Entwurf eines Entzerrungsfilters für das Oktava 4-D Ambisonics Mikrofon

Marco Amelung, Marcel Schillinsky, Johann-Markus Batke
Hochschule Emden-Leer, 26723 Emden, E-Mail: mamelu@technik-emden.de, mschil@technik-emden.de, johann-markus.batke@hs-emden-leer.de

Einleitung

Für die 3-dimensionale Aufzeichnung eines Schallfeldes können Mikrofonarrays in Tetraeder-Bauweise verwendet werden, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist.

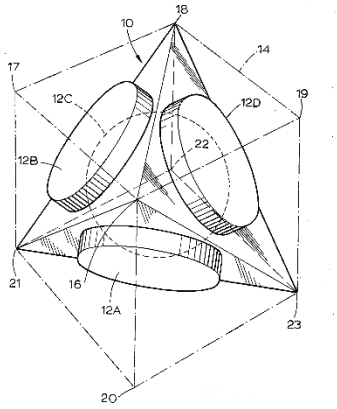

Abbildung 1 - Geometrie eines Mikrofonarrays mit vier Kapseln in Tetraederbauweise [4]

Diese Mikrofonkapselanordnung ermöglicht die Berechnung der Schallfelddarstellung auf Basis von Higher-Order-Ambisonics-Koeffizienten 1. Ordnung. Man erhält die Koeffizienten, indem man die vier Kapselsignale matriziert und anschließend zur Kompensation der Arrayantwort filtert. Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild dieser berechnungsschritte; für den Fall der 1. Ordnung lassen sich den Koeffizienten die Schallfeldgrößen Druck und Schnelle zuordnen, das Signal W entspricht dem Druck, die Signale X, Y und Z der Schnelle. Diese Signale bilden das sogenannte B-Format.

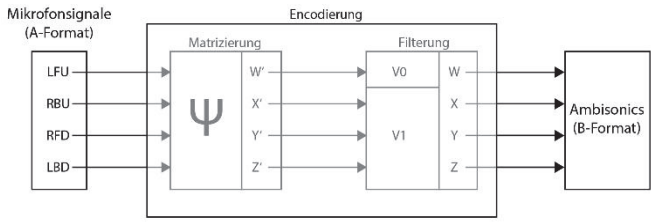

Abbildung 2 - Blockschaltbild, Berechnung des Ambisonics B-Format durch Matrizierung und Filterung von Mikrofonsignalen eines Tetraedermikrofons

Der Schalldruckanteil des B-Format-Signals wird räumlich omnidirektional vom Mikrofonarray aufgezeichnet, die Schnellesignale werden räumlich mit Dipolcharakteristik in allen drei kartesischen Hauptachsen erfasst; in Ambisonics-Terminologie entspricht dies der Kugelflächenfunktion 0. Ordnung für den Druck und Kugelflächenfunktionen 1. Ordnung für die Schnelleanteile.

In der Literatur wird die in Gleichung (1) angegebene Modenmatrix für das Soundfield Mikrofon definiert [1]. Mit dieser Matrix werden aus den Kapselsignalen [LFU, RFD, LBD, RBU] die vier Koeffizienten [W', Y', Z', X'] in Reihenfolge der zugehörigen Kugelflächenfunktionen berechnet.

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Werte der Modenmatrix ergeben sich aus der Geometrie der Kapselanordnung. Abbildung 3 zeigt den Frequenzgang der Arrayantwort der Zwischensignale W‘ und X‘, Y‘ und Z‘. Man erkennt einen Abfall in den hohen Frequenzen ab ca. 10000 Hz. Für eine lineare Darstellung des Schallfelds im B-Format müssen die matrizierten Signale W‘, X‘, Y‘ und Z‘ daher entzerrt werden.

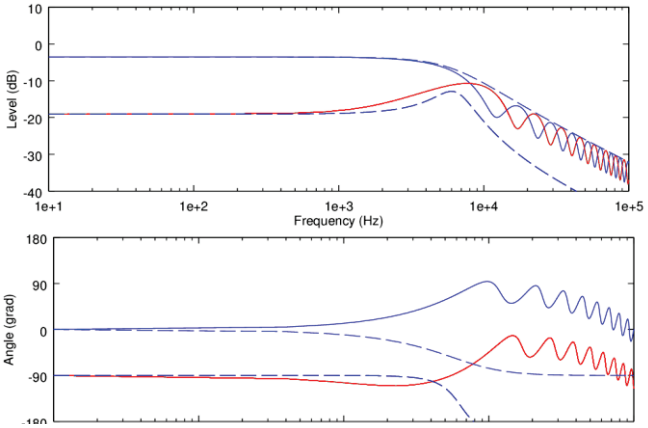

Abbildung 3 - Frequenzgang des Soundfield Mikrofons [1]

Die Frequenzgänge sind abhängig vom Radius des Mikrofonarrays (Abstand der Mikrofonkapseln zum Mikrofonmittelpunkt) und der Nierencharakteristik der Kapseln. Die Kapseln des Soundfield-Mikrofonarray haben die Charakteristik breiter Nieren mit einem Verhältnis Druck zu Schnelle von $\alpha = {}^{2}/_{3}$.

Im Laufe der Jahre wurde das Soundfield Mikrofon, welches das erste kommerziell verfügbare Tetraeder-Mikrofonarray gilt, vielfach imitiert, bzw. nachempfunden. So kann das in diesem Artikel untersuchte Oktava MK-4012 als verwandt mit dem Soundfield Mikrofon betrachtet werden, was den Vergleich der Eigenschaften dieser beiden Mikrofone nahelegt. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der beiden Mikrofonarrays ist der deutlich geringere Anschaffungspreis des MK-4012.

Problemstellung

Zuerst wurde das Oktava-Mikrofonarray auf seine Geometrie untersucht. In Abbildung 4 ist dargestellt, dass die Kapselanordnung teils deutlich von einer idealen Tetraederform abweicht.

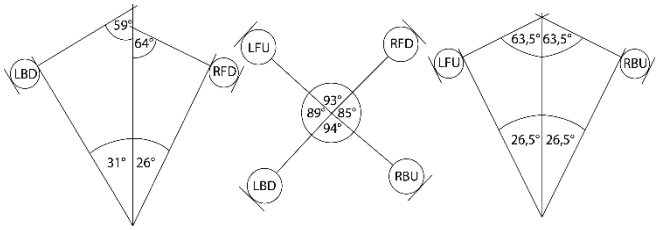

Abbildung 4 - Geometrischer Aufbau der Mikrofonkapseln des Oktava MK-4012

Bei Verwendung der Soundfield-Modenmatrix kommt es daher zu Fehlern bei der Berechnung der B-Format-Koeffizienten. Außerdem ergibt die Vermessung des MK-4012 einen größeren Radius verglichen mit dem Soundfield Mikrofon; ebenso ist die Richtcharakteristik der Mikrofonkapseln mit reiner Nierencharakteristik (Druck zu Schnelle Verhaltnis 0,5) deutlich anders. Somit ändern sich die Frequenzgänge der Array-Antwort und die damit benötigten Entzerrungsfilter.

Das Ziel dieses Beitrags ist der Entwurf einer angepassten Modenmatrix und der Entzerrungsfilter für das Oktava-Mikrofonarray.

Methodik

Auf Basis der Daten der geometrischen Untersuchung wird eine auf das Oktava-Mikrofonarray angepasste Modenmatrix entworfen.

Um zu überprüfen, ob eine neuberechnete Matrix die Darstellung der Kugelflächenfunktionen 0. und 1. Ordnung durch das Mikrofonarray verbessert, wurde das Mikrofonarray akustisch untersucht. Dafür wurde das MK-4012 wie in Abbildung 5 in einem schallarmen Raum auf einem Drehteller angebracht und in 5° Schritten von -45° bis 135° auf dem Azimuth gedreht; über den Lautsprecher wurde weißes Rauschen zur breitbandigen Untersuchung des Mikrofonarrays erzeugt. Zusätzlich wurde ein Messmikrofon verwendet, um die Entzerrung des Lautsprechers zu ermöglichen.

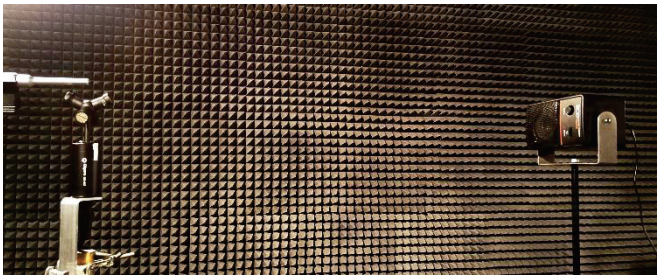

Abbildung 5 - Messaufbau im schallarmen Raum, um die B-Format-Anteile im Bereich zwischen -45° und 135° zu untersuchen

Die Messung wurde jeweils aus 1, 3 und 5 Metern Entfernung durchgeführt.

Die Umsetzung der Gewichte in den Modenmatrizen erfolgt per Routing in der Digital Audio Workstation (DAW) Reaper [2]. Die Audiospuren der einzelnen Mikrofonkapseln werden mit Pegelanpassung für abweichende Werte von 1 und Vorzeichenumkehr (inv. Phase) für negative Werte in vier weitere Spuren W‘, X‘, Y‘ und Z‘ geroutet. In Abbildung 6 ist beispielhaft das Routing für den Kanal X‘ und die angepasste Modenmatrix dargestellt.

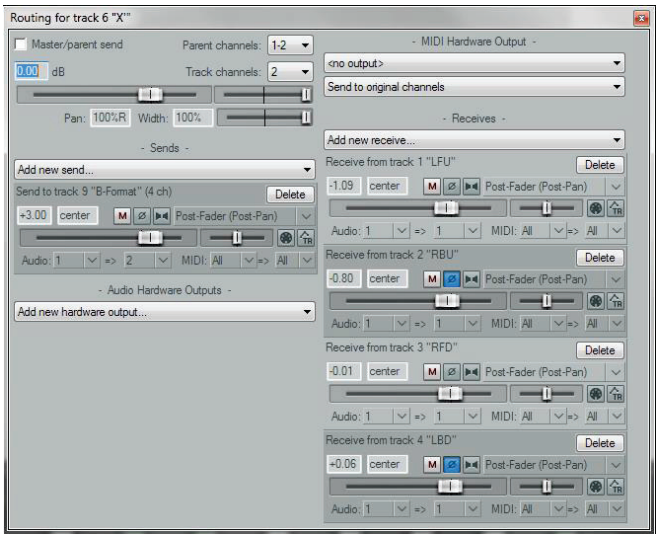

Abbildung 6 - Umsetzung der angepassten Modenmatrix per Routing in der DAW Reaper für den Kanal X'

Die Entzerrungsfilter werden nach [1] mit Formel (2) des Soundfield-Entzerrungsfilters berechnet. Die Konstanten wurden dabei auf das MK-4012 angepasst.

$$V_{n,\alpha}(kr) = \frac{1}{\alpha j_n(kr) - i(1-\alpha) j'_n(kr)} \qquad (2)$$

$n = \ Ordnung\ der\ Filter$

$\alpha = 0.5\ Gewichtung\ der\ Nierenkapseln$

$r = 0.0541m\ Radius\ des\ MK-4012$

Die im Frequenzbereich entworfene Filterfunktion wurde anschließend in den Zeitbereich transformiert und als Wavedatei abgespeichert, um mit dieser Impulsantwort in Reaper in einem Faltungsplugin die matrizierten Signale zu filtern [3].

Ergebnisse

Gleichung (2) zeigt die für das Oktava MK-4012 optimierte Modenmatrix.

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{pmatrix} 1.00000 & 1.00000 & 1.00000 & 1.00000 \\ 1.05751 & -1.19255 & 1.10332 & -1.09607 \\ 0.77284 & -0.75928 & -0.89207 & 0.77284 \\ 1.13365 & 1.00066 & -0.99343 & -1.09607 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Ein Vergleich der Polardiagramme des Schalldrucksignals W‘, jeweils berechnet mit der Ambisonics- und der optimierten Modenmatrix, ist in Abbildung 7 dargestellt.

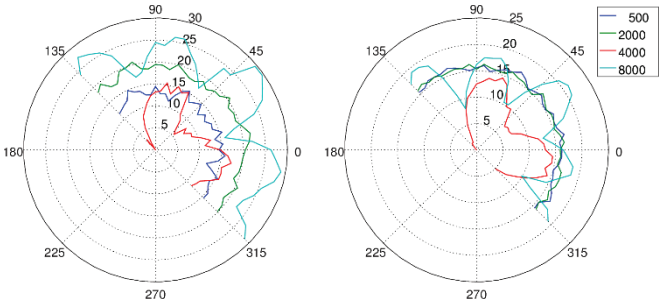

Abbildung 7- Vergleich der Soundfield Modenmatrix (links) und der optimierten Modenmatrix (rechts) am Beispiel des ungefilterten Schalldrucksignals W'

Hier zeigt sich, dass die optimale Kugelform durch die angepasste Modenmatrix besser angenähert wird und gleichzeitig die Pegelunterschiede zwischen den unterschiedlichen Frequenzen minimiert werden.

Konsistenz in den Ergebnissen zeigt sich im unteren bis mittleren Frequenzbereich bis 2000 Hz. Abweichungen von den Kugelflächenfunktionen treten jedoch bereits ab 4000 Hz auf.

Für die Schallschnellesignale X‘ und Y‘ kann, wie in Abbildung 8 dargestellt, ein ähnliches Ergebnis erzielt werden.

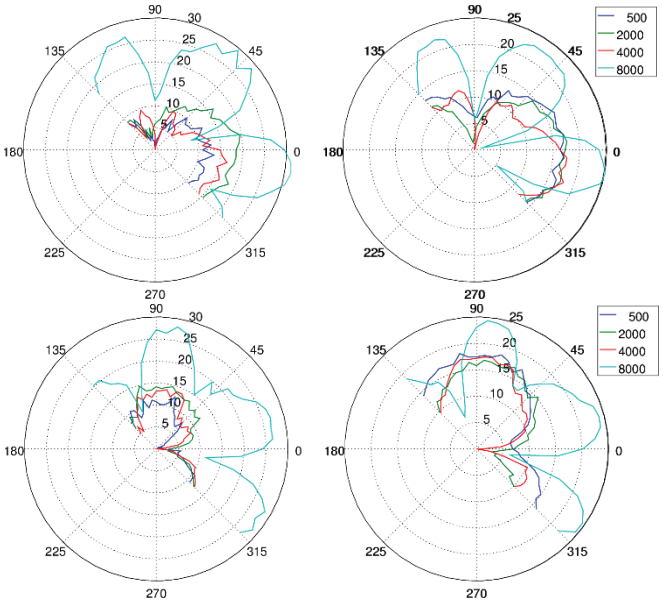

Abbildung 8 - Vergleich der Soundfield Modenmatrix (links) und der optimierten Modenmatrix (rechts) am Beispiel der ungefilterten Schallschnellesignale X' (oben) und Y' (unten)

Auch hier lässt sich eine verbesserte Annäherung an die optimale Achter-Charakteristik in die jeweilige Raumrichtung durch Nutzung der optimierten Modenmatrix erkennen. Ebenso werden die Pegelunterschiede zwischen den Frequenzen eingeschränkt und eine erhöhte Konsistenz bis 4000 Hz erzielt.

Auffällig sind die Störungen durch Kugelflächenfunktionen höherer Ordnung im Frequenzbereich ab 8000 Hz.

In Abbildung 9 ist der angepasste Frequenzgang zu sehen. Aus diesem Frequenzgang resultieren die Entzerrfilter für das Oktava MK-4012.

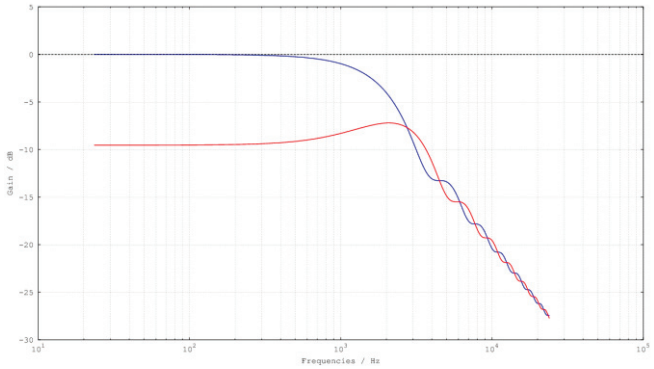

Abbildung 9 - Berechneter Frequenzgang der Ambisonics-Koeffizienten 0. Ordnung W' (blau) und 1. Ordnung X', Y', Z' (rot)

Verglichen mit dem Frequenzgang des Soundfield Mikrofons, ist der Abfall der hohen Frequenzen schon früher, ab ca. 8000 Hz, zu erkennen. Das resultiert vor allem aus dem ca. 3,6 mal größeren Radius des MK-4012.

Fazit

An den Ergebnissen kann man erkennen, dass die optimierte Modenmatrix die Approximation der Kugelflächenfunktionen verbessert. Allerdings würde man mit optimierten Voraussetzungen für die akustischen Messungen genauere Ergebnisse erzielen, um die Funktionalität der Matrix noch besser bewerten zu können. Ebenso könnte man das Mikrofonarray noch genauer geometrisch messen, um die Matrix weiter anzupassen.

Die Filterfunktion wurde bei der Messung der Richtdiagramme nicht verwendet. Man erkennt aber leicht, dass das Oktava-Mikrofonarray bedingt durch seine Größe höhere Pegelabfälle in den hohen Frequenzen aufweist.

Eine Anpassung der Matrix und der Filter bzgl. Der technischen Daten dieses Arrays ist daher besonders wichtig. Matrix und Filterterme für das Soundfield Mikrofon sind ungeeignet, bzw. nach Genauigkeit der geometrischen Ausführung bedingt geeignet für das MK-4012.

Literatur

[1] Batke, J.-M.: The B-Format Microphone Revised (2009), *Ambisonics Symposium,* Graz
[2] REAPER | Audio Production Wihtout Limits, URL: http://www.reaper.fm/
[3] Matthias Kronlachner Plug-Ins, URL: http://www.matthiaskronlachner.com/?p=1910
[4] Craven and Gerzon: US Patent 4042779 A, 1975