

# Entwicklung eines Linienlautsprechers

Toningenieursprojekt

Sommersemester 2011

Betreuung: DI Markus Guldenschuh

Christian Soltzick

0373076

## Abstract

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines aktiven Linienlautsprechers bestückt mit 16 einzelnen Lautsprecherchassis, die vor allem den Sprachfrequenzbereich wiedergeben sollen. Alle Lautsprecherchassis besitzen ein eigenes Verstärkermodul und können separat angesteuert werden. Verschiedene Arten des Beamformings lassen sich so realisieren. Akustische Messungen mit anschließender Entzerrung werden durchgeführt sowie eine Ansteuerung in PD implementiert.

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung - Zielsetzung und Vorgaben.....	4
2 Planung und Konstruktion.....	4
2.1 Auswahl der Komponenten.....	4
2.1.1 Lautsprecherchassis.....	4
2.1.2 Verstärkermodule.....	6
2.2 Gehäusesimulation .....	7
2.3 Konstruktion der Gehäuse.....	8
3 Messungen der fertigen Linienlautsprecher.....	10
3.1 Messaufbau.....	10
3.2 Durchführung der Messungen.....	11
3.3 Auswertung der Messungen.....	12
4 Ansteuerung – "Delay & Sum Beamformer".....	14
4.1 Theorie.....	14
4.2 Pure Data Patch.....	16
5 Zusammenfassung / Fazit.....	16
6 Quellenverzeichnis .....	17
7 Anhang.....	18
7.1 Untersuchung des Einflusses der Schallwanddicke .....	18
7.2 Anlagen auf CD.....	20

# 1 Einleitung - Zielsetzung und Vorgaben

Ein Linienlautsprecher mit 16 einzelnen Lautsprecherchassis soll konstruiert werden. Jeder Lautsprecher erhält ein eigenes, im Gehäuse integriertes, Verstärkermodul. Der vorgesehene Anwendungsbereich umfasst verschiedene Arten der Schallfokussierung, bei denen vor allem der Sprachfrequenzbereich von etwa 300 bis 3kHz wiedergegeben werden soll.

Der Linienlautsprecher soll leicht zu transportieren sein und eine Stativ- oder Tischaufstellung ermöglichen.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich folgende Einschränkungen [1]:

Um Frequenzen bis 3kHz ohne räumliches Aliasing wiedergeben zu können, darf der Abstand der Einzelquellen (Lautsprecherabstand) maximal 6cm betragen. Damit tritt auch bei einer Abstrahlrichtung von 90° zur Hauptabstrahlrichtung des Arrays noch kein räumliches Aliasing auf.

$$\Delta x_{max} = \frac{c}{f_{max} * (1 + \sin(\varphi_{max}))}$$

Um Frequenzen bis 3kHz kugelförmig, also möglichst ohne Richtwirkung abzustrahlen, darf der Membrandurchmesser maximal 6cm groß sein.

$$\phi_{max} = \frac{c}{2 * f_{max}}$$

Um einen leichten Transport zu gewährleisten, werden zwei separate Linienlautsprecher mit je 8 Chassis gebaut. Ein abnehmbarer Stativflansch ermöglicht die Montage auf einem Lautsprecherstativ, für die Tischaufstellung wird ein eigener Ständer angefertigt.

## 2 Planung und Konstruktion

### 2.1 Auswahl der Komponenten

#### 2.1.1 Lautsprecherchassis

Auswahlkriterien der Lautsprecherchassis:

- Größe / Durchmesser
- Nutzbarer Frequenzbereich
- Maximalpegel

Da der Markt nur wenige geeignete Breitbandlautsprecher mit den vorgegebenen Abmessungen und Eigenschaften bietet, wurde ein Lautsprecherchassis gewählt, das diese grundsätzlich erfüllt und mit dem bereits gute Erfahrungen am IEM gemacht wurden.

Hierbei handelt es sich um den Peerless 830983, einen 2" Breitbandlautsprecher mit 40Ohm Nennimpedanz und einer Resonanzfrequenz von 150Hz, der eine steife und leichte Aluminiummembran besitzt [2].



Abbildung 1: Breitbandlautsprecher Peerless 830983

Der Frequenzgang und Impedanzgang, vom Hersteller in der IEC Schallwand gemessen, zeigt folgendes Verhalten:

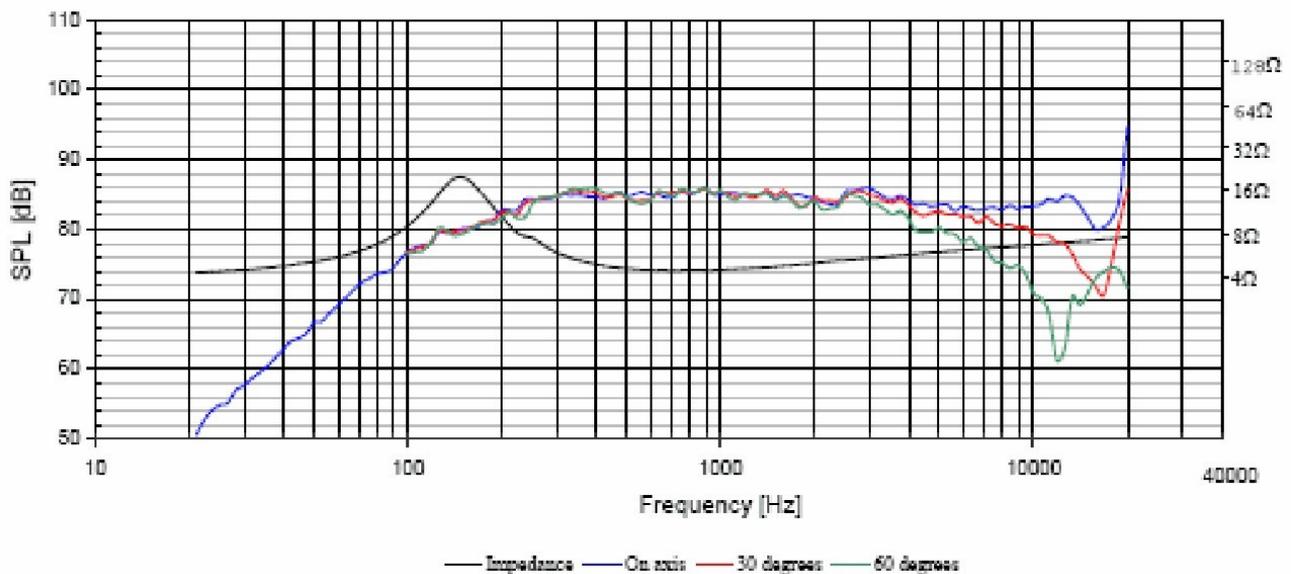


Abbildung 2: Peerless 830983 - Frequenzgang und Impedanzgang des Herstellers

Der Peerless 830983 bietet einen weiten Übertragungsbereich ohne störende Resonanzen sowie eine gering ausgeprägte Richtwirkung. Die in Kapitel 2.2 durchgeführten Simulationen zeigen das Verhalten nach dem Einbau in ein kleines, geschlossenes Gehäuse.

## 2.1.2 Verstärkermodule

Auswahlkriterien der Verstärkermodule:

- Größe
- Leistung
- Spannungsversorgung
- Robustheit

Die Module sollen möglichst kompakt sein, sodass alle 8 Kanäle auf der Rückseite des Gehäuses untergebracht werden können. Die Leistung soll mindestens 5Watt an 4Ohm betragen, um eine verzerrungsfreie Ansteuerung der Chassis zu gewährleisten. Eine Spannungsversorgung mit einem handelsüblichen 12V Netzteil soll möglich sein. Ausserdem ist eine gewisse Robustheit hinsichtlich Kurzschluss sowie Überlast/Übertemperatur von Interesse, um eine lange Lebensdauer sowohl der Lautsprecherchassis, als auch der Verstärkermodule zu ermöglichen.

Der Hersteller Sure Electronics bietet Class-D Verstärkermodule, die 2 Kanäle je 15Watt bieten und die genannten Anforderungen erfüllen [3].

Diese Module arbeiten mit dem Tripath 2024 Verstärker-Chip, besitzen alle wesentlichen Schutzschaltungen und benötigen aufgrund hoher Effizienz keine zusätzliche Kühlung.



Abbildung 3: Sure Electronics Class-D Verstärker

Die Stromversorgung von 4 Modulen (8 Kanälen) erfolgt über ein externes 12V DC / 55Watt Schaltnetzteil.



Abbildung 4: Graupner Schaltnetzteil 12V DC / 55Watt

## 2.2 Gehäusesimulation

Um das Verhalten eines Lautsprecherchassis im Tieftonbereich nach Einbau in ein kleines, geschlossenes Gehäuse abschätzen zu können, wurde mit Matlab eine Simulation des Peerless 830983 in einem Gehäuse mit 0,2 Liter Rückvolumen durchgeführt. Das Simulationsmodell beruht auf den Thiele-Small-Parametern des Lautsprechers [4]. Eine spätere Messung am fertigen Linienlautsprecher macht den Vergleich von Simulation (blau) und Messung (rot) möglich. Abbildung 5 zeigt Messung und Simulation eines Chassis im Tieftonbereich.

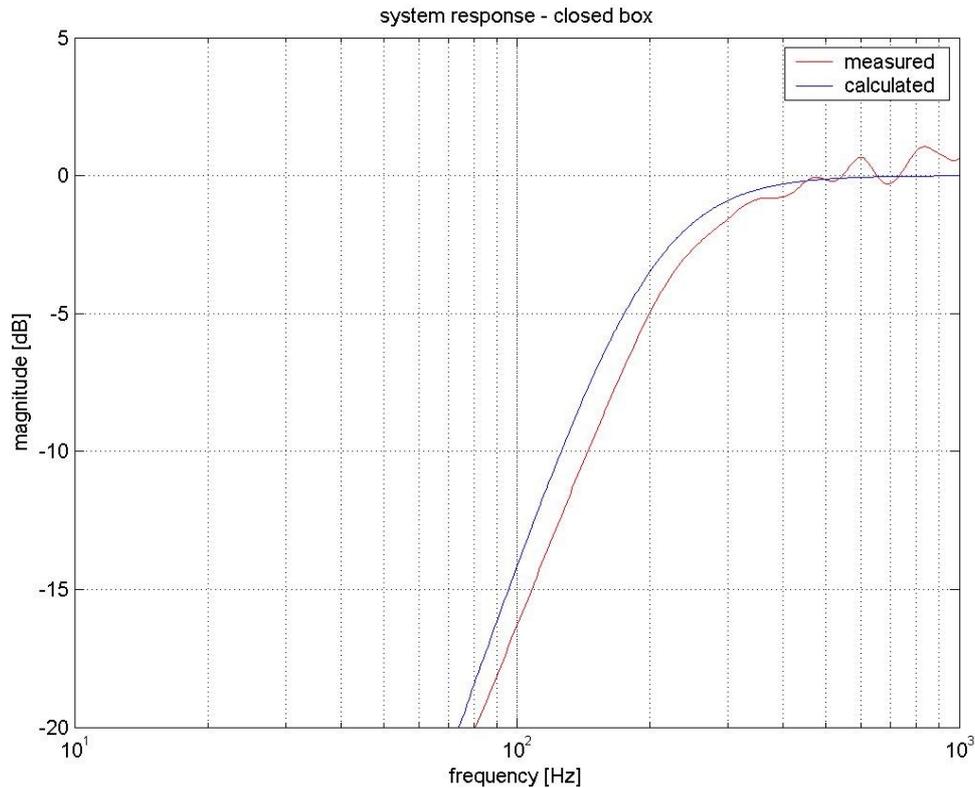


Abbildung 5: Frequenzgang im 0,2l Gehäuse – Vgl. von Messung und Simulation

Die Steilheit der beiden abfallenden Flanken stimmt gut überein, dabei liegt die simulierte Grenzfrequenz leicht tiefer als die im Gehäuse gemessene ( $F_b$  200 / 223Hz). Für die Praxis ist die Übereinstimmung von Simulation und Messung damit hinreichend genau.

## 2.3 Konstruktion der Gehäuse

Acht Lautsprecherchassis sollen mit möglichst geringem Abstand nebeneinander auf der Gehäusefront Platz finden. Die Skizze der Gehäusefront zeigt Abmessungen und Anordnung:

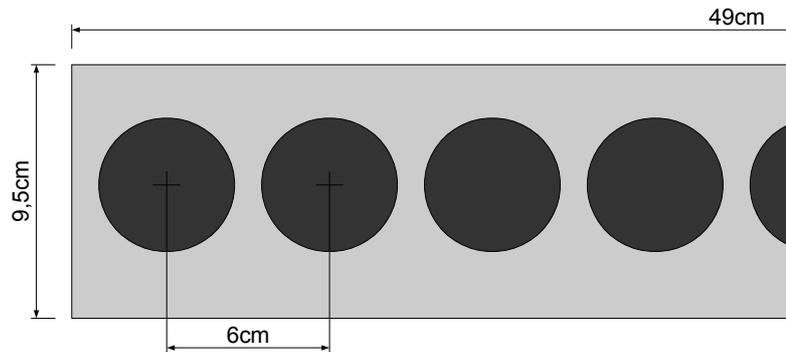


Abbildung 6: Skizze der Gehäusefront

Materialien:

Als Material für Gehäusefront und Rückseite wurde 2mm Aluminium gewählt. Dies hatte neben optischen auch technische Gründe. Um die rückseitigen Korböffnungen der Lautsprecherchassis möglichst wenig zu verdecken und damit keine ungewollten Störungen hervorzurufen, sollte die Schallwand eine möglichst geringe Wandstärke, bei dennoch hoher Stabilität, aufweisen. Messungen und Ergebnisse der Untersuchung bezüglich der Schallwanddicke befinden sich im Anhang.

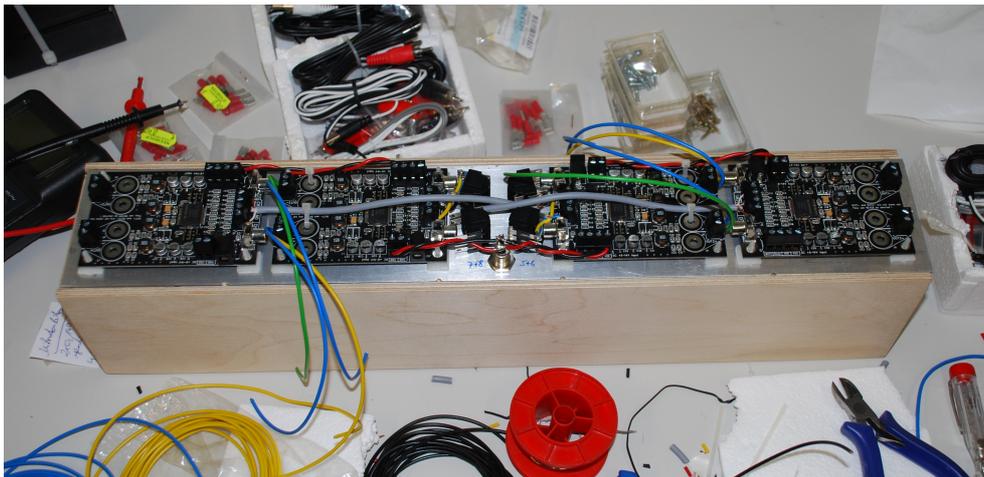
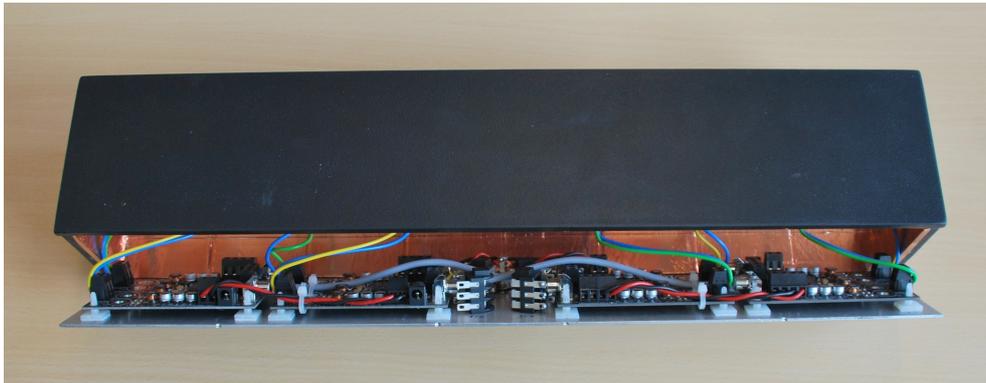


Abbildung 7: Rückseite des Gehäuses - Verkabelung der Verstärkermodule

Für den Korpus wurde 9 und 12mm Birkenspertholz verwendet. Die einzelnen Lautsprecher erhielten separate Kammern, um gegenseitige Beeinflussung auszuschließen. Ebenso wurden die Verstärkermodule in einer separaten Kammer untergebracht. Die Lautsprecherkammern wurden mit Dämmmaterial (Polyesterwatte) gefüllt, um stehende Wellen zu bedämpfen (siehe Abb. 8). Die Kammer der Verstärkermodule wurde mit Kupferfolie ausgekleidet, um eine gute Abschirmung gegen Einstreuungen zu gewährleisten (Abb. 9).



*Abbildung 8: Gehäusefront - Einbau der Lautsprecherchassis*



*Abbildung 9: Rückseite des Gehäuses – Einbau der Verstärkermodule*



*Abbildung 10: Rückseite des Gehäuses - Eingangsbuchsen für Signale sowie Stromversorgung*

Die Ansteuerung der 8 Verstärkermodule erfolgt über 4 unsymmetrische Stereo-Klinkenbuchsen auf der Rückseite des Linienlautsprechers (Abb. 10).



Abbildung 11: Linienlautsprecher auf Stativ



Abbildung 12: Linienlautsprecher auf Tischständer

### 3 Messungen der fertigen Linienlautsprecher

#### 3.1 Messaufbau

Die fertigen Linienlautsprecher werden akustisch gemessen, um eventuelle Abweichungen der einzelnen Chassis zueinander zu dokumentieren bzw. eine spätere Entzerrung zu ermöglichen. Für die Messungen wird der "Cube" des IEM gewählt, um einen möglichst großen Abstand zu vorhandenen Begrenzungsflächen einhalten zu können. Ein Linienlautsprecher wird daher mittig im Raum auf ein Stativ mit 2m Höhe positioniert. Das Messmikrofon wird 1m mittig vor dem Linienlautsprecher aufgestellt. Abbildung 13 stellt den Messaufbau im Cube dar.

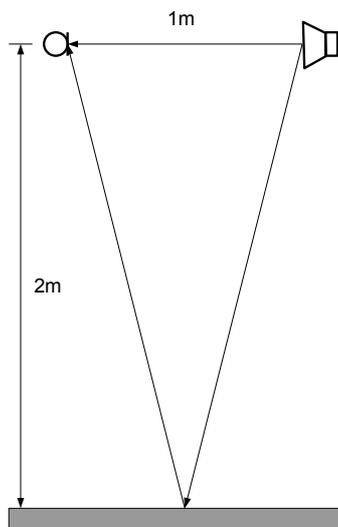


Abbildung 13: Messaufbau Cube

Die erste Raumreflexion, in diesem Fall die Bodenreflexion, trifft etwa 10ms nach dem Direktschall ein. Eine Fensterung der Impulsantwort mit einem 10ms Fenster ermöglicht so quasi reflexionsfreie Messungen ab 100Hz.

$$\Delta t = 3,5 \text{ m} * 3 \frac{\text{ms}}{\text{m}} \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

### 3.2 Durchführung der Messungen

Die Messung der Impulsantworten wird mit ARTA durchgeführt [5]. Als Anregungssignal dient ein logarithmischer Sweep. Die FFT der Impulsantwort liefert den Amplitudenfrequenzgang. Abbildung 14 zeigt eine der gemessenen Impulsantworten sowie das gewählte Fenster, welches kurz vor Eintreffen der ersten Raumreflexion endet.

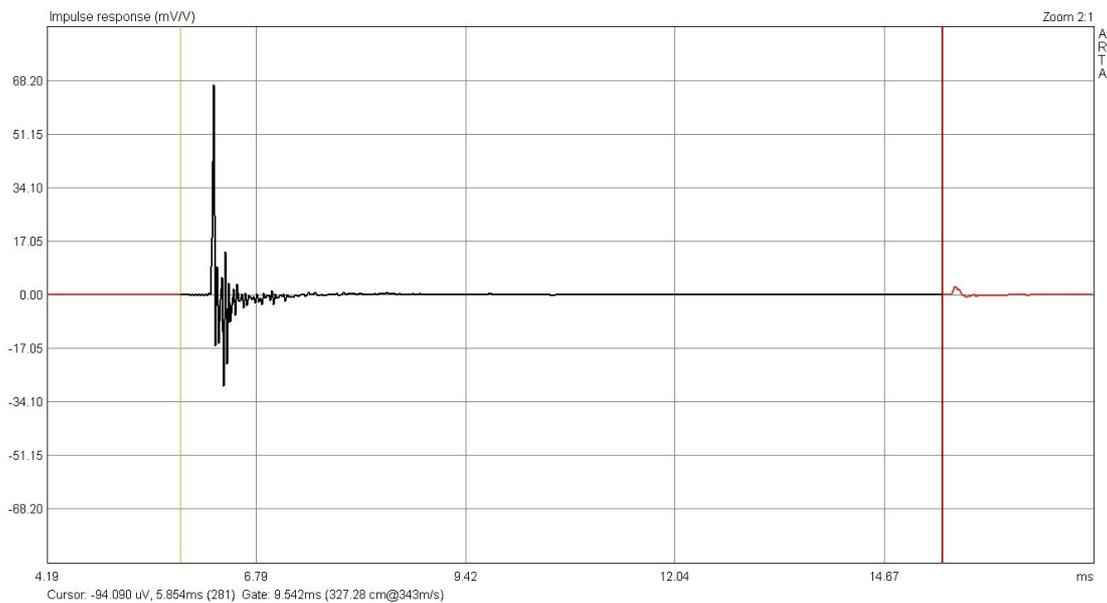


Abbildung 14: Impulsantwort mit Fensterungsbereich

### 3.3 Auswertung der Messungen

Abbildung 15 zeigt die Frequenzgänge aller acht Lautsprecherchassis des fertigen Linienlautsprechers.

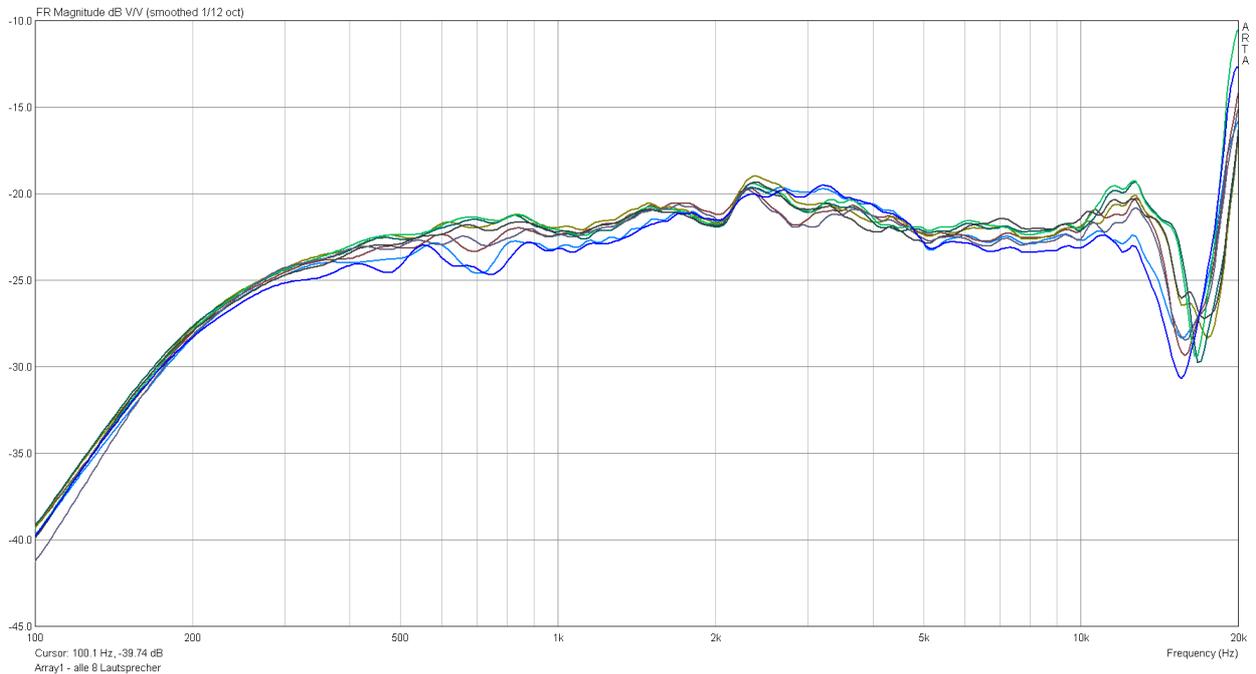


Abbildung 15: Frequenzgang eines Linienlautsprechers – Alle 8 Lautsprecherchassis

Den Vergleich der Lautsprecherchassis in der Mitte des Arrays mit denen am Rand zeigt Abbildung 16. Die Messungen erfolgen dabei an einem Linienlautsprechers.

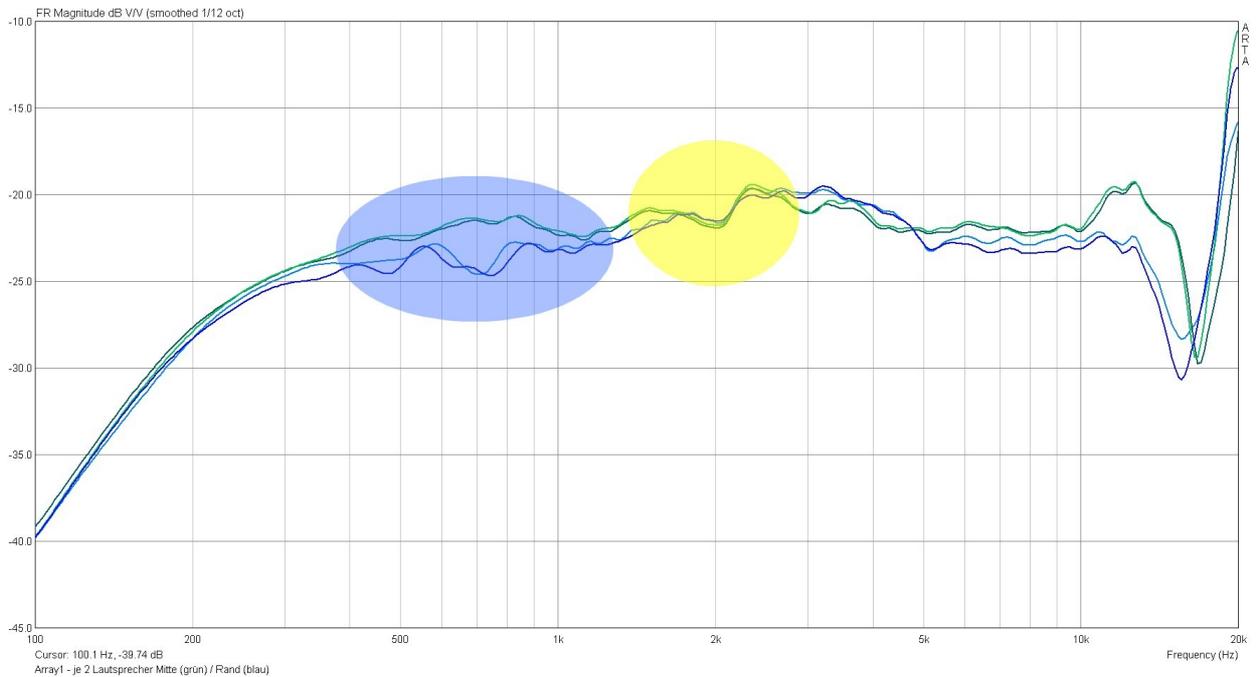


Abbildung 16: Frequenzgang eines Linienlautsprechers - Chassis Mitte / Rand

Die Untersuchung der Richtwirkung zeigt Abbildung 17. Dabei erfolgt eine Variation der Mikrofonhöhe von 0, 30, 50cm wobei 50cm etwa 30° Winkel entspricht. Die Messungen erfolgen hierbei an einem Lautsprecherchassis.

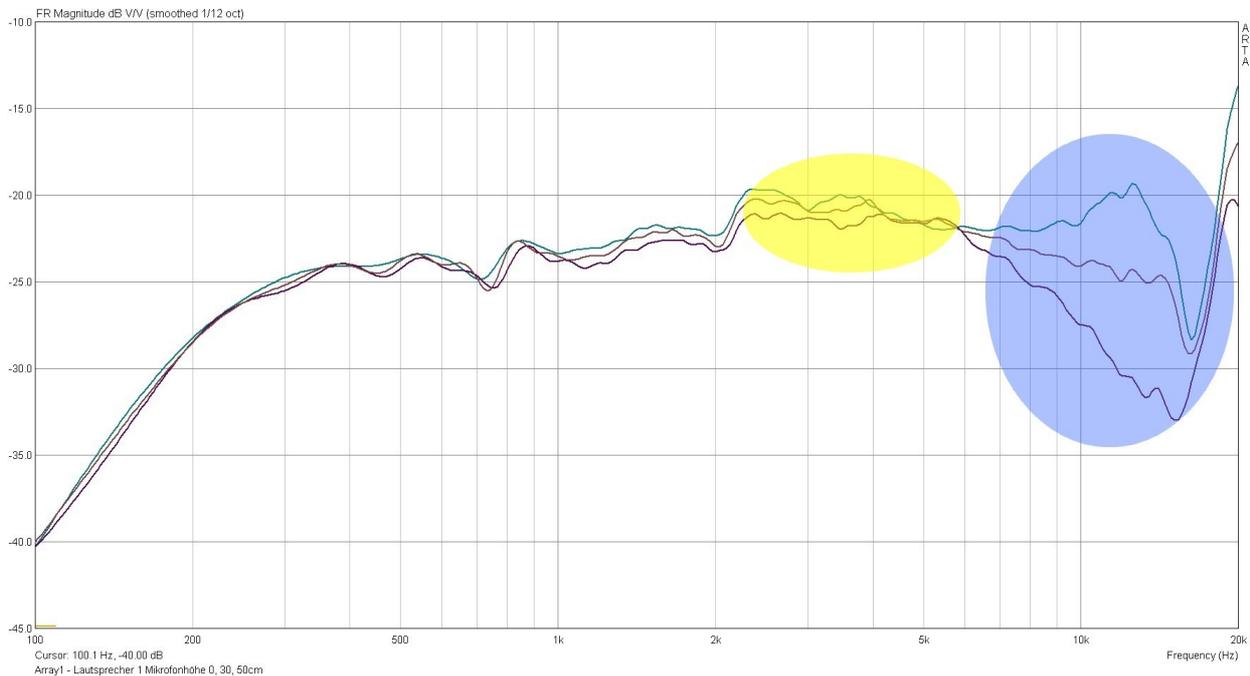


Abbildung 17: Frequenzgang eines Lautsprecherchassis – Richtwirkung

Folgende Einflussfaktoren auf den Frequenzgang lassen sich beobachten und differenzieren:

### ***Diffraction an den Gehäusekanten / Bafflestep***

Mit "Bafflestep" wird eine Stufe im Frequenzgang bezeichnet, die durch den Übergang von kugelförmiger auf halbkugelförmige bzw. gerichtete Abstrahlung entsteht. Dies tritt auf, wenn sich die Wellenlänge des abgestrahlten Schalls im Bereich der Schallwanddimensionen befindet.

Die Auswirkungen des Bafflesteps zeigen sich im Frequenzbereich von 400-1200Hz (Abb. 16, blau markiert). Hier nimmt die Längsseite und die jeweilige Chassisposition, d.h. der Abstand zu dieser, Einfluss. Die Stufe im Frequenzgang bei 2kHz zeigt nun den Einfluss der, wesentlich kürzeren und für alle Chassis gleichen, Querseite (Abb. 16, gelb markiert). Die Schallwandgeometrie und deren absolute Abmessungen sowie die Lautsprecherpositionen sind also für eine unterschiedliche Ausprägung des Bafflestep verantwortlich.

### ***Reflexion an den Gehäusekanten***

Ebenso sind die Schallwandgeometrie und deren absolute Abmessungen sowie die Lautsprecherposition für eine unterschiedliche ausgeprägte Welligkeit im Frequenzgang verantwortlich. An den Gehäusekanten kommt es zu Reflexionen die zu Interferenzen führen. Je nach Abstand und Position des Mikrofons kommt es daher zu Welligkeiten im Frequenzgang (Abb. 17, gelb markiert).

### ***Richtwirkung eines Lautsprecherchassis***

Unabhängig von der Schallwandgeometrie und Größe besitzt ein Lautsprecher abhängig von seiner Membrangröße eine zunehmende Richtwirkung zu hohen Frequenzen hin. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Membran tritt die Bündelung allerdings erst bei Frequenzen ab etwa 6kHz auf und ist damit für den angestrebten Übertragungsbereich zu vernachlässigen. Abbildung 17 zeigt das Bündelungsverhalten eines Lautsprecherchassis (blau markiert).

## 4 Ansteuerung – "Delay & Sum Beamformer"

Um eine Ansteuerung der beiden Linienlautsprecher für den geplanten Anwendungsbereich ausprobieren zu können, wird ein einfacher Delay & Sum Beamformer in Pure Data implementiert.

Ziel dabei ist die Steuerung des Beams in Echtzeit, also eine Verschiebung des Fokuspunktes hinsichtlich Abstand und Winkel. Diverse Anregungssignale wie Rauschen oder impulshafte Anregungen sowie beliebige Audiofiles können abgespielt werden. Ausserdem stehen verschiedene Filter zu Verfügung (HPF, LPF, Entzerrung / Pegelkompensation).

### 4.1 Theorie

Grundsätzlich erfolgt beim Delay&Sum Beamforming („Punkt“-Beamforming) eine individuelle Verzögerung jedes Lautsprecherchassis umgekehrt proportional zum Abstand des Aufpunktes. Abbildung 18 veranschaulicht das Prinzip.

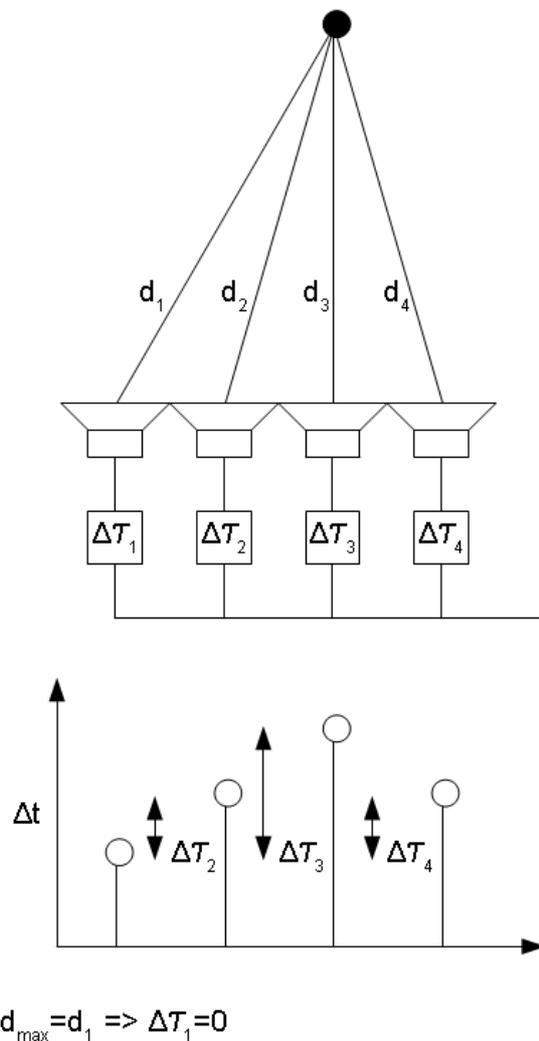


Abbildung 18: Prinzip des "Delay&Sum Beamforming"

Die simulierte Richtcharakteristik des Beams bei 300Hz und bei 1kHz zeigen Abbildung 19 und 20. Mit steigender Frequenz wird die Hauptkeule schmäler, zusätzlich bilden sich Nebenkeulen. Wenn eine Nebenkeule die gleiche Amplitude, wie die der Hauptkeule erreicht, so wird von räumlichen Aliasing gesprochen (Abb. 21) [6].

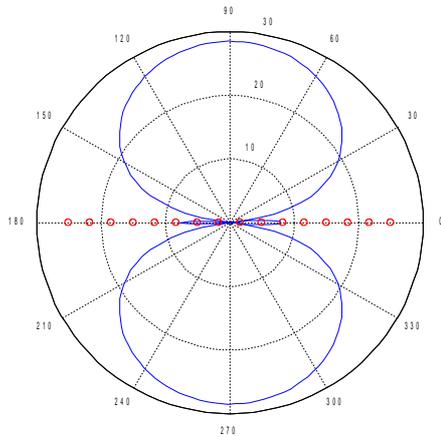


Abbildung 19: Matlab Simulation - Richtcharakteristik bei 300Hz

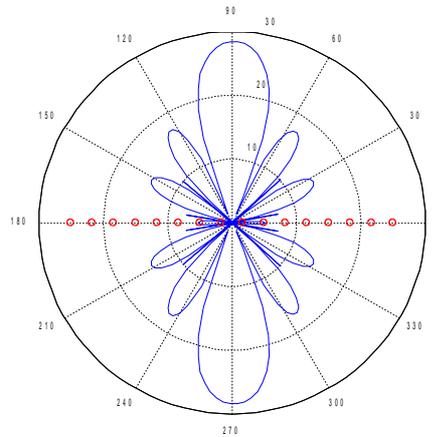


Abbildung 20: Matlab Simulation - Richtcharakteristik bei 1kHz

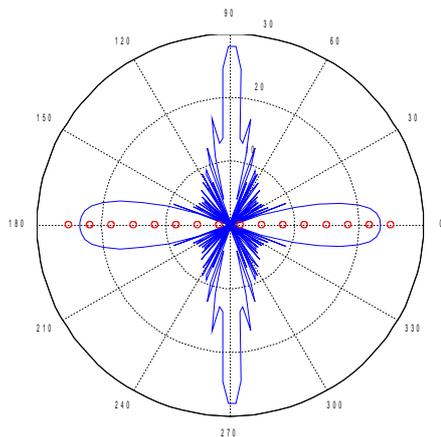


Abbildung 21: Matlab Simulation - Richtcharakteristik bei 3,4kHz

## 4.2 Pure Data Patch

Die Echtzeitsteuerung des Beams wird in PD über das "grid"-Objekt (x/y) realisiert. Der Fokuspunkt lässt sich innerhalb einer quadratischen Fläche (2x2m) beliebig vor dem Array verschieben (Abb. 22).

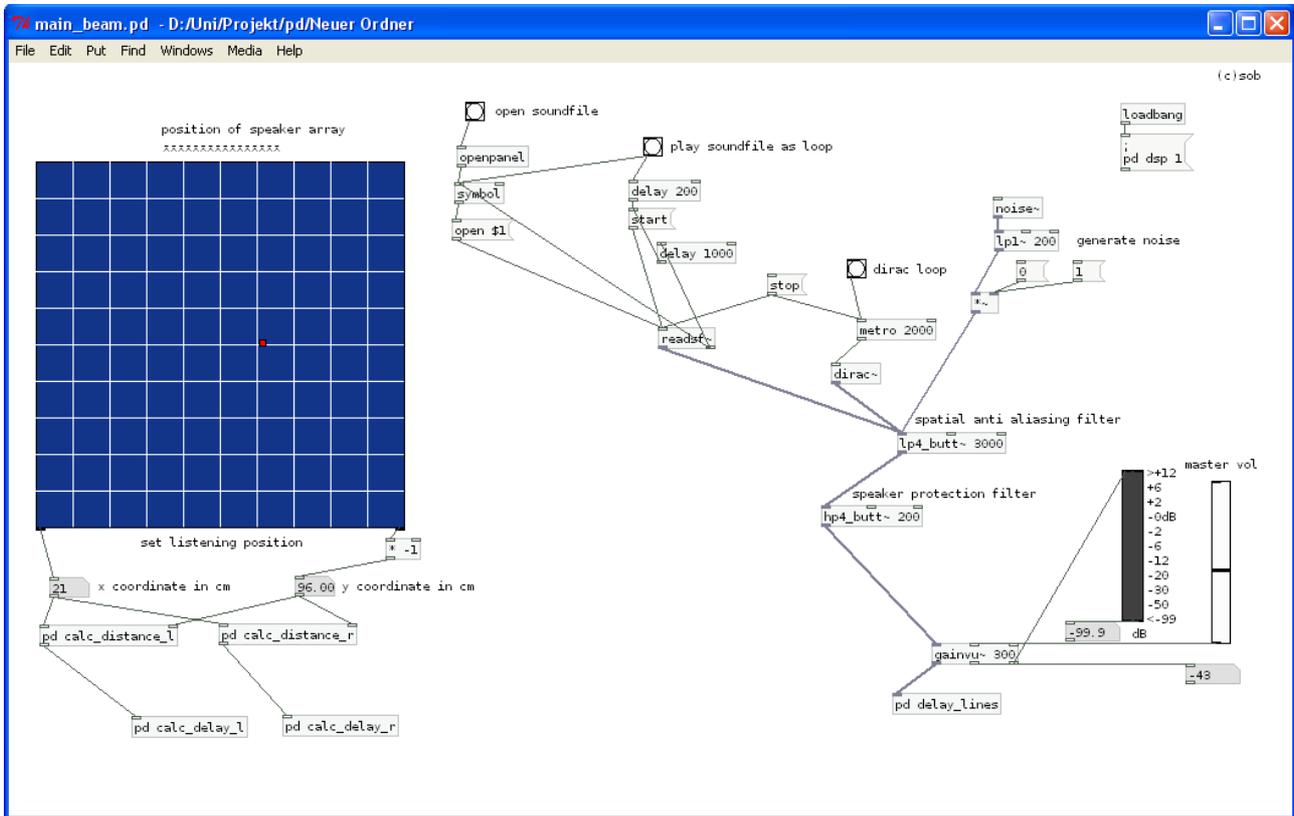


Abbildung 22: PD-Patch zur Ansteuerung

## 5 Zusammenfassung / Fazit

Zwei aktive Linienlautsprecher, mit jeweils 8 einzelnen Lautsprecherchassis bestückt, wurden geplant und konstruiert. Die Lautsprecher besitzen einen weiten Übertragungsbereich mit geringer Welligkeit. In der Praxis ist eine Linearisierung des Frequenzgangs daher, je nach Anwendung, nicht notwendig. Auch die Pegelabweichung der Kanäle zueinander ist gering. Die in der Entwicklungsphase gemachten Simulationen stimmen mit den späteren Messungen weitgehend überein. Die größten Schwierigkeiten ergaben sich vor allem bei der Planung und Umsetzung der Gehäusekonstruktion. Das ebenfalls entwickelte PD Patch bietet die Möglichkeit die Lautsprecher zu testen und einen einfachen Delay&Sum Beamformer vorzuführen. Die Zielsetzung des Projektes wurde damit erreicht.

## 6 Quellenverzeichnis

[1] Franz Zotter, „Studie zur Steuerung der örtlichen Schallfeldkonzentration“ - Projektarbeit

[2] Peerless 830983 – 2“ 4Ω Full Range Speaker

<http://www.tymphany.com/>

Datenblatt auf CD (siehe Anhang)

[3] Sure Electronics Class D Amplifier Board – Tripath 2024

<http://www.sureelectronics.net/>

Datenblatt auf CD (siehe Anhang)

[4] Richard H. Small, „Closed Box Loudspeaker Systems“ - J. Audio Eng. Soc., vol. 20, pp. 798-808 (Dec. 1972); vol. 21, pp. 11-18 (Jan./Feb. 1973)

[5] ARTA – Software für Akustikmessungen von Ivo Mateljan

<http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/>

[6] Markus Guldenschuh, „Transaural Beamforming“ - Diplomarbeit

## 7 Anhang

### 7.1 Untersuchung des Einflusses der Schallwanddicke

Den Vergleich einer 2mm dicken Schallwand (blau) zu einer 6mm dicken (rot) zeigt Abbildung 23:

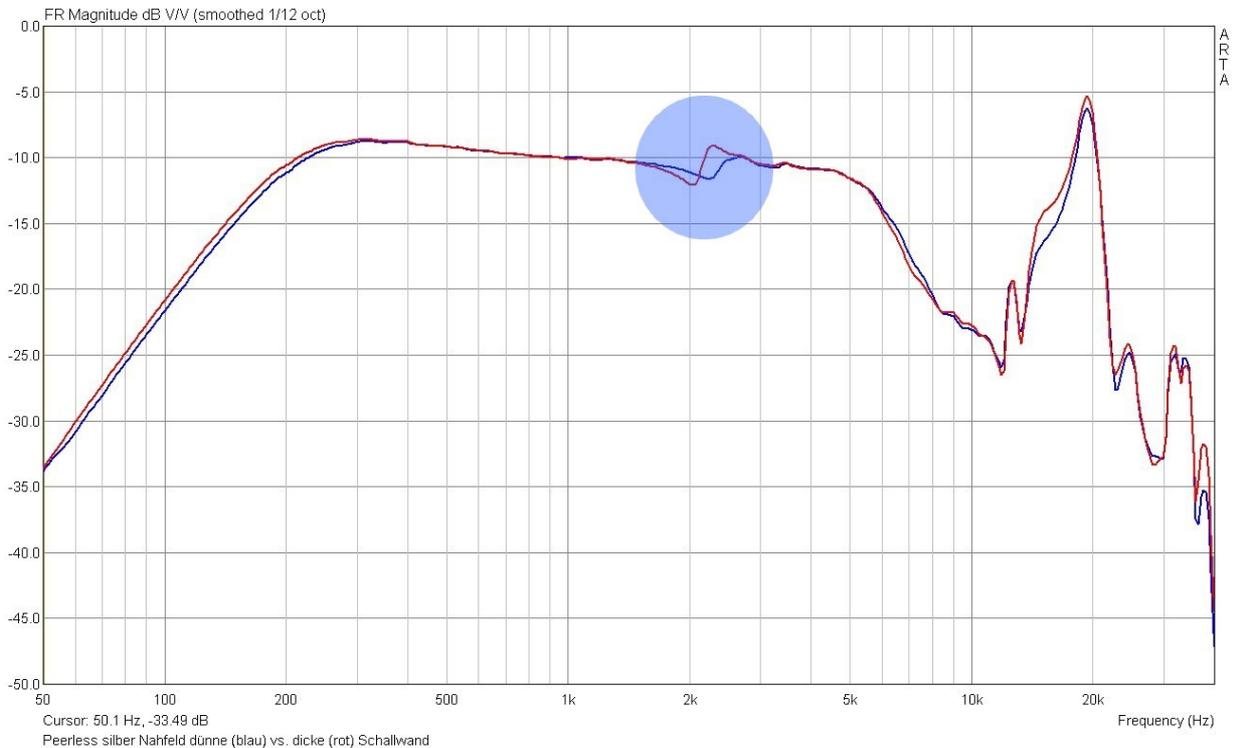
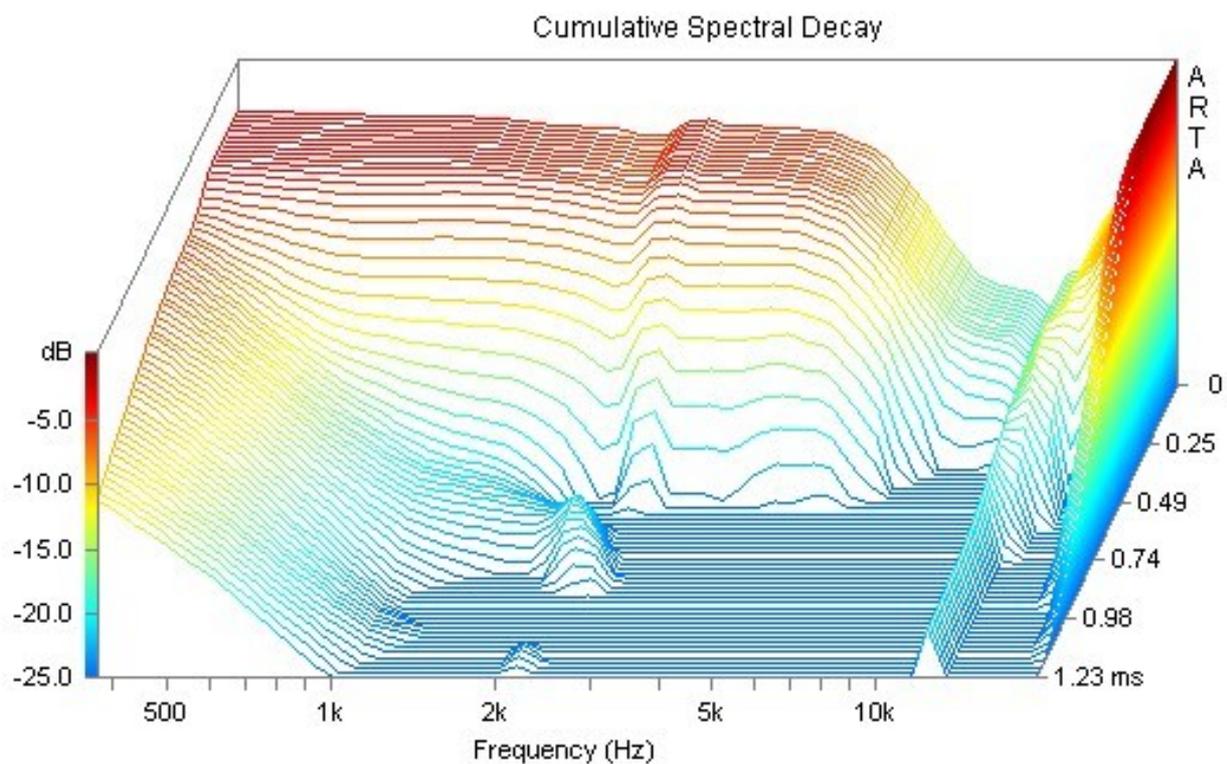


Abbildung 23: Frequenzgang - Schallwanddicke 2 und 6mm

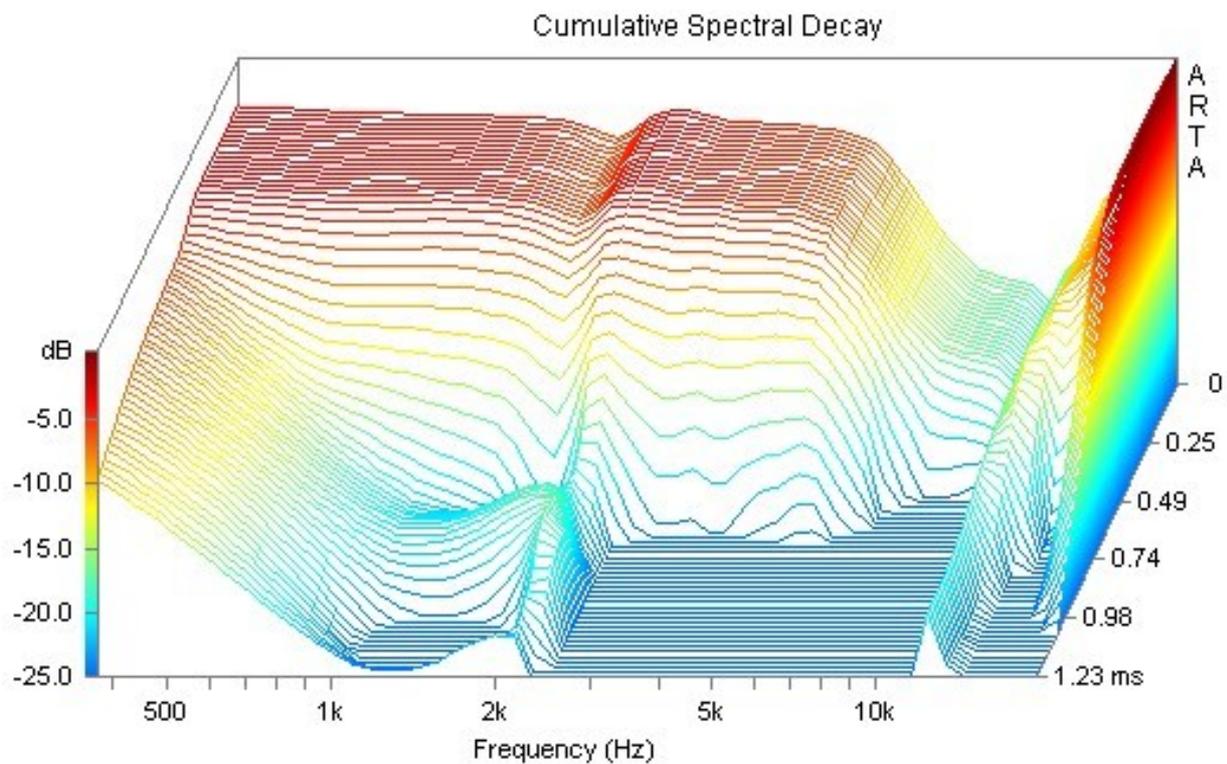
Im Frequenzgang ergibt sich für die dickere Schallwand (rote Kurve) bei 2kHz (Abb. 23, blau markiert) eine deutliche Störung. Auch das Ausschwingverhalten ist in diesem Bereich verzögert. Abbildung 24 zeigt das kumulative Zerfallsspektrum bei Einbau des Lautsprechers in eine 2mm Schallwand. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 25 den Einfluss der 6mm dicken Schallwand.

Fazit: Die eingeschlossene Luft bildet einen akustischer Resonator, der sowohl im Frequenzgang, als auch im Ausschwingverhalten erkennbar ist. Eine möglichst dünne Schallwand, welche dennoch die nötige Stabilität bietet, ist daher zu bevorzugen.



Peerless silber Nahfeld Schallwand dünn

Abbildung 24: Zerfallsspektrum - Schallwanddicke 2mm



Peerless silber Nahfeld Schallwand dick

Abbildung 25: Zerfallsspektrum - Schallwanddicke 6mm

## **7.2 Anlagen auf CD**

Folgende Dateien befinden sich auf beigefügter CD:

Pd-Patch

*main\_beam.pd*

Datenblatt Peerless Lautsprecher

*Peerless830983.pdf*

Datenblätter Sure Verstärker

*SureTA2024manual.pdf*

*SureTA2024schematic.pdf*