

Inhaltsverzeichnis

1	Equipment, Vorbereitung des Versuchs	4
2	Signalverarbeitung	4
2.1	Messung der Sweepantworten	4
2.2	Berechnung des sphärischen Wellenspektrums	5
3	Auswertung der Messergebnisse	6
3.1	Tropfenlautsprecher	6
3.2	JBL-Bühnenmonitor	8
3.3	Ikosaederlautsprecher	10
4	Holographische Extrapolation	12
5	Fazit	12

Abbildungsverzeichnis

1	Kugelmikrofonarray mit 64 Messpunkten	4
2	Impulsantworten der drei Messobjekte	5
3	Tropfenlautsprecher im Kugelmikrofonarray	6
4	Sphärisches Abstrahldiagramm des Tropfenlautsprechers	7
5	Sphärisches Wellenspektrum des JBL-Bühnenmonitors	9
6	Ikosaederlautsprecher im Kugelmikrofonarray	10
7	Fehlerhaftes Abstrahldiagramm des Ikosaederlautsprechers	11

1 Equipment, Vorbereitung des Versuchs

Nach dem Einbau der Mikrofone in das kugelförmige Array (Abb. 1), wurden die Mikrofonpegel mittels eines PD-Patches und eines Pistofons des Referenzschallpegels von 94 dB ($\hat{=} 1$ Pa) erfasst. Die erhaltenen Pegel werden später als Gainkorrekturfaktor in die einzelnen Messungen miteinbezogen. Weiterhin ist es notwendig das geschätzte akustische Zentrum des Messobjekts im geometrischen Zentrum des Arrays zu platzieren, um korrekte Messergebnisse zu erhalten.

Die 64 'Behringer ECM-8000' Messmikrofone mit Kugelcharakteristik sind über die Mikrofonvorverstärker 'Behringer ADA8000 PRO-8 DIGITAL' und dem Audio-Interface 'RME ADI-642' mit dem PC verbunden.

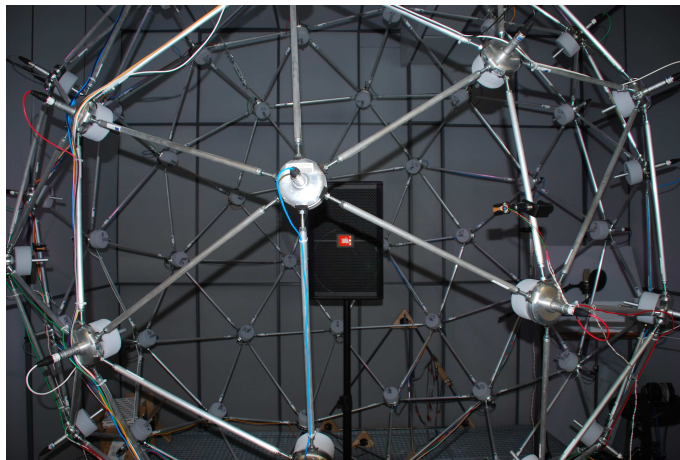


Abb. 1: Kugelmikrofonarray mit 64 Messpunkten

Als Messobjekte verwenden wir einen Tropfenlautsprecher mit einem 3-Zoll Chassis (Abschnitt 3.1), weiters den Bühnenmonitor 'SRX-712M' der Firma JBL (Abschnitt 3.2) und abschließend den Ikosaederlautsprecher des IEM (Abschnitt 3.3).

2 Signalverarbeitung

Im Folgenden wird die Signalverarbeitung von der Aufnahme der Sweep-Antworten bis zur Darstellung der sphärischen Abstrahldiagramme (*balloon-diagrams*) in einem 3D-Plot beschrieben.

2.1 Messung der Sweepantworten

Als Anregungssignal wurde ein logarithmischer Sweep verwendet und der Schalldruck an den 64 Mikrofonpositionen gemessen. Mithilfe der Sweepantworten werden in MATLAB die entsprechenden Impulsantworten berechnet, mit den Kalibrierungsfaktoren korrigiert und schließlich zeitlich gefenstert.

Hierzu werden die Antworten grafisch dargestellt und die Dauer der Lautsprecherimpulsantwort abgeschätzt. Diese entspricht einem Wert von ca. 4,5 ms (oder 200 Samples bei $f_s = 44,1$ kHz). Durch diese Fensterung sollen des Weiteren harmonische Verzerrungen ausgeblendet werden (Abb. 2).

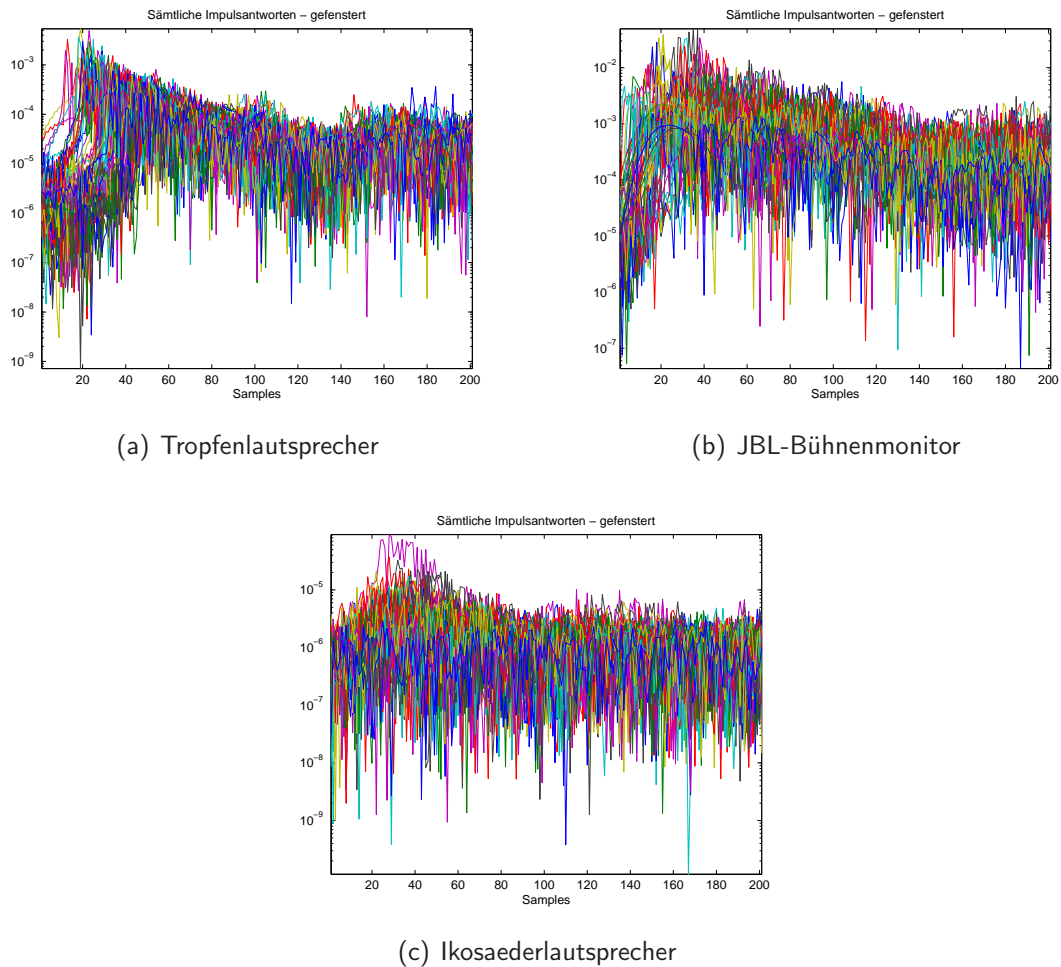


Abb. 2: Impulsantworten der drei Messobjekte

2.2 Berechnung des sphärischen Wellenspektrums

Um die verdrehte Lage der gegebenen Punkte des Kugelarrays im Raum auszugleichen, ist es notwendig die Lage der Kugel mithilfe einer in PD erstellten Drehmatrix an das verwendete Koordinatensystem anzupassen.

Zur Darstellung der Schalldrücke an einer Kugeloberfläche mit Radius $R=1.2$ m und Ordnung $N=7$ ($m = [N+1]^2 = 64$ diskrete Messpunkte) wird vektoriell notierter folgender Zusammenhang angenommen [Zot10]:

$$\mathbf{p} = \mathbf{Y}_N \boldsymbol{\psi}_N. \quad (1)$$

Hierbei entspricht \mathbf{p} den an der Kugeloberfläche gemessenen Schalldrücken, \mathbf{Y}_N den an den Messpositionen ausgewerteten Kugelharmonischen und ψ_N dem sphärischen Wellenspektrum.

Um letzteres berechnen zu können, muss die SH-Matrix, welche mithilfe einer vorhandenen MATLAB-Funktion berechnet wird, invertiert und mit den gemessenen diskreten Schalldrücken multipliziert werden:

$$\psi_N = \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{p}. \quad (2)$$

Aufgrund der relativ geringen Anzahl an diskreten räumlichen Messpunkten auf der Kugeloberfläche ist es sinnvoll, die Auflösung durch Interpolation zu erhöhen. Dies erfolgt, indem man in MATLAB eine feinmaschige Kugel erzeugt, aus der man die Polarwinkel φ und ϑ berechnet. Auf dieser werden interpolierte Schalldruckmuster als schöner 3D-Plot im Radius aufgetragen. Unter Verwendung eines GUIs ist es nun möglich, die Wellenspektren für einzelne Frequenzen mit dieser Vorgehensweise als Abstrahlungsdiagramm anzuzeigen und daraus die entsprechenden Richtcharakteristika abzulesen. Die grauen Linien dienen als Anhaltspunkt zum Ablesen der Messwerte in 10 dB-Schritten (der Dynamikbereich ist also insgesamt auf 30 dB begrenzt).

3 Auswertung der Messergebnisse

3.1 Tropfenlautsprecher

Der Tropfenlautsprecher wurde mit einem Zenitwinkel von 20° im Zentrum des umgebenden Kugelmikrofonarrays positioniert (Azimutwinkel = 90°).

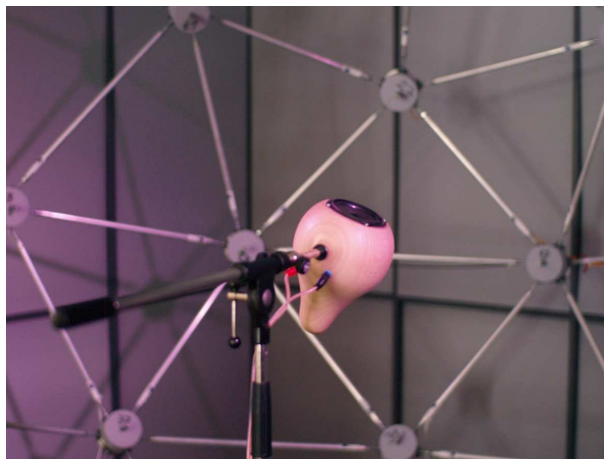
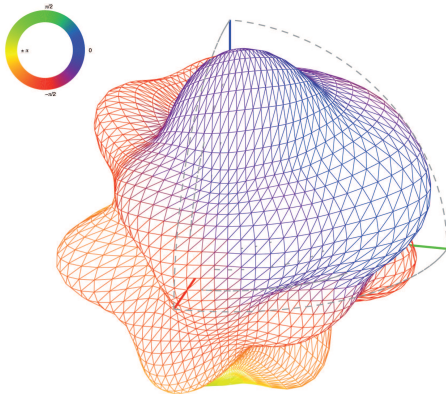
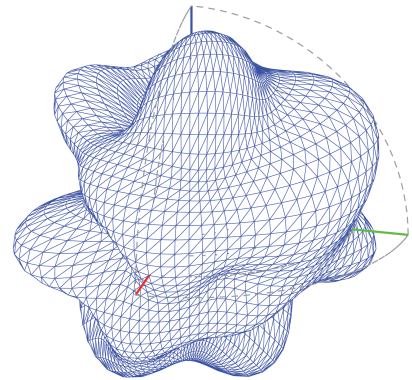


Abb. 3: Tropfenlautsprecher im Kugelmikrofonarray

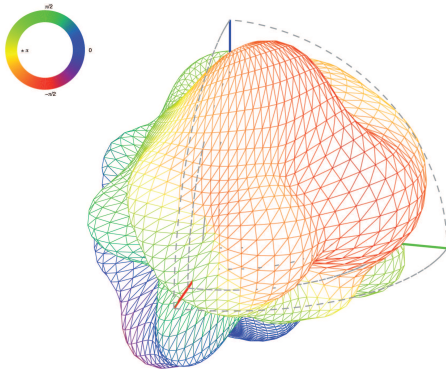
Die entsprechenden Richtcharakteristika für drei exemplarische Frequenzen lassen sich aus Abb. 4 ablesen (x-Achse: Rot, y-Achse: Grün, z-Achse: Blau).



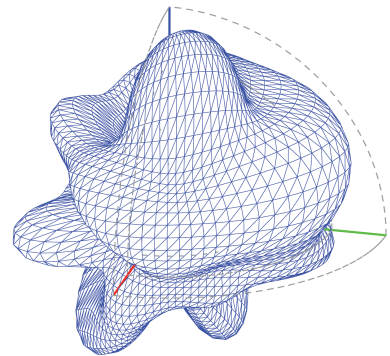
(a) $f = 500$ Hz



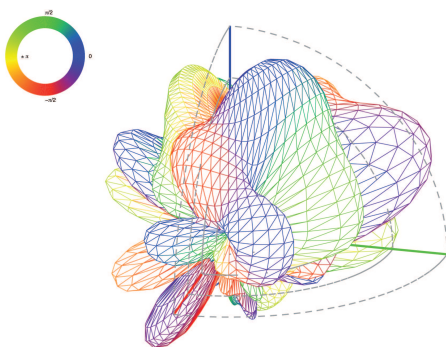
(b) $f = 500$ Hz



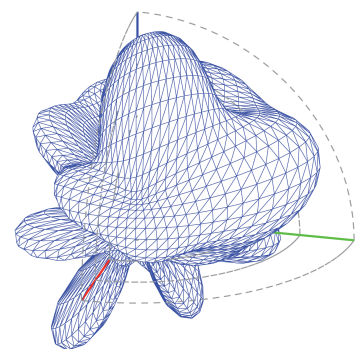
(c) $f = 1000$ Hz



(d) $f = 1000$ Hz



(e) $f = 2800$ Hz



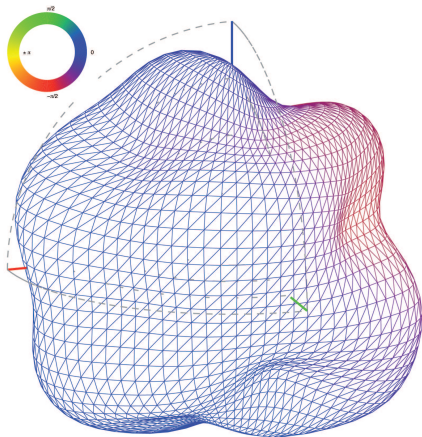
(f) $f = 2800$ Hz

Abb. 4: Sphärisches Abstrahlendiagramm des Tropfenlautsprechers mit/ohne Phaseninformation (90° a, 20° z)

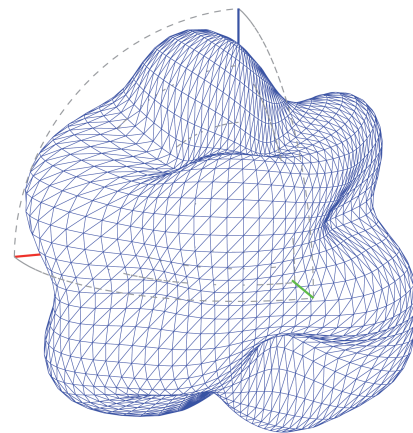
Bei tiefen Frequenzen erhalten wir eine nahezu kugelförmige Richtcharakteristik, wobei die Darstellung mit Phaseninformation sehr gut mit jener ohne Phase übereinstimmt. Das Phasenrad wird im Vergleich vorne zu hinten einmal durchlaufen. Erhöht man die Frequenz, treten ab 1000 Hz Bündelungserscheinungen auf. Es gibt aber noch keine gravierenden Fehler im Phasenplot. Ab 2800 Hz häufen sich die Artefakte in der Darstellung: Da es bei der Interpolation (Phasenplot) nicht immer möglich ist die Phasenübergänge zwischen den diskreten Messpunkten korrekt abzutasten, entstehen ausgeprägte, überschwingende Interpolationsmuster und die beiden Darstellungen stimmen nicht mehr überein.

3.2 JBL-Bühnenmonitor

Zur Analyse der Abstrahlcharakteristik des 'JBL-Bühnenmonitors' (Abb. 1) haben wir ebenfalls drei fixe Frequenzen gewählt, um vor allem die frühe Bündelung zu demonstrieren (Azimutwinkel = 0° , Zenitwinkel = 90°). Dabei wird auch die Trennfrequenz der eingebauten Frequenzweiche sichtbar (Abb. 5).



(a) $f = 200$ Hz



(b) $f = 200$ Hz

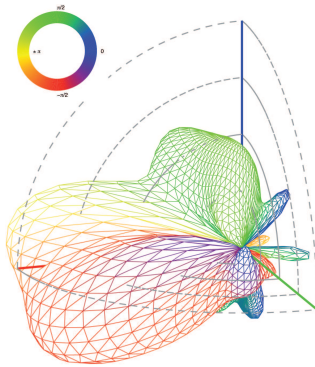
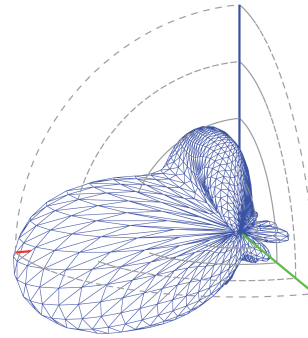
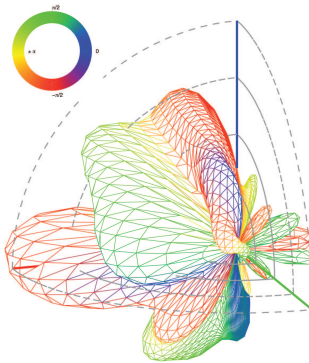
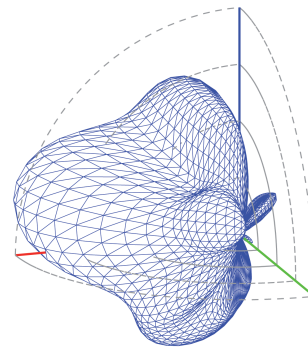
(c) $f = 1100 \text{ Hz}$ (d) $f = 1100 \text{ Hz}$ (e) $f = 1800 \text{ Hz}$ (f) $f = 1800 \text{ Hz}$

Abb. 5: Sphärisches Wellenspektrum des JBL-Bühnenmonitors mit/ohne Phaseninformation ($0^\circ\alpha$, $90^\circ\alpha$)

Auch hier stimmen bei tiefen Frequenzen beide Interpolationsarten relativ gut überein. Auffallend ist, dass der Monitor bereits ab Frequenzen über 200 Hz zu bündeln beginnt. Als Trennfrequenz der Frequenzweiche wird im Datenblatt ein Wert von 1,2 kHz angegeben, was sich sehr gut anhand der Darstellungen bestätigen lässt: Bei 1100 Hz strahlt noch hauptsächlich der Tieftöner ab (Hauptkeule leicht unterhalb der x-Achse). Die Richtwirkung des Hochtöners lässt sich sehr gut bei 1800 Hz ablesen (hier liegt die Hauptkeule etwas über der x-Achse).

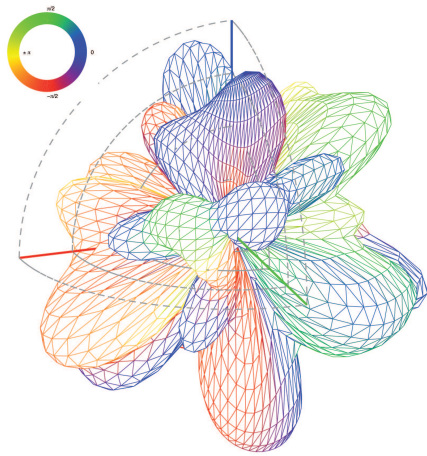
3.3 Ikosaederlautsprecher

Als letztes Messobjekt wird der Ikosaederlautsprecher des IEM betrachtet (Abb. 6). Dieser wird mit einem Strahlformungsalgorithmus angesteuert, um unterschiedliche Richtcharakteristika zu erzeugen. Diese sollten mittels der Messung verifiziert werden.

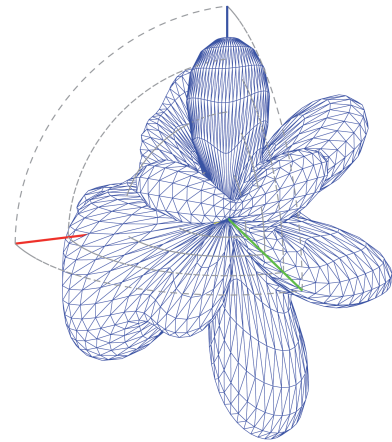


Abb. 6: Ikosaederlautsprecher im Kugelmikrofonarray

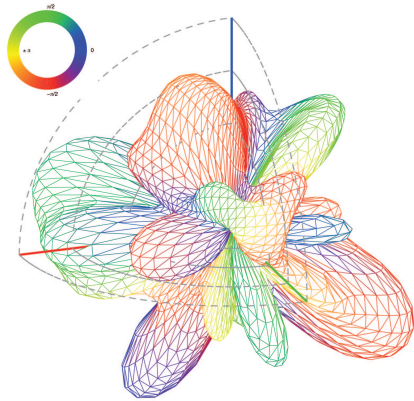
Leider lässt die Auswertung (Abb. 7) keine eindeutige Richtungszuordnung des abgestrahlten Beams erkennen. Als mögliche Ursachen könnte man Fehler in den Ansteuerungsalgorithmen suchen oder die nicht optimalen akustischen Eigenschaften des Messraumes bzw. den Einfluss des Arraygestänges, welches noch nicht genau erforscht worden ist, anführen. Diese Fehlerquellen wurden im Rahmen des Labors nicht weiter untersucht. Insgesamt liegen Messungen von vier eingestellten Richtungen ($0^\circ\text{a} - 90^\circ\text{z}$ | $90^\circ\text{a} - 90^\circ\text{z}$ | $0^\circ\text{a} - 0^\circ\text{z}$ | $-37^\circ\text{a} - 78^\circ\text{z}$) vor. Exemplarisch kann man in Abb. 7 die gemessenen Richtcharakteristika für eine Abstrahlung in x-Richtung (Azimutwinkel = 0° , Zenitwinkel = 90°) sehen.



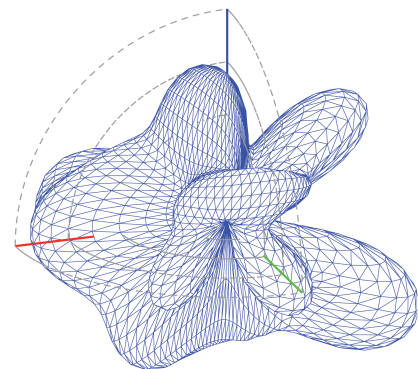
(a) $f = 500 \text{ Hz}$



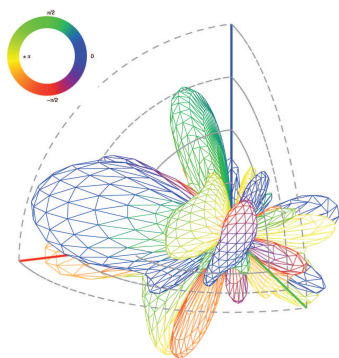
(b) $f = 500 \text{ Hz}$



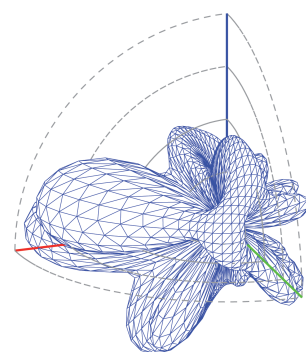
(c) $f = 1000 \text{ Hz}$



(d) $f = 1000 \text{ Hz}$



(e) $f = 5000 \text{ Hz}$



(f) $f = 5000 \text{ Hz}$

Abb. 7: Offensichtlich fehlerhaftes Abstrahlendiagramm des Icosaederlautsprechers mit/ohne Phaseninformation (0° a, 90° z)

4 Holographische Extrapolation

Die bisherigen Richtcharakteristika gelten nur für einen festen Radius R auf der Kugeloberfläche. Durch holographische Extrapolation ist es möglich, das sphärische Wellenspektrum in beliebigem Abstand r auszuwerten. Der kleinstmögliche Radius ergibt sich aus den Abmessungen des Messobjekts. Durch Herausdividieren des Ausbreitungsterms $h_n(kR)$ (beschrieben durch die Hankelfunktion) aus dem sphärischen Wellenspektrum erhält man das Wellenspektrum ψ_N . Aus diesem kann man mithilfe des Ausbreitungsterms $h_n(kr)$ das Schallfeld an beliebigen Radien r auswerten [Zot10]:

$$\mathbf{p}(kr, \varphi, \vartheta) = \mathbf{y}_N^T(\varphi, \vartheta) \text{diag}_N \left\{ \frac{h_n(kr)}{h_n(kR)} \right\} \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{p} \quad (3)$$

Nach der Implementierung von Gl. 3 wird das Schallfeld auf verschiedenen Radien unter Verwendung der Messdaten aus der Ikosaedermessung simuliert. Dies führt jedoch ebenfalls zu unbefriedigenden Ergebnissen (Abschnitt 3.3).

5 Fazit

Bei der Auswertung der Messungen der verschiedenen Lautsprecher zeigt sich wie erwartet bei tiefen Frequenzen eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik, zu höheren Frequenzen hin unterschieden sich die einzelnen Lautsprecher bei der Ausbildung ihrer Richtwirkung. Besonders deutlich ist dies beim Bühnenmonitor von JBL zu sehen; dieser weist bereits knapp über 200 Hz keine kugelförmige Abstrahlung mehr auf, was bei einem Bühnenmonitor erwünscht ist, damit der Monitormix nur den gewünschten Musiker erreicht.

Vor einer weiteren Vermessung des Ikosaederlautsprechers sollte sichergestellt werden, dass in diesem Protokoll genannte Fehlerquellen überprüft werden, um verlässliche Messdaten über dessen Abstrahlcharakteristik zu erhalten. Außerdem sollte das Arraygestänge und der Messraum hinsichtlich Reflexionen und Einfluss auf die Messung noch genauer untersucht werden.

Literatur

[Zot10] F. Zotter, "Laborunterlagen Akustische Messtechnik 2," Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz - Österreich, Ausgabe 2010.