

Akustische Holographie und Holophonie, LU

Protokoll aus Akustische Holographie und Holophonie, LU

Kajetan Enge
Elisabeth Frauscher
Korbinian Wegler
Franck Zagala

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 14. Oktober 2016



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Im Rahmen der Vorlesung *Akustische Holographie und Holophonie*, wurden praktische Messungen mit kugelförmigen Mikrofon- und Lautsprecheranordnungen realisiert und mit den Lösungen der Wellengleichung verknüpft. Dieses Labor bot ebenfalls eine gute Gelegenheit, den neu gefertigten IEM Ikosaederlautsprecher zu vermessen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Vergleich verschiedener Ambisonic-Dekodier-Verfahren	5
2.1	Direkte Dekodierung (Sampling)	5
2.2	All-Round Ambisonic Decoding (AllRAD)	6
2.3	Vergleich	7
2.3.1	Grafische Auswertung des objektiven Vergleichs	7
2.3.2	Empirische Auswertung	9
3	Encoding von Eigenmike und Oktavamikrofon	11
3.1	Oktava A-Formatmikrofon (4-D Ambient MK-012)	11
3.1.1	Richtungskonvention	11
3.1.2	Kodierung von A-Format in B-Format	11
3.2	Eigenmike	12
4	Ikosaederlautsprecher	15
4.1	Messung mit dem Laser-Vibrometer	15
4.2	Ergebnisse der Laservibrometermessung	16
4.2.1	Spektrogramme	16
4.2.2	Entfaltete Sweeps und Abstandsklassen	17
4.3	Entwurf einer Ansteuerungs-Matrix	17
4.3.1	Lautsprecher Simulation anhand des Kugelkappenmodels	18
4.3.2	Keulenformung (eng. <i>Beamforming</i>)	21
4.4	Akustische Messung am akustischen Messplatz des IEM	22
4.5	Ergebnis der akustischen Messung	24
5	Tetraederlautsprecher von Ritsch	26
6	Testhoeren des neuen Ikosaeders im <i>IEM-CUBE</i>	26
7	Schlussfolgerung	26

1 Einleitung

Im Rahmen der Laborübung *akustische Holographie und Holophonie* wurden Messungen der Lautsprecher/Mikrofon Anordnungen mit den Lösungen der Wellengleichung verknüpft. Dabei wurde der Schwerpunkt besonders auf sphärische Arrays bzw. Lösungen der Wellengleichung in sphärischen Koordinaten gesetzt.

Die Wellengleichung im Freifeld lautet

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

wobei

$$\Delta = \nabla^T \nabla,$$

... Laplace Operator

$$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)^T.$$

... Nabla Operator in kartesischen Koordinaten

Die Lösungen dieser Differentialgleichung in Kugelkoordinaten ergeben sich aus der Multiplikation eines Angularterms (Kugelflächenfunktionen Y_n^m) und eines Radialterms (sphärische Besselfunktionen $j_n(kr)$ für interne Problemstellungen bzw. sphärische Hankelfunktionen 2. Art für externe Problemstellungen $h_n^{(2)}(kr)$). Die Multiplikation aus Winkel- und Radiusterm ergibt eine vollständige orthogonale Lösungsbasis zur Analyse eines Wellenfeldes.

Die Druck- bzw. Schnelleverteilung an der Oberfläche einer Kugel kann somit als lineare Kombination von Kugelflächenfunktionen ausgedrückt werden. Aus praktischen Gründen bestehen Lautsprecher- bzw. Mikrofonanordnungen stets aus einer endlichen Menge an Wandlern. Aus diesem Grund kann keine unendlich große Anzahl von Kugelflächenfunktionen mit diesen Anordnungen gezielt aufgenommen, oder gesteuert wiedergegeben werden. Bei tiefen Frequenzen werden hauptsächlich Kugelflächenfunktionen niedrigerer Ordnung empfangen oder abgestrahlt. Daher ist eine Begrenzung möglich. Zu hohen Frequenzen gelingt diese oft und es kommt zu räumlichem Aliasing.

Wie die Analyse bzw. Synthese eines Wellenfeldes praktisch durchgeführt werden kann, wird in dieser Arbeit untersucht. Zu diesem Zweck, wurden

- zwei verschiedene Dekodiermatrizen für den *IEM-CUBE*¹ entworfen, und deren objektive bzw. subjektive Unterschiede bei der Schallfeldreproduktion verglichen,
- eine einfache A-Format- / B-Format-Kodierungsmatrix für eine Mikrofonanordnung 1. Ordnung entwickelt,
- holographische Filter für das *Eigenmike*-Mikrofon entworfen, um die Aufnahme dann korrekt im *IEM-CUBE* wiederzugeben,
- der neuen IEM-Sonible IKO sowohl mit Laser-Doppler-Vibrometer als auch akustisch mit einer Mikrofonanordnung vermessen, um dann die Ansteuerungsmatrix entworfen
- schließlich ein Tetraederlautsprecher-Prototyp von Herrn Ritsch einer Analyse unterzogen.

1. Computer-Unterstützte Beschallungs-Einheit (Diplomarbeit Johannes Zmölnig)

2 Vergleich verschiedener Ambisonic-Dekodier-Verfahren

Um ein Ambisonic-Signal auf einem bestimmten Kugel-Lautsprecher-Array abbilden zu können, wird eine Abbildungsvorschrift in Form einer Dekodiermatrix D benötigt:

$$\mathbf{g} = D \cdot \text{diag}(\mathbf{a}) \cdot \mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}).$$

Für jede Lautsprecheranordnung muss die Dekodierung individuell erstellt werden. Der Ansteuerungsvektor \mathbf{g} setzt sich aus einer Dekodiermatrix D einer Diagonalmatrix $\text{diag}(\mathbf{a})$ zur Nebenkeulenunterdrückung und einem Vektor \mathbf{y} , der die Einkodierung eines Monosignals ins Ambisonics-Format vornimmt, zusammen.

Um Nebenkeulen, die durch endliche Ordnung entstehen, auszublenden wird eine Diagonalmatrix A mit Gewichtungsfaktoren a_n verwendet.

$$A = \text{diag}\{\mathbf{a}\} = \text{diag}\{(a_0, a_1, a_1, a_1, a_2, a_2, \dots, a_N)\}$$

Eine populäre Variante zur Bestimmung dieser, ist die sogenannte $\max\text{-}r_E$ Gewichtung [Dan01] [ZF12]:

$$a_n = P_n \left(\frac{137.9^\circ}{N + 1.51} \right), \quad (1)$$

wobei

P_n ... Legendre Polynom der Ordnung n .

Im Rahmen der Laborübung wurden zwei Dekodierverfahren für den *IEM-CUBE* entworfen (Direkte Dekodierung und All round Ambisonic Decoding). Beim *IEM-CUBE* handelt es sich um eine semiperiphere Wiedergabeeinrichtung mit 24 Lautsprechern. Damit ist eine Wiedergabe 4. Ordnung stabil realisierbar. Da die Lautsprecher im *IEM-CUBE* regelmäßig auf einer Halbkugel angeordnet sind, ist sogar eine Dekodierung bis zur 5. Ordnung möglich [Fra14].

2.1 Direkte Dekodierung (Sampling)

Im Fall der direkten Dekodierung werden die Kugelflächenfunktionen an approximierten Lautsprecherpositionen $\boldsymbol{\theta}_l$ abgetastet.

$$D_{\text{sampling}} = \begin{bmatrix} Y_0^0(\boldsymbol{\theta}_0) & Y_1^{-1}(\boldsymbol{\theta}_0) & Y_1^0(\boldsymbol{\theta}_0) & Y_1^1(\boldsymbol{\theta}_0) & \dots & Y_N^N(\boldsymbol{\theta}_0) \\ Y_0^0(\boldsymbol{\theta}_1) & Y_1^{-1}(\boldsymbol{\theta}_1) & Y_1^0(\boldsymbol{\theta}_1) & Y_1^1(\boldsymbol{\theta}_1) & \dots & Y_N^N(\boldsymbol{\theta}_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_0^0(\boldsymbol{\theta}_L) & Y_1^{-1}(\boldsymbol{\theta}_L) & Y_1^0(\boldsymbol{\theta}_L) & Y_1^1(\boldsymbol{\theta}_L) & \dots & Y_N^N(\boldsymbol{\theta}_L) \end{bmatrix},$$

wobei

θ_l ... Richtungsvektor des l -ten Lautsprechers auf der Kugel,
 L ... Anzahl der Lautsprecher (=Abtastpunkte für die Kugelflächenfunktionen),
 N ... Maximale Ordnung der Kugelflächenfunktionen.

2.2 All-Round Ambisonic Decoding (AIRRAD)

Da bei der direkten Dekodierung die Kugelflächenfunktionen durch die verfügbaren Lautsprecher nicht immer dicht und gleichmäßig abgetastet werden, geht man bei der Allrad-Dekodierung dazu über, mit einer viel größeren Anzahl an virtuellen Lautsprechern abzutasten. Diese virtuellen Lautsprecher werden dann über Vector Base Amplitude Panning (kurz VBAP) ohne Signalverlust auf die Lautsprecher abgebildet [Pul97] [ZF12]. In unserem Fall wurden 5200 virtuelle Lautsprecher mit Koordinaten eines t-designs auf der Oberfläche generiert. Die Abbildungsmatrix D_{AIRRAD} ergibt sich zu

$$D_{\text{AIRRAD}} = G \cdot Y,$$

wobei

G ... VBAP-Panning-Matrix mit der Dimension $[L \times L_v]$,
 Y ... Abgetastete Kugelflächenfunktionen an den virtuellen Lautsprechern $[L_v \times (N + 1)^2]$.

Mit der Panning Matrix G werden die virtuellen Lautsprecher mittels VBAP auf die realen abgebildet. Da es sich beim *IEM-CUBE* um eine semiperiphere Lautsprecheranordnung handelt, wird dazu für die Wiedergabe der virtuellen Lautsprecher über VBAP ein zusätzlicher Lautsprecher am Südpol angenommen (siehe Abb. 1(b)).

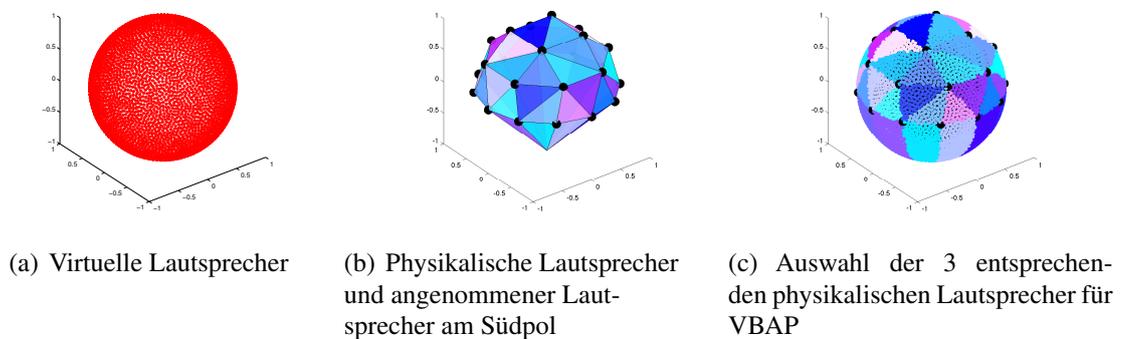


Abbildung 1 – Bei AIRRAD wird jeder dekodierte virtuelle Lautsprecher über VBAP von den physikalischen Lautsprechern abgespielt.

2.3 Vergleich

In weiterer Folge wurden die beiden entworfenen Dekoder sowohl objektiv als auch empirisch verglichen.

2.3.1 Grafische Auswertung des objektiven Vergleichs

Lautstärke:

Der erste untersuchte Parameter ist die Lautstärke. In folgender Abbildung ist die Lautstärkedifferenz links für den Sampling-Dekoder und rechts für den AllRAD-Dekoder zu sehen. Auf der Skala sind hierbei Werte von 0 bis -5 dB aufgetragen.

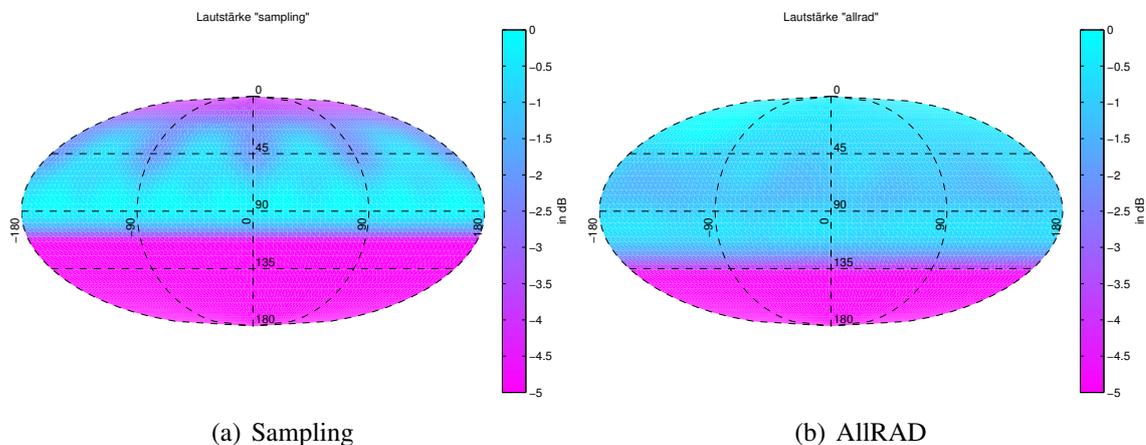


Abbildung 2 – Lautstärke

Sampling Ersichtlich sind die großen Lautstärkeverluste am Nordpol und in dem großen Bereich der unteren Halbkugel. Außerdem sind grobe Unregelmäßigkeiten von bis zu 3 dB zwischen den Lautsprecherpositionen und den Löchern dazwischen erkennbar.

AllRAD Im Vergleich dazu erscheint die Abbildung durch den AllRAD-Dekoder sehr viel gleichmäßiger, sowohl in den Zwischenräumen als auch am Nordpol der Lautsprecheranordnung. Zudem bleibt die Lautstärke von Quellen im Bereich der unteren Halbkugel besser erhalten.

Winkelaufweitung:

Der zweite betrachtete Parameter ist die ebenfalls vom Dekoder abhängige Winkelaufweitung, wenn eine Punktquelle wiedergegeben wird. Der Wertebereich der Skala erstreckt sich hierbei von 0 bis 80° .

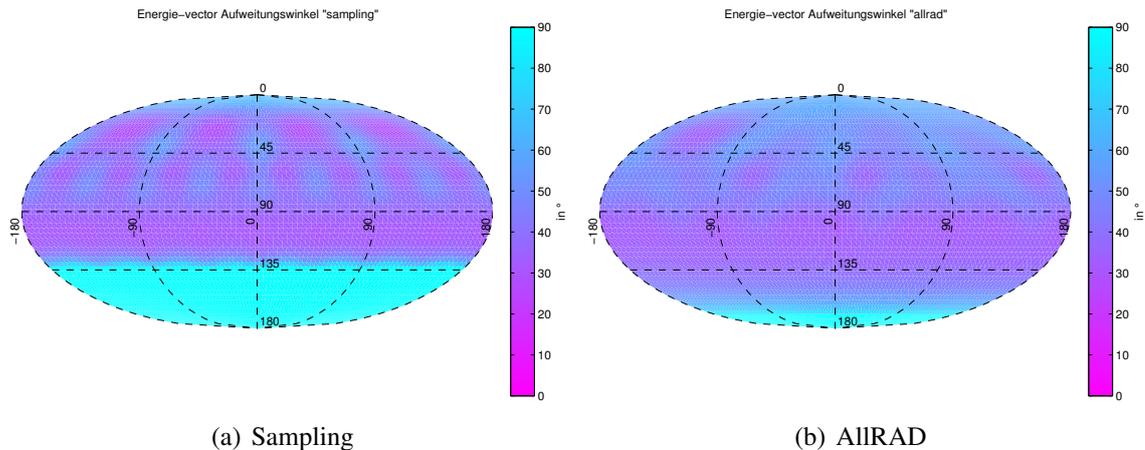


Abbildung 3 – Aufweitungswinkel

Sampling Im Fall des Sampling-Dekoders ist eine große Aufweitung des Winkels in der Südhemisphäre ersichtlich. Ebenfalls erkennbar ist eine Fokussierung an den Lautsprecherpositionen beziehungsweise eine Aufweitung in den Zwischenräumen, sowie am Nordpol.

AllRAD Der Winkel wird beim AllRAD-Dekoder am Südpol wesentlich weniger aufgeweitet, weil bei AllRAD die nächstgelegenen physikalischen Lautsprecher bis ca. 150° am Horizont mitspielen. Die Winkelaufweitung in der oberen Halbkugel sind diffuser und schwerer zu interpretieren, da die Fehler nicht immer mit den Lautsprecherpositionen korrelieren. Interessant ist, dass der bereits beim Lautstärkenvergleich beobachtete Fleck auch in dieser Darstellung wieder an der gleichen Stelle erkennbar ist.

Winkelfehler:

Der durch den Dekoder verursachte Winkelfehler wird als dritter Parameter untersucht. Zur Veranschaulichung wird auf der zugehörigen Skala ein Winkel von 0 bis 30° aufgetragen.

Sampling Die berechneten Winkelfehler ergeben ein, von den Lautsprecherpositionen abhängiges, sehr regelmäßiges Muster. Vor allem zwischen dem zweiten und dritten Lautsprecherring ergeben sich nicht zu vernachlässigende Fehler von 15° . Aufgrund der fehlenden unteren Halbkugel der Lautsprecheranordnung, zeigt sich dort erwartungsgemäß ein schlechtes Bild.

AllRAD Wieder ist zu beobachten, dass die Abweichungen diffuser, unregelmäßiger und weniger gut interpretierbar sind. Im Vergleich zum Sampling-Dekoder funktioniert der AllRAD-Dekoder etwas schlechter am Nordpol.

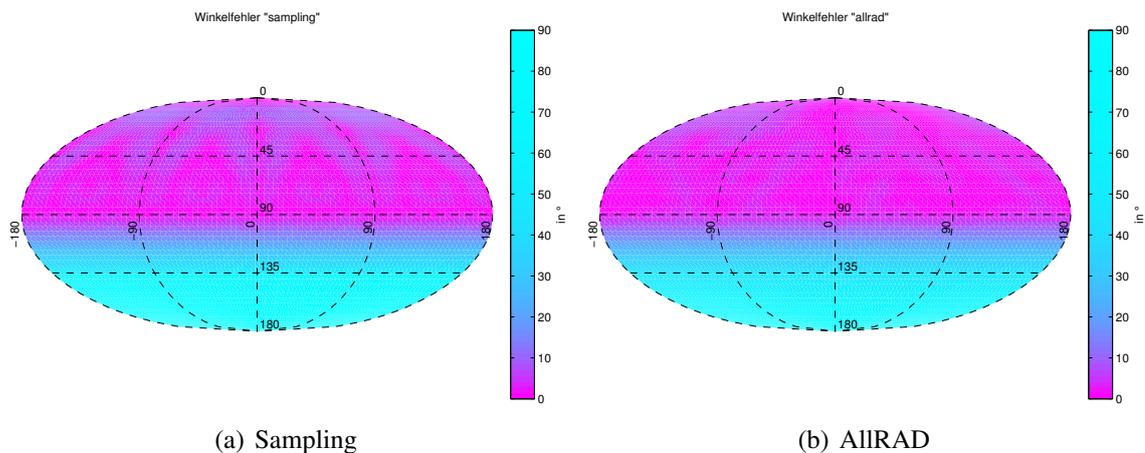


Abbildung 4 – Winkelfehler

2.3.2 Empirische Auswertung

Um die oben genannten Dekodierverfahren empirisch zu vergleichen, wurde ein Hörvergleich durchgeführt. Im ersten Schritt, wurde breitbandiges rosa Rauschen aus Lautsprecherposition LS_1 abgespielt, um die Lautstärkedifferenz zwischen den beiden Dekodervarianten auszugleichen.

Folgende, aus der obigen grafischen Untersuchung hervorgehenden Besonderheiten wurden versucht empirisch nachzuempfinden:

Lautstärke Zunächst wurden etwaige Lautstärkeunterschiede zwischen den Dekodern an verschiedenen auffälligen Zenitpositionen untersucht:

- 0° Zenit: Bei einem Zenitwinkel von 0° ist der Sampling-Dekoder, wie die grafische Darstellung schon vermuten lässt, um 4 dB leiser als der AllRAD-Dekoder.
- 30° Grad Zenit: Bei der Lautsprecherposition 24 wurde kein hörbarer Unterschied zwischen den beiden Dekodern wahrgenommen.
- 40° Zenit, 0° Azimut: Bei einem Zenitwinkel von 40° konnte mittels eines Sliderreglers in unserem PD-Patch ein Lautstärkeunterschied von 1,5 dB festgestellt werden. Der Sampling-Dekoder ist hier leiser.
- 70° Zenit, 0° bzw. 45° Azimut: Bei einem Zenitwinkel von 70° und einem Azimut von 0 bzw. 45° Grad wurde jeweils ein Unterschied von etwa 0,75 dB festgestellt.
- 130° Zenit, 0° Azimut: Bei einem Zenitwinkel von 130° , also in der unteren Hemisphäre und damit in einem Bereich ohne Lautsprecher, wurde ein Lautstärkeunterschied von etwa 15 dB gehört. Der Sampling-Dekoder ist hier leiser, da ein Signal aus der unteren Hemisphäre tendenziell verloren geht und nicht auf die Lautsprecher am Äquator aufgeteilt werden kann, wie beim AllRAD-Dekoder.

Links-rechts Unsymmetrie beim AllRAD-Dekoder: Um einen sinnvolleren Vergleich zwischen links und rechts zu ermöglichen, wurden die Lautsprecherposition ge-

spiegelt, um die vorherige rechte Seite auch links anzuhören. Laut der Simulation befindet sich bei 230° Azimut und 20° Zenit eine lautere Stelle als bei 130° Azimut (Abb. 2(b)), diese ist im Hörversuch nicht hörbar. Jedoch wird sie breitbandiger und schmaler abgebildet empfunden. Letzteres ist auch in der grafischen Darstellung (Abb. 3(b)) ersichtlich.

Lokalisationsfehler: Die Lokalisation der zwei Dekoder wurden im *IEM-CUBE* über die Lautsprecher 2 und 3 mit einem Zenitwinkel von 80° getestet. Dabei hat sich ergeben, dass das Signal mit dem Sampling-Dekoder um etwa 5° höher eleviert wahrgenommen wird. Außerdem änderte sich die Klangfarbe des Signals beim Umschalten der Dekoder, der Sampling-Dekoder klang heller. Unterschiede bezüglich der Lokalisation waren generell deutlich schwerer zu hören, als jene in der Lautstärke.

Aufweitung: Bezüglich der Quellaufweitung wurde die Position mit 40° Zenit und 0° Azimut getestet, hier war der AllRAD-Dekoder breiter als der Sampling-Dekoder.

3 Encoding von Eigenmike und Oktavamikrofon

Um ein einfallendes Schallfeld an einer bestimmten Position zu analysieren, werden kompakte Mikrofonanordnungen verwendet (z.B. um eine dreidimensionale Klangszene aufzunehmen). Das von jedem Mikrofon gemessene Signal wird dann über eine Kodiermatrix in Koeffizienten für eine endliche Menge an Kugelflächenfunktionen transformiert (man spricht von *Ambisonics* bei einer Aufnahme bis 1. Ordnung und *High Order Ambisonics* für höhere Ordnungen).

Die einfachste Art von Mikrofonanordnung, um eine Ambisonics Aufnahme zu realisieren ergeben die sogenannten B-Format Mikrofone (z.B. Oktava 4-D Ambient MK-012). Um die Analyse bei höheren Ordnungen zu machen, werden dann größere Mikrofonanordnungen verwendet (z.B. Eigenmike).

3.1 Oktava A-Formatmikrofon (4-D Ambient MK-012)

Eine der einfachsten Mikrofonanordnungen, um ein dreidimensionales Schallfeld zu analysieren, ist die Anbringung von vier Nierenmikrofonen auf den Flächen eines Tetraeders. Die direkten Signale der Mikrofone werden dabei als A-Format bezeichnet. Die vier nach außen zeigenden Nierencharakteristiken beinhalten dabei eine gemeinsame Omnidirektionalkomponente (Kugel) und jeweils eine Dipolkomponente (Achter-Charakteristik). Durch Verschaltung der vier A-Format-Kanäle können der richtungsunabhängige Anteil (W) und die Signale für die drei Raumrichtungen (X, Y, Z) erzeugt werden. Diese vier Komponenten werden als B-Format bezeichnet.

3.1.1 Richtungskonvention

Bereits 1977 wurde von Gerzon [CG77] im US-Patent 4.042.779 eine Konvention zur Benennung der A-Format-Kanäle vorgeschlagen. Mit left-back-down, left-front-up, right-front-down und right-back-up, werden die Hauptaufnahmerichtungen der Mikrofone bezeichnet, im weiteren A, B, C, D benannt. Ein kartesisches Koordinatensystem wird dem Tetraeder derart einbeschrieben, dass jeweils zwischen zwei Mikrofonen eine Koordinatenachse zu liegen kommt.

3.1.2 Kodierung von A-Format in B-Format

Der omnidirektionale Anteil (W) des B-Formates besteht aus der Addition aller A-Format-Komponenten

$$W = \frac{1}{2}(A + B + C + D).$$

Die übrigen Anteile (X, Y, Z) entstehen durch die Addition der beiden in diese Raumrichtung zeigenden Mikrofonensignale und phaseninverse Addition (Subtraktion) der in ge-

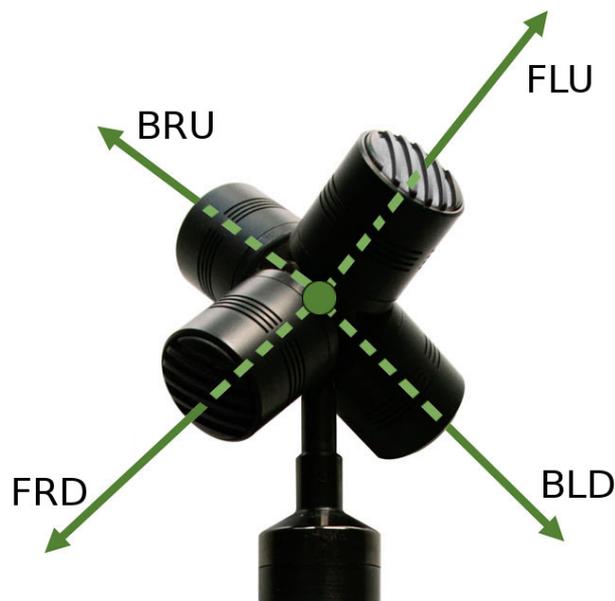


Abbildung 5 – Geometrie eines B-Format Mikrofons

gengesetzte Richtung zeigenden Komponenten.

$$X = \frac{1}{2}(-A + B + C - D) \quad (2)$$

$$Y = \frac{1}{2}(+A + B - C - D) \quad (3)$$

$$Z = \frac{1}{2}(-A + B - C + D) \quad (4)$$

Im Rahmen der Laborübung wurde eine alternative Herangehensweise versucht um eine abweichende Orientierung zu erzielen:

$$X = (\quad - \quad A \quad + \quad B \quad + \quad C \quad - \quad D \quad), \quad (5)$$

$$Y = (\quad + \quad 0 \cdot A \quad + \quad \sqrt{2} \cdot B \quad - \quad \sqrt{2} \cdot C \quad + \quad 0 \cdot D \quad), \quad (6)$$

$$Z = (\quad - \quad \sqrt{2} \cdot A \quad + \quad 0 \cdot B \quad - \quad 0 \cdot C \quad + \quad \sqrt{2} \cdot D \quad). \quad (7)$$

Dadurch sollte eine Orientierung der Y -Achse in die Richtung $+B$ und $-C$ und eine Orientierung der Z -Achse in $+D$ und $-A$ -Richtung erzeugt werden. Da die dabei entstehenden Basisvektoren (X,Y,Z) jedoch keine orthogonale Basis darstellen, ergab sich ein Abbildungsfehler der im Hörversuch als diffuse und unpräzise Wiedergabe zu erkennen war.

3.2 Eigenmike

Das *Eigenmike* Mikrofon der Firma *mhacoustics* bietet eine Anordnung von 32 omnidirektionalen Mikrofonen, die auf einer harten Oberfläche verteilt sind. Nach der Kodierung

in Kugelflächenfunktionen bis zur 4. Ordnung $\psi_{n,m}$ sollte nun ein sogenanntes Holographisches Filter $H_n(f)$ erstellt werden, um die Aufnahme auch auf einem größeren Wiedergaberadius r_s abspielen zu können [L13] [Wil99].

$$\phi_{n,m} = k \cdot R^2 \cdot \overbrace{\frac{h'_n(kR)}{h_n(kr_s)}}^{H_n(f)} \cdot \psi_{n,m}$$

Falls der Wiedergaberadius viel größer als der Radius des Mikrofons ist, kann diese Filterung vereinfacht werden.

$$\phi_{n,m} = k \cdot R^2 \cdot h'_n(kr) \cdot (-1)^{n+1} \cdot \psi_{n,m}$$

Die Entzerrungskurven, je nach Ordnung so eines Filters, sind in Abb. 6 mit durchgezogenen Linien dargestellt. Die benötigte Verstärkung bei tiefen Frequenzen ist jedoch, da das Eigenrauschen zu laut werden würde, nicht realisierbar. Die Verstärkung des Eigenrauschens der Kapseln verfälscht, im besten Fall den 0. Ordnung-Anteil, und im schlimmsten Fall die Lokalisation bei höheren Ordnungen. Aus diesem Grund werden die Radialfilter mit Hochpassfiltern nachgerüstet (strichlierte Linien in Abb. 6).

Die Ordnungen der verwendeten Hochpassfilter sind mit der Ordnung der Kugelflächen $n + 1$ verbunden, um die Steigerung der idealen Radialfilter für jede Ordnung zu kompensieren. Es entsteht dadurch eine Steigung von 20dB pro Dekade. Die verwendeten Hochpassfilter $\hat{H}_n(g)$ lassen sich wie folgt beschreiben:

$$\hat{H}_n(f) = \frac{\left(\frac{f}{f_{c_n}}\right)^{n+1}}{1 + \left(\frac{f}{f_{c_n}}\right)^{n+1}},$$

wobei die Grenzfrequenzen folgende sind:

Ordnung n	0	1	2	3	4
Grenzfrequenz f_{c_n}	20	70	500	1500	2700

Aus diesen gewünschten Filtern, werden dann praktische Filter entworfen, deren Impulsantworten als .wav-Dateien exportiert werden. Daraus wurde eine Konfigurationsdatei für den *mcfx* Convolver erstellt [Kro14].

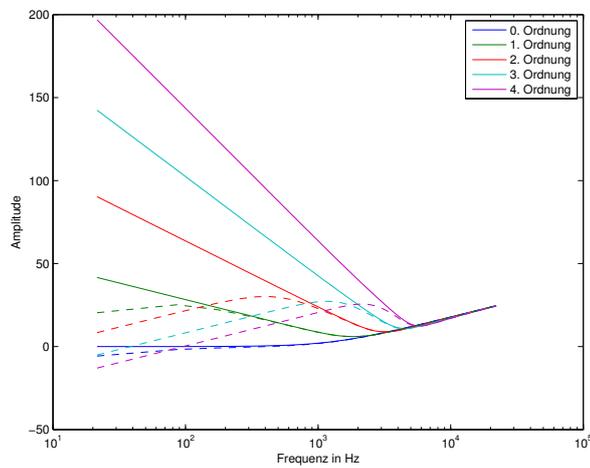


Abbildung 6 – *Durchgezogen*: ideale Radialfilterung $H_n(f)$ des Eigenmike Mikrofons je nach Ordnung projiziert auf einem unendlich weiten Radius. *Strichliert*: Radialfilterung des Eigenmike-Mikrofons je nach Ordnung mit Hochpassfilterung $\hat{H}_n(f)$ um den unpraktischen *Bass-Boost* zu vermeiden.

4 Ikosaederlautsprecher

Der Ikosaeder-Lautsprecher ist ein Lautsprecherarray mit 20 Chassis, die auf den Flächen eines Ikosaeders verteilt sind. Im Zuge des Labors wurde die zweite Generation des Ikosaeders vermessen. Diese zweite Generation hat ein kleineres Volumen als die erste und die verwendeten Lautsprecherchassis hochwertiger, wodurch sie erst bei höheren Frequenzen in Biegeschwingungen aufbrechen. Die Vermessung des Ikosaeders wurde auf zweierlei Art durchgeführt, zunächst mittels eines Laser-Doppler-Vibrometers und im Anschluss mit Hilfe eines Mikrofonarrays.

4.1 Messung mit dem Laser-Vibrometer

Ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) misst die Normalschnelle der Lautsprechermembran. Ein großer Vorteil der Messung mit einem LDV ist, dass jegliche raumakustischen Einflüsse nicht im Messergebnis aufscheinen, weil statt mit Schall mit Licht gearbeitet wird. Hierfür müssen die Lautsprechermembranen das Laserlicht reflektieren können. Um eine Reflexion zu ermöglichen, wurden die Zentren der Membranen mit kleinen reflektierenden Flächen beklebt. Anschließend wurde das LDV mit einem Abstand von 23 cm normal auf die Membranebene ausgerichtet. Wichtig für die Messung mit dem LDV ist, dass sich die zu vermessene Membran zu Beginn der Messung in Ruheposition befindet. Sollte die Membranschnelle beispielsweise mit einer Bewegung des ganzen Ikosaeders überlagert sein, so ergibt sich in der Messung ein Fehler. Diese Fehler machen sich dann als steile Flanken im Spektrogramm der Messung bemerkbar. Weil die Steckverbindung im Fuß des Ikosaeders nicht ganz stabil ist, war es notwendig während die Bewegungen im Raum zu reduzieren, um dem Ikosaeder keine tieffrequente Schwingung aufzuprägen.

Im Folgenden eine kurze Überlegung zum Messfehler durch nicht normale Ausrichtung des Lasers auf die Membrane:

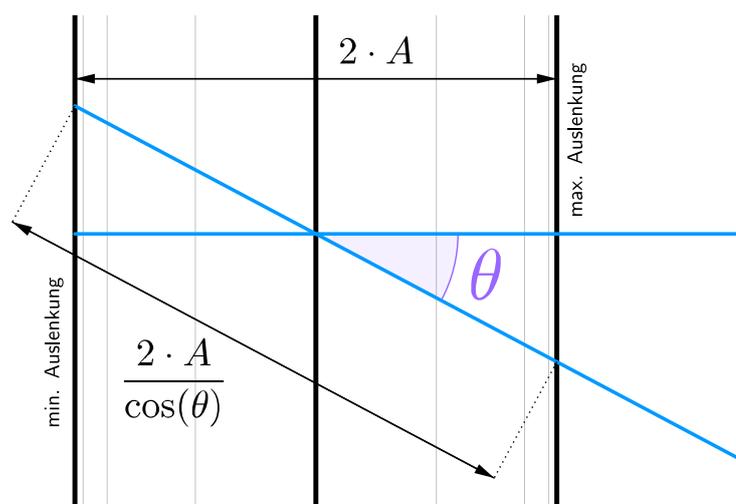


Abbildung 7 – Winkelfehler-Fortpflanzung bei Schnellemessung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer

Normale Bewegung der Mitte der Membran:

$$\xi_x(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t),$$

nach der Zeit abgeleitet:

$$v_x(t) = -A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Wenn das Laser-Doppler-Vibrometer unter einem Einfallswinkel θ misst, wird eine Schnelle v_{LDV} gemessen:

$$v_{LDV}(t) = -\left(\frac{A}{\cos(\theta)}\right) \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

der relative Messfehler beträgt also:

$$f = \frac{v_x - v_{LDV}}{v_x} \cdot [100\%] = \left(1 - \frac{1}{\cos(\theta)}\right) \cdot [100\%].$$

Bei einer Abweichung von 5° ergibt sich somit ein Fehler von 0.38%. Aufgrund dieses geringen Messfehlers reicht es aus, den Winkel mittels Augenmaß einzustellen.

Zur Systemidentifikation wird ein exponentieller Sweep verwendet (von 10 bis 22050Hz, 1s, 16Bit 44100Hz). Um Zeit zu sparen, werden die einzelnen Membranen zeitlich überlappend angeregt (mit 18000 Samples Verschiebung). Das Abspielen des Sweep s bzw. das Aufnehmen der Sweep-Antworten $y_{i,j}$ wird mit einem PD-Patch gesteuert.

Die Impulsantworten der einzelnen Membranen $h_{i,j}$ werden in Matlab mit einer schnellen Entfaltung berechnet:

$$h_{i,j}(t) = \text{ifft} \frac{\text{fft}(y_{i,j}(t))}{\text{fft}(s(t))},$$

wobei

i ... Indizes der gemessenen Membran
 j ... Indizes der angeregten Membran

Die Impulsantworten werden dann mit diesem Format in einer Matrix gespeichert:

$$H : \left[\underbrace{2048}_{\text{Samples}} \times \overbrace{20}^{\text{gesteuerte Membrane}} \times \underbrace{20}_{\text{gemessene Membrane}} \right]$$

4.2 Ergebnisse der Laservibrometermessung

4.2.1 Spektrogramme

Als Zwischenergebnis der Messung mit dem Laservibrometer entsteht eine Aufzeichnung verschränkter Sinussweeps. Zur Kontrolle ob die Messung bis dahin erfolgreich war, wurde deren Spektrogramm in Audacity 8 betrachtet. Ein exponentieller Sweep ergibt ebenso

eine exponentielle Kurve. Nicht-lineare Verzerrungen sind als zusätzliche Kurve, die auf der Zeitachse vor dem eigentlichen Signal entsteht, zu sehen. In diesen Spektrogrammen sind die einzelnen Sweepsignale, die den gemessenen Lautsprecher aktiv oder passiv anregen, der Reihe nach zu erkennen.

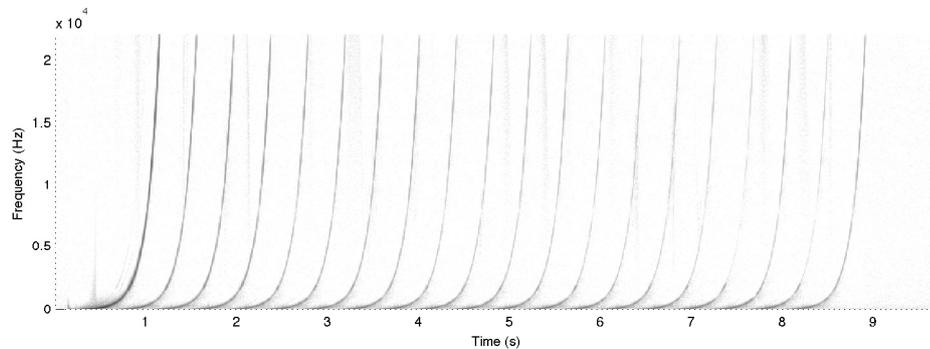


Abbildung 8 – Sweepantwort der einzelnen Membranen. Membrane 1 wird elektrisch angesteuert

In diesen Spektrogrammen waren teilweise Clicks (senkrechte Linien) und ähnliche Störungen zu erkennen. In diesem Fall wurde die Messung verworfen und wiederholt. Es zeigen sich, wie erwartet die exponentiellen Sweeps in zeitlicher Reihenfolge. Dabei ist die aktive Anregung des gemessenen Lautsprechers als stärkeres Signal zu sehen und die passiven Anregungen zeigen sich in bestimmten Abstufungen. Diese Abstufungen, beziehungsweise die unterschiedlich starke Kopplung aus der diese folgen, entstehen durch sogenannte Abstandsklassen.

4.2.2 Entfaltete Sweeps und Abstandsklassen

Nach Entfaltung des Zeitsignals ergeben sich für jeden Lautsprecher alle Impulsantworten für die unterschiedlichen Anregungen. Durch Fouriertransformation der Impulsantworten, die zu einer Lautsprechermessung gehören, erhält man die Amplitudengänge über der Frequenz. Daraus ist deutlich die Entstehung von Abstandsklassen zu erkennen.

4.3 Entwurf einer Ansteuerungs-Matrix

Um eine gewisse Richtcharakteristik erzeugen zu können, sollte nun untersucht werden, wie die Systemmatrix (20 Spannungen am Eingang - $(N + 1)^2$ sphärische Wellenspektren am Ausgang) aussieht. Daraus kann dann bestimmt werden wie die Lautsprecher elektrisch angesteuert werden sollten, um ein Signal mit der gewünschten Richtcharakteristik abzustrahlen.

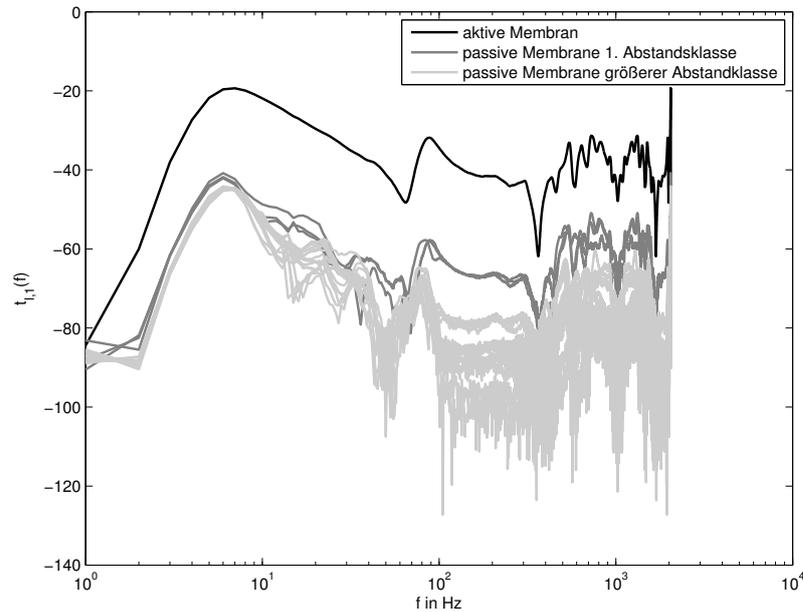


Abbildung 9 – Frequenzantwort der einzelnen Membranen und Abstandsklasse. Membrane 1 wird elektrisch angesteuert.

4.3.1 Lautsprecher Simulation anhand des Kugelkappenmodells

Anhand des Kugelkappenmodells (eng. *Spherical cap model*) [Zot09] und der in 4.1 gemessenen Schnellen $v^{(l)}$, kann die Schnelleverteilung über der Kugeloberfläche bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass der Lautsprecher einer Kugel mit Radius r_0 entspricht, mit starrer Fläche zwischen den Lautsprechern ($v_r|_{r_0} = 0$) und konphas schwingenden Membranen ($v_r|_{r_0} = v^{(l)}$).

Die Schnelleverteilung an der Lautsprecher-Oberfläche in Kugelflächenfunktionen ist somit :

$$\boldsymbol{\nu} = \hat{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{C}_N \cdot \mathbf{v}, \quad (8)$$

wobei,

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \text{vec}\{v^{(l)}\} && \dots \text{gemessene Schnellen an den Membranen} && [L \times 1] \\ \boldsymbol{\nu} &= \text{vec}\{\nu_n^m\} && \dots \text{sphärisches Wellenspektrum der Schnelle an der Oberfläche} && [1 \times (N + 1)^2] \\ \mathbf{Y} &= \text{mtx}\{Y_n^m(\boldsymbol{\theta}_l)\} && \dots Y_n^m \text{ evaluiert an LS-Positionen} && [(N + 1)^2 \times L] \\ \hat{\mathbf{A}} &= \text{diag}(\hat{\mathbf{a}}) && \dots \text{Koeffizienten für die Kugelkappen} && [(N + 1)^2 \times (N + 1)^2], \end{aligned}$$

und

$$\hat{a}_n = \sqrt{\frac{(2n+1) \cdot \pi}{2}} \cdot \begin{cases} \cos(\frac{\alpha}{2}) P_n[\cos(\frac{\alpha}{2})] - P_{n-1}[\cos(\frac{\alpha}{2})], & n > 0, \\ 1 - \cos(\frac{\alpha}{2}), & n = 0, \end{cases}$$

(siehe [Zot09]).

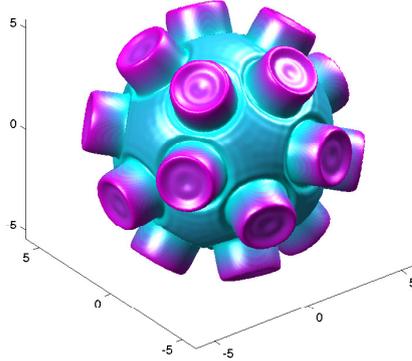


Abbildung 10 – Kugelkappenmodell für den Icosaederlautsprecher wenn alle Membranen mit der gleichen Schnelle schwingen, gerechnet mit einer maximalen Ordnung $N = 60$.

Äußere Schallausbreitung: Für äußere Problemstellung (eng. *external problems*) sind die sphärischen Hankel-Funktionen 2. Art, ($h_n^{(2)}$ hier h_n verkürzt) ausreichend um den radialen Anteil zu beschreiben. Die sphärischen Wellenspektren für die Schnelle an der Oberfläche des Icos (r_0) bzw. den Druck an einem beliebigen Projektionsradius ($r_p > r_0$) können somit beschrieben werden also [Wil99]:

$$\nu_n^m(kr_0) = c_{n,m} \cdot h'_n(kr_0) \cdot \frac{i}{\rho_0 \cdot c} \quad (9)$$

$$\psi_n^m(kr_p) = c_{n,m} \cdot h_n(kr_p) \quad (10)$$

Fügen wir Gleichung (9) in (10) ein, erhalten wir das sphärische Wellenspektrum des Druckes ψ_n^m am Radius r_p in Abhängigkeit von ν_n^m an der Oberfläche des Lautsprechers r_0 :

$$\psi_n^m(kr_p) = \frac{\rho_0 \cdot c}{i} \cdot \frac{h_n(kr_p)}{h'_n(kr_0)} \cdot \nu_n^m(kr_0). \quad (11)$$

Beim Einfügen der Gl. (8) in (11),

$$\psi_n^m(kr_p) = \frac{\rho \cdot c}{i} \frac{h_n(kr)}{h'_n(kR)} \hat{a}_n \sum_{l=1}^{20} Y_n^m(\theta^{(l)}) v^{(l)},$$

oder in Matrixnotation:

$$\begin{aligned}\psi(kr_p) &= \frac{\rho_0 \cdot c}{i} \cdot \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{v}, \\ \psi(kr_p) &= \mathbf{Q} \cdot \mathbf{v},\end{aligned}$$

wobei,

$$\begin{aligned}\mathbf{H} &= \text{diag} \left\{ \frac{h_n(kr_p)}{h'_n(kr_0)} \right\} && \dots \text{Holographische Extrapolationskoeffizienten} \\ &&& [(N+1)^2 \times (N+1)^2] \\ \mathbf{Q} &= \frac{\rho_0 \cdot c}{i} \cdot \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{Y} && \dots \text{Übertragungsmatrix} \\ &&& \text{Schnelle zu sph. Schalldruck-Wellenspektrum} \\ &&& [(N+1)^2 \times L]\end{aligned}$$

Spannung-Schnelle-MIMO-System:² Wie die 20 elektrische Signale je nach Frequenz auf die Schnelle der einzelnen Membranen wirken, lässt sich mit einer Matrix $\mathbf{T}(\omega)$ beschreiben (siehe Abb. 9 & 11). In einem idealen System wäre diese Matrix eine frequenzunabhängige Einheitsmatrix, aus folgenden Gründen kann sie das aber nicht sein:

- das Lautsprecherchassisystem reagiert frequenzabhängig,
- die Membranen des Ikosaederlautsprechers sind in einem gemeinsamen geschlossenen Volumen eingebaut, daher treten akustische Kopplungen auf,

Die Schnelle kann nun als Linearkombination der Spannungssignale jedes Chassis angenommen werden:

$$\mathbf{v} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{u},$$

wobei,

$$\begin{aligned}\mathbf{T}(\omega) &= \begin{bmatrix} t_{1,1}(\omega) & t_{1,2}(\omega) & \dots & t_{1,L}(\omega) \\ t_{2,1}(\omega) & t_{2,2}(\omega) & \dots & t_{2,L}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{L,1}(\omega) & t_{L,2}(\omega) & \dots & t_{L,L}(\omega) \end{bmatrix} && \dots \text{Lautsprecher-LDV-Systemmatrix} \\ &&& [L \times L]\end{aligned}$$

Das ganze System kann dann wie folgt beschrieben werden:

$$\psi(kr_p) = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{u}.$$

2. MIMO= Multiple Input Multiple Output

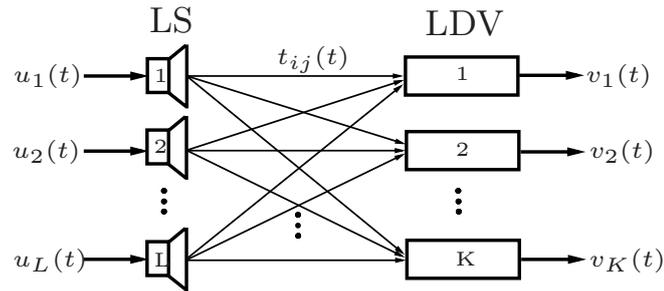


Abbildung 11 – LDV-Lautsprecher-MIMO-System, aus [Ker10]

4.3.2 Keulenformung (eng. *Beamforming*)

Falls die Matrizen \mathbf{T} und \mathbf{Q} sich invertieren lassen kann dann kann jede beliebige gewünschte Linearkombination aus Kugelflächenfunktionen $\check{\psi}_n^m$ bis zur entsprechenden maximalen Ordnung N mit dem Steuerungsvektor $\mathbf{u}_{St.}$ erzeugt werden,

$$\mathbf{u}_{St.} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{Q}^{-1} \cdot \check{\boldsymbol{\psi}}.$$

Jedoch hat der Ikosaederlautsprecher 20 Chassis und ist somit für die 3. Ordnung überdeterminiert: Nur ein Lautsprecher mit mindestens $(N + 1)^2$ Wandlern (Hier $N = 3 \Rightarrow 16$ Chassis) ermöglicht eine direkte Inversion der Matrix \mathbf{Q} , falls die Anordnung günstig ist.

In unserem Fall, unter der Bedingung, dass $(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^T)^{-1}$ existiert, wird die pseudo-inverse Matrix verwendet:

$$\mathbf{u}_{St.} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{Q}^+ \cdot \check{\boldsymbol{\psi}},$$

wobei,

$$\mathbf{Q}^+ = \mathbf{Q}^T \cdot (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^T)^{-1} \quad \dots \text{Schnelleinstellung mittels pseudoinverser Matrix}$$

$$[L \times (N + 1)^2]$$

$$\check{\boldsymbol{\psi}}_n^m \quad \dots \text{gewünschtes sphärisches Wellenspektrum am Radius } r_p$$

$$[(N + 1)^2 \times 1]$$

Soll eine keulenförmige Abstrahlung erzielt werden, lässt sich das sphärische Wellenspektrum $\mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}_{beam})$ so berechnen:

$$\mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}_b) = \mathcal{SHT}[\delta(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_{beam})]$$

$$\mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}_b) = [Y_n^m(\boldsymbol{\theta}_{beam})]_{n=0 \dots N, m=-n \dots n}$$

Da der Iko es nicht ermöglicht die Kugelflächenfunktionen bis zur ∞ -Ordnung anzusteuern, sondern nur bis $N = 3$, sollen die typischen Abschneidungsphänomene in Form von Nebenkeulen mit einer *max-re* Gewichtung \mathbf{A} unterdrückt werden. Der Spannungssteuerungsvektor lautet dann:

$$\mathbf{u}_b(\boldsymbol{\theta}_{beam}) = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{Q}^+ \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}_{beam})$$

wobei,

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{a\} \quad \dots \text{Koeffizienten für die max-re Gewichtung (siehe Gleichung 1)}$$

$$[(N + 1)^2 \times (N + 1)^2],$$

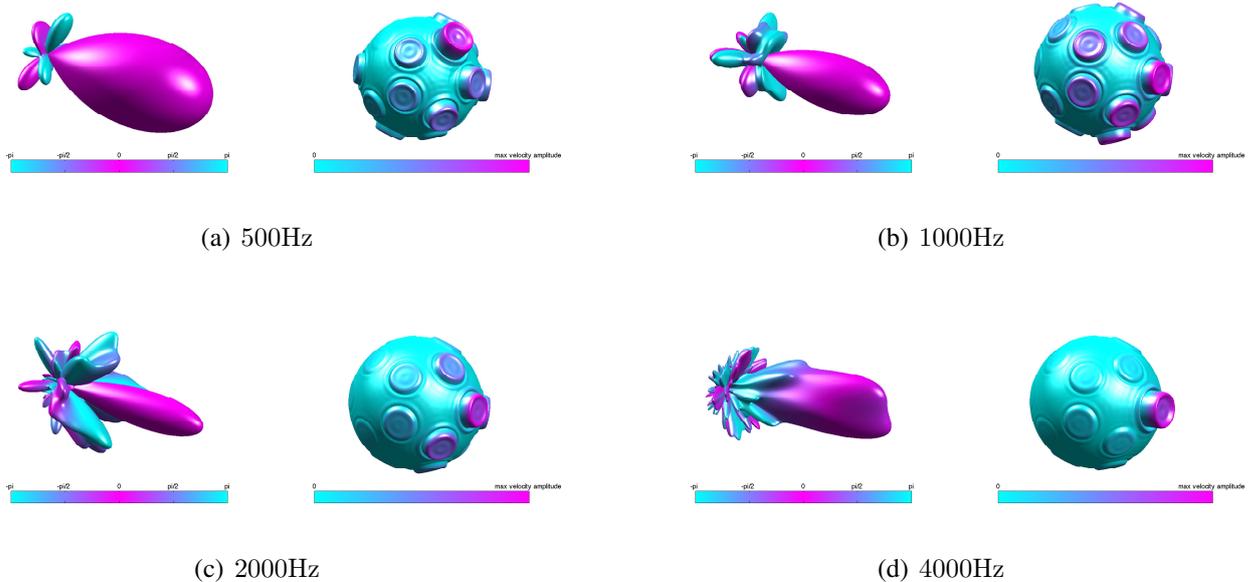


Abbildung 12 – Richtcharakteristik einer Keule (Azimut: 0° , Zenit: $\pi/2^\circ$) an $r_p = 1\text{m}$ und Amplitude der Schnelleverteilung an der Fläche, die Steuerungsmatrix wurde anhand des Kugelkappenmodells (bis $N = 60$) und mit max-re-Gewichtung berechnet. (Annahme : $r_0 = 0.27\text{m}$ und $\alpha = \pi/6\text{rad}$).

In Abb. 12 sind die Amplitude der Schnelle an der Oberfläche sowie die Richtcharakteristiken am Radius $r_P = 1\text{m}$ an verschiedenen Frequenzen mit Spannungssignalen $u_b(\phi = 0^\circ, \theta = \pi/2)$ dargestellt. Offensichtlich spielen die Kugelflächenfunktionen höherer Ordnungen eine nicht vernachlässigbare Rolle und verzerren die Richtcharakteristik der Keule.

4.4 Akustische Messung am akustischen Messplatz des IEM

Neben der Messung mit dem Laser-Doppler-Vibrometer wurde auch eine akustische Vermessung des Ikosaeders durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der Ikosaeder im akustischen Messraum des IEM aufgebaut. Mit Hilfe einer Holzkonstruktion wurden 18 Mikrofone, mit einem vertikalen Winkelabstand von 10° , in Form eines Halbkreises um den Ikosaeder angebracht. Der Ikosaeder wurde mit seinem Stativ auf einen elektrisch gesteuerten Drehteller gestellt und genau in der Mitte des Mikrofonhalbkreises positioniert. Durch 36 Drehungen des Tellers und die separate Ansteuerung der 20 Membranen entstehen 12900 aufgezeichnete Signale. Jedes dieser Signale ist 4096 Samples lang, wodurch



Abbildung 13 – Akustische Vermessung des Icosaeders im akustischen Messplatz von IEM mit 18 Messmikrofonen

eine vierdimensionale Matrix H entsteht. Die Sweeps wurden mit einer Samplingfrequenz von 44100 Hz generiert. Zwischen den einzelnen Sweeps wurden 35000 Samples Platz gelassen. Der Sweep verlief zwischen den Frequenzen 10 und 22050 Hz.

Die Impulsantworten für jede gesteuerte Membran an jeder Drehtellerposition werden wie Oben entfaltet und ergeben:

$$H : \left[\underbrace{4096}_{\text{Samples}} \times \underbrace{20}_{\text{Membrane}} \times \underbrace{18}_{\text{Mikrofon}} \times \underbrace{36}_{\text{Drehteller}} \right]$$

Damit die Messungen von dem GUI `balloon_holo_initdata.m` ausgelesen werden können, werden diese in eine Matrix `hall.mat` gespeichert:

- `H`
- `f_s`

- ls_zenith
- mic_zenith_azimuth
- prefix

Insgesamt wird für jede gesteuerte Membran (Einheitsvektor \mathbf{u}) der Druck p_{648} an 648 Position gemessen. Die Systemmatrix \mathbf{G} ist hier als *Blackbox* betrachtet. Das sphärische Wellenspektrum für den Druck ψ kann mittels eines diskreten Kugelflächenfunktions-transformation ermittelt werden und erlaubt später eine feininterpolierte Darstellung mittels Ballondiagramm und einem Schnitt als Polardiagramm:

$$\begin{aligned} p_{648} &= \mathbf{G} \cdot \mathbf{u}, \\ \psi &= \mathbf{Y}_{648}^+ \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{u}. \end{aligned}$$

Ähnlich wie im Teil 4.3.2, kann eine Ansteuerungsmatrix (z.B. für Keulenformung mit $\max -r_E$ -Gewichtung) aus dieser Messung ermittelt werden.

Kontrolle: Die durch LDV ermittelte Ansteuerungsmatrix könnte mit den akustisch gemessenen Ergebnissen verglichen werden, wobei beide Systemmatrizen im idealen Fall identisch sein sollten

$$\begin{aligned} \psi &\stackrel{!}{=} \mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}_{beam}) \\ \Leftrightarrow \mathbf{Q} \cdot \mathbf{T} &\stackrel{!}{=} \mathbf{Y}_{648}^+ \cdot \mathbf{G} \\ \Leftrightarrow \mathbf{I} &\stackrel{!}{=} \mathbf{Y}_{648}^+ \cdot \mathbf{G} \cdot (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{T})^+. \end{aligned}$$

4.5 Ergebnis der akustischen Messung

Ausgewertet wird das Ergebnis der akustischen Messung mittels der Matlab GUI `balloon_holo.m`. Diese zeigt die Daten sowohl in einer 2D als auch in einer 3D Ansicht und trägt zusätzlich die Phasenverschiebung in Farbe auf. Verstellen lassen sich hierbei Frequenz und Azimut- und Zenitwinkel für die Option Beamforming.

In folgender Grafik dargestellt sind markante Punkte im Frequenzverlauf:

Bei 100 Hz wird nicht mehr kugelförmig abgestrahlt, sondern es ergibt sich auf der Rückseite schon eine Dämpfung von -15 dB.

Ab 180 Hz bildet sich ein Nierenform aus, die sich bei 250 Hz zu einer Hyperniere entwickelt. Ab 350 Hz beginnen sich auf der Hinterseite Nebenkeulen auszubilden. Die Grafiken bei 500 Hz bis 4000 Hz können mit der Simulation in Abbildung 12 verglichen werden. Beobachtbar ist, dass ab 1000 Hz die Richtwirkung unsymmetrisch wird und nicht mehr optimal bündelt.

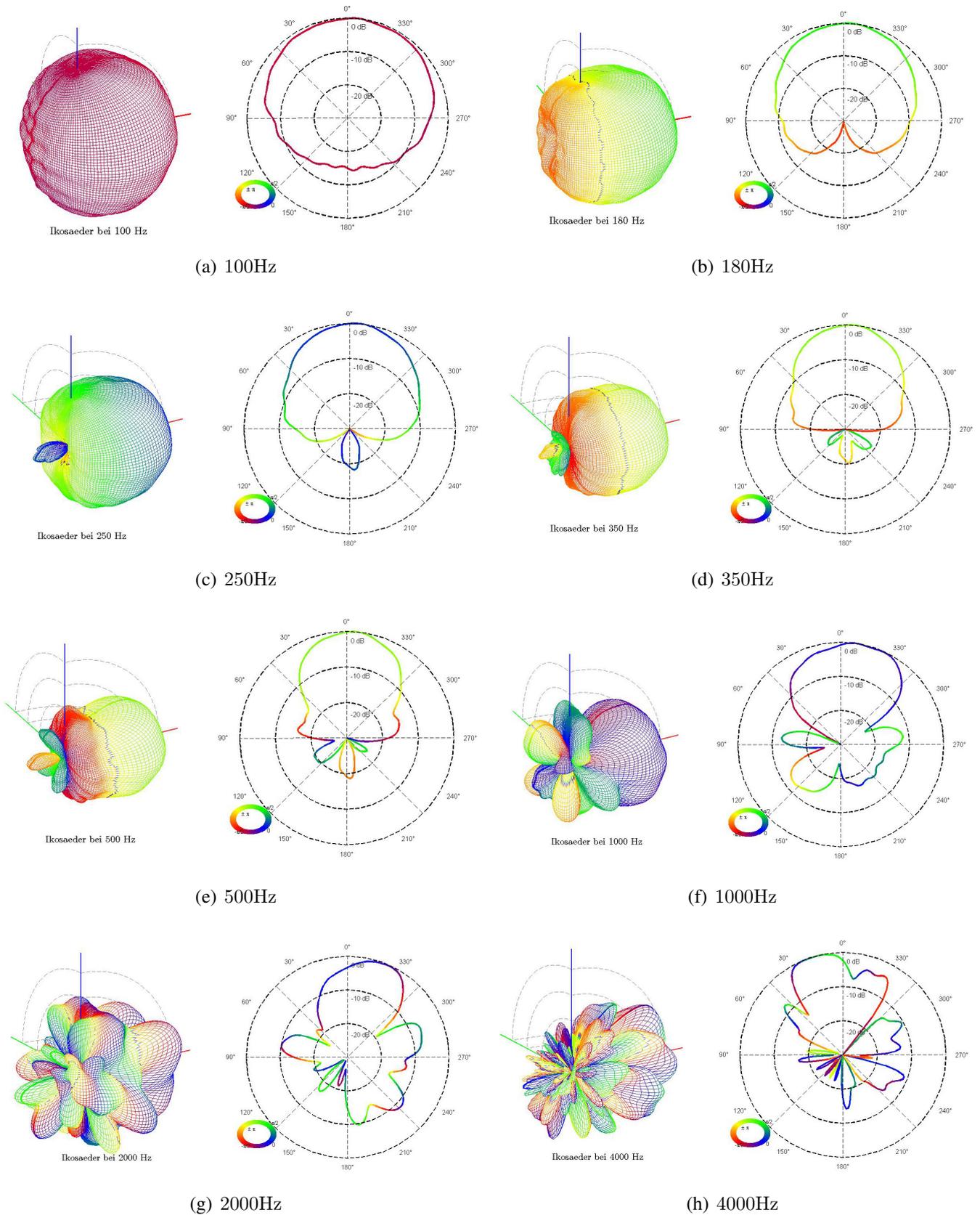


Abbildung 14 – Mit der GUI "Balloon Holo"geplottetes Ergebnis der akustischen Messung des Icosaeders in acht charakterisierenden Frequenzschritten

5 Tetraederlautsprecher von Ritsch

Neben den Vermessungen am Ikosaeder wurde auch ein Prototyp von Winfried Ritschs Tetraeder vermessen. Die technischen Aufbauten für diese Messungen waren ident zu den bisher beschriebenen. Es wurde sowohl eine Laser-Vibrometer-Messung als auch eine akustische Messung durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen haben zwei Besonderheiten ergeben. Erstens sind drei der Lautsprecher im Tetraeder verpolt angeschlossen, was aus der Impulsantwort der Lautsprecher ersichtlich ist. Zweitens konnten deutlich stärkere harmonische Verzerrungen (siehe Abb.15) als beim Ikosaeder festgestellt werden. Dieser Umstand ist sowohl für die Klangqualität als auch für die Lokalisation problematisch. Zeit für einen Filterentwurf und Probehören mit Ansteuerung blieb leider keine mehr innerhalb des Labors.

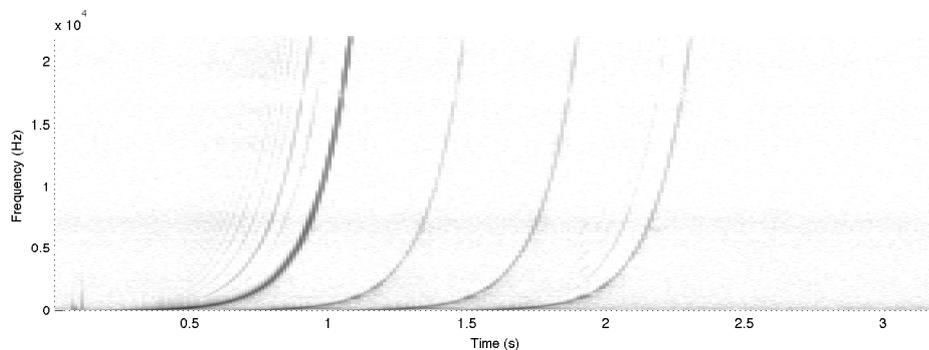


Abbildung 15 – Sweepantwort der einzelnen Membranen. Die Schnelle der Membran 1 wird mit LDV gemessen, alle Membran werden nacheinander gesteuert.

6 Testhoeren des neuen Ikosaeders im *IEM-CUBE*

Am letzten Labortag, haben wir die Gelegenheit gehabt, Stücke für den Ikosaederlautsprecher von Gerriet K. Sharma zu hören. Die Ansteuerungsmatrix der Lautsprecher basiert auf unseren Messungen und wurde von Franz Zotter und Markus Zaunschirm entworfen [ZZFK16].

7 Schlussfolgerung

Innerhalb dieser Labor-Übung haben wir zwei verschiedene Dekodierverfahren (Direktdekodierung und AllRAD) für die Lautsprecheranordnung vom *IEM-CUBE* entworfen und sowohl analytisch (grafisch) als auch empirisch verglichen. Wie zu erwarten hat sich der AllRAD in unserem Fall als der bessere Dekoder hinsichtlich der Verteilung der Lautstärke, der Winkelaufweitung und des Winkelfehlers erwiesen.

Neben diesen Dekodierverfahren wurden auch Enkodierverfahren anhand von Mikrofonarrays behandelt. Im Speziellen wurden Radialfilter für das Eigenmike entworfen. Außerdem

wurde die Richtungskonvention des Oktava A-Formatmikrofons für die Allgemeingültigkeit von zugehörigen Enkodierern besprochen und implementiert.

Der Hauptteil des Labors bestand in der Vermessung des neuen Ikosaeder Lautsprechers und des Tetrader Lautsprechers von Winfried Ritsch. Im Zuge der Laservibrometermessungen beziehungsweise der akustischen Messungen gelang es uns die Frequenzgänge und die Abstandsklassen der beiden Lautsprecherarrays zu ermitteln und in weiterer Folge das MIMO-System zu analysieren. Im Laborprotokoll ist außerdem theoretisch hergeleitet, wie eine Ansteuerungsmatrix für einen Ikosaeder Lautsprecher entworfen werden könnte, um Keulen mit $\max-r_E$ Charakteristik zu formen. Verglichen mit dem Ikosaeder Lautsprecher der 1. Generation wird aufgrund des kleineren Gehäuses eine Verschiebung der unteren Grenzfrequenz im gemessenen Frequenzgang sichtbar. Positiv fiel der im höheren Frequenzbereich linearere Frequenzgang auf, sowie eine bessere Steuerbarkeit der Richtcharakteristik.

Als Abschluss wurde der neue Ikosaeder Lautsprecher im IEM-CUBE testgehört.

Literatur

- [CG77] P. Craven and M. Gerzon, "Coincident microphone simulation covering three dimensional space and yielding various directional outputs," Aug. 16 1977, uS Patent 4,042,779. [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US4042779>
- [Dan01] J. Daniel, "Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia," Ph.D. dissertation, Université Paris 6, July 2001.
- [Fra14] M. Frank, "How to make ambisonic sound good," *Proceedings of Forum Acusticum (Forum Acusticum)*, no. 10, p. 807, October 2014.
- [Ker10] M. Kerscher, "Compact spherical loudspeaker array for variable sound-radiation," Master's thesis, Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2010.
- [Kro14] M. Kronlachner. (2014, Dec.) mcfx v0.5.1 - multichannel audio plug-in suite. [Online]. Available: <http://www.matthiaskronlachner.com/?p=1910>
- [L3] S. Lösler, "Schallfeldspezifische Entzerrung bei Radialfiltern begrenzter Dynamik für das Eigenmike," Master's thesis, Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2013.
- [LZ15] S. Lösler and F. Zotter, "Comprehensive radial filter design for practical higher-order ambisonic recording," in *DAGA*, 2015.
- [Pul97] V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning," *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 45, no. 6, 1997.
- [Wil99] E. G. Williams, *Fourier Acoustics*. Academic Press, 1999.
- [ZF12] F. Zotter and M. Frank, "All-round ambisonic panning and decoding," *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 60, no. 10, p. 807, October 2012.
- [Zot09] F. Zotter, "Analysis and synthesis of sound-radiation with spherical arrays," Ph.D. dissertation, Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2009.
- [Zot10] ———, "Laborunterlagen Akustische Messtechnik 2, lu, s2010," Ausgabe 2010.
- [ZZFK16] F. Zotter, M. Zaunschirm, M. Frank, and M. Kronlachner, "Beamforming and exciting wall reflections – the icosahedral loudspeaker," 2016.