



Perzeptive Eigenschaften der datenbasierten Wellenfeldsynthese

*Sascha Spors*¹ and *Hagen Wierstorf*²

¹Universität Rostock, Institut für Nachrichtentechnik

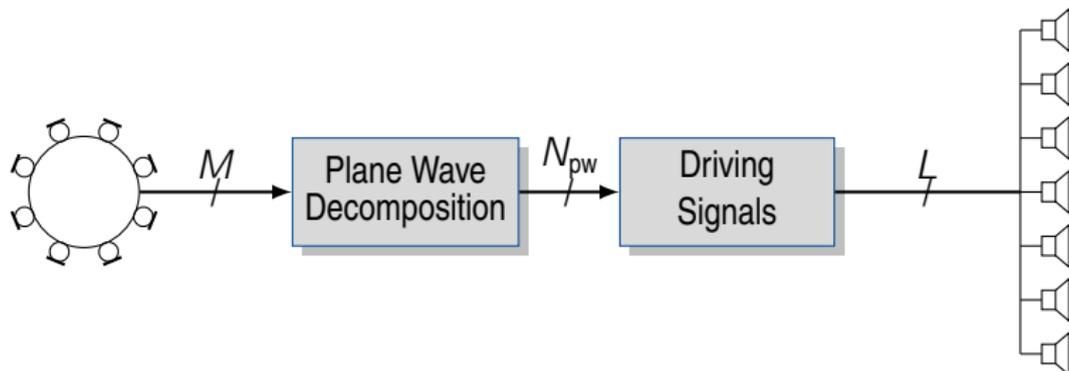
²Technische Universität Berlin, Assessment of IP-based Applications

12.März 2014

Datenbasierte Wellenfeldsynthese

[Hulsebos et al. 2001]

Aufnahme natürlicher Schallfelder mittels Mikrofonarray und
Synthese des Schallfeldes durch die Wellenfeldsynthese



Hier:

Untersuchung der perceptiven Eigenschaften datenbasierter Wellenfeldsynthese

Intrinsische Dimensionalität von Schallfeldern

[Kennedy et al. 2007]

Die Darstellung eines Schallfeldes mit beschränktem Fehler in einem beschränkten quellenfreien Bereich benötigt nur eine endliche Anzahl von Expansionskoeffizienten.

Sphärischer/kreisförmiger Bereich

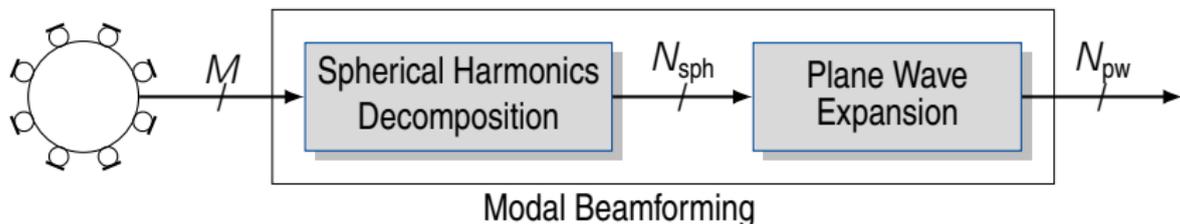
- Sphärische Harmonische als Expansionsbasis
- Fehler sinkt exponentiell mit steigender Ordnung N_{sph}
- Ordnung N_{sph} steigt linear mit Frequenz und Radius

Darstellung als Superposition von ebenen Wellen

- Spektrum der ebenen Wellen aus Darstellung in sphärischen Harmonischen
- Endliche Anzahl N_{pw} von (unabhängigen) ebenen Wellen

Modales Beamforming mit sphärischen Mikrofonarrays

Expansion des aufgenommenen Schallfeldes in sphärische Harmonische endlicher Ordnung



Realisierung des modalen Beamformings

1. Räumliche Abtastung

- Wiederholung des räumlichen Spektrums [Ahrens et al. 2012]
- Typischerweise Begrenzung der Ordnung N_{sph}

2. Eigenrauschen des Equipments

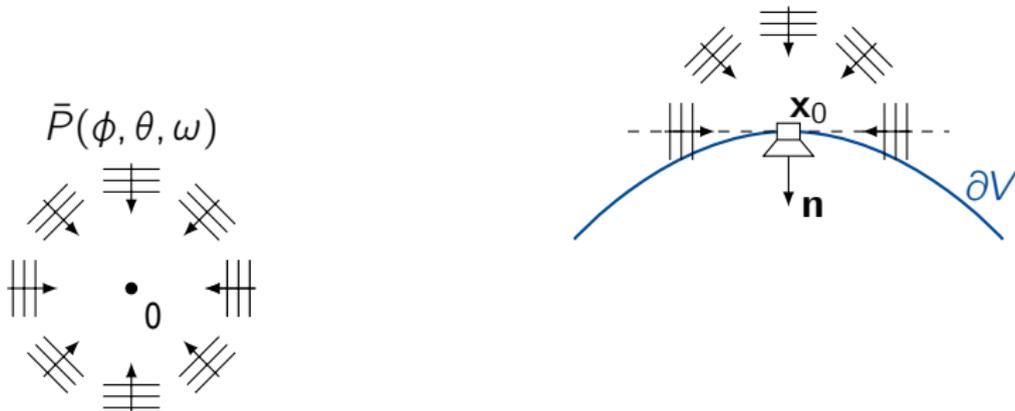
3. Mikrofonabweichungen- und Positionsungenauigkeiten

Ansteuerungsfunktionen für die Wellenfeldsynthese

Gerichtete Ableitung des aufgenommenen Schallfeldes an der Lautsprecherposition

- Vorfilterung der Signals der virtuellen Quelle
- Translation der ebene Wellen zur Lautsprecherposition und Summation

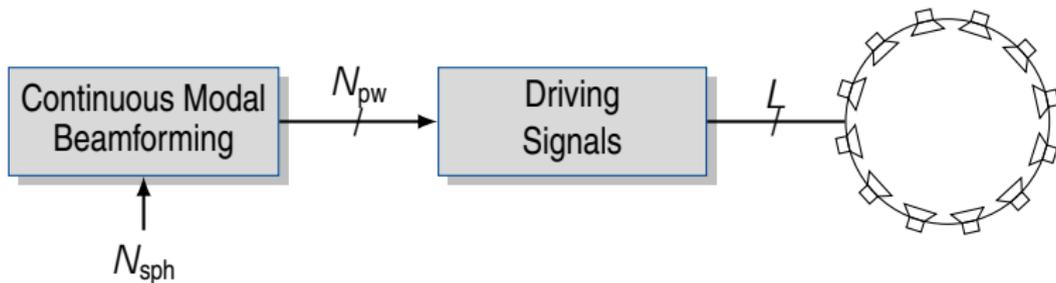
Illustration



Alternativ: Synthese von ebenen Wellen mit Spektrum der jeweiligen ebene Welle

Versuchsdesign

- Eine monofrequente/breitbandige ebenen Welle als virtuelle Quelle
- Kontinuierliches modales Beamforming [Rafaely 2005]
- 2.5-dimensionale Wellenfeldsynthese mit zirkulären Lautsprecherarray



Einfluss der Ordnung auf

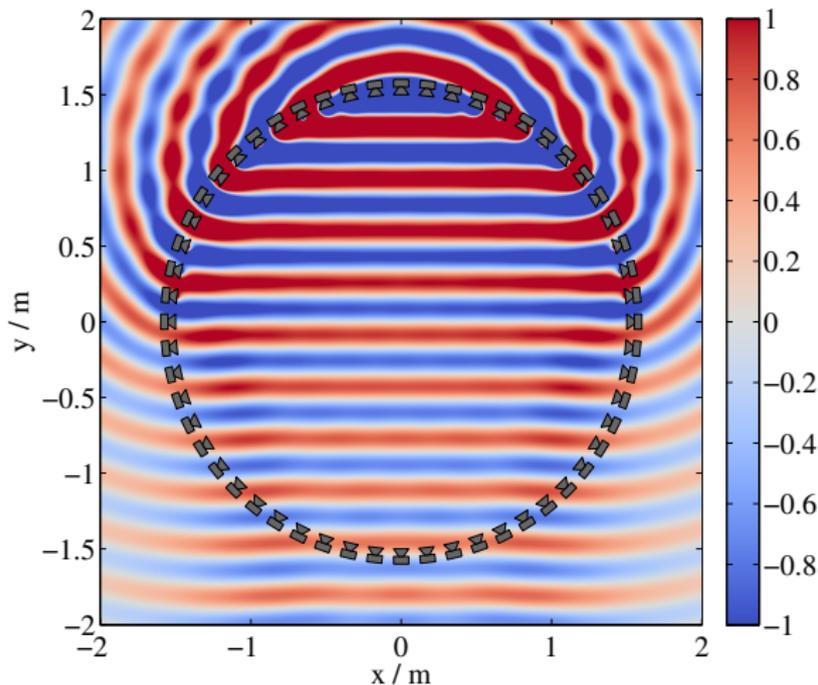
- synthetisiertes Schallfeld
- Lokalisation und Klangfarbe

Simulationsparameter

N_{sph}	750	28	10	5	1	28
N_{pw}	$2 \cdot N_{\text{sph}} + 1$					1501
L	56					

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequent

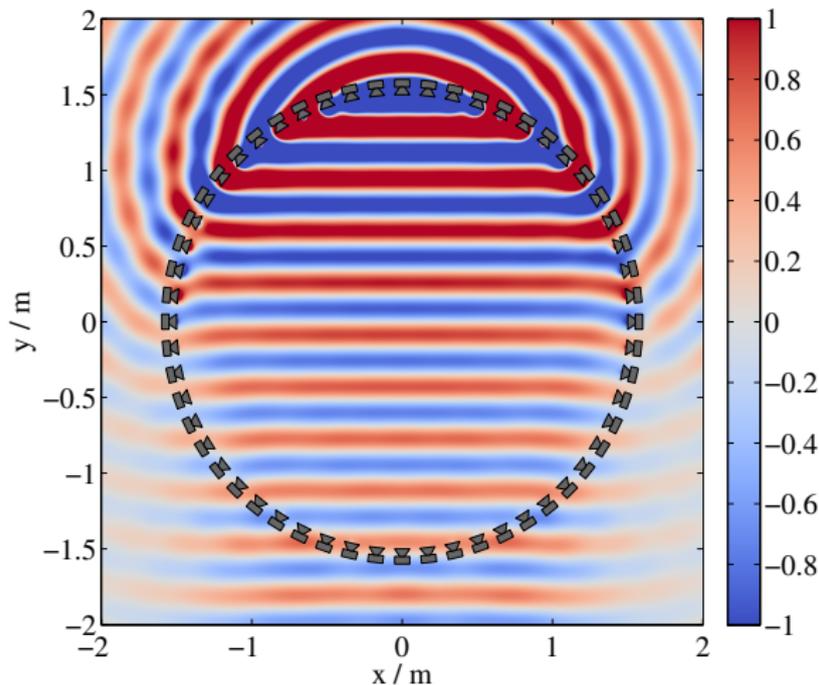
$N_{\text{sph}} = 750$, $f = 1000$ Hz (Volle Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequent

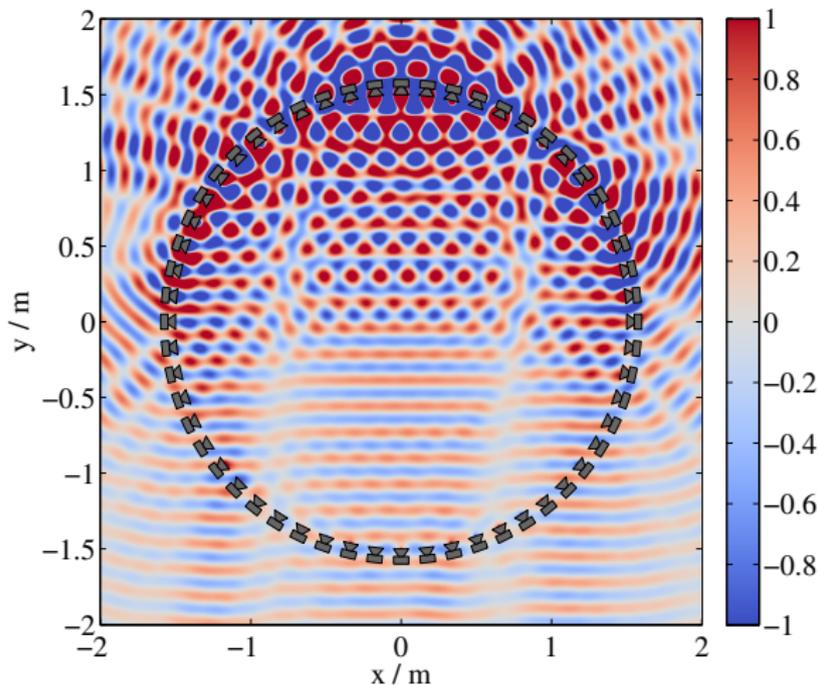
$N_{\text{sph}} = 28$, $f = 1000$ Hz (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequent

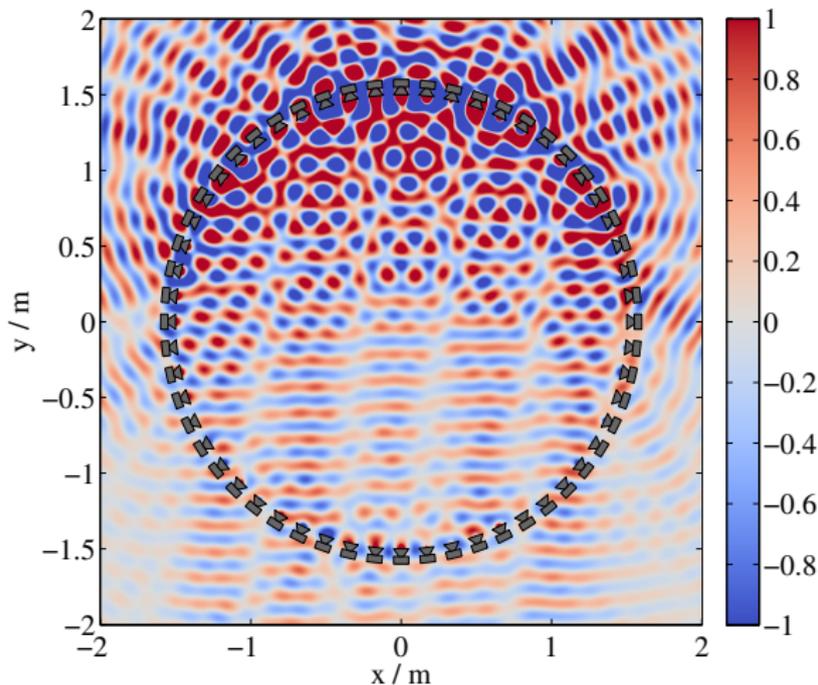
$N_{\text{sph}} = 28$, $f = 2000$ Hz (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequenz

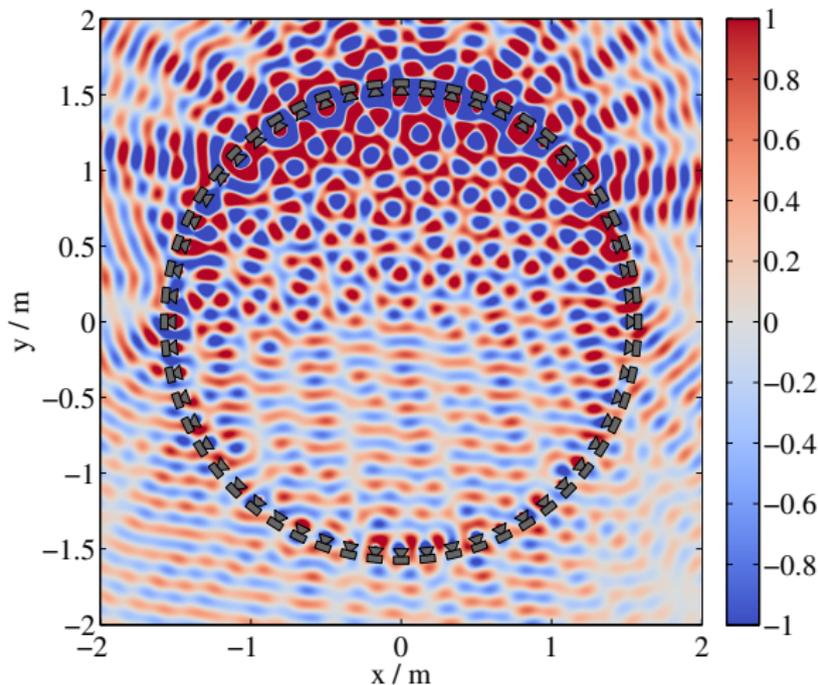
$N_{\text{sph}} = 10$, $f = 2000$ Hz (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequent

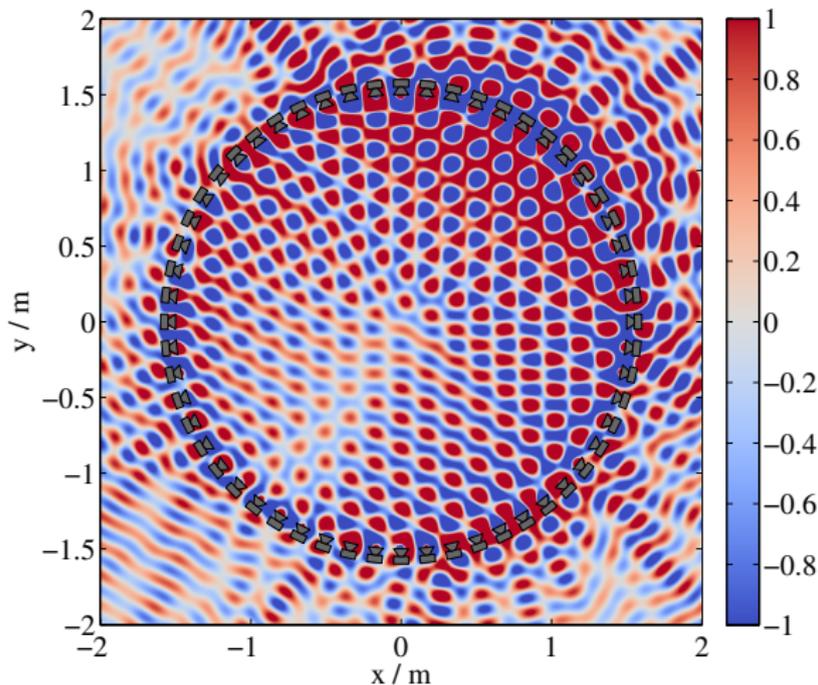
$N_{\text{sph}} = 5$, $f = 2000$ Hz (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequenz

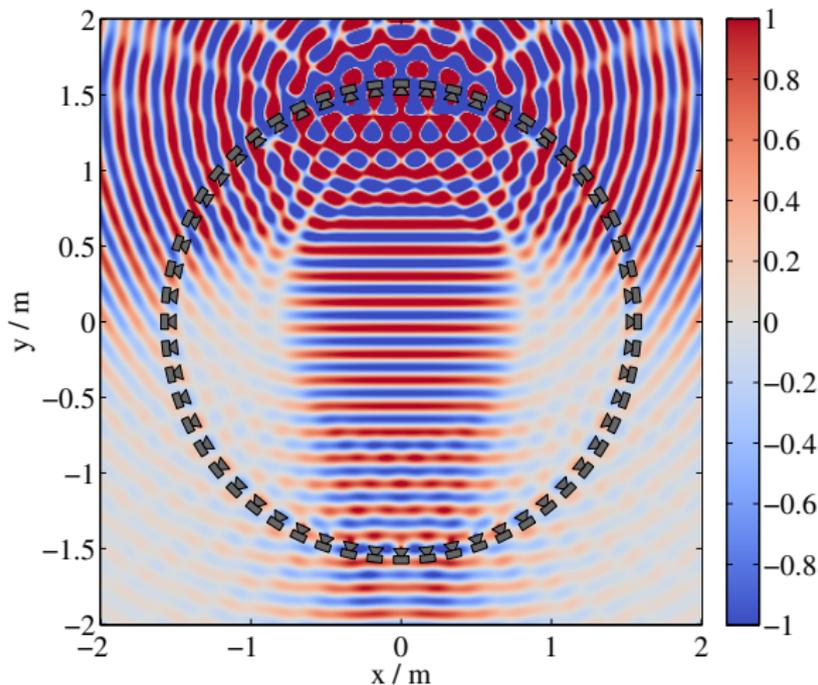
$N_{\text{sph}} = 1$, $f = 2000$ Hz (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Monofrequenz

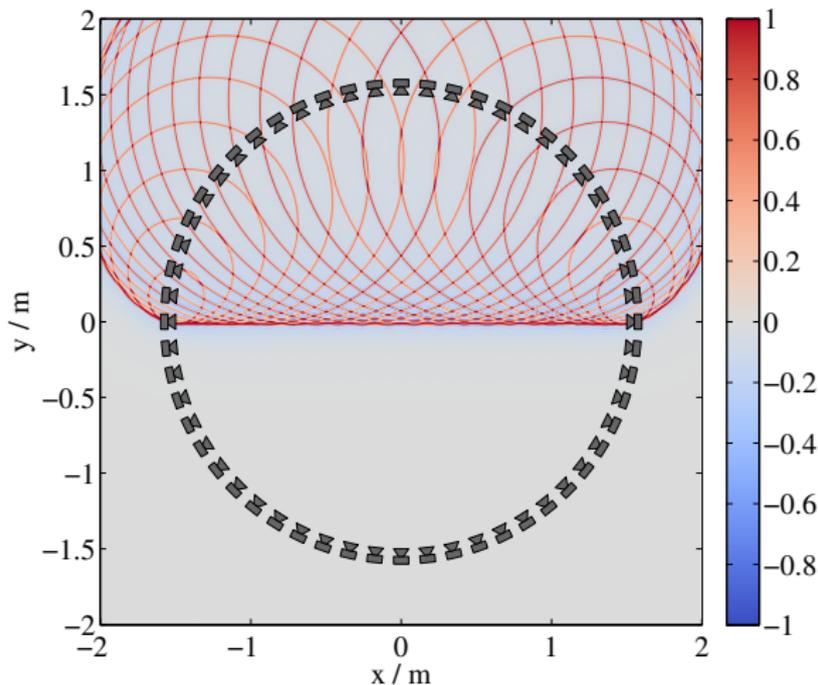
$N_{\text{sph}} = 28$, $N_{\text{pw}} = 1501$, $f = 2000$ Hz (Interpolation)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$)

Synthetisiertes Schallfeld - Breitbandig

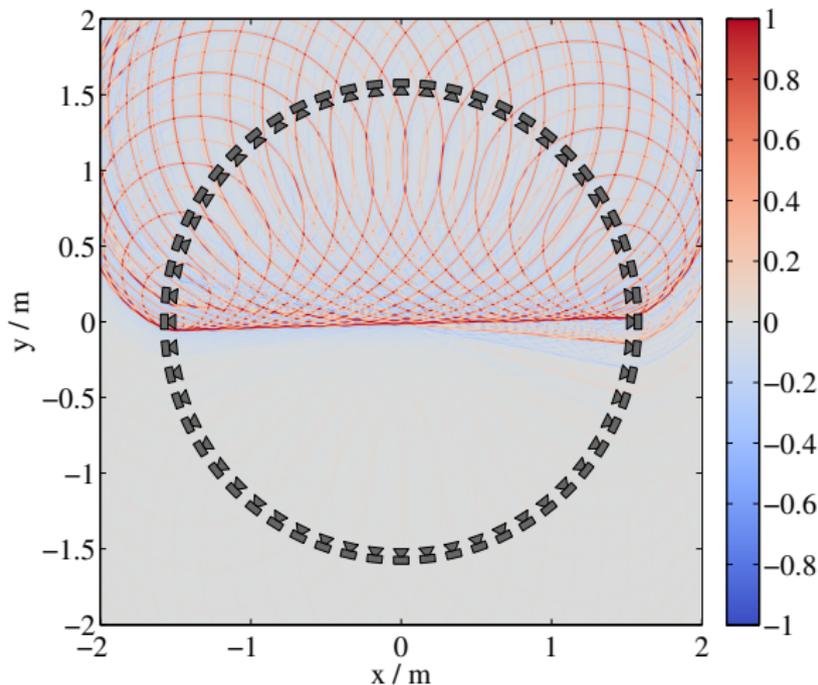
$N_{\text{sph}} = 750$ (Volle Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz)

Synthetisiertes Schallfeld - Breitbandig

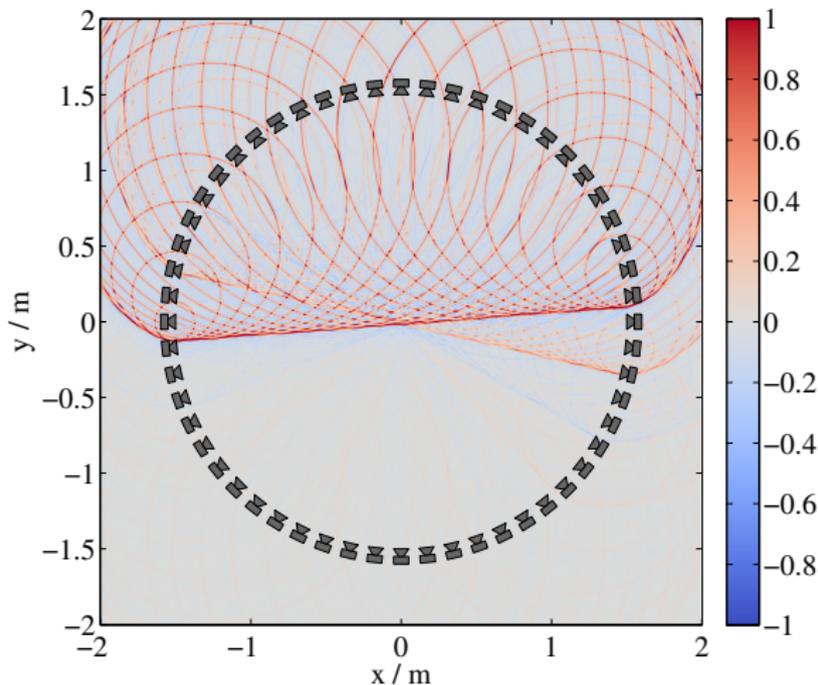
$N_{\text{sph}} = 28$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz)

Synthetisiertes Schallfeld - Breitbandig

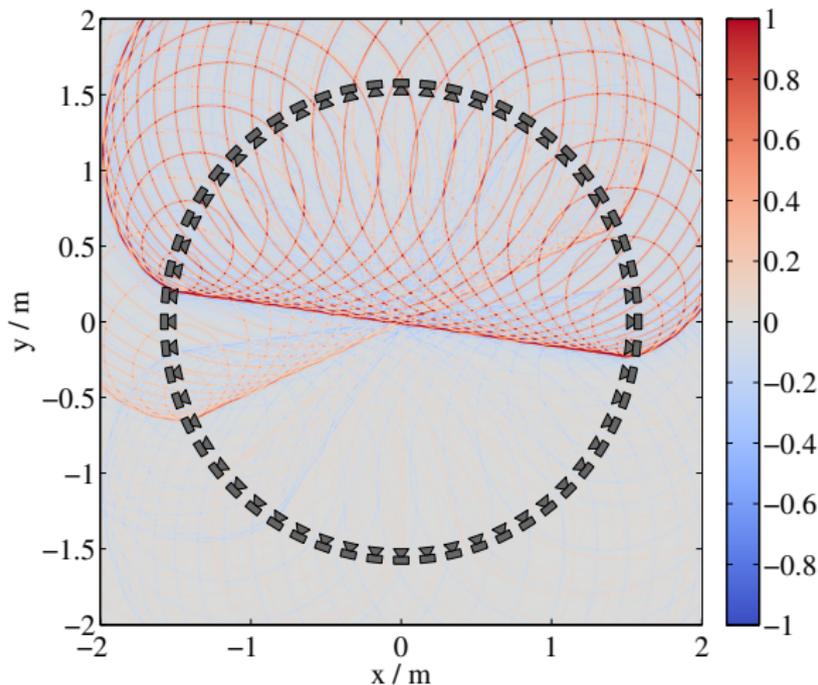
$N_{\text{sph}} = 10$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz)

Synthetisiertes Schallfeld - Breitbandig

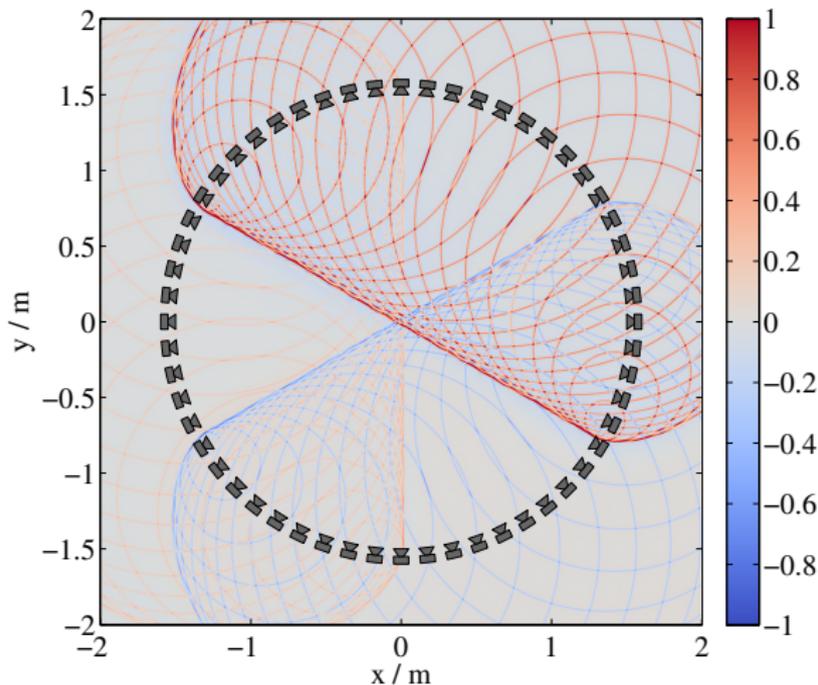
$N_{\text{sph}} = 5$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz)

Synthetisiertes Schallfeld - Breitbandig

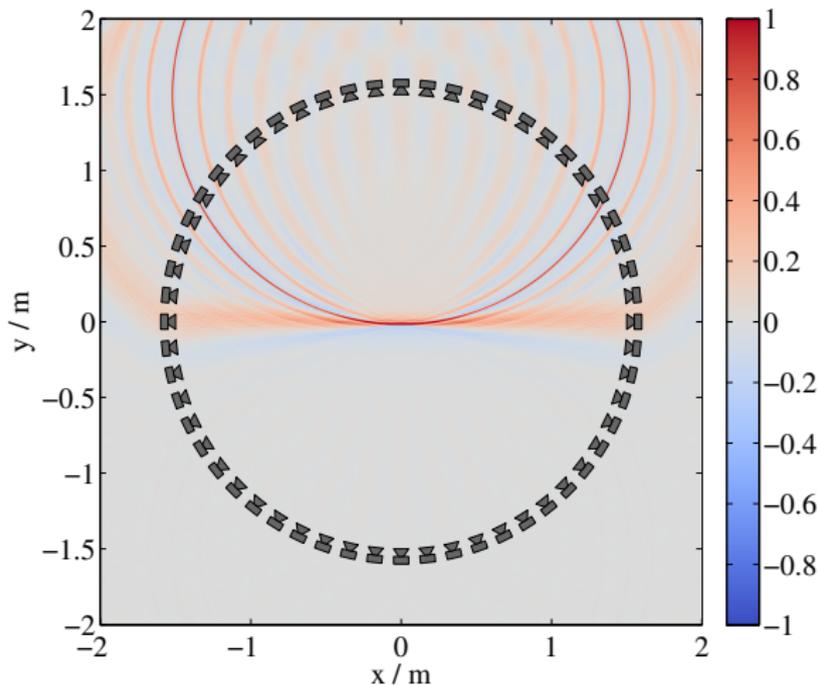
$N_{\text{sph}} = 1$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5 \text{ m}$, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1 \text{ kHz}$)

Synthetisiertes Schallfeld - Breitbandig

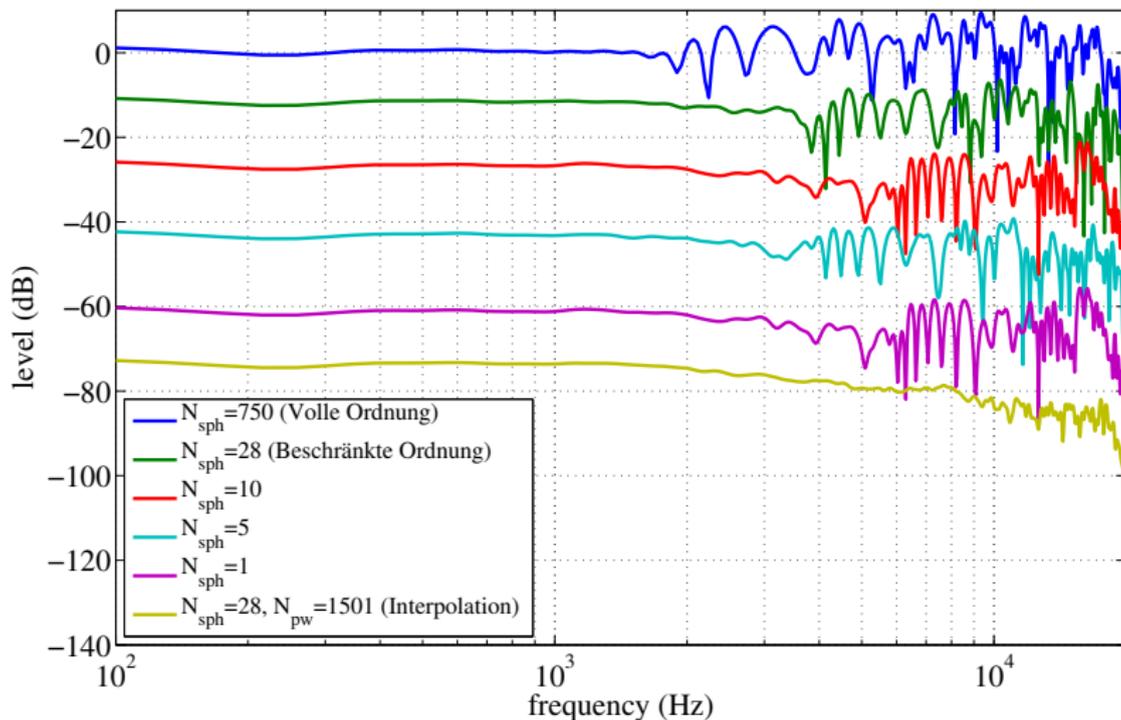
$N_{\text{sph}} = 28$, $N_{\text{pw}} = 1501$ (Interpolation)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz)

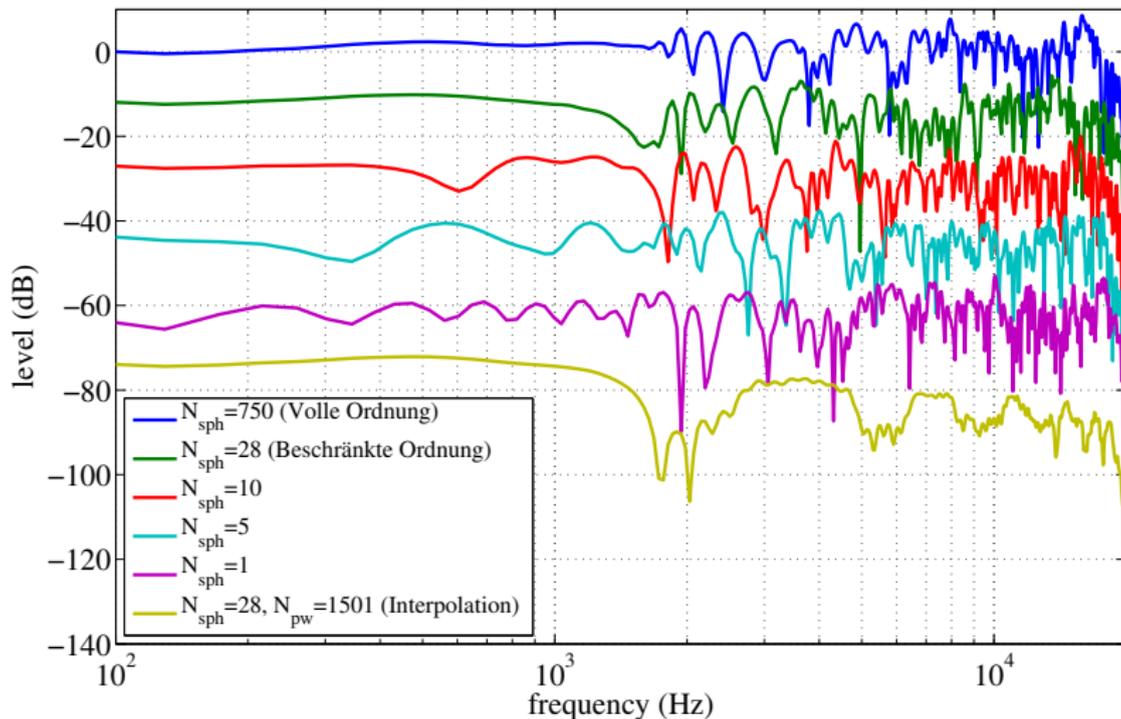
Frequenzgang

Mittig $\mathbf{x} = (0, 0, 0)$ m



Frequenzgang

Außermittig $\mathbf{x} = (1, 0, 0)$ m



Eigenschaften des synthetisierten Schallfeldes

- Überlagerung einer endlichen Anzahl von ebene Wellen
- Volle Ordnung: Synthese einer ebenen Welle
- Beschränkte Ordnung: *amplitude-panning higher-order Ambisonics* (APA)
- Interpolation: *near-field compensated higher-order Ambisonics* (NFC-HOA)

Lokalisation der virtuellen Schallquelle

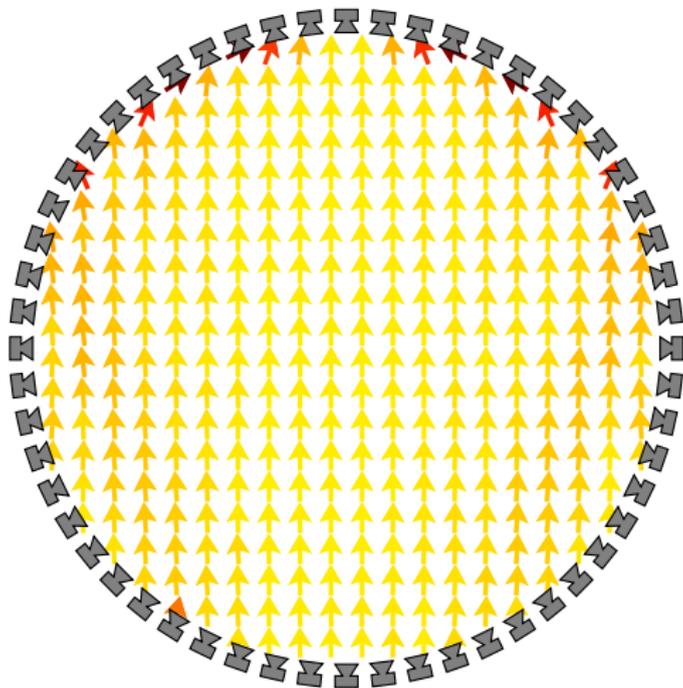
- Volle Ordnung \Rightarrow Wellenfeldsynthese [Wierstorf et al. 2013]
- Beschränkte Ordnung:
 - Mittig \Rightarrow datenbasierte binauraler Synthese [Spors et al. 2012]
 - Außermittig \Rightarrow **Abschätzung durch binaurales Modell**
- Interpolation \Rightarrow NFC-HOA [Wierstorf et al. 2013]

Klangfarbe

Beschränkte Ordnung/Interpolation \Rightarrow Klangverfärbungen für außermittige Positionen

Vorhersage der Lokalisation durch binaurales Modell

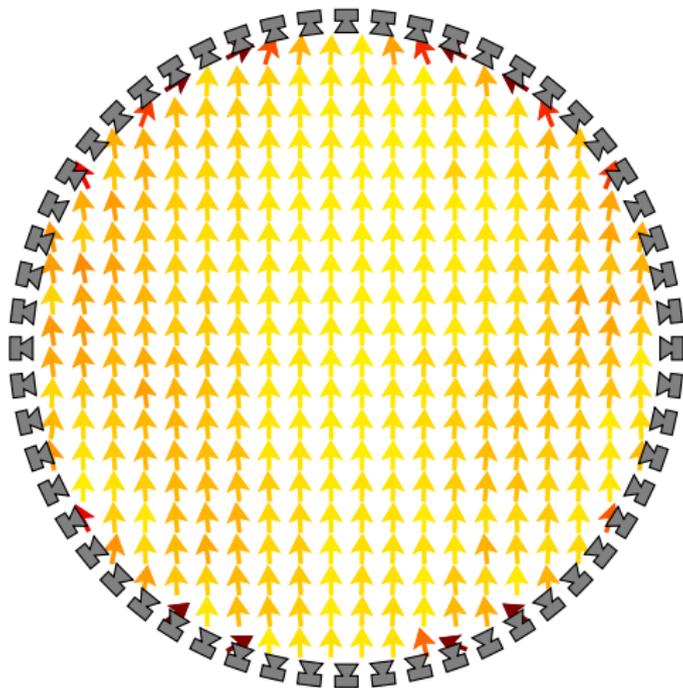
$N_{\text{sph}} = 28$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz, binaurales Modell nach [Dietz et al. 2011], [Wierstorf et al. 2013])

Vorhersage der Lokalisation durch binaurales Modell

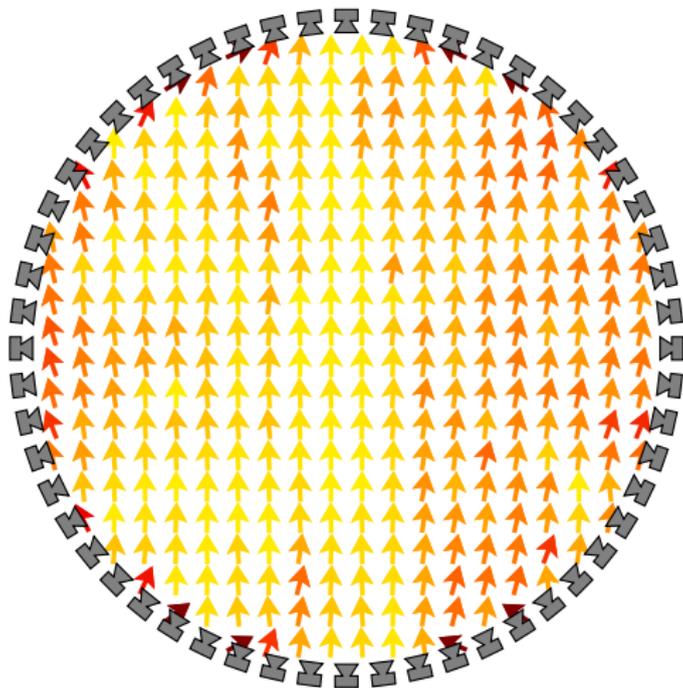
$N_{\text{sph}} = 10$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz, binaurales Modell nach [Dietz et al. 2011], [Wierstorf et al. 2013])

Vorhersage der Lokalisation durch binaurales Modell

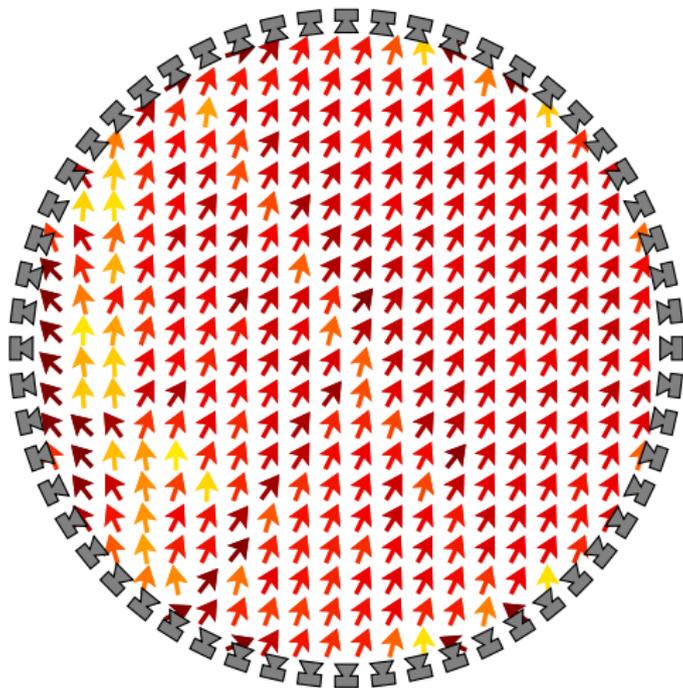
$N_{\text{sph}} = 5$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz, binaurales Modell nach [Dietz et al. 2011], [Wierstorf et al. 2013])

Vorhersage der Lokalisation durch binaurales Modell

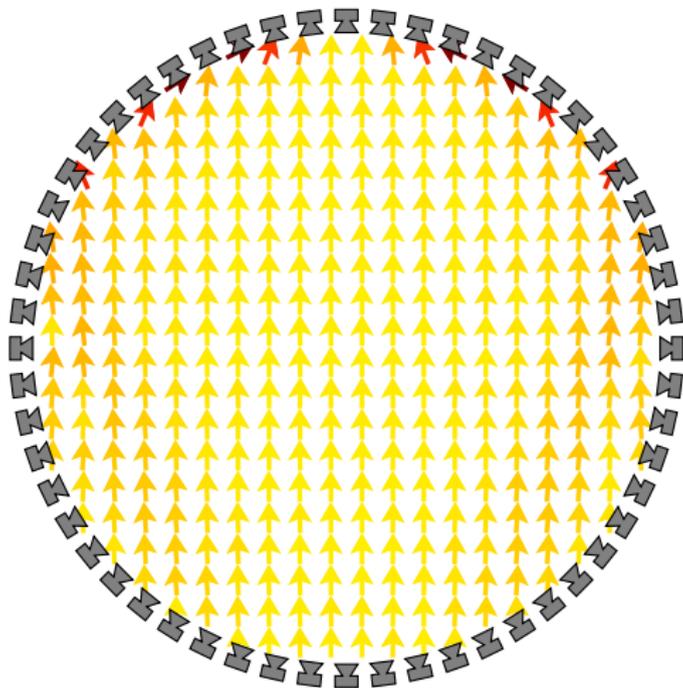
$N_{\text{sph}} = 1$ (Beschränkte Ordnung)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz, binaurales Modell nach [Dietz et al. 2011], [Wierstorf et al. 2013])

Vorhersage der Lokalisation durch binaurales Modell

$N_{\text{sph}} = 28$, $N_{\text{pw}} = 1500$ (Interpolation)



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz, binaurales Modell nach [Dietz et al. 2011], [Wierstorf et al. 2013])

Zusammenfassung und Ausblick

Für eine typische Ordnung von $N_{\text{sph}} \geq 5$ ergeben sich

- Gute Ergebnisse für mittige Zuhörerposition
- Gute Lokalisation aber Klangverfärbungen für außermittige Positionen

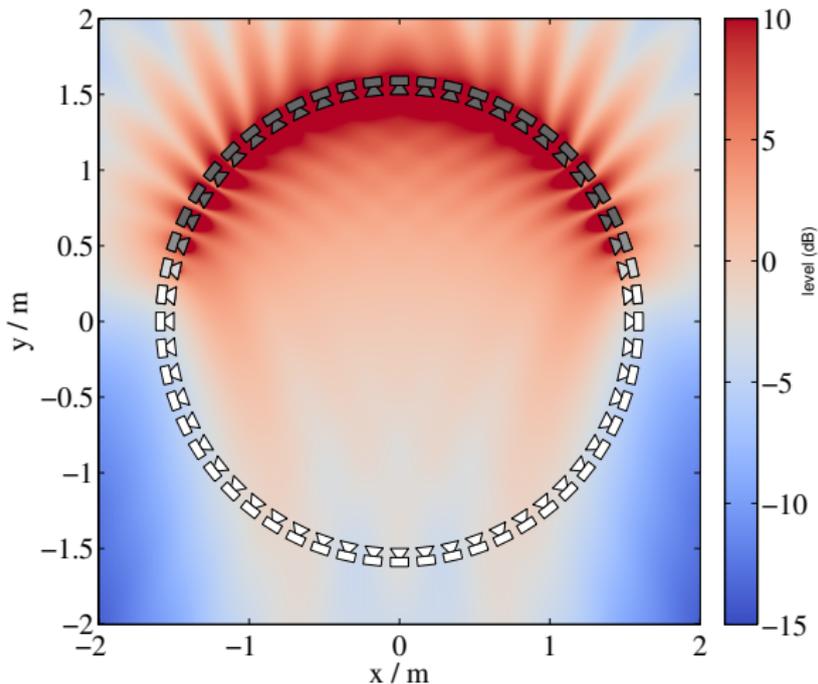
Ausblick

- Einfluss des Amplitudenfehlers bei 2.5-dimensionaler Synthese
- Einfluss von Abtastung und Eigenrauschen



Ausblick – Amplitudenabweichungen

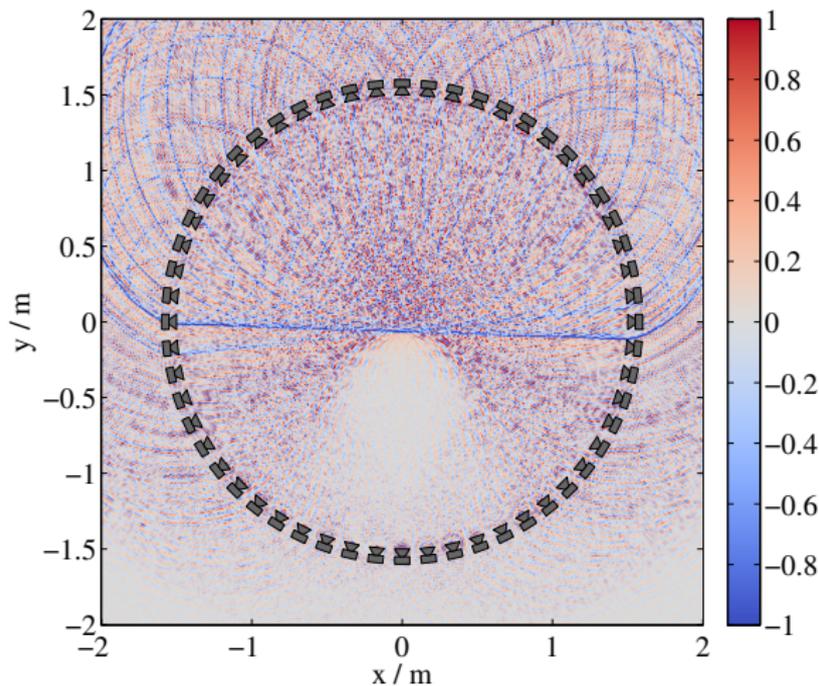
2.5-dimensionale Synthese einer ebene Welle $f = 1000$ Hz



(2.5D, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{pw} = 270^\circ$)

Sphärisches Mikrofonarray ohne Eigenrauschen

Synthetisiertes Schallfeld für $N_{\text{sph}} = 23$



(2.5D, $M = 770$ Lebedev, $L = 56$, $R = 1.5$ m, $\phi_{\text{pw}} = 270^\circ$, $f_s = 44.1$ kHz)

A top-down view of a circular speaker array in a room. The array consists of many small speakers arranged in a ring, supported by a metal truss structure. The room's floor is visible in the center, and the walls are dark. The text "Vielen Dank!" and the URL "http://spatialaudio.net" are overlaid in the center of the image.

Vielen Dank!

<http://spatialaudio.net>