

Messung von Abstrahlcharakteristika mittels Halbkreis-Mikrofonarray

Laborprotokoll aus Akustische Messtechnik 2 LU

Rudolf Liepins
Andrés Ureta

Betreuer: Dr. Franz Zotter

Graz, im Mai 2010



UNIVERSITÄT
FÜR MUSIK UND
DARSTELLENDEN KUNST
GRAZ - AUSTRIA



Inhaltsverzeichnis

1	Messung der Abstrahlcharakteristik des JBL SRX-712 M Lautsprechers	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Messaufbau	3
1.3	Messung	5
1.3.1	Kalibrierung.....	5
1.3.2	Messsignal	5
1.3.3	Messung und Aufbereitung der Impulsantworten.....	6
1.4	Sphärisches Wellenspektrum	7
1.5	Evaluierung der Messung	8
2	Messung der Abstrahlcharakteristik des Ikosaeder-Lautsprechers	10
2.1	Aufgabenstellung.....	10
2.2	Messaufbau	11
2.3	Messung	11
2.4	Evaluierung der Messung	12
3	Fazit	13
4	Literatur	14

1 Messung der Abstrahlcharakteristik des JBL SRX-712 M Lautsprechers

1.1 Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Messaufgabe sollte mithilfe eines halbkreisförmigen Mikrofonarrays die Schallabstrahlung des JBL SRX-712 M Lautsprechers für alle Raumrichtungen und verschiedene Frequenzen gemessen werden.

1.2 Messaufbau

Die erste Tätigkeit bestand darin, einen sinnvollen Messaufbau zu realisieren. Als Messpunkte dienten insgesamt 18 Behringer ECM8000 Kondensator-Messmikrofone mit Kugelcharakteristik, die an einem Halbbogen aus Holz wie in Abb. 1.1 angeordnet wurden. Das Messobjekt, in diesem Fall ein JBL SRX-712 M Lautsprecher wurde auf einem Boxenstativ montiert, welches wiederum an einer motorisierten Drehplatte (Outline ET250-3D) befestigt war.

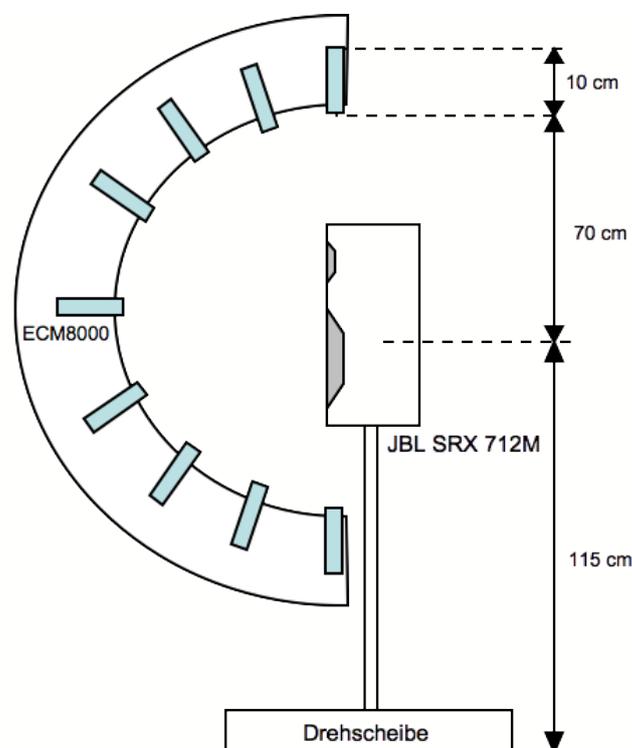


Abb. 1.1 Schematische Darstellung des Messaufbaus

Bei der Einrichtung der zu vermessenden Lautsprecherbox wurde besonderes Augenmerk auf die Positionierung bezüglich des akustischen Zentrums gelegt (siehe Abb. 1.2). Im idealen Fall sollte das akustische Zentrum des Messobjekts genau im Mittelpunkt des Halbkreises liegen, welcher von den Messmikrofonen aufgespannt wird. Da dieses jedoch im konkreten Fall nicht genau bekannt war, wurde in etwa der Mittelpunkt der Box gewählt, mit leichter Tendenz zum Tieftonlautsprecher. Dies resultierte aus der Überlegung, dass das Tieftonchassis vermutlich mehr zur Gesamtschallleistung beitragen würde als der Hochtöner und in weiterer Folge das akustische Zentrum aus dem geometrischen Mittelpunkt der Box leicht nach unten verschoben wäre.



Abb. 1.2 Einrichten des Messaufbaus

Die Messmikrofone wurden schließlich über AD-Umsetzer mit einem Linux-Rechner verbunden. Über einen PureData-Patch konnten einerseits die resultierenden Messwerte für die Auswertung eingelesen werden, andererseits ließ sich damit die Drehscheibe ansteuern und deren Rotation automatisieren.

1.3 Messung

1.3.1 Kalibrierung

Da bei dieser Messmethode 18 Mikrofone zum Einsatz kommen, ist es wichtig diese vor der Messung zu kalibrieren. Diese Notwendigkeit wird zusätzlich durch den Umstand bestärkt, dass es sich bei den verwendeten Behringer ECM8000 Messmikrofonen um günstige Modelle mit einer recht großen Serienstreuung handelt. Für die Kalibrierung wurde jedem einzelnen Mikrofon per Schallpegelkalibrator ein 1 kHz Sinuston mit 94 dB zugeführt und der jeweilige Ausgangspegel mit Hilfe von PureData angezeigt und erfasst. Beim Aufbereiten der Messdaten wurden diese Pegelwerte invertiert und als Entzerrungsfaktoren für die jeweiligen Mikrofonkanäle herangezogen. Es ist insofern zulässig nur den Amplitudenwert bei 1 kHz für die Kalibrierung heranzuziehen, da die Frequenzgänge der Mikrofone in diesem Fall unter 3 kHz nur mehr geringe Abweichungen zueinander aufweisen (siehe [1]).

1.3.2 Messsignal

Als Anregungssignal für die Messung der Impulsantworten des Lautsprechers diente ein logarithmischer Sweep (siehe Abb. 1.1) über einen Frequenzbereich von 40 Hz bis 22 kHz. Dieser ermöglicht einen guten Signal-Störabstand und hat gegenüber dem linearen Sweep den Vorteil, dass die zeitliche Verzögerung zwischen resultierenden Harmonischen für jeden betrachteten Frequenzbereich gleich groß ist. Dadurch ist es bei der Ermittlung der (linearen) Impulsantwort leichter mögliche harmonische Verzerrungen durch Fensterung zu eliminieren.

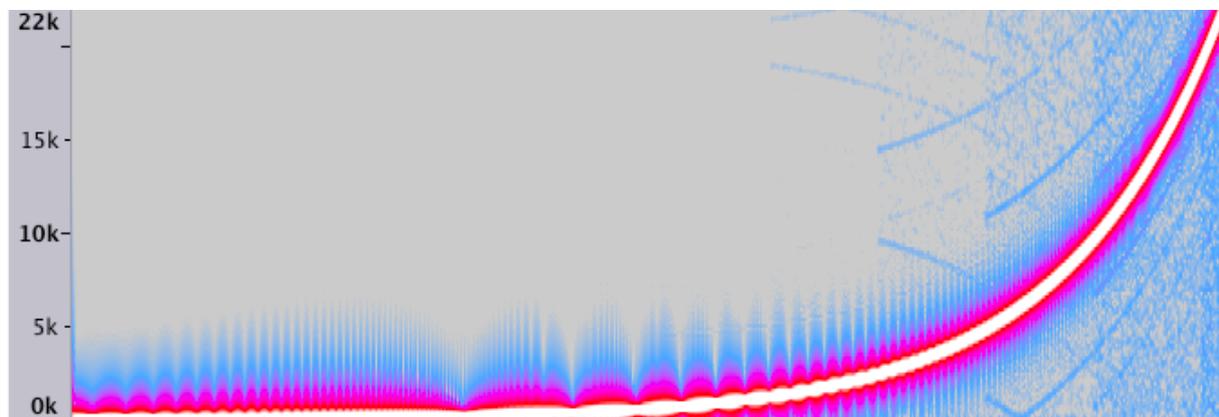


Abb. 1.3 Spektrogramm des logarithmischen Sweeps

1.3.3 Messung und Aufbereitung der Impulsantworten

Die Wahl der Messanordnung fiel auf das Halbkreismikrofonarray, um anschließend einen Vergleich mit früher durchgeführten Messungen im Kugelarray durchführen zu können. In Summe sollten die Messpunkte an einer Kugeloberfläche, wie in Abb. 1.4 dargestellt, ermittelt werden, daher wurde der Proband um seine Azimut-Achse in 10°-Schritten gedreht und jeweils eine Sweepmessung vorgenommen. In Summe ergab dies 640 (18 Mikrofone x 36 Messungen) Messpunkte auf einer Kugeloberfläche.

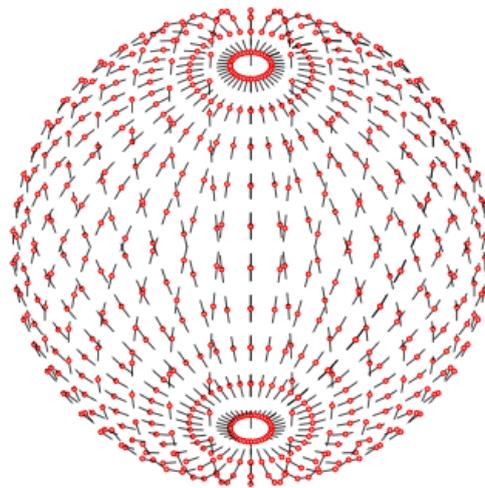


Abb. 1.4 Resultierende Verteilung der Messpunkte auf einer Kugeloberfläche[1]

Für die Ermittlung der Impulsantworten im jeweiligen Messpunkt, wurden die gemessenen Schalldruckverläufe im Frequenzbereich mit dem bekannten Anregungssignal entfaltet. Da es um eine reale Messumgebung handelt, mussten bei der Aufbereitung der Impulsantworten die akustischen Rahmenbedingungen, insbesondere erste Reflexionen von Begrenzungsflächen mitberücksichtigt werden. Es wurde geschätzt, dass die erste Reflexion im vorliegenden Fall nach etwa 200 Samples auftritt; dieser Wert ließ sich auch visuell durch die Betrachtung des Verlaufs der Impulsantworten verifizieren. Unter Berücksichtigung der Störeinflüsse am Anfang der gemessenen Signale wurde für das eingesetzte Von-Hann-Fenster eine Fensterlänge von 200 Samples gewählt. Die resultierenden Impulsantworten für eine Drehtellerposition sind exemplarisch in Abb. 1.5 zu sehen.

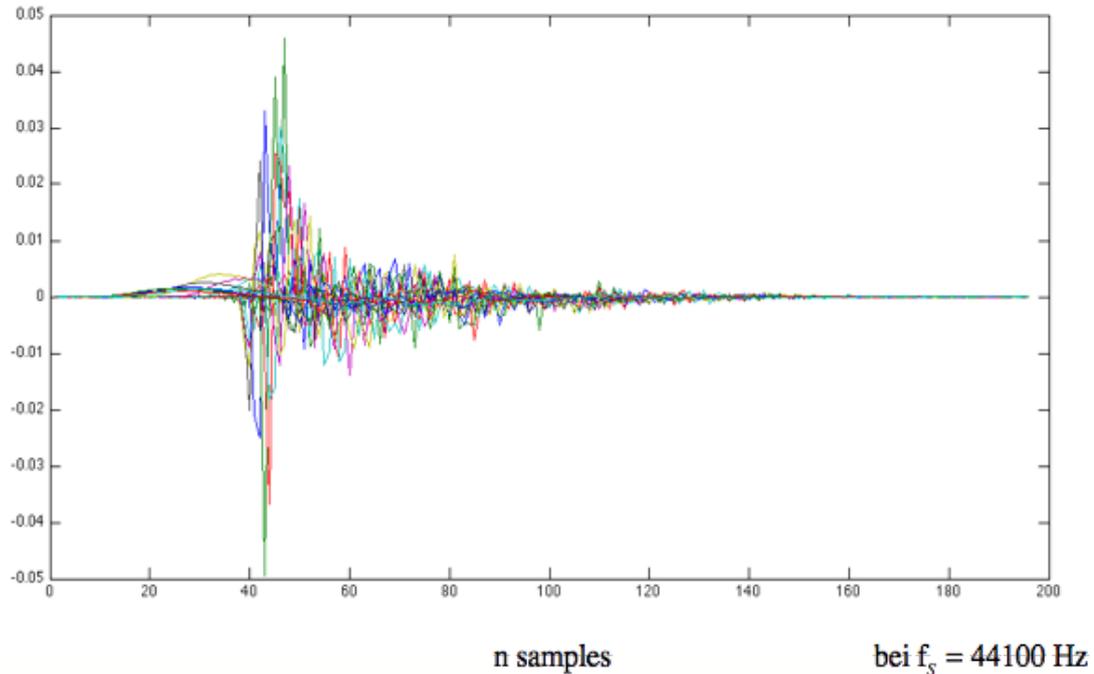


Abb. 1.5 gefenstertere Impulsantworten der einzelnen Messkanäle für 0°-Position der Drehscheibe

1.4 Sphärisches Wellenspektrum

Jede endlich summierbare Funktion $x(\theta)$ auf einer Kugeloberfläche lässt sich durch lineare Kombination der Fourier-Koeffizienten χ_{nm} und die Kugelflächenfunktionen berechnen (Gl. 1.1). Für eine genaue Herleitung und Beschreibung siehe Literatur [1], [2] und [3].

$$x(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \chi_{nm} Y_n^m(\theta) \quad (1.1)$$

Das sphärische Wellenspektrum lässt sich durch die Anwendung der sphärischen Fourier-Entwicklung auf ein bekanntes Schallfeld auf einer Kugeloberfläche berechnen (Gl. 1.2). Dabei stellt $\chi_{nm}(r_i)$ die sphärische Wellenkomponenten an einem Radius r_i dar.

$$\chi_{nm}(r_i) \equiv \int_{S^2} x(r_i, \varphi, \vartheta) Y_n^m(\theta) d\theta \quad (1.2)$$

Die Berechnung des Wellenspektrums ist bei dieser Messung von Interesse und wird zur Untersuchung vom Abstrahlverhalten des Ikosaeder-Lautsprechers herangezogen. $x(r_i, \varphi, \vartheta)$ entspricht den durch die Messung ermittelten Schalldrücken auf der diskreten Kugeloberfläche und Y_n^m stellt die Kugelflächenfunktionen dar. Diese sind ein Set orthonormaler Funktionen im Hilbertbereich, welche die Winkelabhängigkeit der Funktion beschreiben. θ entspricht hier dem Winkelkoordinatenpaar $\theta = (\varphi, \vartheta)$.

1.5 Evaluierung der Messung

Zunächst wurde das Wellenspektrum mit Hilfe der akustischen Holographie (siehe [2] bzw. [3]) extrapoliert, um das Schallfeld an der Oberfläche des Messobjekts zu berechnen. Im letzten Schritt sollten schließlich die Messergebnisse mithilfe eines MATLAB-GUI visualisiert werden. Abb. 1.6 zeigt exemplarisch die Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers bei unterschiedlichen Frequenzen. Der farbliche Verlauf zeigt die jeweilige Phasenlage. Bei 50 Hz (Abb. 1.6 (a)) ist wie erwartet eine mehr oder weniger kugelförmige Abstrahlung zu beobachten. Die Tendenz eine Verschiebung nach unten ergibt sich vermutlich aus der Tatsache, dass der Tieftonlautsprecher mehr Schallleistung abgibt, das akustische Zentrum wurde nicht an seiner tatsächlichen Position angenommen. Abb. 1.6 (b) zeigt das Abstrahlmuster bei 1000 Hz. Deutlich zu erkennen ist, dass Bündelung eintritt; der Hochtöner hat bereits einen sichtbaren Einfluss auf das Abstrahlverhalten, was sich in der kleineren Keule manifestiert.

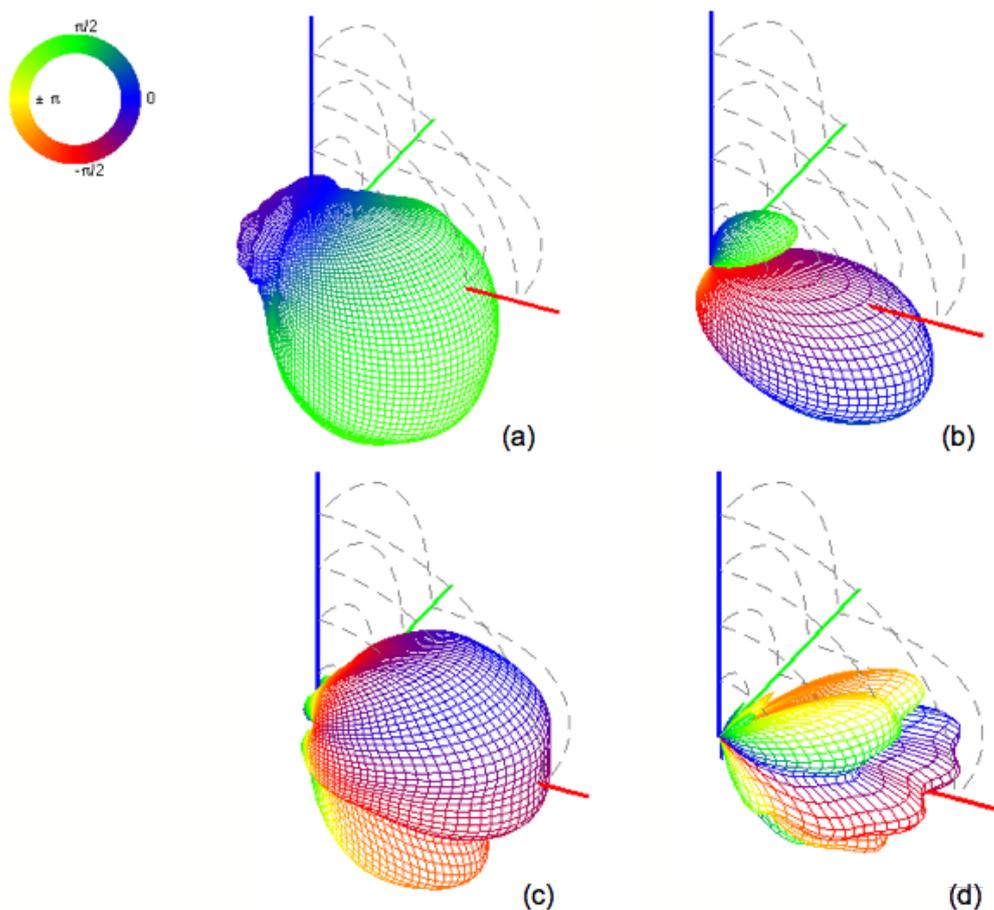


Abb. 1.6 Abstrahlcharakteristik des JBL SRX-712 M bei einer Frequenz von (a) 50 Hz, (b) 1000 Hz, (c) 1600 Hz, sowie (d) 8000 Hz

Die Trennfrequenz der Frequenzweiche beträgt 1200 Hz, was ziemlich gut mit der Beobachtung übereinstimmt. Das Abstrahlmuster in Abb. 1.6 (c) ergibt sich bei 1600 Hz, wie erwartet überwiegt nun der Einfluss des Hochtonlautsprechers. Für hohe Frequenzen ergibt sich aufgrund der diskreten räumlichen Abtastung ein räumliches Aliasing, das Abstrahlverhalten in Abb. 1.6 (d) weist daher Artefakte in Form von seltsam anmutenden Nebenkeulen auf.

2 Messung der Abstrahlcharakteristik des Ikosaeder-Lautsprechers

2.1 Aufgabenstellung

Bei dieser Aufgabe wurde das Abstrahlverhalten des Ikosaeder-Lautsprechers (siehe Abb. 2.1) untersucht. Hierbei sollte überprüft werden, ob und unter welchen Bedingungen der Lautsprecher die mittels Beamforming-Algorithmus errechnete Abstrahlcharakteristik wiedergeben kann. Außerdem sollten die Ergebnisse mit jenen der Messung einer früheren Laborgruppe mittels kugelförmigem Mikrofonarray mit 64 Messpunkten verglichen werden. Damals kam es zu nicht nachvollziehbaren Resultaten, deren Ursache nicht genau eruiert werden konnte. Aus diesem Grund fiel diesmal die Wahl auf die zeitaufwändigere Methode mit dem Halbkreisarray.

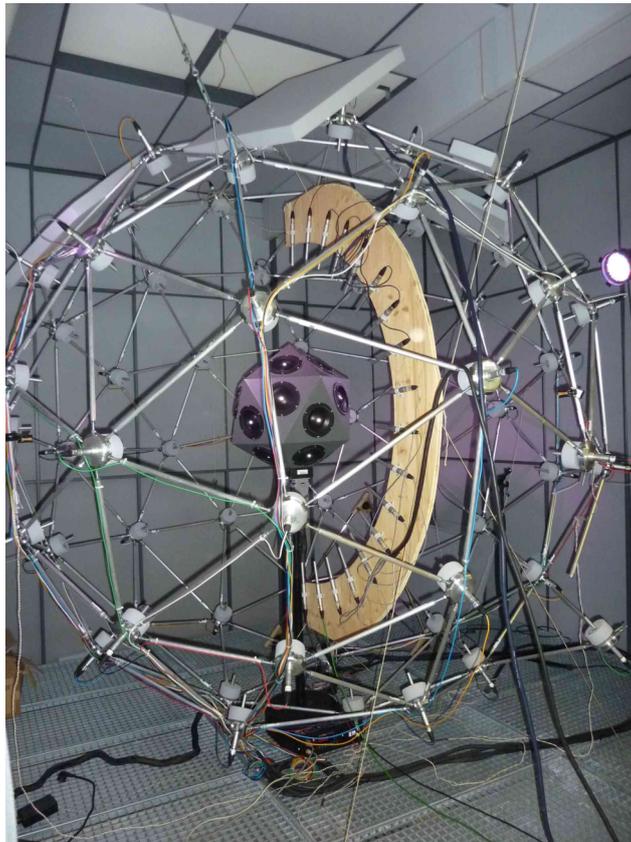


Abb. 2.1 Ikosaeder-Lautsprecher und Halbkreis-Mikrofonarray

2.2 Messaufbau

Der Messaufbau blieb gleich wie bei der Messung des JBL SRX-712 M Lautsprechers (siehe Abb. 1.1), allerdings wurde stattdessen der Ikosaeder-Lautsprecher eingesetzt. Analog zur vorigen Aufgabenstellung wurde der Lautsprecher auf der Drehscheibe montiert und mittels des halbkreisförmigen Mikrofonarrays die Impulsantworten auf dieselbe Art und Weise gemessen. Es wurde ebenfalls darauf geachtet den Lautsprecher im akustischen Zentrum zu positionieren, dies entsprach durch die gegebene Geometrie dem Mittelpunkt des Lautsprechers.

2.3 Messung

Das verwendete Messsignal war wiederum ein logarithmischer Sweep, wobei diesmal 16-mal für jeden der 36 Azimutwinkel eine Messung vorgenommen wurde. Insgesamt ergab dies 10368 Impulsantworten (16 Abstrahlcharakteristiken x 648 Messpunkte) für die Berechnung des sphärischen Wellenspektrums. Die vom Ikosaeder-Lautsprecher emittierten Abstrahlmuster entsprechen den ersten 16 Kugelflächenfunktionen und sind in Abb. 2.2 abgebildet. Die Mikrofone wurden erneut kalibriert um mögliche Veränderungen gegenüber dem Vortag zu kompensieren.

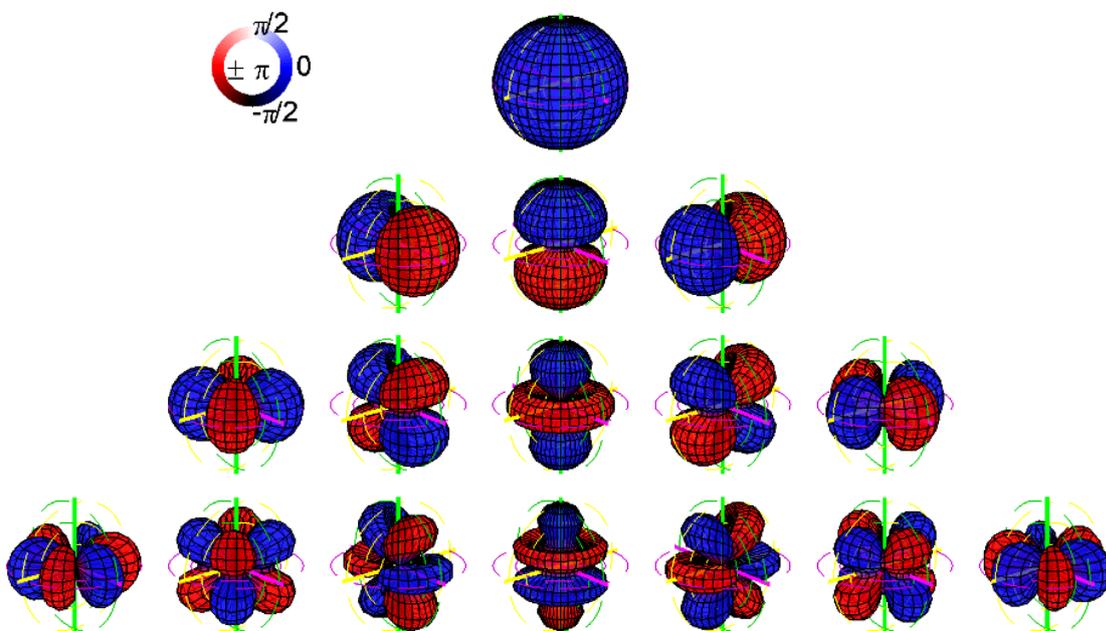


Abb. 2.2 Kugelflächenfunktionen bis zur 3. Ordnung [1]

Die Messung lieferte die Impulsantworten, welche zunächst mit einer Fensterlänge von 9500 Samples gefenstert wurden. Unter Anwendung der sphärischen Fourier-Entwicklung konnte

dann das sphärische Wellenspektrum (siehe Kapitel 1.4) berechnet werden. Um die erforderliche Rechenleistung zu verringern, war es nötig vor der Simulation in Matlab eine Unterabtastung (Faktor 4) vorzunehmen. Zuletzt wurde ein GUI programmiert, um das Wellenspektrum visuell für unterschiedliche Frequenzen, sowie Azimut- und Elevationswinkel darzustellen.

2.4 Evaluierung der Messung

Für tiefe Frequenzen strahlt der Lautsprecher kugelförmig ab. Aus diesem Grund ist kein Schallstrahl erkennbar (Abb.2.3(a)). Für Frequenzen zwischen etwa 200 Hz und 750 Hz (Abb. 2.3(b)) kann ein eindeutiger Schallstrahl festgestellt werden. In diesem Frequenzbereich funktioniert daher das Beamforming am besten. Für höhere Frequenzen (Abb. 2.3 (c) und (d)) tritt so genanntes räumliches Aliasing auf; es ergibt sich ein Muster mit Artefakten, welches eine eindeutige Zuordnung der Abstrahlcharakteristik verhindert. Die Ursache dafür hängt mit der diskreten Abtastung der Kugeloberfläche (siehe Abb. 1.4) zusammen. Erwähnenswert bleibt, dass bei der Auswertung der Messergebnisse für den Ikosaeder-Lautsprecher aufgrund von Zeitmangel auf eine holographische Extrapolation verzichtet wurde.

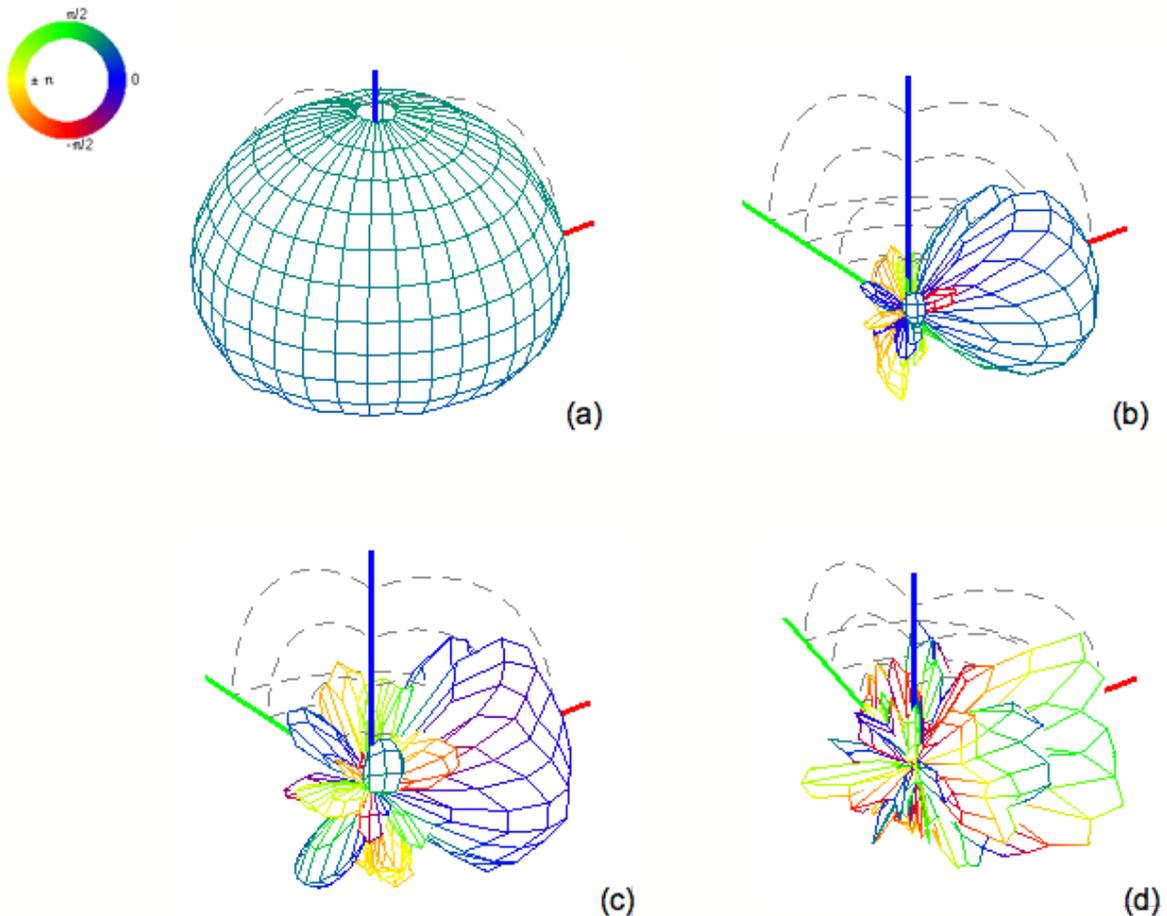


Abb. 2.3 Abstrahlcharakteristik des Ikosaeder-Lautsprechers bei einer Frequenz von **(a)** 100 Hz, **(b)** 500 Hz, **(c)** 750 Hz, sowie **(d)** 2000 Hz

3 Fazit

Im Zuge der behandelten Laboreinheiten wurden die Abstrahlmuster eines Bühnenmonitors, sowie eines Ikosaeder-Lautsprechers gemessen und visualisiert. Während die Berechnung der Schallfelder mittels der Theorie des sphärischen Wellenspektrums für einen gewissen Frequenzbereich zum Teil sehr gut funktioniert, sind dem Erfolg etwa durch räumliches Aliasing bei hohen Frequenzen Grenzen gesetzt. Bei der Vermessung des Ikosaeder-Lautsprechers ist die verwendete Methode geeignet, um sinnvolle Ergebnisse zu erreichen - der Beamforming-Algorithmus dürfte ordnungsgemäß funktionieren.

4 Literatur

[1] Hannes Pomberger: „*Angular and Radial Directivity Control for Spherical Loudspeaker Arrays*“, Diplomarbeit, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Kunstuniversität Graz, 2008

[2] Franz Zotter: „Akustische Messtechnik 2 LU“, Laborunterlagen, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Kunstuniversität Graz, 2010

[3] Earl G. Williams: „*Fourier Acoustics, Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*“, Academic Press, 1999.