Darstellung und praktische Untersuchung eines HOA-Mikrofonarrays mit 8 Kapseln

Johann-Markus Batke[1], Thomas Görne[2]

[1] *Hochschule Emden/Leer, Constantiaplatz 4, 26723 Emden, Email: johann-markus.batke@hs-emden-leer.de*

[2] *HAW Hamburg, Finkenau 35, 22081 Hamburg, Email: thomas.goerne@haw-hamburg.de*

Einleitung

Higher Order Ambisonics (HOA) ist als 3D-Schallfelddarstellung für die Tonwiedergabe in VR-Umgebungen oder bei 360°-Videodarstellungen sehr geeignet. Bei der Aufnahme natürlicher Schallfelder können sphärische Mikrofonarrays eingesetzt werden. Die erreichte Ordnung der HOA-Schallfelddarstellung und damit die erzielbare räumliche Auflösung der Tonwiedergabe gehen einher mit dem aufzubringenden technischen Aufwand. So lässt sich mit 4 Mikrofonkapseln eine HOA-Darstellung 1. Ordnung aufzeichnen, während die 2. Ordnung bereits 9 Kapseln verlangt.

Auf dem Markt angebotene Arrays mit 8 Kapseln stellen damit ein überbestimmtes Mikrofonarray für HOA-Signale 1. Ordnung dar, werden aber auch als Quelle für HOA-Signale 2. Ordnung beworben. Dies ist über die Beschränkung auf eine 2D-Schallfelddarstellung möglich bzw. die Inkaufnahme von räumlichen Darstellungsfehlern. Der vorliegende Beitrag fasst die theoretischen Möglichkeiten eines 8-Kapsel-Arrays zusammen und untersucht die in der Anwendung wahrnehmbaren räumlichen Darstellungsfehler.

Higher Order Ambisonics

Die Darstellung der Mathematik zu Higher Order Ambisonics (HOA) soll hier nicht erfolgen. Ausführliche Darstellungen finden sich in Zotter und Frank [8] oder Williams [7]. HOA beschreibt ein Schallfeld $p(r, \theta, \phi, k)$ als Reihenentwicklung

$$p(r, \theta, \phi, k) = \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=-n}^{n} A_n^m(k) j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi), \quad (1)$$

wobei die Koeffizienten $A_n^m(k)$ das Schallfeld beschreiben und N die Ordnung bezeichnet. Diese Koeffizienten können durch ein Mikrofonarray ermittelt werden.

Mikrofonarrays

Das Soundfield-Mikrofon wurde 1975 patentiert und dient bis heute als Muster für Mikrofonarrays zur Aufzeichnung von HOA-Signalen [4]. Als Mikrofonarray mit $L = 4$ Mikrofonkapseln ist es auf HOA-Signale mit Ordnung $N = 1$ beschränkt, es gilt für den 3D-Fall der Zusammenhang $L = (N + 1)^2$.

HOA-Koeffizienten 1. Ordnung bei Mikrofonarrays wie dem Soundfield-Mikrofon sind bereits bei 8 kHz gestört, im wesentlich in Form von Kugelflächenfunktionen der nächsthöheren, also 2. Ordnung. Abbildung 1 verdeutlicht den Zusammenhang am Beispiel einer Simulation des Soundfieldmikrofons.

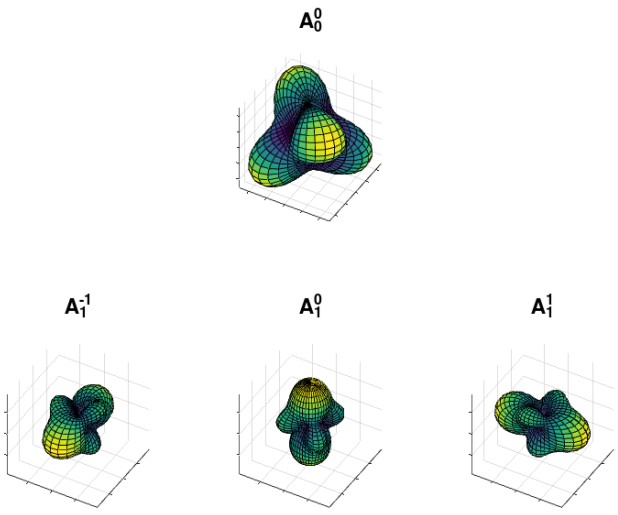

Abbildung 1: Die HOA-Koeffizienten für das Soundfield-Mikrofon. Die Störungen der Dipolcharakteristik machen sich bei der dargestellten Frequenz von 8 kHz in Form von Quadrupolen bemerkbar.

Um eine bessere Qualität zu erlangen, ist ein praktischer Weg der Entwurf von mathmatisch überbestimmten Mikrofonen, es stehen zur Abtastung des Schallfells mehr Mikrofonkapseln als rechnerisch benötigt zur Verfügung [2]. Ein Entwurf mit $L = 8$ Kapseln wird von Benjamin [3] vorgestellt (vgl. Abbildung 2). Die Untersuchung dieses 8-Kapsel-Arrays erfolgt in 2D, d.h. die Polargramme der Transversalebene des Mikrofons werden untersucht. Für den 2D-Fall sind rechnerisch $L = 2N + 1$ Kapseln notwendig, für Ordnung $N = 2$ stellen $L = 8$ Kapseln bereits den mathematisch überbestimmten Fall dar. Die in Benjamin [3] vorgestellten Simulationen zeigen, dass sich wesentlich bessere Ergebnisse für die Polardigramme der HOA-Koeffizienten 1. Ordnung erzielen lassen.

Abbildung 2: Ein auf dem Markt erhältliches Mikrofonarray, dass die Kapselanordnung nach Benjamin [3] umsetzt.

In diesem Beitrag soll ergänzend betrachtet werden, wie sich die Ergebnisse für den 3D-Fall ausnehmen. Dazu wurde ein kommerziell erhältliches Mikrofonarray, dass den Entwurf aus [3] umsetzt, mechanisch vermessen und die gewonnenen Dimensionen für einen Simulation der HOA-Richtcharakteristik verwendet. Die Simulationen wurden mit der Matlab/Octave-Toolbox "booast"durchgeführt [1].

Eine weitere Umsetzung stellt das frei verfügbare Opensource-Projekt "*SpHEAR"dar [5, 6]. Im Rahmen dieses Projekt wird ausführlich auf akustische Messungen eingegangen, wieder erfolgt die Darstellung jedoch in 2D.

Ergebnisse

Die HOA-Koeffizienten für eine auf der Hauptachse einfallenden ebenen Welle über die Frequenz dargestellt finden sich in Abbildung 3. Grau unterlegte Bezeichner am unteren Rand des Diagramms markieren Koeffizienten, die verschwinden. Die gestrichelten Linien stellen die theoretisch zu erwartenden HOA-Koeffizienten dar. Auffällig ist die Komponente A_2^0, die aufgrund der unterbestimmten Schallfeldberechnung nicht korrekt berechnet werden kann.

Abbildung 4 zeigt die räumliche Darstellung der HOA-Koeffizienten des untersuchten kommerziellen 8-Kapsel-Arrays. Die bei 8 kHz auftretenden Störungen der Dipolcharakteristik wie in Abbildung 1 gezeigt sind verschwunden. Die höchste Güte der wird in der xy-Ebene erreicht, wie es in der Literatur zu diesem Arraytyp darstellt wird. Für die Dipole A_1^{-1}, A_1^0 und A_1^1 sind leichte Deformationen erkennbar. Auch die Quadrupole A_2^m zeigen nur leichte Abweichungen von der idealen Form; Ausnahme ist der Koeffizient A_2^0, das sehr große Abweichungen zeigt (für die Idealform vgl. [7]).

Für den praktischen Einsatz des untersuchten 8-Kapsel-Arrays bedeutet dies die uneingeschränkte Verwendbarkeit für HOA-Signale der Ordnung $N = 1$. Die räumlichen Abbildungsfehler für die 3D-Information der Ordnung $N = 2$ haben sich in praktischen Versuchen als wenig relevant erwiesen. An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen der darzustellenden Audioszene und des verwendeten Wiedergabesystems notwendig.

Literatur

[1] Johann-Markus Batke. *Bad Object Oriented Acoustics Simulation Toolbox*. 2018. URL: `https://github.com/badkey/booast`.

[2] Johann-Markus Batke und Hans-Hermann Hake. „Design Aspects for an improved B-Format Microphone“. In: *Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Glasgow, Scotland, 2009. URL: `https://doi.org/10.5281/zenodo.41441`.

[3] Eric Benjamin. „A second-order soundfield microphone with improved polar pattern shape“. Convention Paper 8728. In: *Presented at the 133rd Convention* (San Francisco). Audio Engineering Society. 2012.

[4] Peter G. Craven und Michael A. Gerzon. „Coincident Microphone Simulation Covering Three Dimensional Space and Yielding Various Directional Outputs“. US 4042779. 1975.

[5] Fernando Lopez-Lezcano. „The *SpHEAR project, a family of parametric 3D printed soundfield microphone arrays“. Conference Paper. In: *Presented at the Conference on Sound Field Control* (Guildford, UK). Audio Engineering Society. 2016.

[6] Fernando Lopez-Lezcano. „The SpHEAR project update: Refining the OctaSpHEAR, a 2nd order ambisonics microphone“. In: *EAA Spatial Audio Signal Proceessing Symposium*. Paris, France, Sep. 2019, S. 103–108.

[7] Earl G. Williams. *Fourier Acoustics*. Bd. 93. Applied Mathematical Sciences. Academic Press, 1999.

[8] Franz Zotter und Matthias Frank. *Ambisonics. A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*. Springer Open, 2019.

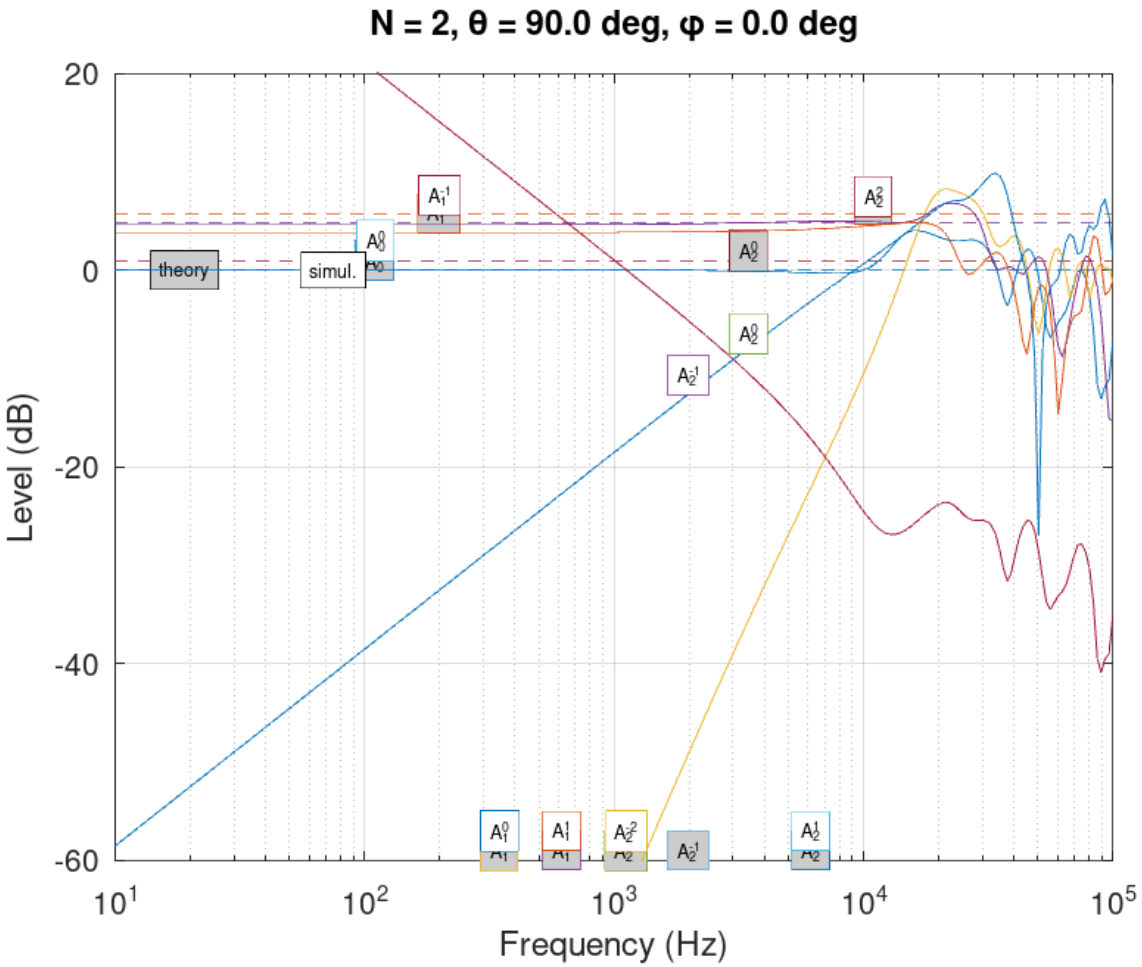

Abbildung 3: Die HOA-Koeffizienten einer ebenen Welle simuliert für ein 8-Kapsel-Array, die Einfallsrichtung ist die Hauptachse des Mikrofons. Die gestrichelten Linien stellen die theoretisch zu erwartenden HOA-Koeffizienten dar. Grau unterlegte Bezeichner am unteren Rand des Diagramms markieren Koeffizienten, die verschwinden. Auffällig ist die Komponente A_2^0, die aufgrund der unterbestimmten Schallfeldabtastung nicht korrekt berechnet werden kann. Ebenfalls starke Fehler tragen A_2^{-1} und A_2^{-2} bei.

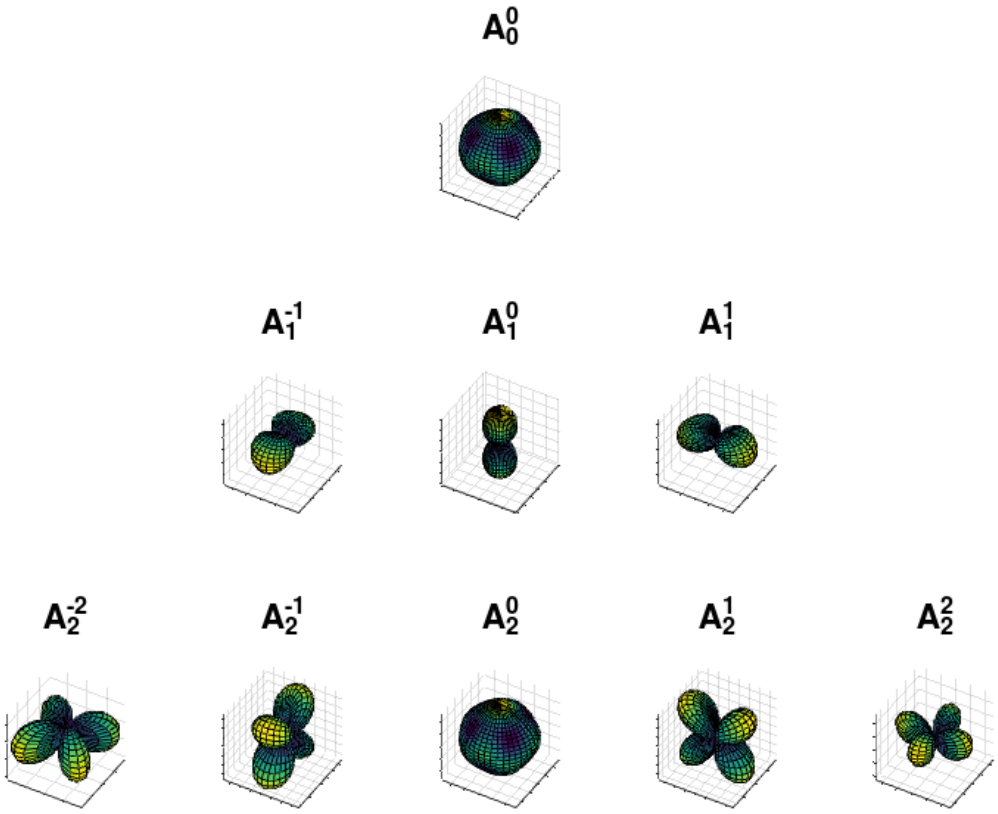

Abbildung 4: Die HOA-Koeffizienten aus der Simulation des untersuchten kommerziellen 8-Kapsel-Arrays. Die bei 8 kHz auftretenden Störungen der Dipolcharakteristik aus Abbildung 1 sind verschwunden. Die höchste Güte wird in der xy-Ebene erreicht, jedoch sind die 3D-Eigenschaften der Richtdiagramme akzeptabel. Einzig der Koeffizient A_2^0 zeigt unbrauchbare Ergebnisse.