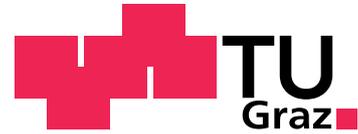


UNIVERSITÄT
FÜR MUSIK UND
DARSTELLEND KUNST
GRAZ - AUSTRIA



Beamforming mit einem Miniatur Line Array

Toningenieur Projekt

ausgeführt am:

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

von

Christian Siller

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. Franz Zotter

Graz, 10. Februar 2010

Kurzfassung

Die Line Array-Technik findet vor allem in der modernen Beschallungstechnik Verbreitung und gewinnt durch sie auch zusehends an Bedeutung. Durch die Herstellung von hochwertigen Kleinlautsprechern und der damit verbundenen Möglichkeit Miniatur Line Arrays zu fertigen, eröffnen sich der Elektroakustik neue Aufgabengebiete und Forschungsmöglichkeiten. Moderne Techniken der Signalverarbeitung machen es zusätzlich möglich die Leistung solcher Miniatur Line Arrays zu steigern und den Anwendungsbereich auszudehnen.

Ziel dieses Projektes ist es einerseits die Übertragungseigenschaften dieser Kleinlautsprecher zu ermitteln. Andererseits gilt es nach Auswertung der Messergebnisse weitere Möglichkeiten eines Miniatur Linearrays transparent zu machen um anschließend Vorschläge einer praktischen Umsetzung aufzuzeigen. Dazu werden anhand der Messdaten mögliche Methoden in MATLAB simuliert. Insbesondere die bekannten Methoden wie Delay & Sum Beamforming und MVDR-Beamforming werden anhand von praktischen Messungen näher analysiert.

Abstract

The line array-technique is often applied in live sound propagation (modern PA-systems) and is becoming more and more important. The production of high quality miniature loudspeakers and the resulting ability to produce mini line arrays opens up a new field of application and new research fields for applied electroacoustic. Modern signal processing technique makes it possible to increase the performance of some mini line arrays and to enlarge the range of application.

The aim of this project is to measure the impulse response of the miniature loudspeakers. After the evaluation of the results, options for controlling miniature line arrays are demonstrated and proposals for a practical application are shown. Therefore, beamforming methods for these arrays have been investigated by simulations in MATLAB using the measured data.

In particular known methods as Delay & Sum-Beamforming, and MVDR are demonstrated and implemented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theorie	5
2.1	Die ideale Linienquelle	5
2.2	Beamformer Simulation	6
2.2.1	Linienstrahler	6
2.3	Messtechnik	10
3	Praxis	11
3.1	Hardware für den Versuchsaufbau	11
3.2	Messung des Arrays	13
3.2.1	Kenndaten Lautsprecher	14
3.3	Beamformingansätze	19
3.3.1	Delay & Sum-Beamformer	19
3.3.2	MVDR-Beamformer	22
3.3.3	Erweiterter MVDR-Beamformer	24
4	Zusammenfassung	28
4.1	Beamformer Simulation	28
4.2	Beamformingansätze	29
4.3	Fazit	29
	Abbildungsverzeichnis	34
	Literaturverzeichnis	34

1 Einleitung

Vertikale Lautsprecheranordnungen finden bereits seit mehreren Jahren eine immer größere Verbreitung. Nicht nur bei der Sprachbeschallung, durch ihre kompakte Bauweise, sondern auch bei Großbeschallungsanlagen trifft man fast ausschließlich nur mehr auf sogenannte LINE ARRAYS. Diese bereits aus den 70er Jahren bekannte Technologie ermöglicht die Beeinflussung der Schallausbreitung. Durch WAVEGUIDS, aber auch durch eine möglichst exakte Winkelung der einzelnen Lautsprecher im Array kann der zu beschallende Bereich gleichmäßig und gezielt mit Direktschall versorgt werden. Dies bringt nicht nur eine bessere Abgrenzung der zu beschallenden Fläche, sondern auch eine Verringerung der Lautstärke für eine äquivalente Beschallungsfläche mit sich.

Wie man sich vorstellen kann, ist eine exakte Winkelung der Einzellautsprecher nicht immer leicht zu bewerkstelligen. Zudem ist es mit einem meist komplizierten und umständlichen mechanischen Aufwand verbunden. Deshalb gab es in den letzten Jahren immer wieder Versuche die Fokussierung der Schallwelle nicht durch mechanische Veränderung der Lautsprecheranordnung, sondern durch die Veränderung der Signale zur Ansteuerung der Lautsprecher-Module zu lösen. Die Weiterentwicklung von DSPs und deren kompakte Bauweise, sowie die Umsetzung digitaler Signalverarbeitung auf diesen, ermöglichen eine technologische Weiterentwicklung der Line Arrays.

Führende namhafte Hersteller von Beschallungsanlagen arbeiten bereits mit solchen DSP- basierenden Systemen und sollen deshalb für einen kurzen (möglicherweise unvollständigen) Marktvergleich herangezogen werden.

Marktvergleich

Das ICONYX Line Array System von RENKUS HEINZ ist ein DSP basiertes vertikales Array. Die Bauweise geht von der kleinsten Ausführung mit acht Lautsprechern, bis hinauf zu 32 Lautsprechern. Wobei es sich dabei um speziell angefertigte Lautsprecher mit 4" und 2" Membranen handelt. Der 4" Lautsprecher ist im Frequenzbereich von 300 - 1 kHz als Kugelstrahler angegeben und oberhalb als gerichteter Lautsprecher in der Halbebene. Die implementierten FIR-Filter können über eine Benutzeroberfläche eingestellt werden. Dafür ist eine gleichzeitige Simulation in EASE möglich. Die Bauweise dieses Arrays reicht von ca. 80 cm bis einigen Metern. Die Anwendung dieses Arrays reicht von Sprachbeschallungsanwendungen bis hin zu einem sogenannten „Full-Range“ Betrieb im Museums- und Auditoriumsbereich. [RenkHeinz]

Von MAYER SOUND gibt es verschiedene theoretische Beschreibungen für die praktische Anwendung der handelsüblichen Line Arrays im Großbeschallungssektor. Dabei wird „DSP-Beam Steering“ mit der hauseigenen Controller-Software MAPP-Online beschrieben, die in Kombination mit genügend Verstärkern und Lautsprecher Controllern ermöglicht. [Meyer]

NXP V-SOUND PANEL (BUTTERFLY)

Das für dieses Projekt zur Verfügung gestellte Lautsprecher Array besteht durch seine kleinen Abmessungen und ist nicht zur Beschallung gedacht. Es sind zwölf Miniatur-Lautsprecher eingebaut (Kolbenmembran); diese werden im Zweikanalmodus (Stereo) betrieben. Die Verstärker für die Lautsprecher sind mit der zugehörigen Schaltung im Gehäuse eingebaut. Die Zuleitung zu den Lautsprechern erfolgt über eine Kontaktplatte direkt hinter den Lautsprechern. Die Versorgungsspannung erfolgt über rückseitig einführbare Batterien. Der Status des Sound Panels ist über die in der Front eingebaute LED zu erkennen. Derzeit ist diese Anordnung nicht zu individueller Ansteuerung ausgelegt



Abbildung 1.1: NXP V-Sound Panel

Motivation

Da sämtliche im Marktvergleich aufgezählten Produkte deutlich größer sind als das NXP Sound Panel, ist gerade dieses für nähere Untersuchungen interessant, da mit diesem Miniatur Line Array neue Anwendungsgebiete erschlossen werden können.

So sind zum Beispiel sämtliche Desktop Applikationen vorstellbar. Das Sound Panel lässt sich hervorragend an der Oberkante von Bildschirmen befestigen. Ein Virtueller Köpfhörer, Stereo Enhancement und ähnliche Anwendungen sind durch eine solche Anordnung denkbar.

Für uns ist es deshalb interessant, die Übertragungseigenschaften dieses Miniatur Line Arrays zu bestimmen. Zudem sollen Ansätze gefunden und implementiert werden, die ein Beamforming ermöglichen. Aus einer Analyse sollen Vor- und Nachteile hervor gehen.

Im Anschluss daran soll zusammenfassend gezeigt werden, was mit dem NXP V-Sound Panel möglich ist, und wo die Grenzen eines solchen Miniatur Line Arrays liegen.

Anmerkung Die Implementierung der Beamforming-Ansätze erfolgt in MATLAB[®] 2007a. Ein Delay & Sum-Beamformer wurde auch in Pure Data getestet.

2 Theorie

2.1 Die ideale Linienquelle

Theoretische Betrachtung einer idealen Linienquelle [Ureda]

Line Arrays finden vor allem dort Anwendung, wo eine engere Abstrahlung notwendig ist. Eine schmale Richtcharakteristik erlaubt es, die Verstärkung zu erhöhen und so gerade in schwierigen akustischen Umgebungen ein besseres Ergebnis zu erzielen, d.h. eine bessere Direktschallversorgung ohne zu viel Nachhall anzuregen.

Gehen wir von einer idealen Linienquelle aus, so ist es theoretisch möglich, unendlich viele Punktquellen nebeneinander anzuordnen. Diese einzelnen Punktquellen werden mit ein und dem selben Signal angesteuert. Dadurch tritt eine rotationssymmetrische Bündelungswirkung auf, also ein zylindrisch abgestrahltes Feld, das hauptsächlich in die Normalebene zu dieser Anordnung bündelt.

Da es aber praktisch nicht möglich sein wird, mit einer idealen Linienquelle zu arbeiten, sind Abstriche hinsichtlich des von der Linienquelle abgestrahlten Schallfeldes zu machen.

Dabei fallen folgende Eigenschaften besonders ins Gewicht:

- Nah- und Fernfeld
- Öffnungswinkel

Zudem nimmt im Gegensatz zu einer einzelnen Punktquelle der Schalldruck weniger mit der Entfernung ab, als bei einer Linienquelle.

In der Praxis gibt es natürlich auch keine perfekten Punktquellen für alle Frequenzen, sondern nur Lautsprecher. Die Abstände zwischen den einzelnen Laut-

sprechern können auch nicht verschwindend klein werden, somit kommt es vor allem bei hohen Frequenzen zu Ungenauigkeiten gegenüber der Theorie einer Linienquelle.

Der erste Schritt um die Richtcharakteristik eines Linienstrahlers herzuleiten ist es, ein Modell für den abgestrahlten Schalldruck zu finden.

2.2 Beamformer Simulation

2.2.1 Linienstrahler

Die Betrachtung der Kombination aus zwei kleinen Quellen bildet die einfachste Vorstufe für den allgemeinen Fall, der aus beliebig vielen diskreten Teilen zusammengesetzten Linienstrahler.

Die Modellanordnung in Abbildung 2.1 mit dem benutzten Kugelkoordinatensystem zeigt zwei Quellen auf der z -Achse, die im Abstand h voneinander angeordnet sind. Es ergibt sich ein rotationssymmetrisches Schallfeld. [Mös]

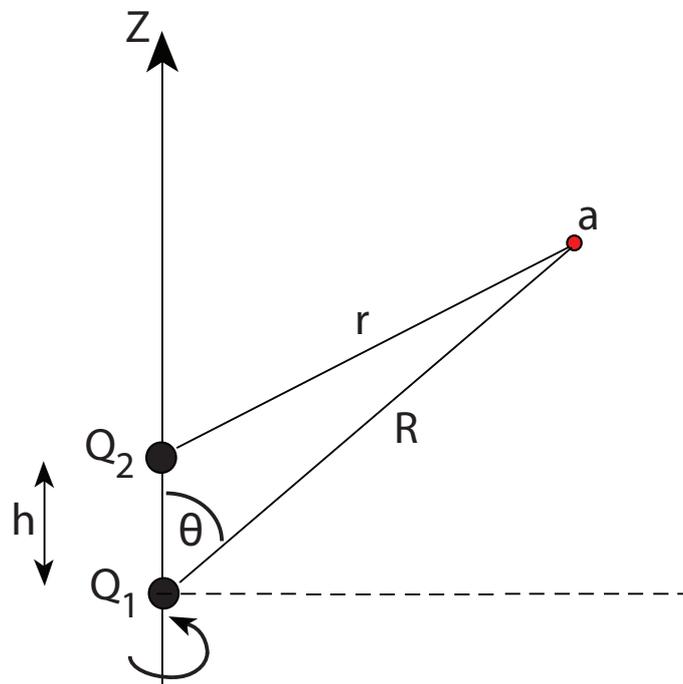


Abbildung 2.1: Modellanordnung mit 2 Quellen

Mit den Beziehungen von Kugelwelle

$$p = \frac{A}{r} \cdot e^{-j\omega\Delta t} \quad (2.1)$$

und des Volumenfluss

$$Q = 4\pi \cdot a^2 \cdot v_a \quad (2.2)$$

erhält man die Gleichung 2.3. Für Punktquellen kann der Schalldruck im Aufpunkt mit

$$p = v_a \cdot \frac{e^{-jkr}}{4\pi \cdot r} \quad (2.3)$$

angegeben werden.

v_a ... Schallschnelle

k ... Wellenzahl

Wobei diese Berechnung im Frequenzbereich mit $k = \frac{\omega}{c}$ durchgeführt wird.

Allgemein gilt für das Schallfeld der beiden Quellen

$$p = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ Q_1 \frac{e^{-jkR}}{R} + Q_2 \frac{e^{-jkr}}{r} \right\} \quad (2.4)$$

Wegen der Linearität der Wellengleichung besteht das Schallfeld einfach aus der Summer der Teile.

Realisierung in Matlab

Mit dem mathematischen Modell eines linearen LS-Array mit Punktquellen, kann eine Realisierung in MATLAB erfolgen. Dazu wird der Phasenterm zur Berechnung der Schallschnelle herangezogen. Dadurch ist unter Berücksichtigung der Delayzeit Δt vom Aufpunkt zu jedem Lautsprecher die phasenrichtige Summation der Lautsprechergewichte im Aufpunkt a möglich. Die Berechnung für Δt ist in Abbildung 2.2 schematisch für einen Lautsprecher dargestellt.

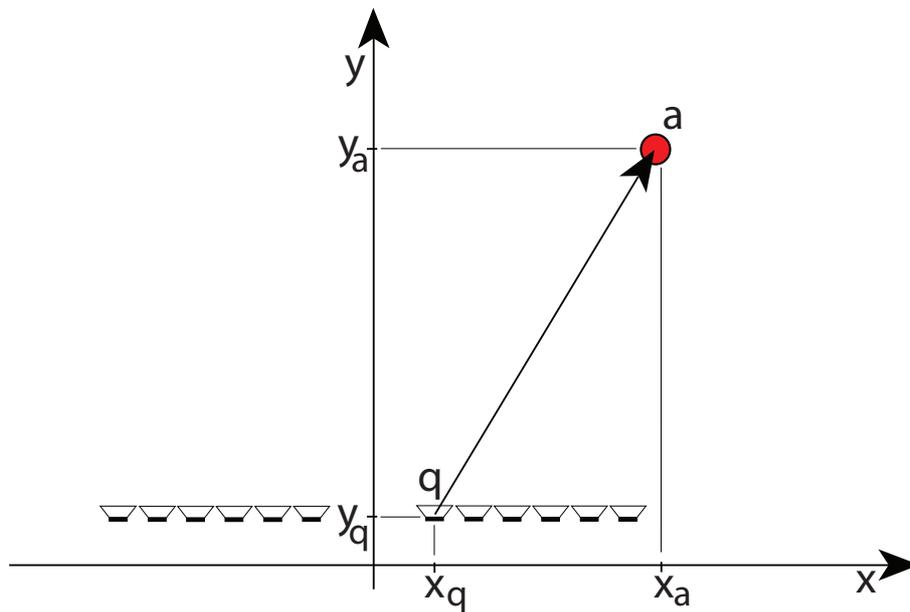


Abbildung 2.2: Delayberechnung im Aufpunkt a

$$v_a = v_0 \cdot e^{-j\omega\Delta t} \quad (2.5)$$

$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s}$... Bezugsschallschnelle

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(x_q - x_a)^2 + (y_q - y_a)^2}}{c} \quad (2.6)$$

x_q ... x-Koordinate Quellpunkt

y_q ... y-Koordinate Quellpunkt

x_a ... x-Koordinate Aufpunkt

y_a ... y-Koordinate Aufpunkt

Beamformer GUI

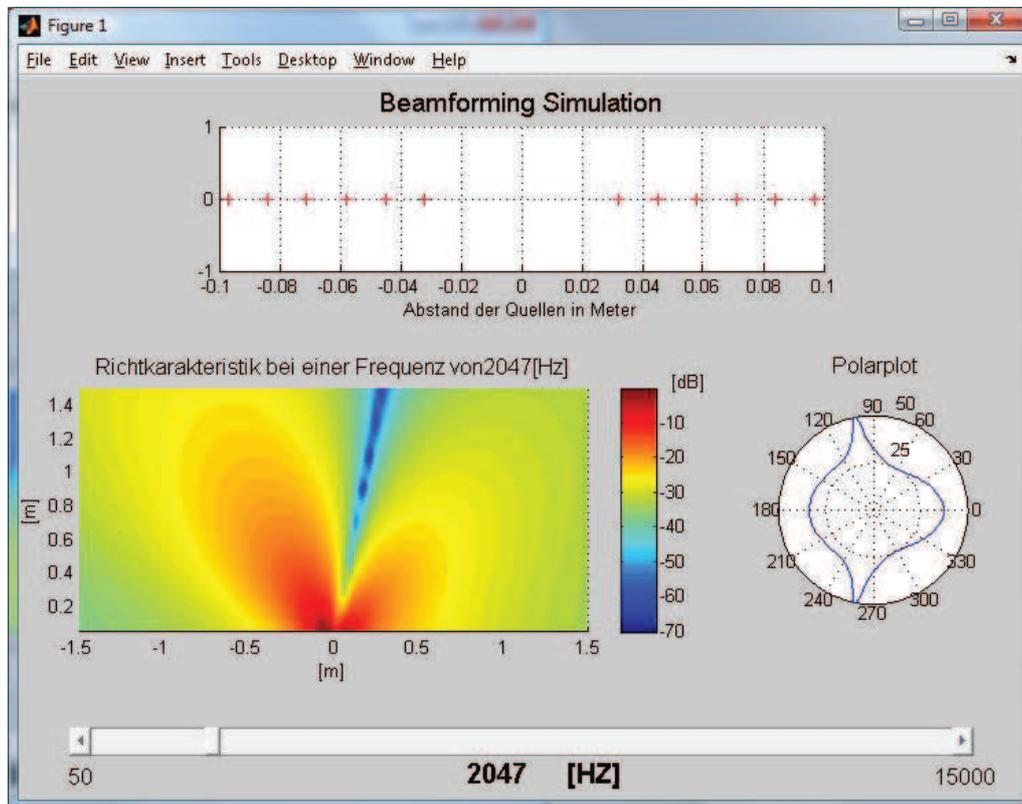


Abbildung 2.3: Matlab-GUI der Beamformer Simulation

In der GUI ist in der oberen Hälfte die Anordnung der Quellen zu sehen. Durch einfaches Klicken in den Plot, lässt sich der Beam in die gewünschte Richtung lenken und in der darunterliegenden Scrollbar lässt sich die gewünschte Frequenz einstellen. Rechts von der Beamformerdarstellung ist noch ein Polarplot des Beamformers zu sehen.

2.3 Messtechnik

Exponentieller Sweep

In Gleichung 2.7 ist der Sweep beschrieben. Dieser wird zur Gewinnung der Impulsantwort in die Frequenzdomäne transformiert. Dadurch ist eine Multiplikation des inversen Sweep mit den gemessenen Daten möglich. Nach Rücktransformation in den Zeitbereich erhält man die Impulsantwort $h(t)$ wie es aus Gleichung 2.9 hervorgeht.

Sweep

$$x(t) = \sin \left[A \left(e^{\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right] \quad (2.7)$$

Berechnung der Impulsantwort

Aus den gemessenen Sweepantworten $y(t)$ und dem Sweep $x(t)$ kann die Impulsantwort $h(t)$ bestimmt werden. Dazu wird sowohl die gemessene Sweepantwort, als auch der Sweep in die Frequenzdomäne transformiert. Dadurch ist eine Multiplikation von Sweepantwort $Y(\omega)$ im Frequenzbereich und der inversen des Sweeps $X(\omega)^{-1}$ möglich.

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega) \Rightarrow H(\omega) = Y(\omega) \cdot X(\omega)^{-1} \quad (2.8)$$

Nach Rücktransformation der Frequenzantwort in den Zeitbereich erhält man die Impulsantwort

$$h(t) = IDFT(H(\omega)) \quad (2.9)$$

3 Praxis

3.1 Hardware für den Versuchsaufbau

Das von NXP zur Verfügung gestellte V-Sound Panel wurde in der Projektarbeit zur individuellen Ansteuerung der Lautsprecher umgebaut. Für einen Beamformer mit einstellbarer Bündelungsrichtung ist diese individuelle Ansteuerbarkeit mit geeignet aufbereiteten Signalen eine Voraussetzung. Nur so kann Amplitude und Phase der einzelnen Lautsprecher getrennt voneinander manipuliert werden.

Da für den Versuchsaufbau die bestehenden Komponenten des V-Sound Panels verwendet werden sollen, war es notwendig aus mehreren Geräten die Verstärkerplatine auszubauen und in ein separates Gehäuse zu geben. Die Einzellautsprecher L1 - L12 werden nun über die Zuleitung wie es aus Abbildung 3.3 zu erkennen ist angesteuert. Die Stromversorgung erfolgte weiterhin durch Batterien. Um den Betriebszustand eindeutig zu erkennen wurden die Status LED's aus dem V-Sound Panel beibehalten.

Zur flexiblen Ansteuerung an einer beliebigen Soundkarte wurde noch eine Sub-D Buchse montiert und das entsprechende Kabel (D-Sub25) auf zwölf mal Monoklinke konfektioniert.



Abbildung 3.1: Miniatur Line Array für Beamformer

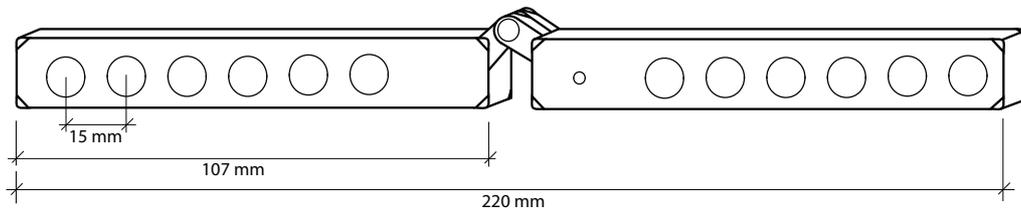


Abbildung 3.2: Abmessungen des Miniatur Line Arrays



Abbildung 3.3: Ansteuerung des umgebauten Sound Panels

3.2 Messung des Arrays

Zur Messung des NXP Sound Panels wird die in Kapitel 2 beschriebene exponentielle Sweeptchnik verwendet. Sie bringt den Vorteil eines höheren Signal-Rauschabstandes im Vergleich zu anderen Messtechniken mit sich. Nachdem das NXP Sound Panel nur kleine Schallpegel erreichen kann, ist das von entscheidender Bedeutung. In der Abbildung 3.4 ist die Messanordnung zu sehen. Gemessen wurde mit den 18, auf einem halbkreis förmigen Holzbrett angeordneten Mikrofonen.

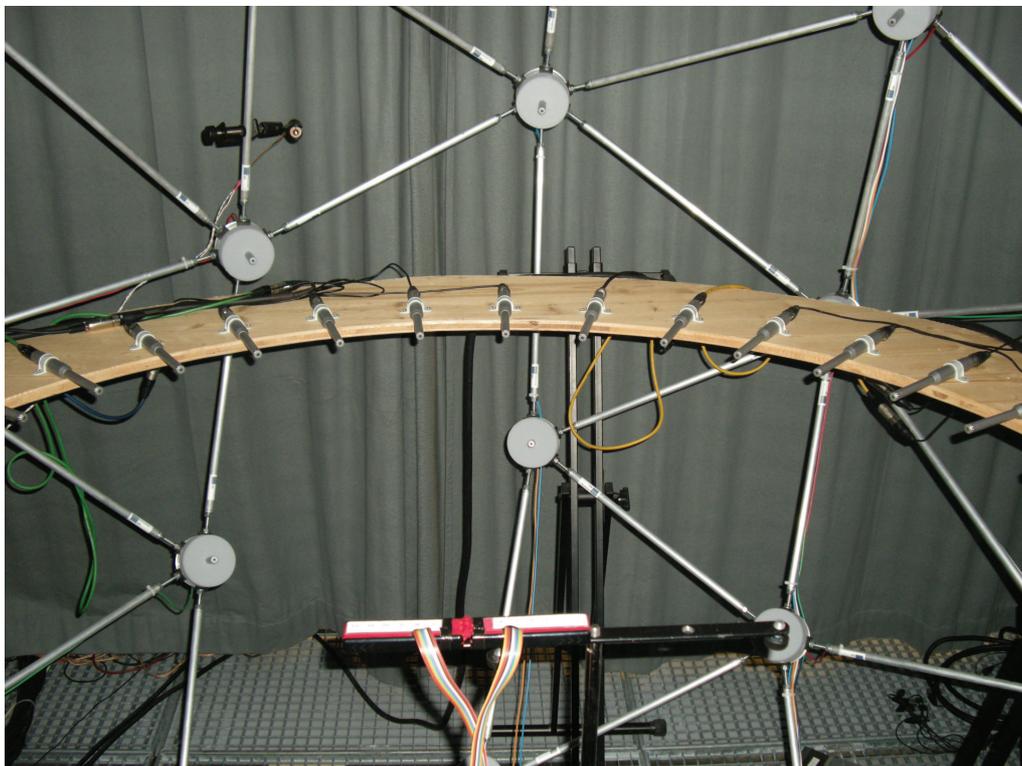


Abbildung 3.4: Exponentielle Sweep Messung

3.2.1 Kenndaten Lautsprecher

Aus den gemessenen Impulsantworten können nun die Kenndaten, insbesondere die Abstrahlcharakteristik des Sound Panels, bzw. der Einzellautsprecher gewonnen werden.

Gewinnung der Abstrahlcharakteristik

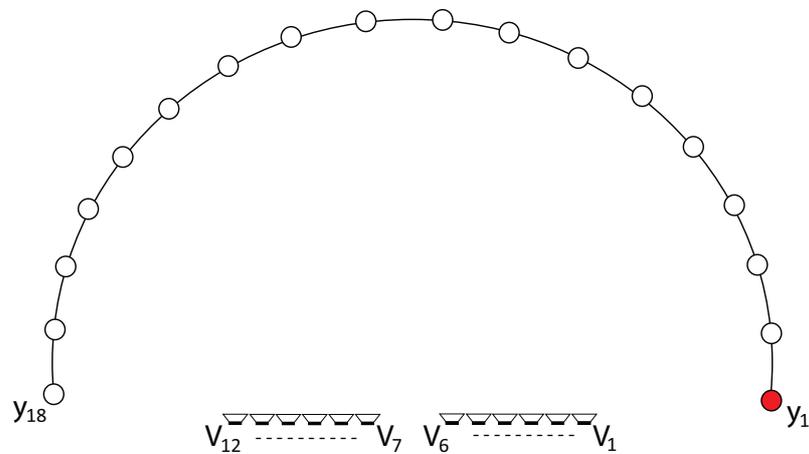


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Messung: Alle LS an Mic1

Gemessen wurde mit einer Abtastfrequenz von 44.100 kHz und einer Länge der Impulsantworten mit $N = 1024$.

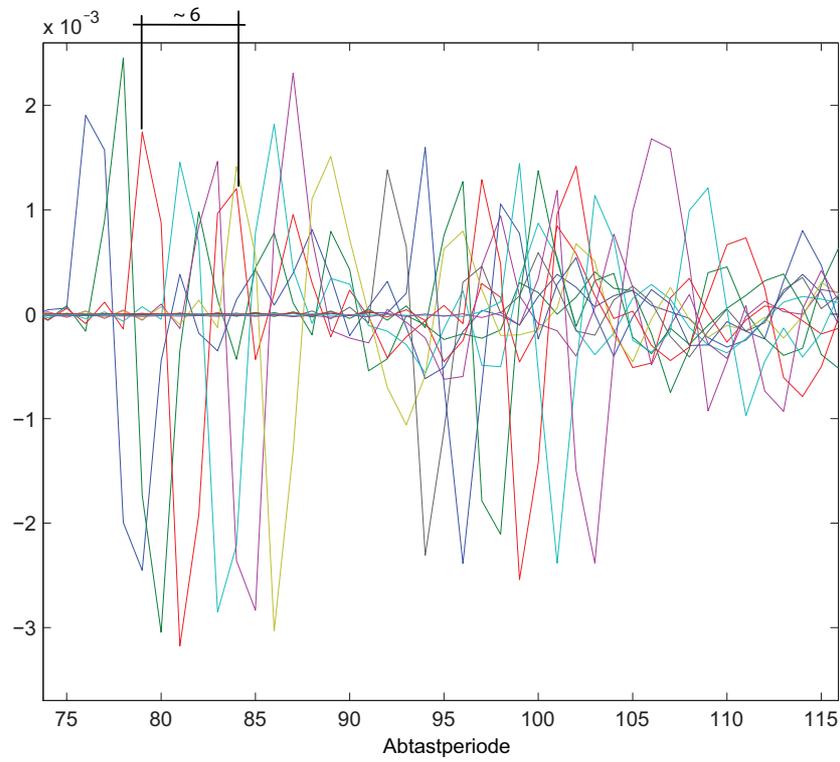


Abbildung 3.6: Impulsantworten aller Lautsprecher an Messposition 1 (dargestellt vom 75 bis zum 115 Abtastwert)

In der Abbildung 3.6 ist ein vergrößerter Ausschnitt der Impulsantworten zu sehen. Zu erkennen ist die Verzögerung der Einzellautsprecher. Bei genauerem Hinsehen ist ab dem zweiten Lautsprecher ein zweites Maximum nach ca. 6 Abtastperioden zu sehen. Dies entspricht einem ungefähren Abstand von 4 cm. Daraus ist zu schließen, dass es sich offenbar um eine Reflexion vom Gehäuse selbst handelt.

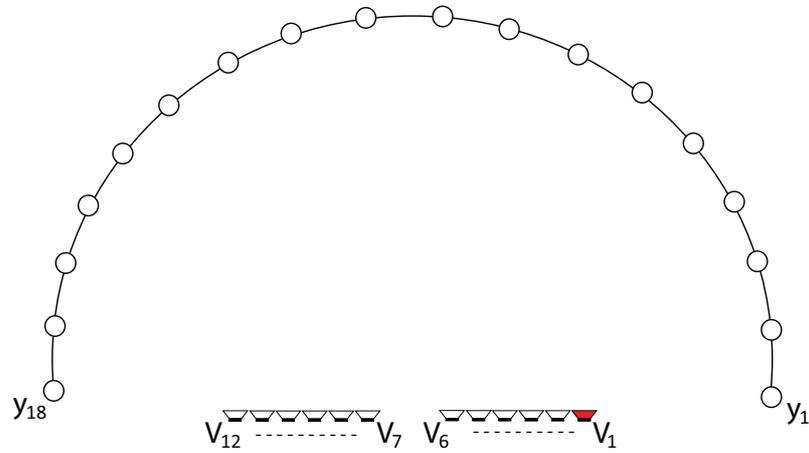
Impulsantworten des ersten Lautsprechers an allen Messpositionen

Abbildung 3.7: Schema des Messaufbaus: LS1 an allen Messpunkten

Für eine bessere Erkennbarkeit des Messaufbaus sei hier noch die schematische Darstellung für das folgende Messergebnis dargestellt. Die Impulsantworten des rot gekennzeichneten Lautsprechers sind in Abbildung 3.8 zu sehen.

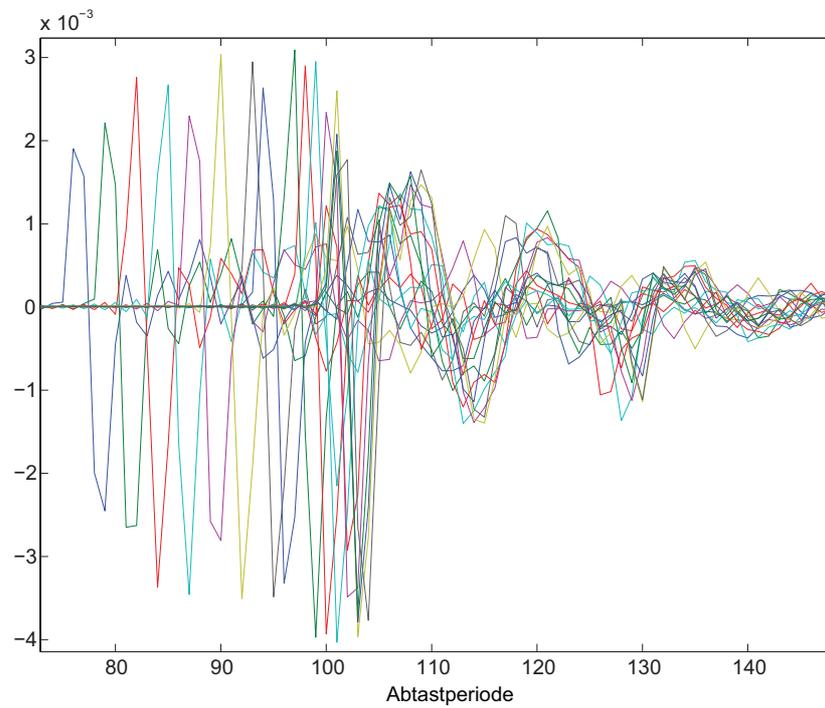


Abbildung 3.8: Impulsantworten LS1 an allen Messpunkten

Die Verzögerung des Direktschallimpulses des ersten Lautsprechers über alle Messpositionen ist in Abbildung 3.8 gut zu erkennen. Wobei es bei den letzten vier Mikrofonen zu einer starken Überlappung der Impulsantworten kommt. Dies resultiert aus der Geometrie der halbkreisförmigen Mikrofonanordnung. Die Laufzeiten des Arrays zu den Messpositionen 15 – 18 sind nahezu ident.

Um eine Aussage über die im Array verwendeten Einzellautsprecher treffen zu können, ist in Abbildung 3.10 die Richtcharakteristik bei verschiedenen Frequenzen zu sehen.

Die **Richtcharakteristik des Einzellautsprechers** wird aus der Impulsantwort des sechsten Lautsprechers gewonnen.

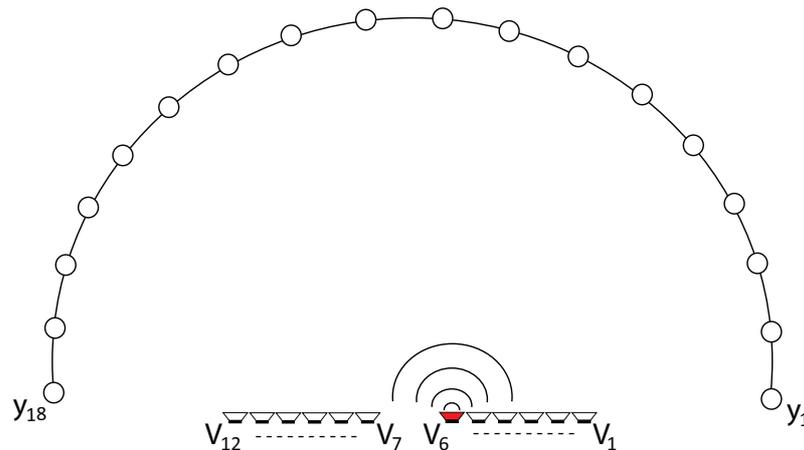


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der Messung des Einzellautsprechers

Bei tiefen Frequenzen weist die Abstrahlung die Eigenschaften eines Kugelstrahlers auf. Mit steigender Frequenz nimmt allerdings auch die Richtwirkung des Lautsprechers zu. So ist zum Beispiel bei 3,15 kHz eine deutliche Richtwirkung zu sehen, wobei die Pegelanhebung zur Mitte hin sogar 10 dB beträgt. Aus diesem Diagramm ist auch der große Pegelunterschied bei verschiedenen Frequenzen zu erkennen. Die Pegel bei tiefen Frequenzen liegen z.B. in manchen Bereichen um 40 dB tiefer als jene bei hohen Frequenzen.

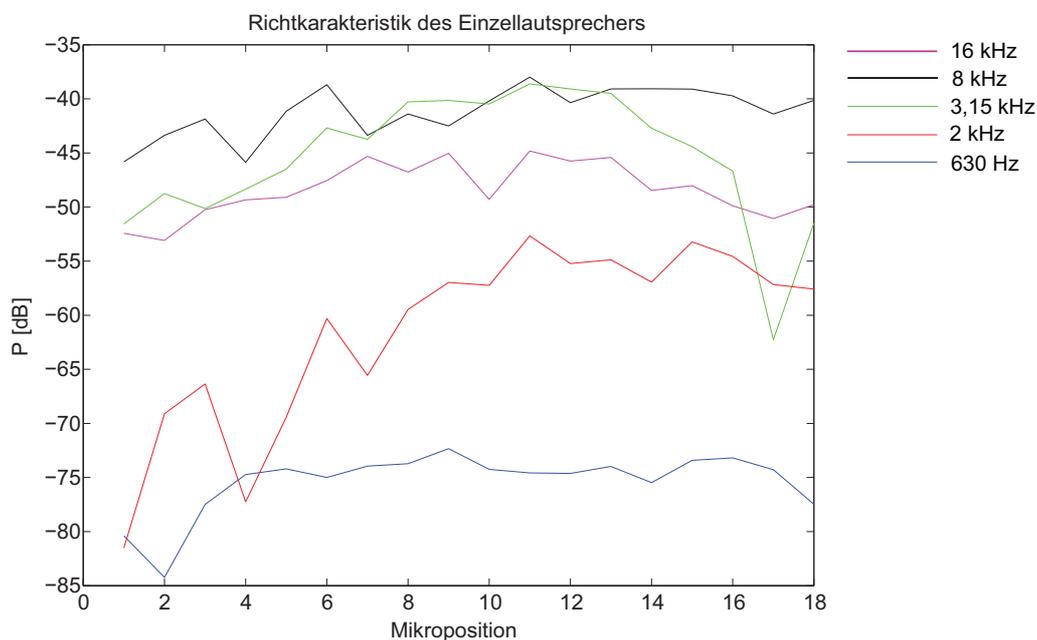


Abbildung 3.10: Richtcharakteristik des Einzellausprechers

3.3 Beamformingansätze

3.3.1 Delay & Sum-Beamformer

Der in Abbildung 3.11 dargestellte Delay & Sum-Beamformer stellt die einfachste Variante eines Beamformers da. Dabei werden die Signale $X_i(k)$ verzögert, sodass sich die akustischen Signale an einem Punkt konstruktiv überlagern.

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t - t_i) \quad (3.1)$$

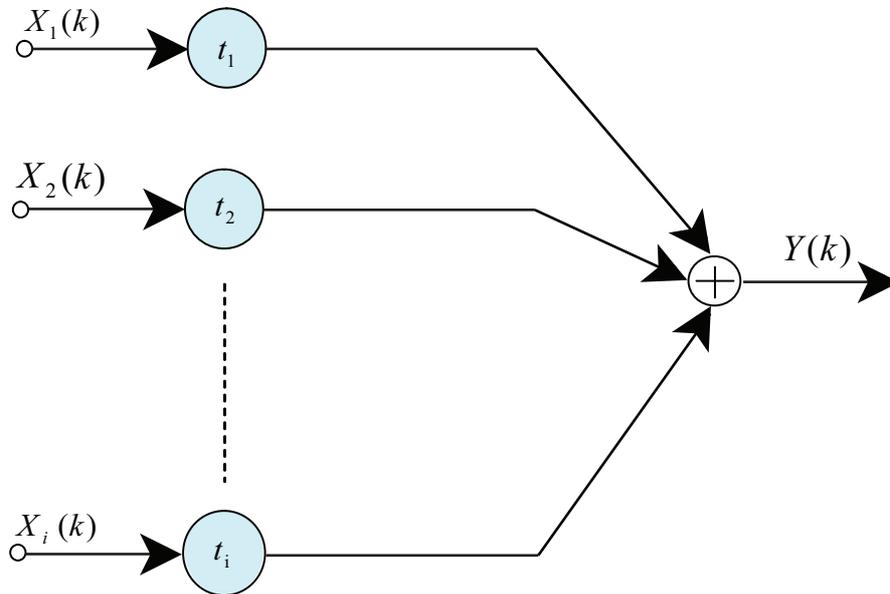


Abbildung 3.11: Struktogramm eines Delay & Sum-Beamformers

Realisierung in Matlab

Die Verzögerungszeit zum weitest entfernten Lautsprecher ergibt die maximale Verzögerungszeit, aus dem sich die Differenz zu den jeweilig anderen Verzögerungszeiten der Lautsprecher berechnen lässt. Daraus ergibt sich die Matrix zur Berechnung des Delay & Sum-Beamformers in Matlab. Da die Verzögerungszeiten für den Aufpunkt über die Gleichung 3.3 im Frequenzbereich eingestellt werden, ist es bei der Implementierung des Beamformer-GUI einfacher eine Vorgabe für die Betrachtung des Schallabstrahlung bei nur einer Frequenz zu machen.

$$\tau_{ls} = \max(\Delta n_{ls}) - \Delta n_{ls} \quad (3.2)$$

τ_{ls} ... Vektor mit den Delay & Sum-Verzögerungszeiten

Δn_{ls} ... Verzögerungszeiten der LS aus Geometriebeziehungen zum Aufpunkt

Damit kann die Verzögerungszeit für jeden Lautsprecher nach Formel 3.3 für eine kohärente Überlagerung berechnet werden.

$$\mathbf{Del}_{ls} = e^{-i \cdot \omega \cdot \tau_{ls}} \quad (3.3)$$

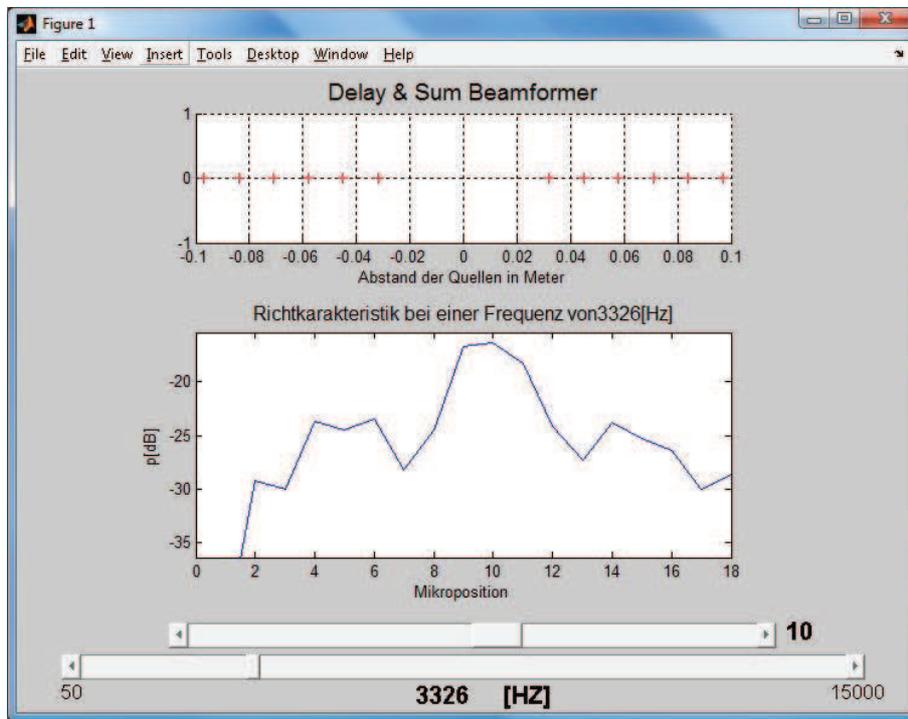


Abbildung 3.12: Matlab-GUI des Delay & Sum-Beamformer

\mathbf{Del}_{l_s} ... Vektor der Verzögerungen für jeden Lautsprecher

Mit der Frequenzantwort $\mathbf{H}_{l_s}(\omega)$ der Einzellautsprecher ergibt sich damit für den Schalldruck im Aufpunkt des Beamformers:

$$p(\omega) = \mathbf{H}_{l_s}(\omega) \cdot \mathbf{Del}_{l_s} \quad (3.4)$$

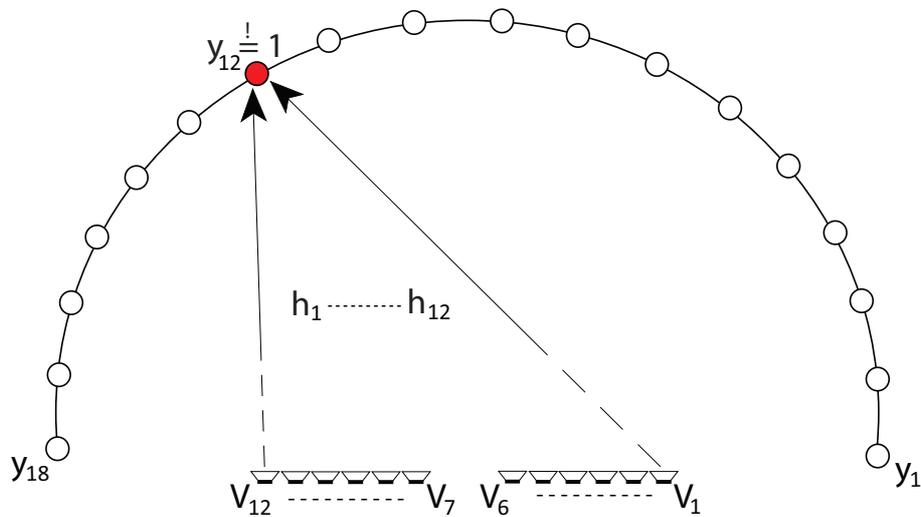


Abbildung 3.13: Darstellung des MVDR-Prinzip

3.3.2 MVDR-Beamformer

MVDR – MINIMUM VARIANZ DISTORTIONLESS RESPONSE

Es soll die quadratische Gleichung gelöst werden, indem die Varianz, die im hier vorliegenden Fall die abgestrahlte Energie repräsentiert, minimiert wird. Dazu ist noch die Nebenbedingung aus dem Ansatz 3.5 erforderlich, da ein triviales Minimum bei $v = 0$ liegen würde. Damit soll sichergestellt werden dass, $v_a = 0$ unzulässig ist und im Aufpunkt des Beamformers der Einheitspegel herrscht. Beispielsweise wie in Abbildung 3.13 soll der Pegel im Punkt $y_{12} = 1$ betragen. In allen anderen Punkten $y_1 - y_{11}$ und $y_{13} - y_{18}$ soll die Energie minimiert werden.

Mit diesen Voraussetzungen kann der Ansatz zur Lösung des Gleichungssystem angeschrieben werden:

Ansatz:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^H \mathbf{v} &\Rightarrow \text{Minimum} \\ \mathbf{h}^H \mathbf{v} &= 1 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$J(\mathbf{v}) = \mathbf{v}^H \mathbf{v} + \lambda (\mathbf{h}^H \mathbf{v} - 1) \quad (3.6)$$

$v \dots$ Gewichte der Lautsprecher

$h \dots$ Impulsantworten

$\lambda \dots$ Lagrange-Multiplikator

und das System für die Extremwerte in λ und v lösen.

$$\frac{\partial J(\mathbf{v})}{\partial \lambda} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \mathbf{h}^H \mathbf{v} - 1 \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial J(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow 2\mathbf{v}^H + \lambda \mathbf{h}^H \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.8)$$

$$\mathbf{v}_{opt} = \frac{\mathbf{h}^H}{\|\mathbf{h}\|^2} \quad (3.9)$$

Im Unterschied zum reinen Delay & Sum-Beamformer wird die Amplitude des Beams hier stets auf 0 dB normiert. Ansonsten ergeben sich qualitativ ähnliche Resultate.

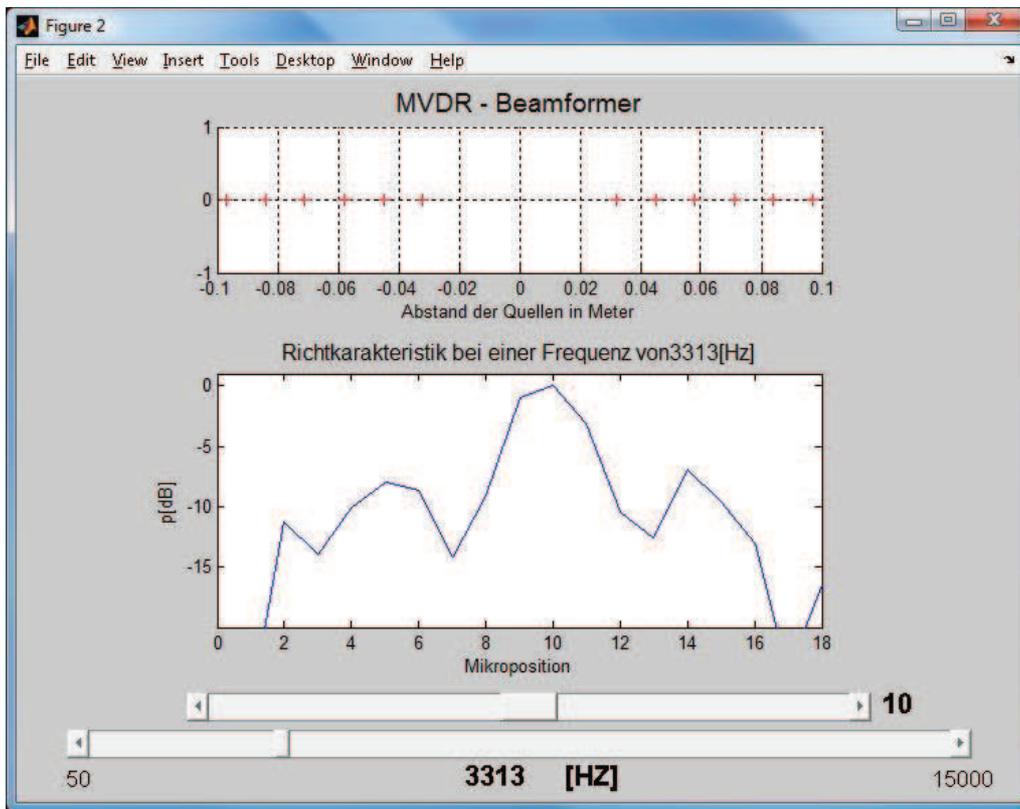


Abbildung 3.14: Matlab-GUI des MVDR-Beamformer

3.3.3 Erweiterter MVDR-Beamformer

Bei dieser Variante des MVDR-Beamformers wird die quadratische Gleichung 3.10 um die Matrix \mathbf{G}^H erweitert. Wobei darin die Impulsantworten von jedem Lautsprecher zu jedem Mikrofon enthalten sind. Damit wird der Schalldruck direkt im Richtdiagramm minimiert.

Ansatz:

$$\mathbf{v}^H \mathbf{G} \mathbf{G}^H \mathbf{v} \Rightarrow \textit{Minimum} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{h}^H \mathbf{v} = 1 \quad (3.11)$$

$$\mathbf{G}^H = \begin{pmatrix} g_{1,1}^* & \cdots & g_{12,1}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{1,18}^* & \cdots & g_{12,18}^* \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Mit diesem Ansatz kann die Gleichung

$$J(\mathbf{v}) = \mathbf{v}^H \mathbf{G} \mathbf{G}^H \mathbf{v} + \lambda (\mathbf{h}^H \mathbf{v} - 1) \quad (3.13)$$

gelöst werden.

$$\frac{\partial J(\mathbf{v})}{\partial \lambda} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \mathbf{h}^H \mathbf{v} - 1 \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.14)$$

$$1 = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{h}^H (\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1} \mathbf{h} \quad (3.15)$$

Und mit der Ableitung nach \mathbf{v} ergibt sich:

$$\frac{\partial J(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow 2\mathbf{v}^H \mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{h}^H = 0 \quad (3.16)$$

$$\mathbf{v} = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{h}^H (\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1} \quad (3.17)$$

Nach einsetzen in die Gleichung ergibt sich für \mathbf{v}_{opt} folgender Ausdruck:

$$\mathbf{v}_{opt} = \frac{\mathbf{h}^H (\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1}}{\mathbf{h}^H (\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1} \mathbf{h}} \quad (3.18)$$

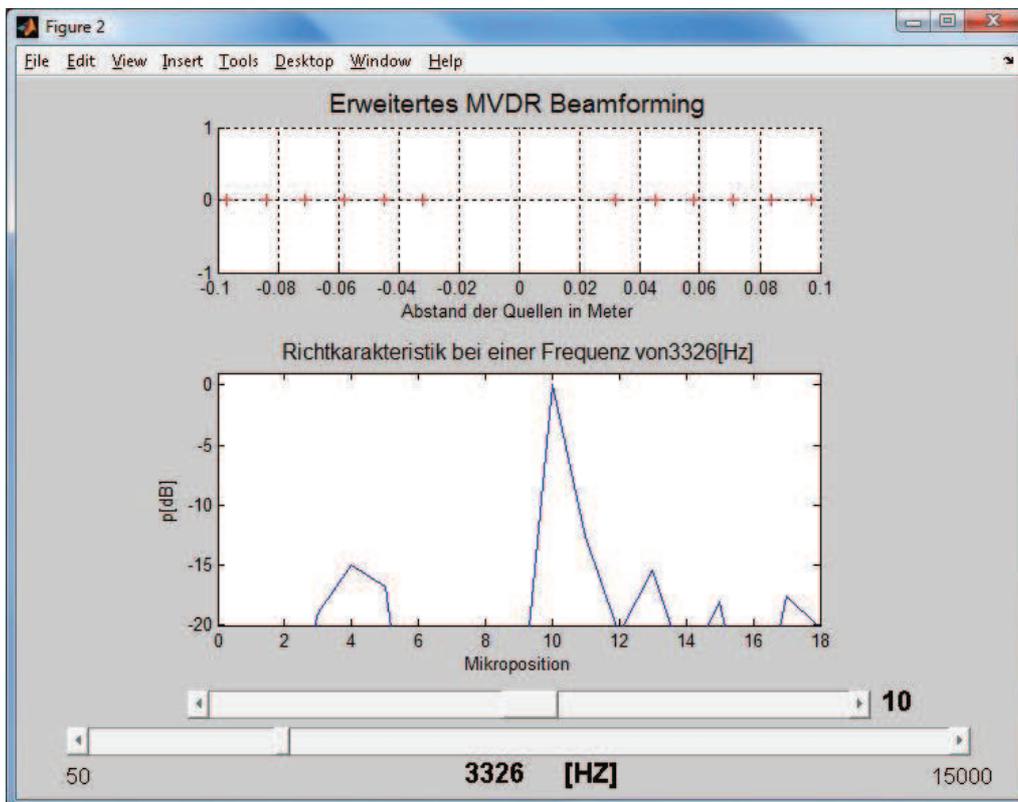


Abbildung 3.15: Matlab-GUI des erweiterten MVDR-Beamformer

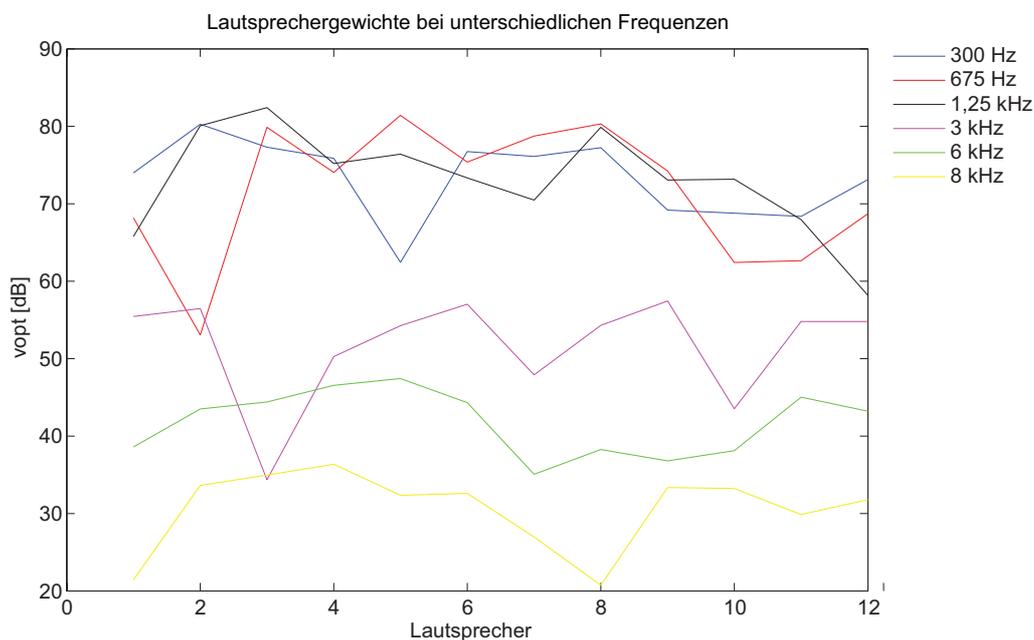


Abbildung 3.16: Gewichte der Lautsprecher bei unterschiedlichen Frequenzen

Bei dieser Erweiterung des MVDR-Beamformers ist natürlich zu bedenken, dass die Gewichte der Lautsprecher praktisch nicht beliebig groß werden dürfen. Sie können zwar begrenzt werden, um den Lautsprecher vor eventueller Zerstörung zu schützen. Noch interessanter ist es aber die Gewichte der Lautsprecher bei unterschiedlichen Frequenzen zu betrachten, um zu sehen ob der Dynamikumfang der Gewichte technisch realisierbar ist.

In Abbildung 3.16 sind die Gewichte des MVDR-Beamformers dargestellt und es wird klar dass es schwierig ist, diesen Dynamikumfang technisch zu realisieren. Dabei ist nicht der unterschied einer einzelnen Frequenz an einem Lautsprecher das Problem, sondern der Frequenzgang des Einzellautsprechers von tiefen zu hohen Frequenzen.

4 Zusammenfassung

4.1 Beamformer Simulation

Grenzwerte des MLA theoretisch

Aus den Abmessungen des Miniatur Line Arrays lässt sich eine untere Grenzfrequenz von 780 Hz berechnen. Mit der Länge des Arrays dem die halbe Wellenlänge entspricht kann diese mit

$$f_{low} = \frac{c}{2 \cdot l} \quad (4.1)$$

berechnet werden.

$c = 340 \frac{m}{s}$... Schallgeschwindigkeit

$l = 22cm$... Arraylänge

Die obere Grenzfrequenz wird aus dem Abstand der einzelnen Speaker berechnet und gibt an ab welcher Frequenz es zu Aliasing kommt.

$$f_{high} = \frac{c}{a} \quad (4.2)$$

$a = 1.5cm$... Abstand der Einzellausprecher

4.2 Beamformingansätze

Delay & Sum-Beamformer

Bei der Analyse des Delay & Sum-Beamformers sind einerseits die theoretisch berechneten Grenzbereiche zu erkennen, noch deutlicher wird aber bei der Simulation die Richtwirkung zur Mitte hin. Wobei es bei Frequenzen unterhalb von 1 kHz bzw. oberhalb von 4 kHz zu keinem ausgeprägten Beamforming kommt.

MVDR-Beamformer

Bei diesem Ansatz des Beamformings kommt es zu keinen nennenswerten Unterschieden im Vergleich zum Delay & Sum-Beamformer. Der Unterschied liegt lediglich in der Skalierung. Die Beams sind aber auch hier nur in einem sehr eingeschränkten Frequenzbereich zu erkennen.

Erweiterter MVDR-Beamformer

Erst bei der Erweiterung des MVDR-Beamformers kommt es zu einer Bündelung bei allen Frequenzen. In der implementierten GUI ist ein Beam mit genügend großem Pegelabstand zu den benachbarten Beams zu sehen. Der Hauptbeam liegt wie es die Berechnung erfordert immer bei 0 dB.

4.3 Fazit

Die anfangs erstellte Simulation eines Beamformers zeigt deutlich, dass es auch mit einem Miniatur Line Array möglich ist, einen Beamformer zu realisieren. Die Einzelauslautsprecher des verwendeten Arrays sind aber durch die hohe Richtwirkung nicht unbedingt für eine gezielte Beeinflussung der Schallabstrahlung geeignet. Es lässt sich jedoch mit diesem Array unter Zuhilfenahme komplexer Beamformingalgorithmen ein Beamformer simulieren. Die praktischen Grenzen liegen klar in der praktischen Umsetzung des Dynamikbereiches, bzw. in der Beschränkung der berechneten Gewichte.

Die untere Grenzfrequenz, bedingt durch die Abmessung des Arrays spielt keine wesentliche Rolle, da es bei tiefen Frequenzen ohnehin keine Richtwirkung erzeugt werden kann. Zu hohen Frequenzen hin ist das Miniatur Line Array unproblematisch. Die kleine Bauweise des Arrays ist nach wie vor interessant für Desktop-Anwendungen. Mit den hier implementierten Ansätzen konnte gezeigt werden dass ein Beamforming möglich ist, aber die Lautsprecher nicht unbedingt für diese Anwendung geeignet sind.

Zum einen können die verwendeten Beamforming-Ansätze für Weiterentwicklungen des Miniatur Line Arrays herangezogen werden, zum anderen sind künftigen Ergebnisse mit den theoretischen Berechnungen, sowie der Beamformer-Simulation zu vergleichen.



Ultra-portable sound panels

Philips Sound Solutions ultra-portable speakers for sharing music anytime, anywhere

Designed for use with mobile phones and other handheld devices, these innovative sound panels deliver optimized stereo sound yet are small enough to fit easily into a pocket or purse.

Key features

- Innovative, inspiring design
- Simple market delivery
- True go-anywhere portability
 - Small, lightweight format
 - Miniature speaker components with a diameter of only 13 mm
 - Low power consumption
 - Very compact design
- Scalable technology can be ported to other formats
- High-volume, high-quality manufacturing with excellent reliability

Applications

- Mobile handsets
- Portable music players
- Gaming devices
- Portable video players

These eye-catching sound panels from Philips Sound Solutions let consumers share music and other audio content anytime, anywhere.

Folded together, they're small enough to fit into a pocket or purse. Unfolded, they deliver great stereo sound.

They are a truly distinguished sound accessory, combining innovative, inspiring package design with high-performance sound technology. They consume very little power yet deliver superior audio, creating a truly portable speaker solution for mobile phones, portable music players, gaming devices, and other mobile applications.

The core component is a miniature speaker with a diameter of only 13 mm. Using Philips LifeVibes Concert Sound software, the stereo sound can be enhanced even further.

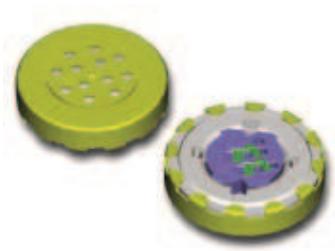
For handset and audio manufacturers, the pressure to bring increasingly smaller systems to market in less time makes it hard to optimize sound quality when speakers are integrated into the end product. In many cases, for the highest possible sound performance, an external speaker is the best approach.

For end consumers, the sound panels create a better sound experience and increase flexibility on the go. They make time spent in a hotel room, on the beach, or at outdoor activities more fun, and make it easy to share mobile music with friends.

To ensure excellent durability as well as high performance, the sound panels build on more than 75 years of leadership in acoustics and sound algorithms.

Philips Sound Solutions

Philips Sound Solutions has produced more than two billion mobile-phone speakers and receivers and is the market leader in mini-acoustic solutions for telecom applications. With manufacturing sites and application support centers in Beijing and Vienna, Philips Sound Solutions offers fully automated, high-volume production for standard products and semi-automated or manual production for low-volume, specialty products.



The speakers used in the sound panels have a diameter of only 13 mm

Philips Semiconductors
Philips Semiconductors is one of the world's top semiconductor suppliers, with 20 manufacturing and assembly sites and a sales organization that delivers in 60 countries.
For a complete up-to-date list of our sales offices please visit our website <http://www.semiconductors.philips.com/sales>

©2006 Koninklijke Philips Electronics N.V.
All rights reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner.
The information presented in this document does not form part of any quotation or contract, is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent- or other industrial or intellectual property rights.

date of release: January 2006
document order number: 9397 750 15432
Printed in the Netherlands



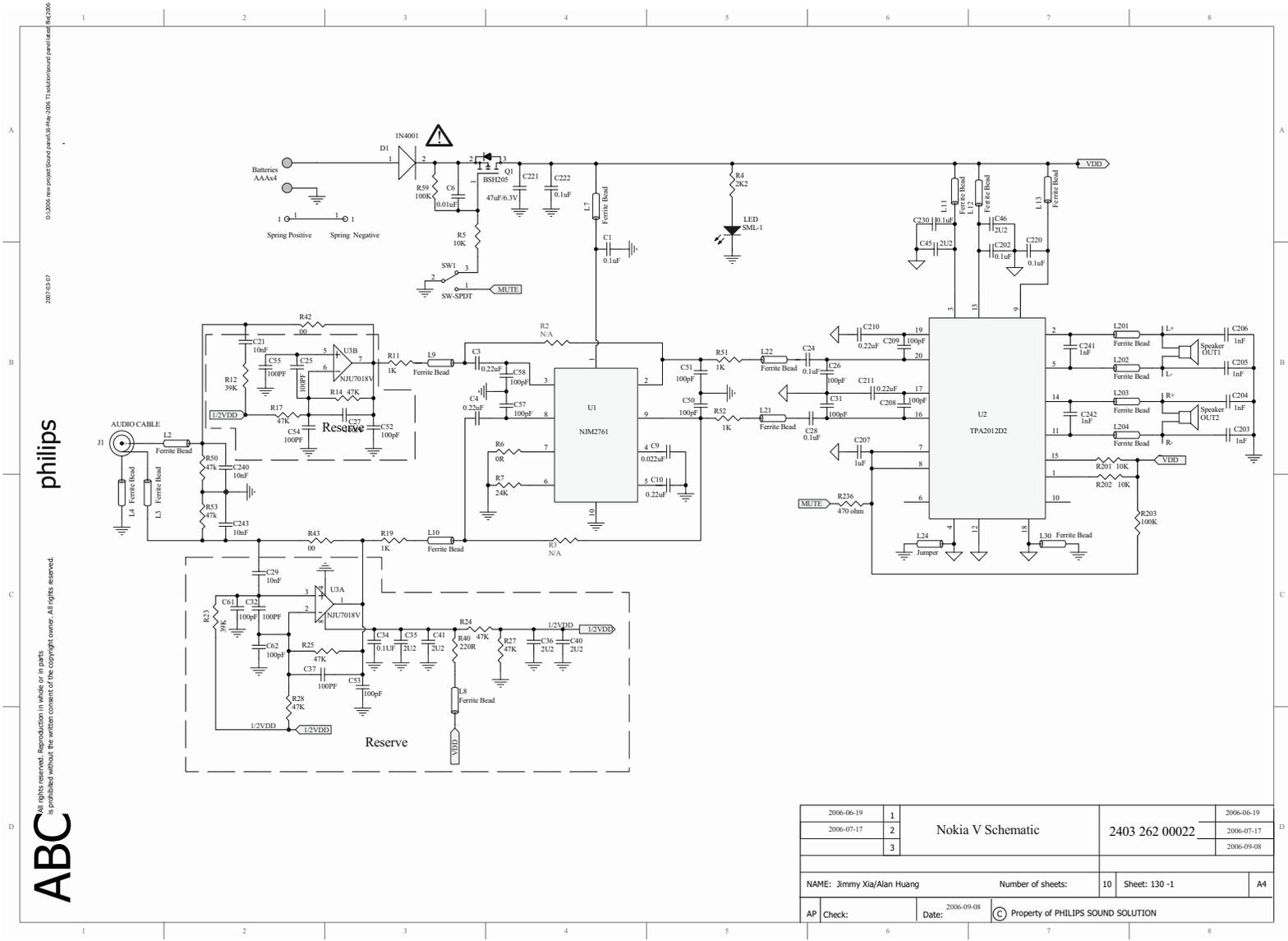


Abbildung 1: Sound Panel Schematic

2006-06-19	1	Nokia V Schematic	2006-06-19
2006-07-17	2		2403 262 00022
	3		2006-07-17
			2006-09-08
NAME: Jimmy Xia/Alan Huang		Number of sheets:	10
		Sheet:	130 -1
			A4
AP Check:	Date: 2006-09-08	© Property of PHILIPS SOUND SOLUTION	

Abbildungsverzeichnis

1.1	NXP V-Sound Panel	4
2.1	Modellanordnung mit 2 Quellen	6
2.2	Delayberechnung im Aufpunkt a	8
2.3	Matlab-GUI der Beamformer Simulation	9
3.1	Miniatur Line Array für Beamformer	11
3.2	Abmessungen des Miniatur Line Arrays	12
3.3	Ansteuerung des umgebauten Sound Panels	12
3.4	Exponentielle Sweep Messung	13
3.5	Schematische Darstellung der Messung: Alle LS an Mic1	14
3.6	Impulsantworten aller Lautsprecher an Messposition 1 (dargestellt vom 75 bis zum 115 Abtastwert)	15
3.7	Schema des Messaufbaus: LS1 an allen Messpunkten	16
3.8	Impulsantworten LS1 an allen Messpunkten	17
3.9	Schematische Darstellung der Messung des Einzellautsprechers	18
3.10	Richtcharakteristik des Einzellautsprechers	19
3.11	Struktogramm eines Delay & Sum-Beamformer	20
3.12	Matlab-GUI des Delay & Sum-Beamformer	21
3.13	Darstellung des MVDR-Prinzip	22
3.14	Matlab-GUI des MVDR-Beamformer	24
3.15	Matlab-GUI des erweiterten MVDR-Beamformer	26
3.16	Gewichte der Lautsprecher bei unterschiedlichen Frequenzen	27
1	Sound Panel Schematic	33

Literaturverzeichnis

- [OS01] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*, 3. Auflage, Oldenburg, 2001
- [KamKro02] Karl-Dirk Kammeyer, Kristian Kroschl. *Digitale Signalverarbeitung; Filterung und Spektralanalyse mit Matlab-Übungen*, 5. Auflage, 2002
- [Ureda] Mark S. Ureda *Line Arrays: Theory and Applications*, AES Convention Paper 5304, 2001
- [MabKel] Edwin Mabande, Walter Kellermann *Towards superdirectivity beamforming with loudspeaker arrays*, University of Erlangen, 2005
- [Mös] Michael Möser *Technische Akustik*, 7. Auflage, Springer, 2007
- [ZotNois] Franz Zotter, Markus Noisternig *Near- and Farfield Beamforming using Spherical Loudspeaker Arrays*, 3-rd Congress of AAA, 2007
- [RenkHeinz] Renkus-Heinz *Renkus-Heinz, Engineering White Paper*, 2007
- [Meyer] Meyer Sound *DSP Beam Steering with Modern Line Arrays*, Technical Report, 2002