

UNIVERSITÄT  
FÜR MUSIK UND  
DARSTELLEND KUNST  
GRAZ · AUSTRIA



# *Akustische Messtechnik 2* *Labor*

9. – 14. Juni  
2008 (SS)

Peter Dollfusz  
Markus Meister  
Thomas Walder

Betreuer: DI Franz Zotter

# 1 Raumakustische Messungen mit verschiedenen Richtwirkungen des Ikosaederlautsprechers

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Laborübung ist es, Informationen über Reflexionspfade eines Raumes zu erhalten. Diese Reflexionen können gezielt mit dem Ikosaederlautsprecher angeregt werden, um gewisse, gewünschte Reflexionen zu erzeugen.

Dabei soll die Abstrahlrichtung auf eine schallharte Wand gerichtet und damit ein Reflexionspfad direkt angeregt werden. Aus der Impulsantwort kann auf Reflexionen und deren Entfernung geschlossen werden.

Dahinter steckt die Absicht, die Richtung und Stärke der frühen Reflexionen und somit die Richtungslokalisierung gezielt zu beeinflussen.

## 1.2 Messaufbau

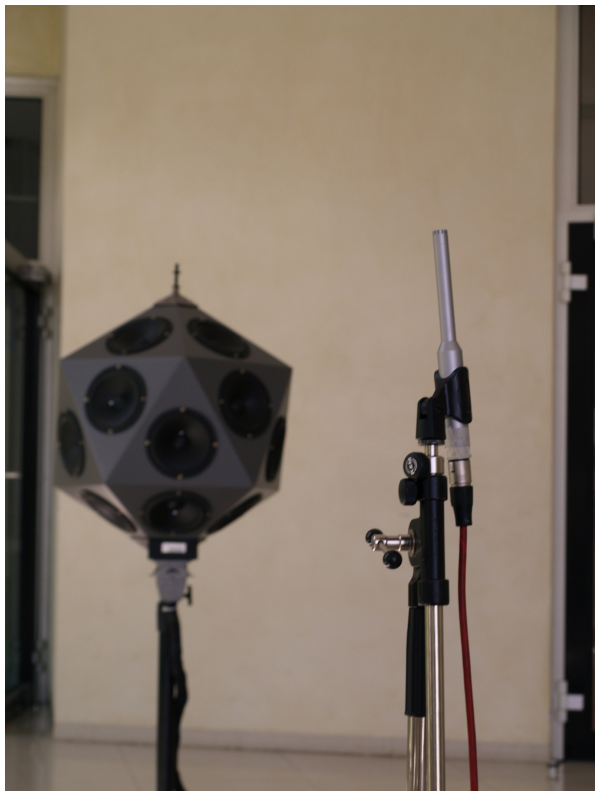


Abbildung 1: Ikosaederlautsprecher in der Nähe einer schallharten Wand, Kugelmikrofon an beliebiger Raumposition

Der Ikosaederlautsprecher wird in der Nähe eines reflektierenden Objektes (schallharten Wand) platziert. Das Mikrofon wird an einer beliebigen Raumposition aufgestellt.

### 1.3 Messablauf und Auswertung der Ergebnisse

Die Impulsantworten werden mit der log-swept-Methode nach [A. Farina] bestimmt. Die durch unterschiedliche Abstrahlrichtung der Schallquelle gewonnenen Impulsantworten wiesen keine signifikanten Unterschiede auf, welche aber auf Grund der räumlichen Gegebenheiten zu erwarten wären (siehe Abbildung 2).

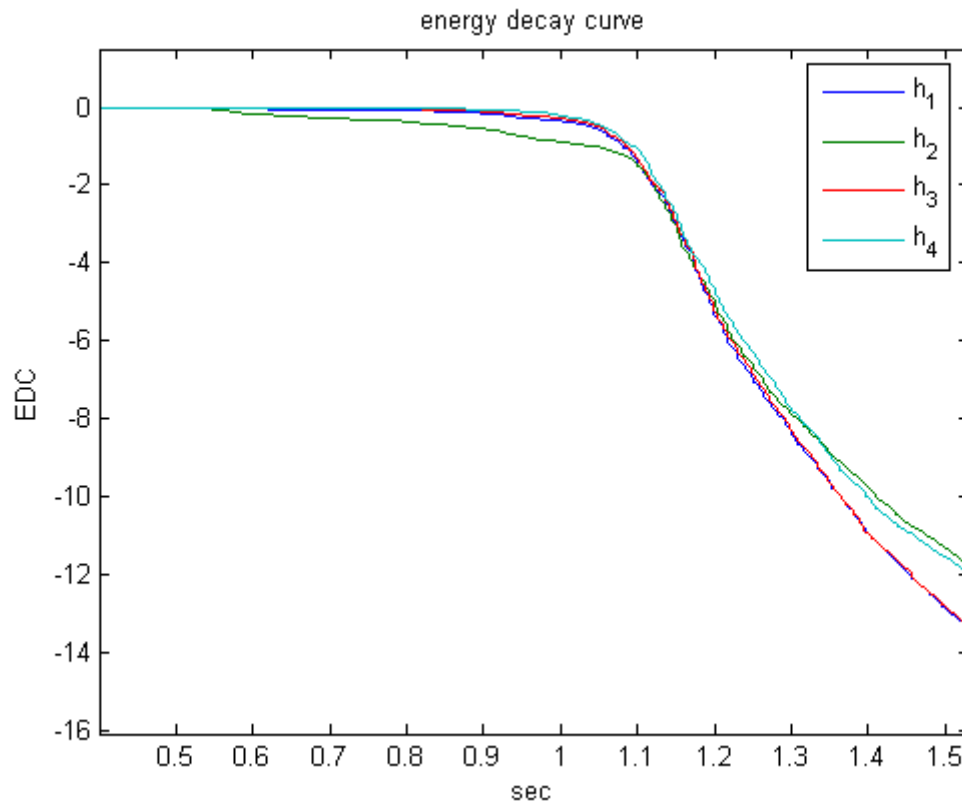


Abbildung 2: Darstellung der Impulsantworten mittels Schröder-Rückwärtsintegration und anschließender Normierung auf den Maximalpegel.

In der Abbildung sind die erwarteten Reflexionsmuster, die sich als Stufen ausprägen sollten, nicht erkennbar. In den dadurch veranlassten Untersuchungen sind die verantwortlichen Fehler im Beam Forming Algorithmus der Ikosaederlautsprecheransteuerung gefunden worden.

# 2 Messung der Abstrahlmuster des Ikosaederlautsprechers

## 2.1 Aufgabenstellung

Ziel der folgenden Betrachtungen ist, Abstrahlmuster des IEM-Ikosaeders zu messen und mit den eingestellten Abstrahlfunktionen, der spherical Harmonics bis zur 3. Ordnung zu vergleichen. Im Idealfall sollten die analytischen mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

## 2.2 Spherical harmonics, analytisch

Um glatte Abstrahlmuster von Schallquelle optimal darstellen zu können, wird vorerst von der Wellengleichung ausgegangen. Zur Berechnung der Wellengleichung im Frequenzbereich wird ein Produktansatz verwendet, der die Gleichung mittels Separation (Separationskonstanten:  $m, n$ ) der Variablen löst. Die erhaltenen Kugelflächenfunktionen (neben den Bessel- und Hankel-Basisfunktionen) enthalten die angularen Informationen der Abstrahlung und können mit Betrag und Phase dargestellt werden.

Die Separationskonstanten  $m$  und  $n$  entsprechen dabei der Ordnung (dargestellt in den jeweiligen Zeilen im Bild).

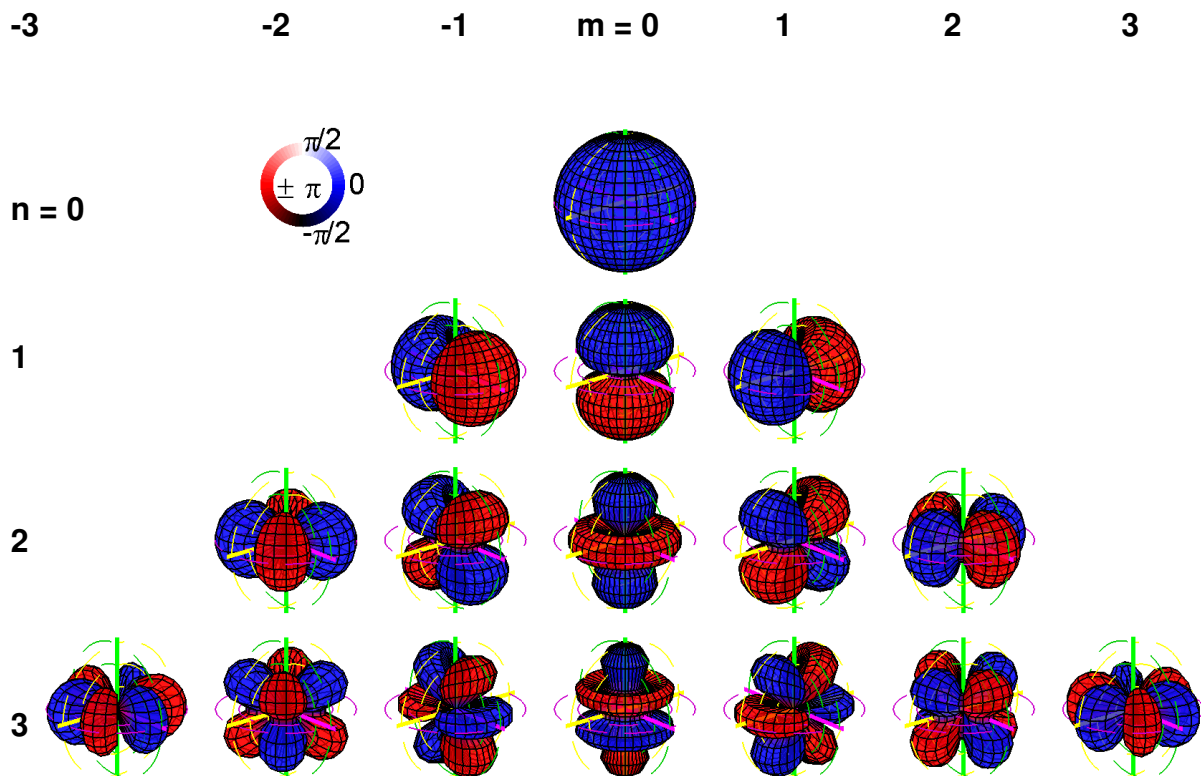


Abbildung 3: Spherical Harmonics bis zur dritten Ordnung [Hannes Pomberger, 2008]

Diese Kugelflächenfunktionen sollen in einer Messung am Ikosaederlautsprecher nachgewiesen werden.

## 2.3 Abstrahlungsmuster des Ikosaederlautsprechers, gemessen

### 2.3.1 Messaufbau

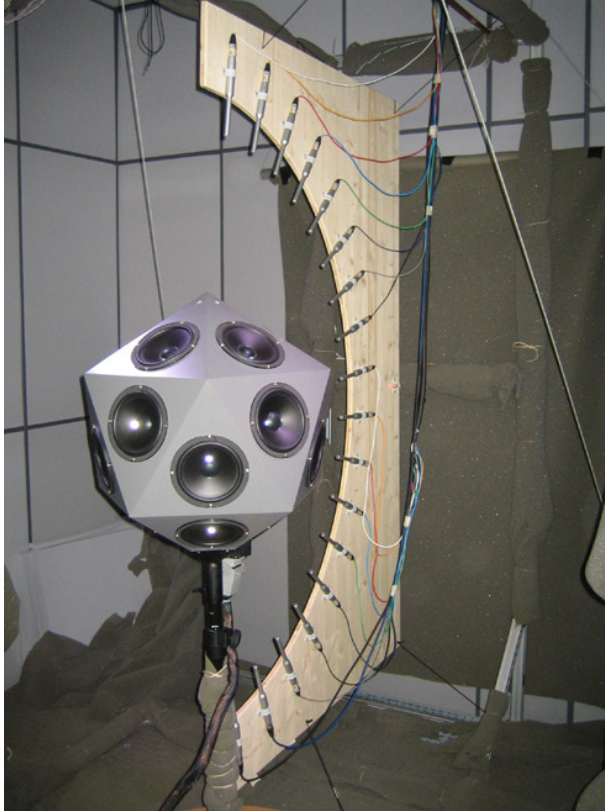


Abbildung 4: Messanordnung [Hannes Pomberger, 2008]

Hier sieht man den Ikosaeder, das Mikrofonarray (Erfassung der Schallpegel am Radius 0.7m, abhängig vom Elevationswinkel) und den Drehteller (mit welchem der Azimutwinkel eingestellt wurde), welche die Grundhardware für diese Messung bilden.

Die Mikrofonsignale wurden über einen Analog/Digital Konverter in Pure Data eingelesen.

Die Syntheseparameter (Radius, Ordnung, Winkel) wurden mittels Ansteuerungsalgorithmus eingestellt.

Sämtliche Übertragungsfaktoren der einzelnen Mikrofone des Mikrofonarrays, wurden für die Anpassung der Pegel der mit einem Pistofon ermittelt. Aufgrund von unerwartetem Datenverlust entfällt diese Anpassung (siehe Abschnitt 3.4).

### 2.3.2 Messablauf

Über den Ikosaederlautsprecher werden log-Sweep Signale wiedergegeben und am Mikrofonarray aufgezeichnet. Dieser Schritt wird für jede der 16. spherical Harmonics (3.Ordnung) wiederholt. Da kein vollständiges kugelförmiges Mikrofonarray zur Verfügung steht, wird der Ikosaeder mit einem Drehteller pro Messung um  $10^\circ$  weiter gedreht. Nach einer vollständigen Drehung um  $360^\circ$  liegen die gesamten Daten eines (gedachten) vollständigen Kugelmikrofonarrays vor. Die Daten werden in 18 kanäligem *wav-files* abgespeichert, es ergeben sich somit 576 (36 Azimutschritte x 16 spherical harmonics) *wav-files* sowie 10368 Sweepantworten (36 x 16 x 18 Mikrofonkanäle).

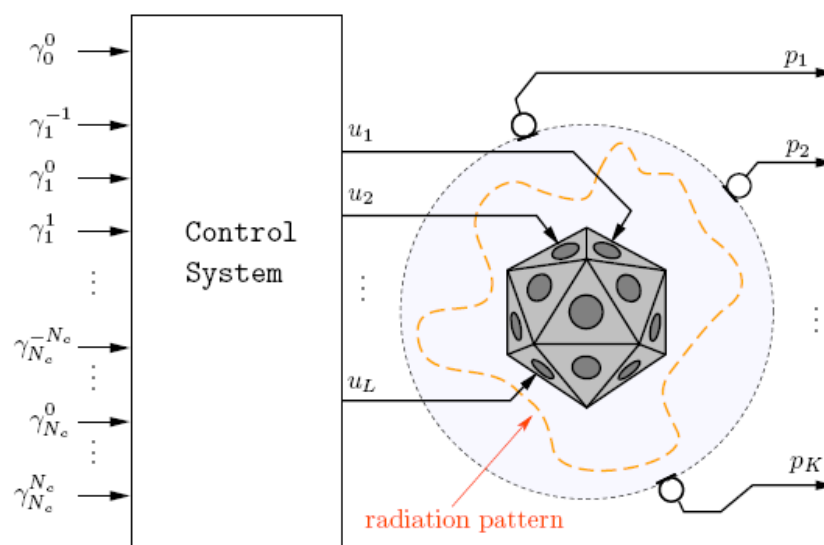


Abbildung 5: schematische Darstellung des Messaufbaus [Pomberger, 2008]

### 2.3.3 Berechnung der Impulsantworten

Aus den gemessenen Sweepantworten werden nach der Methode von Angelo Farina [Farina, 2001] die Impulsantworten bestimmt. Dabei werden die Signale in die Frequenzdomäne transformiert (FFT) und anschließend die Anregung durch das gemessene Signal dividiert. Die Fensterlänge der FFT muss dabei genügend lang sein, damit bei der Entfaltung keine zyklische Entfaltung entsteht und sich damit eine fehlerhafte Impulsantwort ergibt. In unserem Fall ergibt sich eine Fensterlänge von  $L = 2^{18}$  Samples. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist, dass sich nach Anwendung der inversen Fouriertransformation die harmonischen Anteile des Systems im Zeitbereich voneinander unterscheiden lassen. Bei einem Sweep ausreichender Länge und geeigneter Fensterfunktion (verwendet wurde bei dieser Aufgabe ein Hann-Fenster) lassen sich die Impulsantworten der harmonischen Anteile des Systems gut voneinander trennen. Bei der durchgeführten Messung wurden die Kanäle nur leicht im nichtlinearen Bereich angesteuert, daher ergaben sich nur schwach ausgeprägte Harmonische in der Impulsantwort.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Spektrogramm des Anregungssignals, der Antwort auf das Anregungssignal für ein Mikrofon und die daraus (Methode von Angelo Farina) resultierende Impulsantwort.

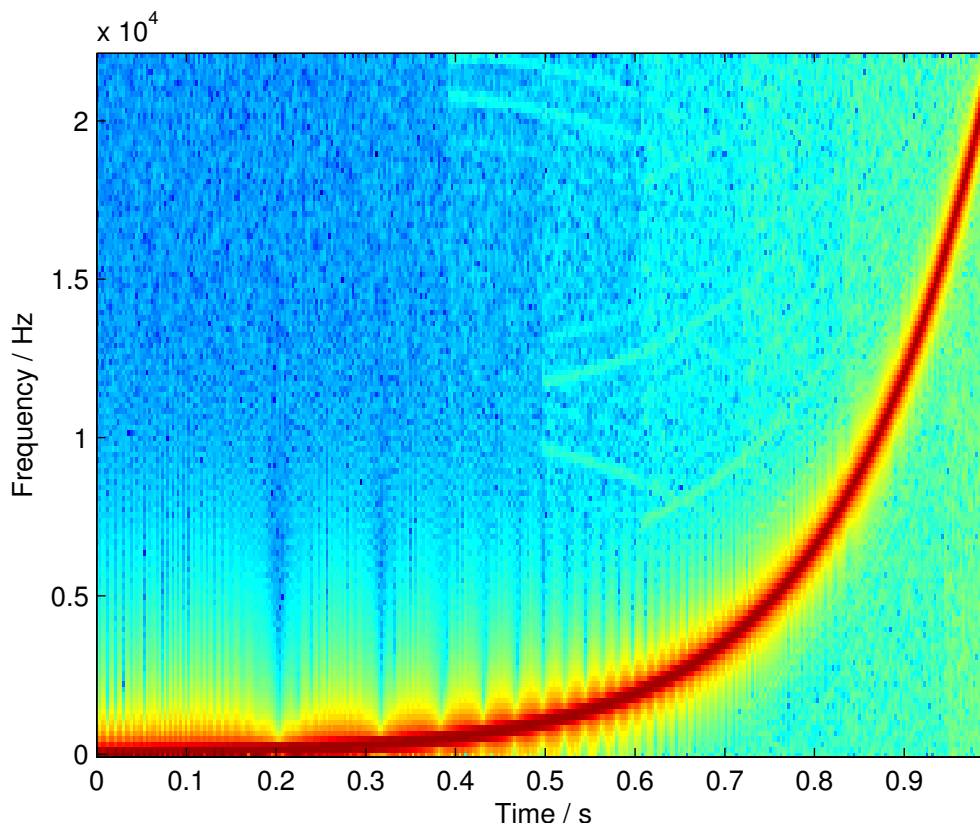


Abbildung 6: Spektrogramm eines logarithmischer Sweeps (Anregungssignal) mit einer Sekunde Länge über den gesamten Frequenzbereich ( $f_s = 44,1$  kHz)

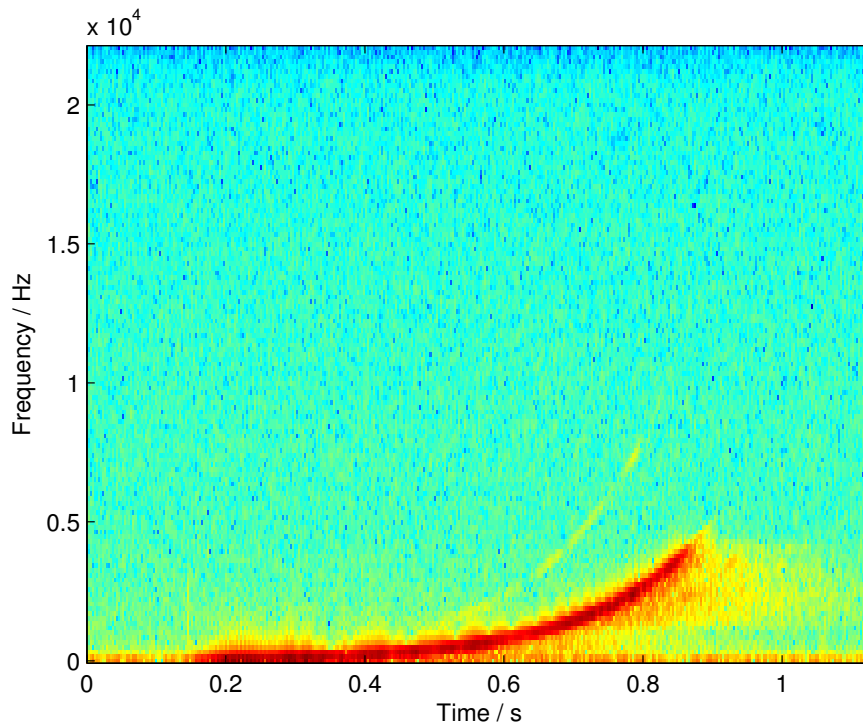


Abbildung 7: Antwort auf den wiedergegebenen logarithmischen Sweep an einem Mikrofon

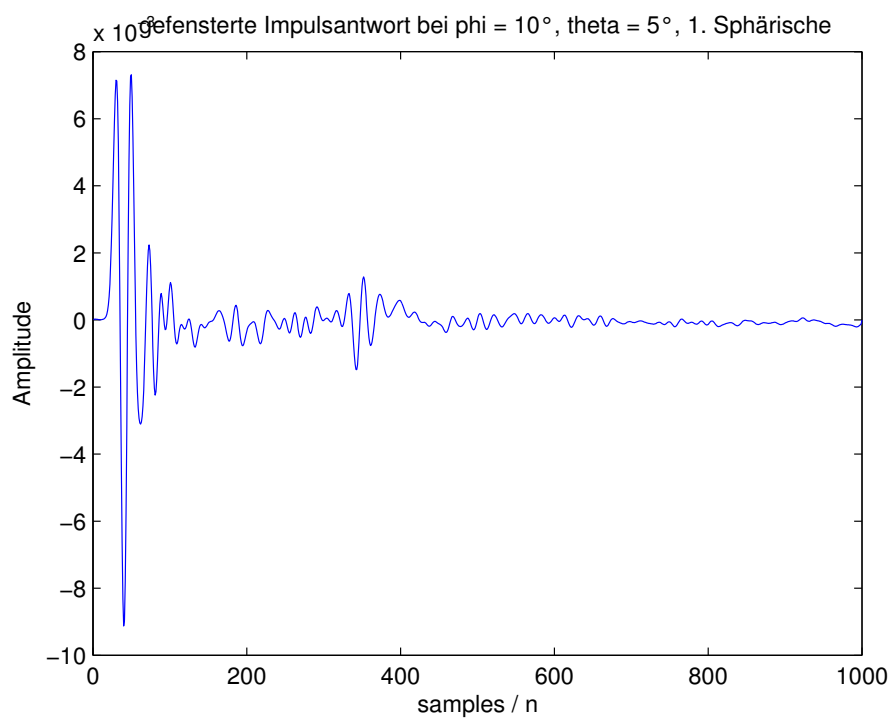


Abbildung 8: Darstellung einer gefensterter Impulsantwort. Die Impulsantwort wurde mit einem Hann-Fenster multipliziert (Am Beispiel der 1. sphärischen Harmonischen bei einem Azimutwinkel von  $10^\circ$  und einem Elevationswinkel von  $5^\circ$ ).



Der Vergleich der beiden Spektrogramme verdeutlicht auch die spektrale Begrenzung des Wiedergabesystems. Weiters zeigt sich eine harmonische Verzerrung, welche Rückschlüsse auf leichte Nichtlinearitäten im Gesamtsystem (Lautsprecher, Vorverstärker etc.) zulässt.

### **2.3.4 Aufbereitung der Messungen**

Für die weitere Verarbeitung der Messsignale wird eine 4D-Matrix generiert welche folgende Struktur besitzt.

1. Dimension: Impulsantworten der Länge L (in unserem Fall:  $L = 1000$ )
2. Dimension: sphärische Harmonische (1 ... 16)
3. Dimension: Elevation ( 1 ... 18 bzw.  $5^\circ$  ...  $175^\circ$  )
4. Dimension: Azimut ( 1 ... 36 bzw.  $0^\circ$  ...  $360^\circ$  )

Zur Darstellung gemessener Richtmuster, bei frei einstellbarer Frequenz, werden die Impulsantworten in der Matrix abgelegt. Für die spätere Visualisierung in einem *graphical user interface* werden die gewünschten Abstrahlungsmuster mit Hilfe einer entsprechenden Exponentialfolge in den Frequenzbereich transformiert.

Für die Darstellung der gemessenen Abstrahlungsmuster werden die ermittelten Amplituden für die gewünschte Frequenz auf der Kugeloberfläche im 3-dimensionalen Koordinatensystem aufgetragen (abhängig von Azimut und Elevation).

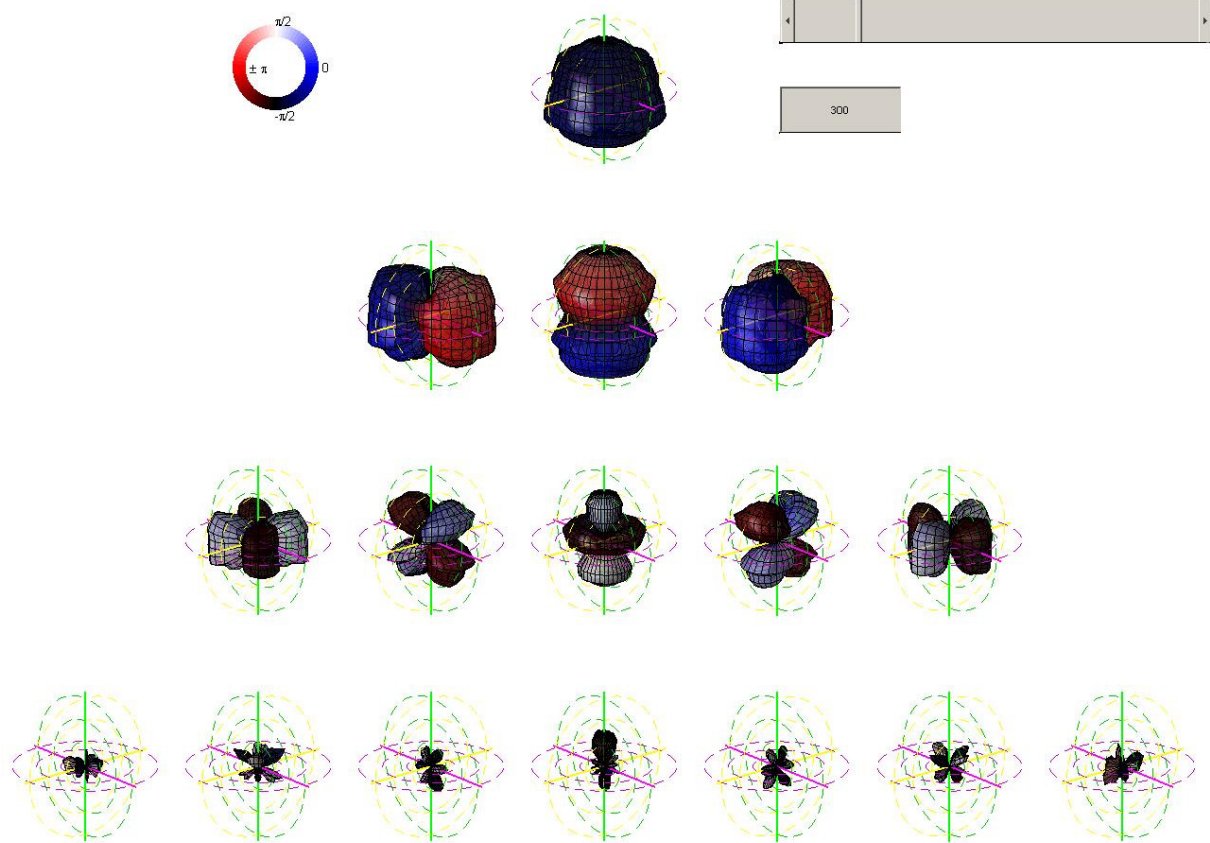


Abbildung 9: Abstrahlungsmuster bei der Frequenz  $f = 300\text{Hz}$ . Die vergleichsweise niedrigen Amplituden der Abstrahlungsmuster 3. Ordnung, rühren von einem Fehler im Algorithmus des Radialbeamformers her.

Aus oben gezeigter Abbildung wird ersichtlich, dass der Algorithmus des Radialbeamformers [Pomberger 2008], welcher normalerweise die Amplituden der sphärischen Harmonischen höherer Ordnung bei tiefen Frequenzen anheben sollte, nicht funktioniert hat.

Die ausbreitungsbedingte Amplitude der sphärischen Harmonischen wird durch sogenannte Hankel-Funktionen (welche abhängig vom Radius sind) beschrieben. Die Hankel-Funktionen sind Teil der Lösung der Wellengleichung im Kugelkoordinatensystem. Dadurch werden Terme hoher Ordnung bei der radialen Ausbreitung stärker als Terme niedrigerer Ordnung abgedämpft. Dies ist der Grund für die niedrigen Amplituden der sphärischen Harmonischen 3. Ordnung bei 300Hz.

Es zeigt sich auch, dass die Auswirkung der Fehlfunktion über 500Hz kleiner wird. Die Amplituden der sphärischen Harmonischen dritter Ordnung (unterste Zeile) sind in Abbildung 9 etwa um 10dB kleiner als die der restlichen Ordnungen.

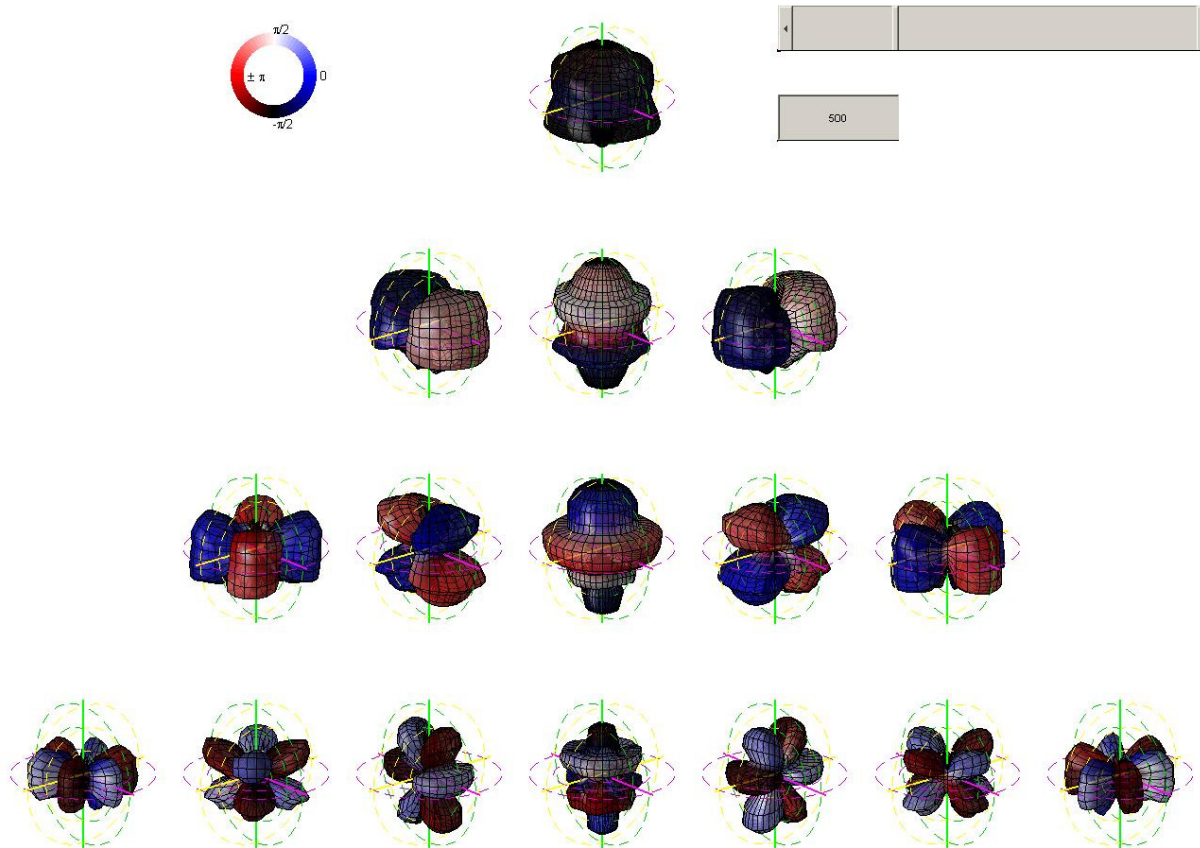
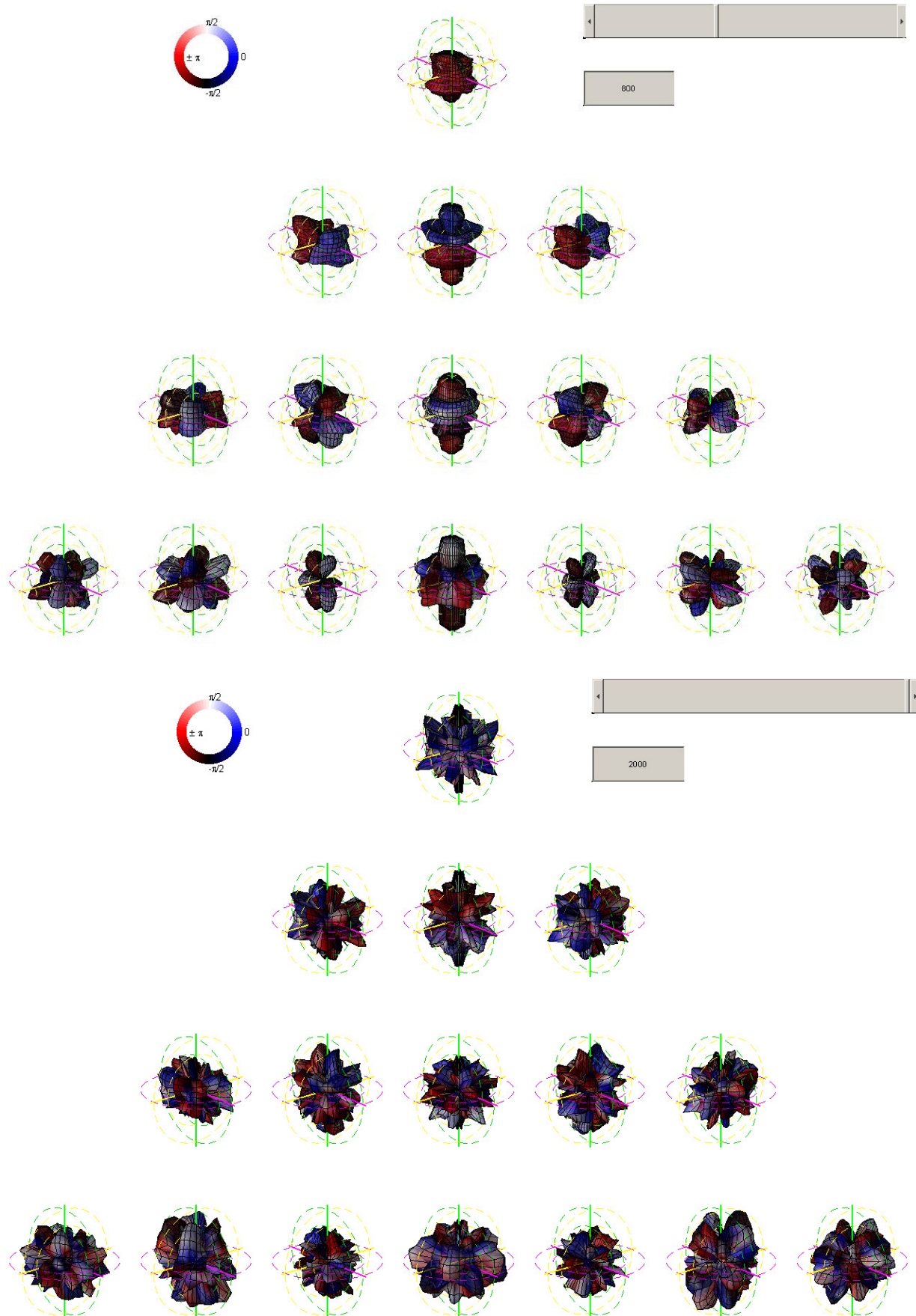


Abbildung 10: Sphärische Harmonische bei der Frequenz  $f = 500\text{Hz}$  (noch unterhalb der Grenze für räumliches Aliasing).

Da die Kalibrierungspegel der Mikrofone nicht ordnungsgemäß abgelegt wurden, sind die Amplituden über Azimut- und Elevationswinkel nicht angeglichen worden. Am Abstrahlungsmuster das die Kugelcharakteristik darstellen soll, ist die Abweichung zur sphärischen Harmonischen nullter Ordnung (kugelförmige Abstrahlung) erkennbar.



Abbildungen 11, 12: Auswirkung des räumlichen Aliasing bei 800Hz bzw. 2000Hz. Die Mehrdeutigkeiten in den beiden Abbildungen sind deutlich ersichtlich.

## 3 Fazit

Die zweite Phase der Laborübung (Gegenstand dieses Protokolls) besteht darin, akustische Messungen mit dem Ikosaederlautsprecher durchzuführen. Die gezielte Anregung von Reflexionspfaden im Raum bei der Impulsantwortbestimmung mit dem Ikosaederlautsprecher ist erfolglos verlaufen. Mit der Ansteuerung des Ikosaeders, die zum Zeitpunkt der Messungen zur Verfügung gestanden ist, sind die erwarteten Unterschiede in den Impulsantworten bei unterschiedlicher Abstrahlrichtung aus geblieben.

Bei der Vermessung der verwendeten Abstrahlungsfunktionen ist es jedoch gelungen den Fehler im Beamformingalgorithmus zu detektieren, der für diese Fehlfunktion verantwortlich ist. Die Muster hoher Ordnung, die vom Radialbeamformer in der Amplitude angeglichen werden sollten, sind aber in der Vermessung der Abstrahlung zu leise. Dies lässt den Schluss zu, dass der Radialbeamformer zu gegebener Zeit fehlerhaft gearbeitet hat und repariert werden muss.

## 4 Literatur

Skriptum zum Labor: Akustische Messtechnik 2, Zotter, Franz, 2008

Diplomarbeit: Pomberger, Hannes, 2008

Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique: Farina, Angelo, 2000