

Seminararbeit

**Distanzkodierung**  
in Ambisonics höherer Ordnung durch  
Nahfeld - Kompensationsfilter

Georg Koller

27. November 2008, Graz

Betreuer: DI Franz Zotter

Institut für Elektronische Musik und Akustik  
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz



**UNIVERSITÄT**  
FÜR MUSIK UND  
DARSTELLENDEN KUNST  
GRAZ - AUSTRIA

## Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                       | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Ambisonicsansatz</b>                                 | <b>3</b>  |
| 2.1      | Lösung des Ambisonicsansatzes durch Variablenseparation | 4         |
| 2.1.1    | Lösung für den radialabhängigen Teil                    | 4         |
| 2.1.2    | Lösung für den winkelabhängigen Teil                    | 4         |
| 2.2      | Annahmen bei Ambisonics zur Lösung der Wellengleichung  | 5         |
| 2.2.1    | Kugelflächenfunktionen                                  | 5         |
| 2.3      | Ambisonics  | 5         |
| 2.4      | Ambisonicsansatz vs. Realität                           | 6         |
| 2.5      | HOA vs. NFC   | 6         |
| <b>3</b> | <b>Nahfeld-Kompensationsfilter</b>                      | <b>7</b>  |
| 3.1      | NFC Kodierung   | 7         |
| 3.2      | NFC Dekodierung   | 9         |
| 3.3      | NFC Filter Problem                                      | 11        |
| 3.4      | NFC Filter Lösung                                       | 12        |
| <b>4</b> | <b>Distanzfilter</b>                                    | <b>13</b> |
| 4.1      | Implementierung in Matlab                               | 14        |
| 4.2      | Implementierung in Pure Data                            | 15        |
| 4.3      | Probleme bei der Distanzkodierung                       | 16        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>6</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>                             | <b>17</b> |

## 1 Einleitung

In dieser Seminararbeit wurde ein echtzeitfähiges Binauralsystem in PD<sup>1</sup> mit Distanzcodierungsfiltren erweitert, um die hörbaren Auswirkungen zu untersuchen. Weiters wurde in Matlab ein Programm zur Visualisierung dieser Distanzfilterwirkung erstellt. Abschließend wurde in einer Präsentation der Ansatz des Nahfeld-Kompensationsfilters, sowie die durch Ihre Verwendung mögliche Distanzkodierung hergeleitet und erläutert.

Diese Seminararbeit versucht dieses komplexe Thema sowie den dafür notwendigen Ambisonicsansatz möglichst einfach zu erklären, um einen Einstieg in diese Thematik zu geben.

## 2 Ambisonicsansatz

Lösung der

- zeitinvarianten<sup>2</sup>
- verlustlosen
- homogenen<sup>3</sup>
- Helmholtz Wellengleichung
- in sphärischen Koordinaten<sup>4</sup>

$$(\Delta + k^2)p(\mathbf{r}) = 0$$

$p(\mathbf{r})$  ... Repräsentation der Schalldruckverteilung im Raum

$\Delta$  ... Laplaceoperator, Summe der zweiten Ableitungen bzgl. ebener Koordinaten

$k$  ... Wellenzahl ( $2\pi/\lambda$ )

---

<sup>1</sup> PD ... Pure Data, echtzeitfähige, graphische, "open source" Programmiersprache  
<sup>2</sup> zeitinvariant ... konstante Bedingungen im Betrachtungszeitraum  
<sup>3</sup> homogen ... quellen- und hindernisfrei und mit konstanter Schallgeschwindigkeit  
<sup>4</sup> sphärischen Koordinaten ...  $r, \vartheta, \varphi$

## 2.1 Lösung des Ambisonicsansatzes durch Variablenseparation

$$p(\mathbf{r}) = R(\mathbf{r})\Theta(\vartheta)\Phi(\varphi)$$

Die Schalldruckverteilung im Raum ( $p(\mathbf{r})$ ) wird aufgeteilt in Radius- und Winkelanteil. Diese sind jeweils nur von einer Variable ( $r, \vartheta, \varphi$ ) abhängig. Dadurch ist eine getrennte Lösung für den radial- und den winkelabhängigen Teil möglich.

### 2.1.1 Lösung für den radialabhängigen Teil

$$R(\mathbf{r}) = A_{mn}^{\sigma} j_m(kr) + C_{mn}^{\sigma} h_m(kr) \quad \begin{array}{l} m,n = 0,1,2,3... \\ \sigma = \pm 1 \end{array}$$

$A_{mn}^{\sigma}, C_{mn}^{\sigma} \dots$  Gewichtungsfaktoren

gegeben:

$j_m(kr)$  ... sphärische Besselfunktion beschreibt einlaufende Wellenfelder

$h_m(kr)$  ... sphärische Hankelfunktion beschreibt auslaufende Wellenfelder

### 2.1.2 Lösung für den winkelabhängigen Teil

$$\Theta(\vartheta)\Phi(\varphi) = Y_{mn}^{\sigma}(\mathbf{r}/r) \quad \begin{array}{l} m,n = 0,1,2,3... \\ \sigma = \pm 1 \end{array}$$

$\Theta(\vartheta)$  ... vom Azimutwinkel ( $\vartheta$ ) abhängiger Teil

$\Phi(\varphi)$  ... vom Elevationswinkel ( $\varphi$ ) abhängiger Teil

gegeben:

$Y_{mn}^{\sigma}(\mathbf{r}/r)$  ... Kugelflächenfunktion „spherical harmonics“, entspricht einem Set von orthonormalen Basisvektoren

## 2.2 Annahmen bei Ambisonics zur Lösung der Wellengleichung

- die aufgenommene Wellenfront ist eine ebene Welle
- die reproduzierte Welle eines Lautsprechers ist eine ebene Welle

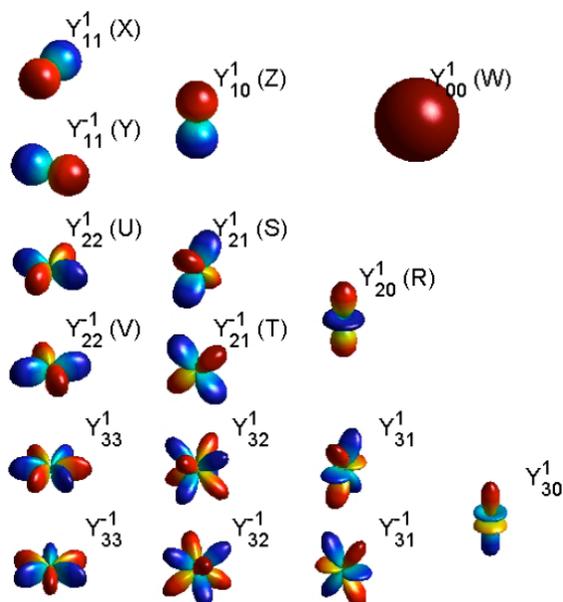
Daraus folgt  $|R(r)| = 1$ , absolut betrachtet keine radiale Abhängigkeit

$$p(\mathbf{r}) \cong Y_{mn}^\sigma(\mathbf{r}/r) \text{ Kugelflächenfunktionen}$$

### 2.2.1 Kugelflächenfunktionen

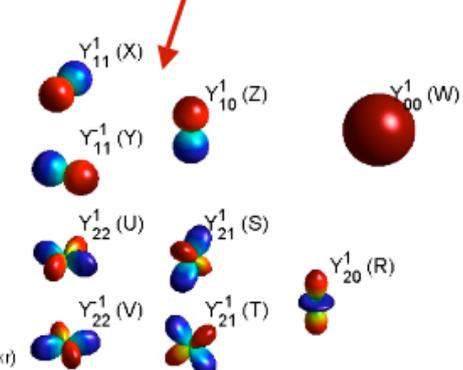
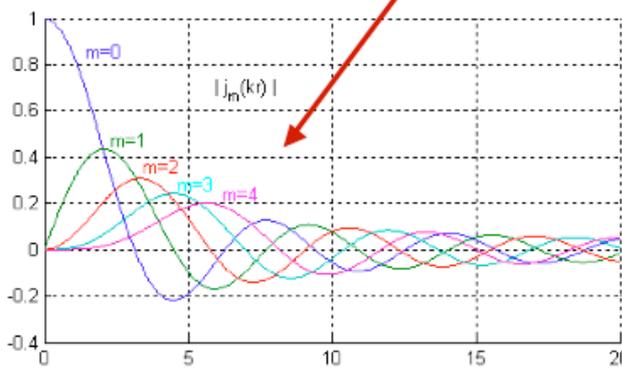
$$Y_{mn}^\sigma(\mathbf{r})$$

| M | m | $\eta$ | $Y_{m,\eta}^{+1}$                     | $Y_{m,\eta}^{-1}$                     |
|---|---|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0      | 1                                     | 0                                     |
| 1 | 1 | 0      | $\sin \theta$                         | 0                                     |
|   |   | 1      | $\cos \theta \cos \phi$               | $\cos \theta \sin \phi$               |
| 2 | 2 | 0      | $\frac{1}{2}(3\sin^2 \theta - 1)$     | 0                                     |
|   |   | 1      | $\frac{3}{2}\sin 2\theta \cos \phi$   | $\frac{3}{2}\sin 2\theta \sin \phi$   |
|   |   | 2      | $\frac{3}{2}\cos^2 \theta \cos 2\phi$ | $\frac{3}{2}\cos^2 \theta \sin 2\phi$ |



### 2.3 Ambisonics

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{m=0}^{\infty} j^m \underbrace{j_m(kr)}_{\text{Besselfunktion}} \sum_{0 \leq n \leq m, \sigma = \pm 1} \underbrace{B_{mn}^\sigma}_{\text{Ambisonic Kanäle}} \underbrace{Y_{mn}^\sigma(\varphi, \vartheta)}_{\text{Kugelflächenfunktion}}$$



## 2.4 Ambisonicsansatz vs. Realität

Bereiche mit guter Rekonstruktion: Gelb: Fehlertoleranz: 20%  
Blau: Fehlertoleranz: 50%

### Ambisonics niedriger Ordnung: oberes Bild

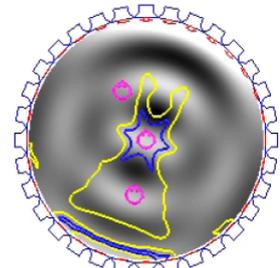
- Nur in einem sehr kleinen Sweetspot kann eine ebene Welle reproduziert werden.

### Ambisonics höherer Ordnung: unteres Bild

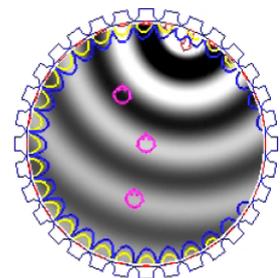
- Es kann keine ebene Welle erzeugt werden, da die Lautsprecher ein gekrümmtes Wellenfeld abstrahlen.

→ Die Lösung für dieses Problem bieten NFC Filter (Near Field Compensation Filter). Sie passen die Krümmung des Wellenfeldes an die von den Lautsprechern erzeugte an.

HOA (2nd order) f=500 Hz



HOA (15th order) f=500 Hz



## 2.5 HOA vs. NFC

(Higher Order Ambisonics vs. Near Field Compensation)

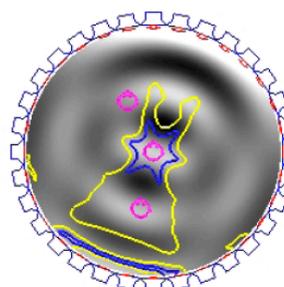
Bereiche mit guter Rekonstruktion: Gelb: Fehlertoleranz: 20%  
Blau: Fehlertoleranz: 50%

### Ambisonics niedriger Ordnung mit NFC Filter:

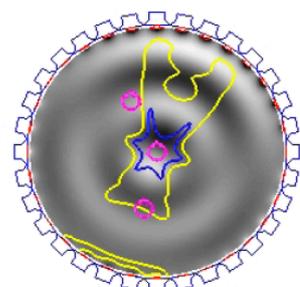
rechte Spalte, oberes Bild

- Der Sweetspot, in dem eine ebene Welle reproduziert werden kann, bleibt sehr klein.

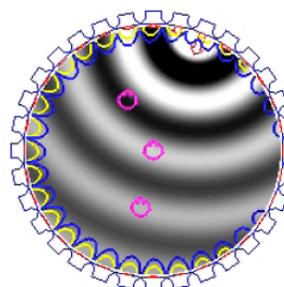
HOA (2nd order) f=500 Hz



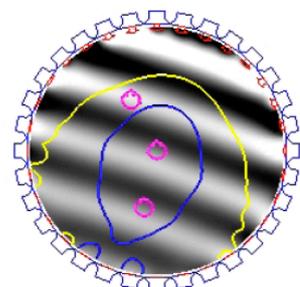
NFC-HOA (2nd order) f= 500 Hz



HOA (15th order) f=500 Hz



NFC-HOA (15th order) f= 500 Hz



### Ambisonics höherer Ordnung mit NFC Filter:

rechte Spalte, unteres Bild

- Durch den Einsatz von NFC Filter bei Ambisonics höherer Ordnung, kann in einem großen Bereich eine ebene Welle rekonstruiert werden.

**Ambisonics ohne NFC:** linke Spalte, siehe 2.4

### 3 Nahfeld-Kompensationsfilter

$$h_m^{\rho/c}(\omega) = \frac{(\omega/c) \cdot h_m(\omega \cdot \rho/c)}{j^m \cdot e^{(-j \cdot \omega \cdot \rho/c)}} = \sum_{n=0}^m \frac{(m+n)!}{(m-n)!n!} \cdot \left(\frac{-j \cdot c}{\omega \cdot \rho}\right)^n$$

$\rho$  ... Abstand der Quelle zum Mittelpunkt

$c$  ... Schallgeschwindigkeit

Der NFC Filter (Near Field Compensation Filter) beinhaltet im Gegensatz zum Abisonicsansatz eine Abhängigkeit vom Radius und beeinflusst dadurch die Krümmung des Wellenfeldes. Das bedeutet, dass die Distanz der Quelle im Gegensatz zum Ambisonicsansatz mit  $\rho$  verändert werden kann. Die benötigte NFC Filterfunktion oben entspricht i. W. der sphärischen Hankelfunktion.

#### 3.1 NFC Kodierung

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{m=0}^{\infty} j^m \underbrace{j_m(kr)}_{\text{Besselfunktion}} \sum_{\substack{0 \leq n \leq m, \sigma = \pm 1}} \underbrace{B_{mn}^{\sigma} Y_{mn}^{\sigma}(\varphi, \vartheta)}_{\text{Kugelflächenfunktion}}$$

#### Ambisonics Kodierung ohne NFC Filter

Für eine einfallende Schallwelle aus der Richtung  $\varphi_S, \vartheta_S$  gilt:

$$B_{mn}^{\sigma} = Y_{mn}^{\sigma}(\varphi_S, \vartheta_S) \cdot p_S$$

$Y_{mn}^{\sigma}(\varphi_S, \vartheta_S)$  ... Richtung des Quellsignals in Spherical Harmonics

$p_S$  ... monophones Quellsignal

Durch die begrenzte Anzahl an Übertragungskanälen kommt es zu einem Informationsverlust bei der Synthese. Die ebene Welle wird im Betrachtungspunkt nur angenähert. Die unendliche Summe wird durch einen begrenzten Vektor ersetzt.

$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S} = \mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S} \cdot p_S$$

$$\mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S} = \left[ Y_{0,0}^1(\varphi_S, \vartheta_S) \quad Y_{1,0}^1(\varphi_S, \vartheta_S) \quad \dots \quad Y_{M,M}^{-1}(\varphi_S, \vartheta_S) \right]^T$$

$\mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S}$  ... drückt eine Quellrichtung in Form von Koeffizienten im spherical Harmonics Bereich begrenzter Ordnung aus

$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S} = \left[ Y_{0,0}^1(\varphi_S, \vartheta_S) \quad Y_{1,0}^1(\varphi_S, \vartheta_S) \quad \dots \quad Y_{M,M}^{-1}(\varphi_S, \vartheta_S) \right]^T \cdot p_S$$

$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}$  ... die Beschreibung der Ambisonics Signale einer Ebenen Welle aus der Richtung  $\varphi_S, \vartheta_S$

Die Anzahl L der benötigten Übertragungskanäle für ein Ambisonics-System der Ordnung M:

$$L^{3D} = (M + 1)^2 \quad \dots \text{für den dreidimensionalen Fall}$$

$$L^{2D} = 2M + 1 \quad \dots \text{für den zweidimensionalen Fall}$$

### Ambisonics Kodierung mit NFC Filter

$$B_{mn}^\sigma = h_m^{\rho/c}(\omega) \cdot Y_{mn}^\sigma(\varphi_S, \vartheta_S) \cdot p_S$$

$$\mathbf{H}^{\rho/c}(\omega) = \begin{bmatrix} h_0^{\rho/c}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_1^{\rho/c}(\omega) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_M^{\rho/c}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}^{\rho/c} = \mathbf{H}^{\rho/c}(\omega) \cdot \mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S} \cdot p_S$$

$\rho$  ... Distanz des Quellsignals zum Zentrum

$c$  ... Schallgeschwindigkeit

### 3.2 NFC Dekodierung

Im Betrachtungspunkt soll nun das ursprüngliche Schallfeld durch das mittels Lautsprecher wiedergegebene Schallfeld resynthetisiert werden. Dafür benötigt man so genannte Abgleichbedingungen (matching conditions). Diese Abgleichbedingungen lassen sich durch folgende Gleichung darstellen:

$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S} = \mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{p}_L$$

$$\mathbf{p}_L = [p_{L1}, p_{L2}, \dots, p_{LN}]^T$$

$\mathbf{p}_L$  ... die Menge alle Lautsprechersignale auf der Wiedergabeseite zur Reproduktion des Schallfeldes des Quellsignals

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} Y_{0,0}^1(\varphi_1, \vartheta_1) & Y_{0,0}^1(\varphi_2, \vartheta_2) & \dots & Y_{0,0}^1(\varphi_N, \vartheta_N) \\ Y_{1,0}^1(\varphi_1, \vartheta_1) & Y_{1,0}^1(\varphi_2, \vartheta_2) & \dots & Y_{1,0}^1(\varphi_N, \vartheta_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{M,M}^{-1}(\varphi_1, \vartheta_1) & Y_{M,M}^{-1}(\varphi_2, \vartheta_2) & \dots & Y_{M,M}^{-1}(\varphi_N, \vartheta_N) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{Y}_L$  ... in spherical Harmonics Koeffizienten ausgedrückte Richtungsbeschreibung aller Lautsprecher

#### Ambisonics Dekodierung ohne NFC Filter

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{Y}_L^{-1} \cdot \mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}$$

Im Allgemeinen ist die Ordnung des Systems ungleich der Anzahl der Lautsprecher,  $M \neq N$ . Für eine eindeutige Abbildung muss  $N \geq L$  gelten (N...Anzahl der benötigten Lautsprecher, L ... Ambisonic-Kanäle).

Deshalb kann die Dekodiermatrix nur mit Hilfe der Pseudoinversen berechnet werden.

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{Y}_L^T \left( \mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{Y}_L^T \right)^{-1} \cdot \mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}$$

Auf der Wiedergabeseite kann das Schallfeld des „unendlich weit entfernten“ Quellsignals reproduziert werden. Unter der Annahme, dass die Lautsprecher ebene Wellen abstrahlen. Diese Annahme ist mit einem Fehler in der Krümmung des Wellenfeldes verbunden.

$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S} = \mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{p}_L$$

*Quellsignalschallfeld = Wiedergabeschallfeld*

*die Quelledistanz ist unveränderbar*

### Ambisonics Dekodierung mit NFC Filter

$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}^{R/c} = \mathbf{H}^{R/c}(\omega) \cdot \mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{p}_L$$

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{Y}_L^T \left( \mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{Y}_L^T \right)^{-1} \cdot \mathbf{H}^{R/c}(\omega)^{-1} \cdot \mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}^{R/c}$$

R ... Distanz der Lautsprecheranordnung zum Zentrum

c ... Schallgeschwindigkeit

Es wird im Gegensatz zum klassischen Ambisonicsansatz von einer punktförmigen Quellcharakteristik der im Radius R angebrachten Lautsprecher ausgegangen. Dies wird mit Hilfe der NFC Filter kompensiert, was die Abstrahlung ebener Wellen durch die Lautsprecheranordnung ermöglicht.

Auf der Wiedergabeseite kann das Schallfeld des Quellsignals reproduziert werden. Die Dekoderdistanz kann auf beliebige Wiedergabeeinrichtungen eingestellt werden.

### 3.3 NFC Filter Problem

#### Ambisonics Kodierung mit NFC Filter

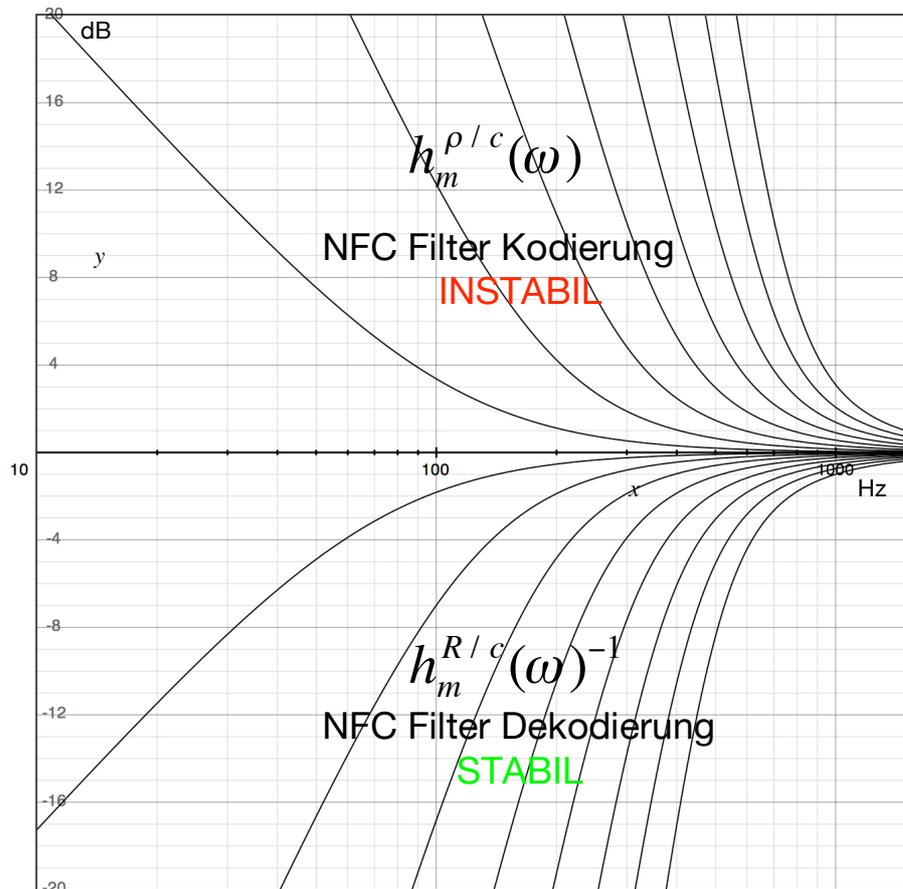
$$\mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}^{\rho/c} = \mathbf{H}^{\rho/c}(\omega) \cdot \mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S} \cdot \mathbf{p}_S$$

NFC Filter bei der Kodierung ist **INSTABIL!**

#### Ambisonics Dekodierung mit NFC Filter

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{Y}_L^T (\mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{Y}_L^T)^{-1} \cdot \mathbf{H}^{R/c}(\omega)^{-1} \cdot \mathbf{B}_{\varphi_S, \vartheta_S}^{\rho/c}$$

NFC Filter bei der Dekodierung ist **STABIL!**



$$\rho = 1\text{m}, R=1.5\text{m}, c= 340\text{ m/s}$$

### 3.4 NFC Filter Lösung

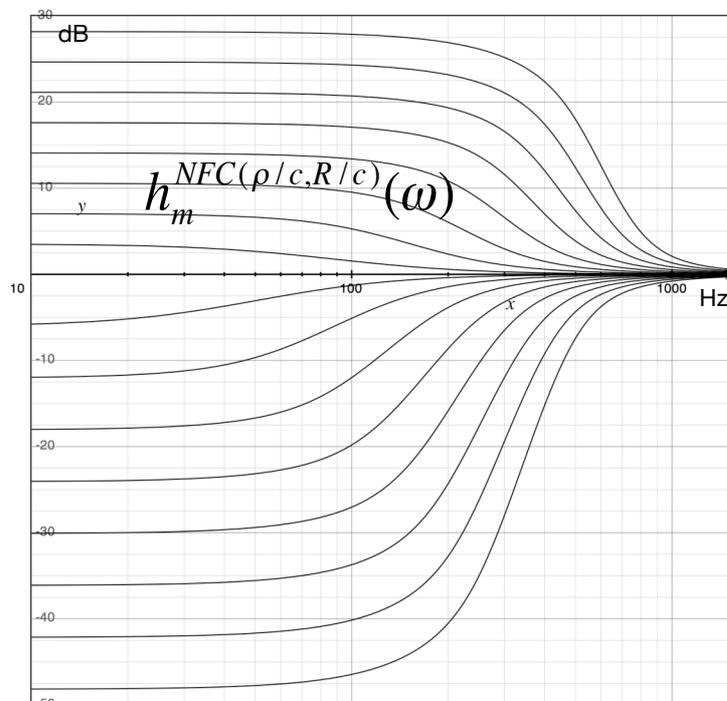
Die Lösung des NFC Filter Problems ist eine Zusammenführung des Kodierers und Dekodierers. Dadurch entsteht ein stabiler Filter.

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{Y}_L^T (\mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{Y}_L^T)^{-1} \cdot \mathbf{H}^{R/c}(\omega)^{-1} \cdot \mathbf{H}^{\rho/c}(\omega) \cdot \mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S} \cdot p_S$$

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{Y}_L^T (\mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{Y}_L^T)^{-1} \cdot \mathbf{H}^{NFC(\rho/c, R/c)}(\omega) \cdot \mathbf{Y}_{\varphi_S, \vartheta_S} \cdot p_S$$

$$h_m^{NFC(\rho/c, R/c)}(\omega) = \frac{h_m^{\rho/c}(\omega)}{h_m^{R/c}(\omega)}$$

Durch die Zusammenführung sind der Kodierer und der Dekodierer nicht mehr unabhängig von einander. Dies kann jedoch leicht durch eine Erweiterung um einen zusätzlichen NFC Filter mit  $\rho = R$  gelöst werden. Es entsteht eine Art „Shelvingfilter“.



#### Bassanhebung

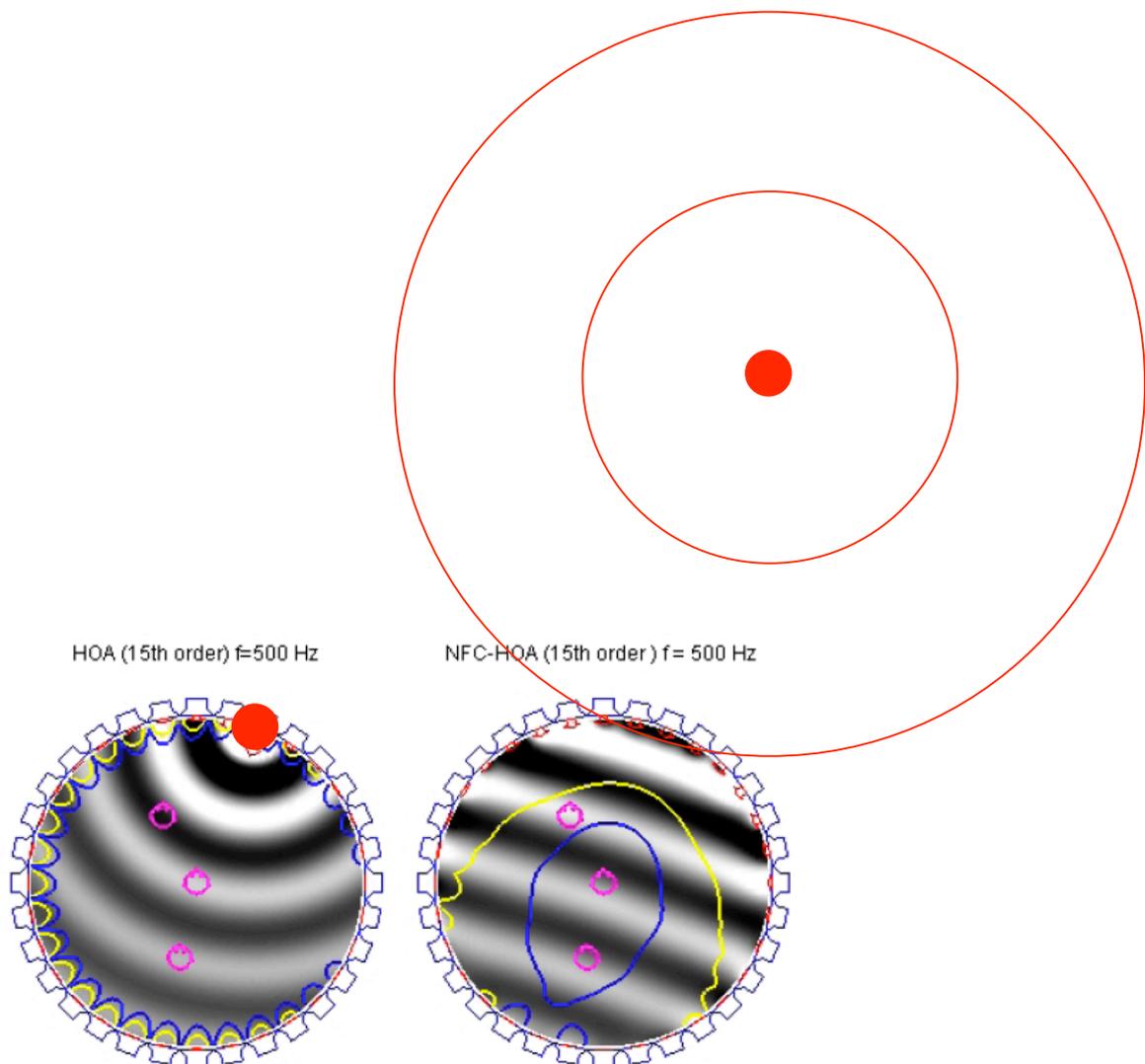
Quelle liegt innerhalb  
 $\rho = 1\text{m} < R\ 1.5\text{m}$

#### Bassabsenkung

Quelle liegt außerhalb  
 $\rho = 3\text{m} > R\ 1.5\text{m}$

## 4 Distanzfilter

Der NFC Filter kann auch als Distanzfilter gesehen werden, da mit  $\rho$  die Distanz der Quelle zum Mittelpunkt eingestellt werden kann. Dies geschieht durch Einstellung der Krümmung des Wellenfeldes, wie im folgenden Bild gezeigt wird. Die Amplitude bleibt unverändert.



## 4.1 Implementierung in Matlab

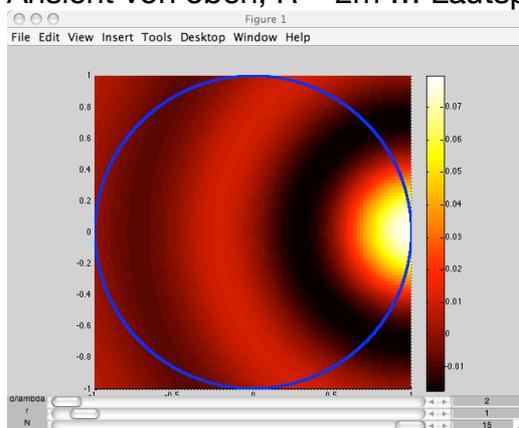
Zur Visualisierung des Einflusses des Distanzfilters auf den Realteil von  $p(\mathbf{r})$  wurde ein Matlab Programm geschrieben.

Einstellbare Parameter:

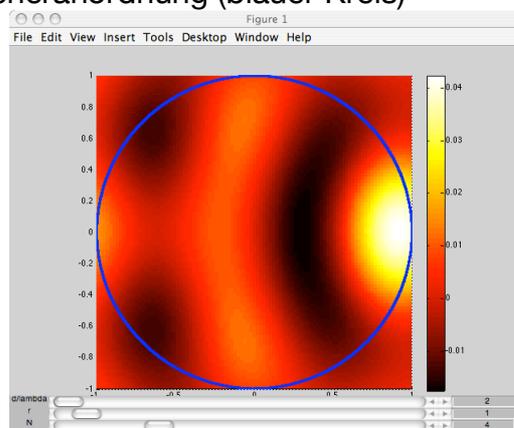
- Ordnung (N),
- Quellabstand (r),
- Anzahl der Wellenlängen ( $d/\lambda$ ) innerhalb von R

Die anschließenden Abbildungen zeigen den Realteil von  $p(\mathbf{r})$ .

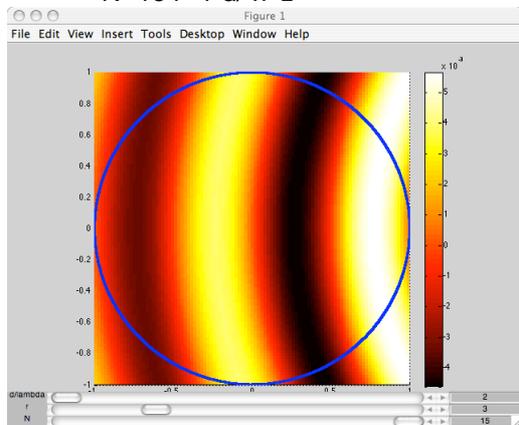
Ansicht von oben,  $R = 2\text{m}$  ... Lautsprecheranordnung (blauer Kreis)



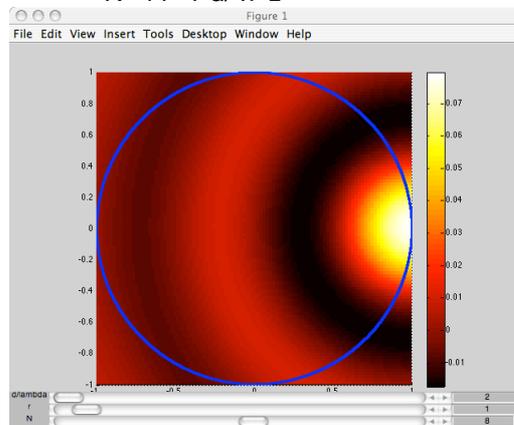
$N=15$   $r=1$   $d/\lambda=2$



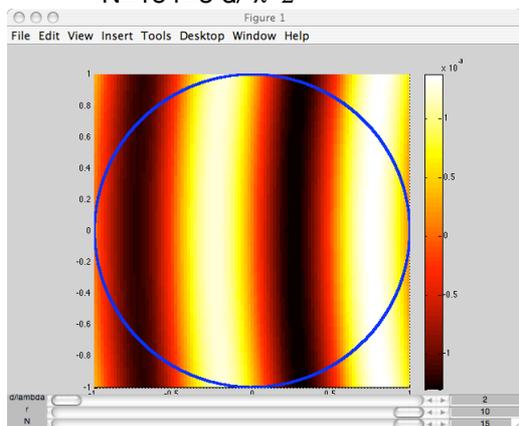
$N=4$   $r=1$   $d/\lambda=2$



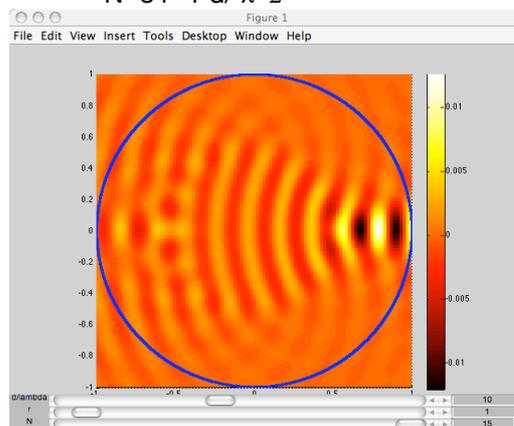
$N=15$   $r=3$   $d/\lambda=2$



$N=8$   $r=1$   $d/\lambda=2$



$N=15$   $r=10$   $d/\lambda=2$



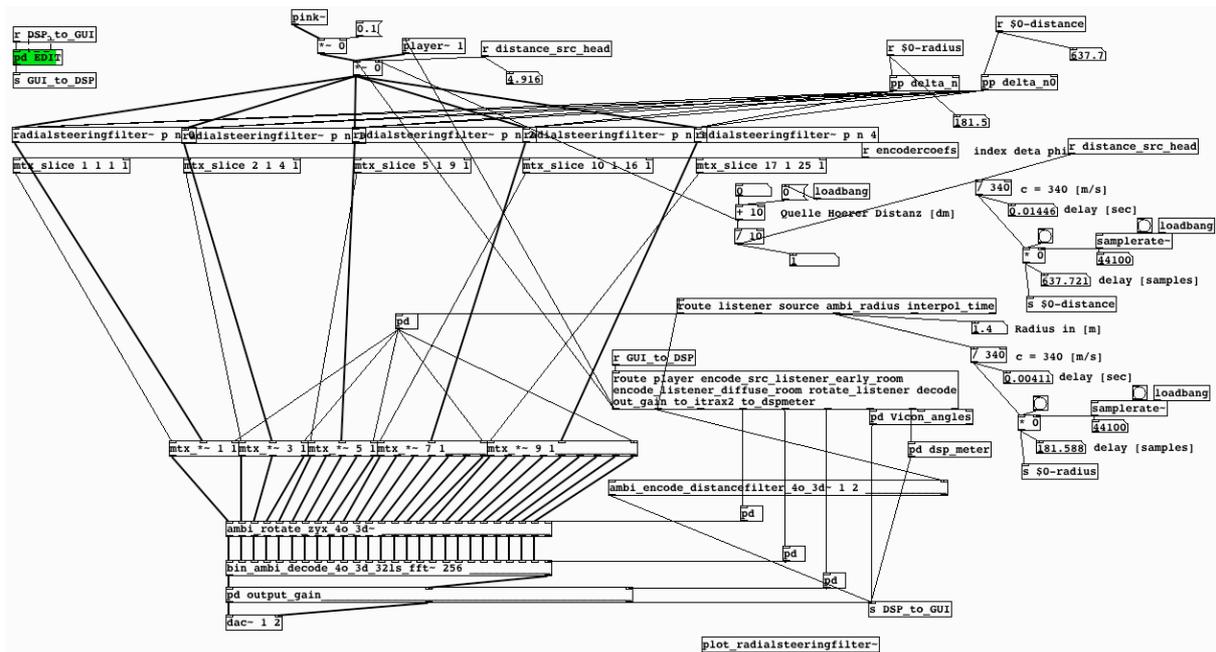
$N=15$   $r=1$   $d/\lambda=10$

## 4.2 Implementierung in Pure Data

Zum Testen des hörbaren Einflusses wurde ein bestehendes Binauralsystem in Pure Data mit einem Distanzfilter erweitert.

Einstellbare Parameter:

- Quellposition im Raum
- Quellsignal



## Ergebnisse:

Die Effekte des Distanzfilters waren nicht wahrnehmbar.

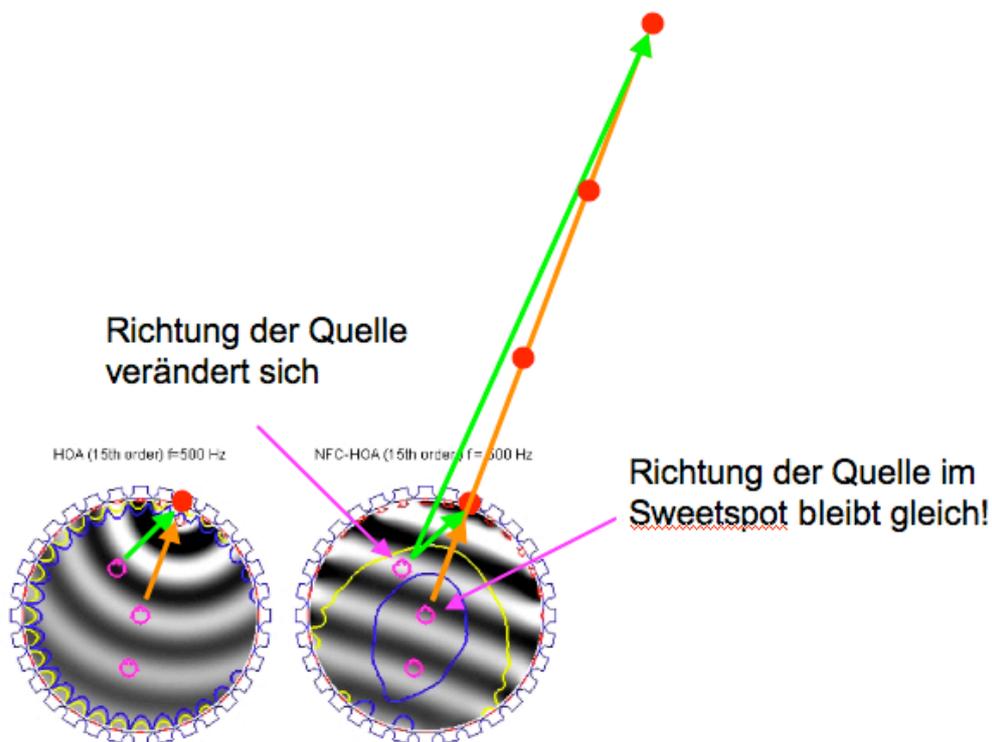
Für ein Ambisonicssystem 4. Ordnung ist eine Veränderung der Distanz-wahrnehmung nur durch Krümmen des Schallfeldes anscheinend nicht möglich.

### 4.3 Probleme bei der Distanzkodierung

Durch Veränderung der Quelledistanz  $\rho$  kann die Krümmung des Wellenfeldes verändert werden. Die Amplitude wird nicht verändert.

#### Mögliche Fehler:

- Distanzwahrnehmung hängt auch von der Amplitudendämpfung (Luft) ab.
- Ambisonics4. Ordnung, räumliche Glättung
- Sweetspot, siehe Abbildung



Verändert sich die Quelledistanz entlang des Radius so bleibt die Richtung der Quellenposition gleich und es verändert sich nur die Krümmung des Wellenfeldes. Dies ist auch bei dem verwendeten Binauralsystem der Fall, da sich der Hörer immer im „Sweetspot“ (Zentrum) befindet.

## 5 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass mit NFC Filter die Krümmung des Wellenfeldes innerhalb der gegebenen Möglichkeiten einer begrenzten Ordnung beeinflusst werden kann. Jedoch konnte nicht bestätigt werden, dass das Krümmen des Wellenfeldes alleine einen Einfluss auf die Hörwahrnehmung hat.

Es wäre interessant die Hörbarkeit mit einem Ambisonicssystem höherer Ordnung zu testen und speziell den Einfluss der Krümmung außerhalb des Zentrums zu untersuchen, um das in 4.3 beschriebene Problem der Veränderung der Quellendistanz entlang des Radius zu umgehen.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Jérôme Daniel Spatial sound encoding including near field effect: introducing distance coding filters and a viable, new ambisonic format, AES 23rd international conference, Copenhagen, Denmark, 2003 May 23-25
2. Further investigations of high order ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging, AES 114th convention, Amsterdam, the Netherlands, 2003 March 22-25
3. Franz Zotter, Hannes Pomberger and Matthias Frank, An Alternative Ambisonic Formulation: Modal Source Strength Matching and the Effect of Spatial Aliasing, AES 126th international conference, Munich, Germany, 2009 May 7-10
4. Piotr Majdak, Markus Noisternig Implementation kopfpositionsbezogener Binauraltechnik, Diplomarbeit, Institut für elektronische Musik und Akustik, Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz, Feb. 2002
5. [http://iem.at/Members/zotter/spherical\\_soundfield/gif\\_anims/SphericalHarmonicVibrations.html](http://iem.at/Members/zotter/spherical_soundfield/gif_anims/SphericalHarmonicVibrations.html) [20.10.2008]