



Protokoll: Messungen mit einem planaren Mikrofonarray

Akustische Holographie und Holophonie - Labor

Gruppe 1

6. Oktober 2013

Christian Haar (christian.haar@rwth-aachen.de)
Fabian Knauber (fabian.knauber@rwth-aachen.de)
Raphael Kapeller (raphael.kapeller@student.tugraz.at)

Betreuer: Dr. Franz Zotter (zotter@iem.at)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Versuchsbeschreibung	5
2.1	Versuchsaufbau	5
2.2	Kalibrierung	6
2.3	Signalverarbeitung	6
2.3.1	Datenimport in MATLAB und Signalaufbereitung	7
2.3.2	2D-DFT und Darstellung im Wellenzahlraum	7
3	Versuchsauswertung	11
3.1	Messungen im Direktfeld	11
3.2	Messungen im Diffusfeld	14
4	Zusammenfassung und Ergebnis	21
	Literaturverzeichnis	22

1 Einleitung

In der Laborübung zur akustischen Holographie und Holophonie im Sommersemester 2013 werden Messungen mit einigen der am Institut für Elektronische Musik und Akustik (IEM) zur Verfügung stehenden Mikrofon- und Lautsprecherarrays durchgeführt. Der Versuchsaufbau, die messtechnische Umsetzung und die Signalverarbeitung- und Darstellung sollen grundlegende Zusammenhänge zwischen Theorie und Praxis verdeutlichen. Im ersten Versuchsteil soll mit dem planaren 64-Kanal Mikrofonarray gemessen und nach anschließender Signalaufbereitung, 2D-Fouriertransformation und Darstellung im modalen Wellenzahlraum (*Wellenzahlspektrum*) die Schallquelle lokalisiert werden. Im Anschluss daran werden die Qualität der Schallquellenlokalisierung und die Begrenzung durch die Apertur und Diskretisierung der Messfläche diskutiert. Zusätzlich ist eine Untersuchung des Diffusfelds anhand der Messungen vorgesehen.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Versuchsaufbau

Die Messungen verwenden ein planares 64-Kanal Mikrophonarray (vgl. Abbildung 2.1). Genauer zu den Spezifikationen ist in [1] nachlesbar. Die 64¹ Messmikrophone wurden auf einem vorgefertigten Rahmen mit positionsvariablen Zeilenelementen und darauf befindlichen Montagevorrichtungen angebracht und äquidistant im Abstand $\Delta x = \Delta y = 0.07m$ zueinander ausgerichtet. Somit ergibt sich für $N_{mic} = 8$ Mikrophone eine Apertur in x-Richtung (y analog) im kartesischen Koordinatensystem von $(N_{mic} - 1) \cdot \Delta x = 7 \cdot 0.07m = 0.49m$.



Abbildung 2.1: IEM-Tropfenlautsprecher und 64-Kanal Mikrophonarray

Die Signale wurden mit Hilfe von acht Vorverstärkern² mit jeweils acht Mikrophonkanälen

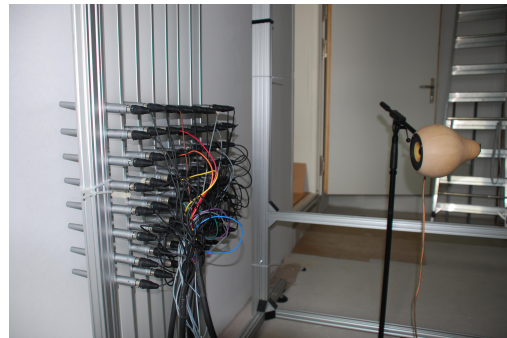
¹Behringer ECM8000 Messmikrophone

²Es wurden drei Presonus-Geräte und fünf Geräte von Behringer, Typ ADA8000 verwendet.

Analog/Digital(A/D)-gewandelt, über ADAT Leitungen an einen zentralen MADI-Formatkonverter geleitet und darauffolgend über die MADI-Schnittstelle mit dem Rechner verbunden. Um das Array akustisch anzuregen wurde ein Tropfenlautsprecher des Institutes (vgl. Abbildung 2.1) verwendet, dessen Position für die einzelnen Messungen variiert werden sollte. Es wurden zwei Versuche durchgeführt, einerseits eine Messung im Direktfeld und andererseits eine Messung im Diffusfeld. Für den Versuchsaufbau wurde in beiden Fällen das selbe Equipment verwendet, jedoch wurden die Positionen vom Lautsprecher und vom Mikrophonarray im Raum verändert. Für den zweiten Versuch wurde das Mikrophonarray vor der Wand aufgestellt, wie in Abbildung 2.2(a) und Abbildung 2.2(b) dargestellt. Zudem wurden sämtliche Schaumstoffabsorber aus dem Raum entfernt, um einen „halligeren“ Raum und somit ein diffuseres Schallfeld zu erhalten.



(a)



(b)

Abbildung 2.2: 64-Kanal Mikrophonarray vor der Wand aufgestellt

2.2 Kalibrierung

Zur Kalibrierung der 64 Eingangskanäle wurden die Mikrophonvorverstärker mittels Pistonphon bei $94\text{dB SPL @ }1\text{kHz}$ grob³ per Hand am Regler eingestellt. Die Messung erfolgte in *Pure Data* (PD). Im verwendeten Patch wurde dabei der Eingangskanal mit dem höchsten Eingangsspegel in diskreten Zeitabständen ausgewählt. Mit diesem Patch war es nicht nur möglich den höchsten Eingangswert anzuzeigen, sondern auch die vorhandenen 64 Kanäle aufzunehmen. Dabei wurde jedes Mikrofon einzeln mit dem Pistonphon bespielt. Die erhaltenen Audiodateien dienten in weiterer Folge zur Berechnung der über die händische Grobeinstellung hinausreichenden Korrekturwerte der Mikrofonempfindlichkeiten.

2.3 Signalverarbeitung

In diesem Abschnitt soll ein grober Überblick auf die verwendete Signalverarbeitung zur Analyse des Schallfeldes mit Hilfe des planaren Mikrophonarrays gegeben werden. Ziel ist es die aufgenommenen

³Unterschiede von $\pm 3\text{dB}$ wurden als maximale Toleranzgrenzen zugelassen

Daten im Wellenzahlbereich (*k-space*) darzustellen und zu analysieren.

2.3.1 Datenimport in MATLAB und Signalaufbereitung

In jeder der aus den Messungen erhaltenen Dateien sind die gleichzeitigen Sweepantworten von allen 64 Mikrofonkanälen gespeichert. Diese Audiodateien werden zunächst in eine Variable mit 64 Kanälen in Matlab eingelesen und einer diskreten Fouriertransformation (DFT) unterzogen. Im vorliegenden Frequenzbereich kann nun durch Division durch das in den ebenfalls in den Frequenzbereich gebrachte Eingangssignal (exponentieller Sweep) die Impulsantwort⁴ für jedes einzelne Mikrofon errechnet werden. Weiters gewichtet man die Impulsantworten mit den in Kapitel 2.2 erwähnten Korrekturwerten. Für die Korrekturwerte werden die Maxima der Betragsspektren aus den Kalibrierungsdaten der einzelnen Kanäle ermittelt, aufsummiert und in der Variable *g* gespeichert (vgl. Abbildung 2.3).

Als Korrekturwert wird der Minimalwert von *g* elementweise durch *g* dividiert, wodurch eine Normierung auf den Minimalwert erreicht wird. In weiterer Folge müssen die Messwerte wieder zurück in den Zeitbereich gebracht werden, um eine Fensterung und somit eine Auswahl des zu untersuchenden Bereichs in der Zeitdomäne zu ermöglichen. Außerdem werden dadurch Nichtlinearitäten beseitigt. In dieser Anwendung wurde ein Hann-Fenster verwendet. Der zu untersuchende Bereich wurde aufgrund der Impulsantworten der Mikrophone gewählt und auf den Abstand des Lautsprechers zum Array angepasst. Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 zeigen die Impulsantworten des ersten Mikrophones in der ersten Zeile für die Messungen im Direktfeld, sowie im Diffusfeld.

2.3.2 2D-DFT und Darstellung im Wellenzahlraum

Die gefensterten Impulsantworten werden für jeweils eine Frequenz in den Frequenzbereich gebracht, indem das Inprodukt der 64 Impulsantwortvektoren mit dem Vektor gebildet wird, der an jeder Stelle den entsprechenden komplexen Exponentialterm enthält. Die daraus erhaltenen 8x8 komplexen Werte für den Schalldruck in der Array-Ebene werden anschließend in den Wellenzahlbereich unter Verwendung der zweidimensionalen DFT (x- und y-Richtung) transformiert. Dazu wird die MATLAB-Funktion *fft2()* verwendet. Zur detaillierteren Beschreibung der Theorie zur akustischen Nahfeldholographie sei verwiesen auf [2] und [3].

⁴ $H(j\omega) = \frac{\text{Ausgang}}{\text{Eingang}} \bullet \text{oh}(t)$

```
%% Kalibrierungsdaten
g=zeros(64,1);
for k=1:64
    x=wavread(['cal/cal22mai13-' num2str(k) '.wav']);
    g(k)=sum(max(abs(fft(x))));
end
g=min(g)./g;

%% Eingangs- / Ausgangssignal
S=wavread('sweep.wav');
Y=wavread('sweepresponse.wav');

%% Berechnung der Impulsantworten... Fensterung... Gewichtung... Speichern
N=2^nextpow2(size(Y,1));
h=ifft(fft(Y,N)./repmat(fft(S,N),1,64));
% Nstart=4350+8000; % Diffusfeld
Nstart=4350;
Nresp=220;
plot(h)
h=h(Nstart+(0:Nresp-1),:)*diag(g);

Naus=100;
w=hanning(Naus*2+1);
w=flipud(w(1:Naus));

h(end-Naus+1:end,:)=diag(w)*h(end-Naus+1:end,:);

Nein=10;
w=hanning(Nein*2+1);
w=w(1:Nein);
h(1:Nein,:)=diag(w)*h(1:Nein,:);
save h.mat h
```

Abbildung 2.3: MATLAB-Code zur Signalaufbereitung für die 2D-DFT

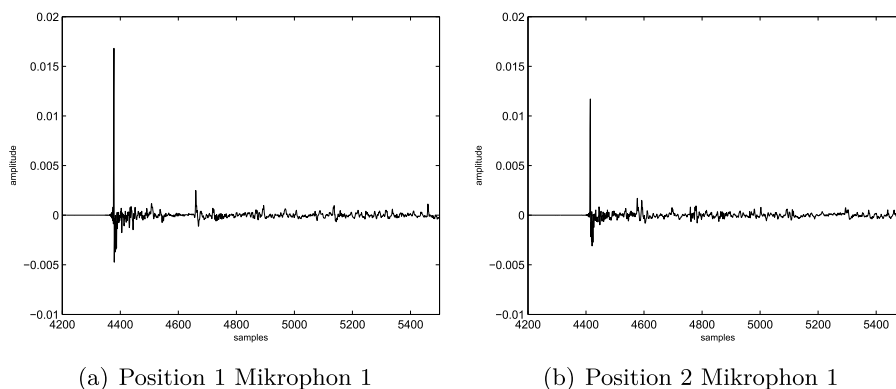


Abbildung 2.4: Impulsantworten der Direktfeldmessungen für verschiedene Positionen

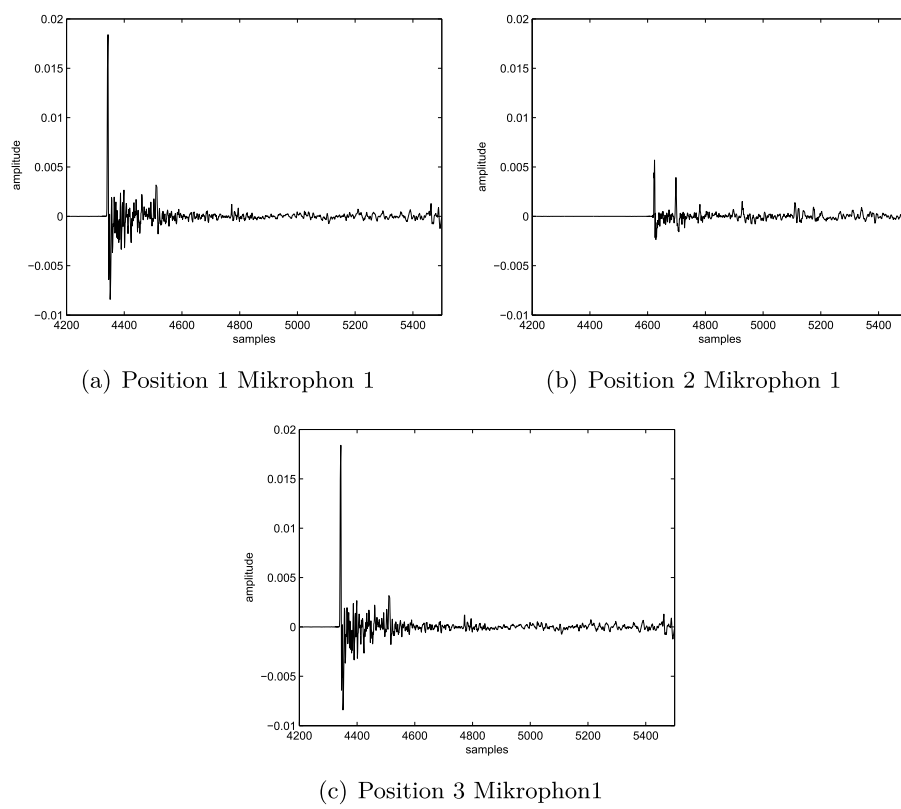


Abbildung 2.5: Impulantworten der Diffusfeldmessungen für verschiedene Positionen

3 Versuchsauswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Dazu werden die Wellenzahlspektren für verschiedene Frequenzen betrachtet und ausgewertet. Zunächst wird dabei das akustische Direktfeld thematisiert, anschließend das Diffusfeld.

3.1 Messungen im Direktfeld

Für die Messungen im Direktfeld wurde das 64-Kanal Mikrophonarray im Raum aufgestellt und die Position des Lautsprechers variiert (vgl. Abbildung 3.1). Dabei wurde eine Messungen unter einem Azimutwinkel von $\varphi = 40^\circ$ und einem Elevationswinkel von $\vartheta = 0^\circ$ und einem Radius von $r = 1.5m$ (vgl. Abbildung 3.1(b)) sowie eine zweite Messung unter einem Elevationswinkel von $\vartheta = 40^\circ$ und einem Elevationswinkel von $\varphi = 0^\circ$ und einem Radius von $r = 1.5m$ (vgl. Abbildung 3.1(a)) durchgeführt. Ein exponentieller Sinussweep mit einer Länge von einer Sekunde von 20 Hz bis 22,05 kHz stellte das Anregungssignal dar (vgl. Abbildung 3.2).



Abbildung 3.1: Lautsprecherpositionen für die Direktfeldmessungen

Nach der Signalaufbereitung, wie sie in Kapitel 2 erläutert wurde, wurden die aufgezeichneten Daten in den Wellenzahlbereich (k -space) transformiert und dargestellt. Zwei Effekte sind dabei zu erkennen. Für tiefe Frequenzen wird die Richtungsabbildung ungenau, da bei großen Wellenlängen die Phasenunterschiede des gesamten Arrays gering werden (hier z.B. $500Hz$: vgl. Abbildung 3.3(a) und Abbildung 3.4(a)). Die Apertur des Mikrophonarrays ist mit $0.49m \times 0.49m$ begrenzt, wodurch

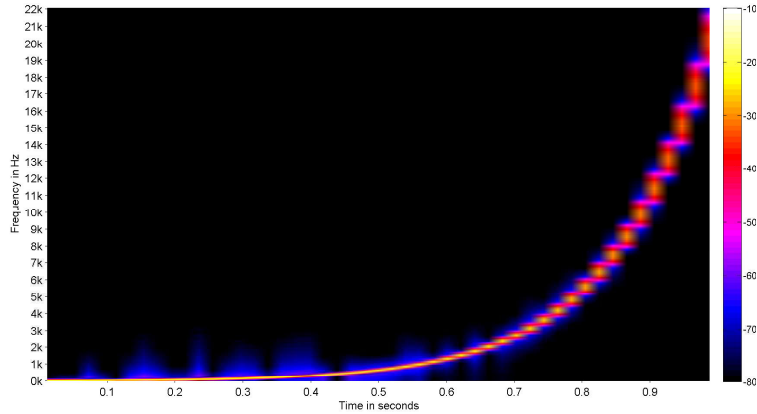


Abbildung 3.2: Als Anregungssignal verwendeter Sweep

tiefe Frequenzen nicht mehr richtig abgebildet werden können. Der rote Kreis in den abgebildeten Wellenzahlspektren gibt die Grenze zwischen dem Ausbreitungsbereich für ebene Wellen (innerhalb des Kreises) sowie den Ausbreitungsbereich für evaneszente Wellen (außerhalb des Kreises) an. Für 1kHz kann man die grobe Quellenrichtung schon erkennen (vgl. Abbildung 3.3(b) und Abbildung 3.4(b)), jedoch nur eine recht grobe Aussage darüber treffen. Die genaueste Lokalisation für die hier dargestellten Frequenzen ergibt sich für 2kHz ^{1 2} (vgl. Abbildung 3.3(c) und Abbildung 3.4(c)). Der zweite auftretende Effekt gibt die obere Grenzfrequenz an, bis zu welcher eine eindeutige Abbildung erkennbar ist. Die Auflösung für hohe Frequenzen ist durch die endliche Anzahl an diskreten Messpositionen begrenzt, da diese ab einer Grenzfrequenz (vgl. Gl. 3.1) nicht mehr korrekt abgetastet werden. Durch eine solche Unterabtastung entstehen Aliasingeffekte und somit räumliche Spiegelfrequenzen. Das Auftreten von Spiegelfrequenzen verhindert eine eindeutige Zuordnung des Schalls zu einer (Quellen-)Richtung im Raum. Die obere Grenzfrequenz beträgt hier:

$$f_{\text{og}} = \frac{c}{2\Delta x} = \frac{343}{2 \cdot 0.07} = 2450\text{Hz} \quad (3.1)$$

In Abbildung 3.3(d) und Abbildung 3.4(d) lässt sich innerhalb des Wellenzahlkreises eine periodische Wiederholung des Wellenzahlspektrums einfügen. Diese Wiederholung entspricht der spektralen Periodizität gleichförmig abgetasteter Funktionen und verdeutlicht die Richtungsvieldeutigkeit, das sogenannte räumliche Aliasing, bei hohen Frequenzen.

¹Anhand von Abbildung 3.3 kann man erkennen, dass der Lautsprecher nicht exakt bei $\varphi = 0^\circ$ lokalisiert wird, sondern leicht nach links abweicht, was vermutlich an Positionsfehler liegt.

²Anhand von Abbildung 3.4 kann man erkennen, dass der Lautsprecher nicht exakt bei $\vartheta = 0^\circ$ lokalisiert wird, sondern leicht nach oben abweicht, was vermutlich an Positionsfehler liegt.

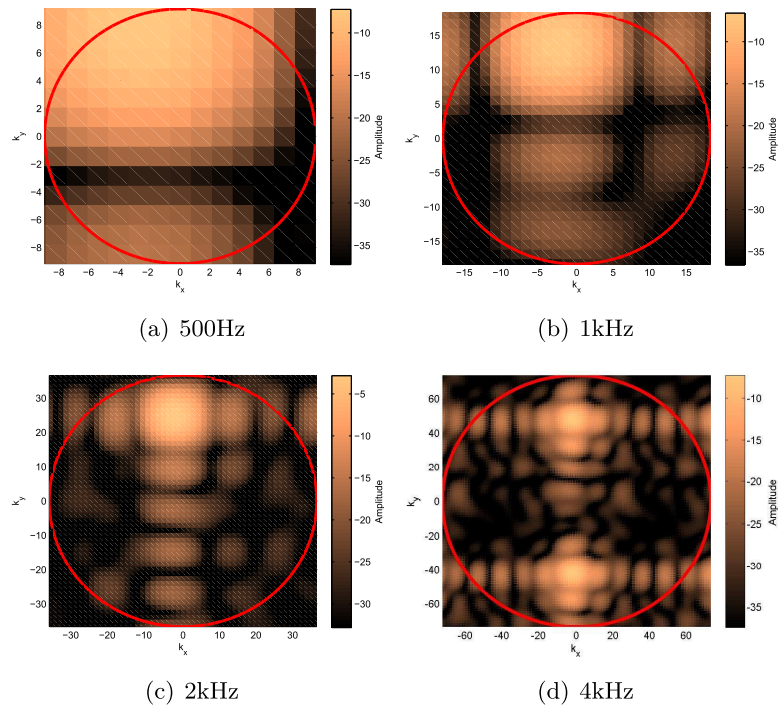


Abbildung 3.3: Direktfeldmessung bei $\varphi = 0^\circ$ und $\vartheta = 40^\circ$

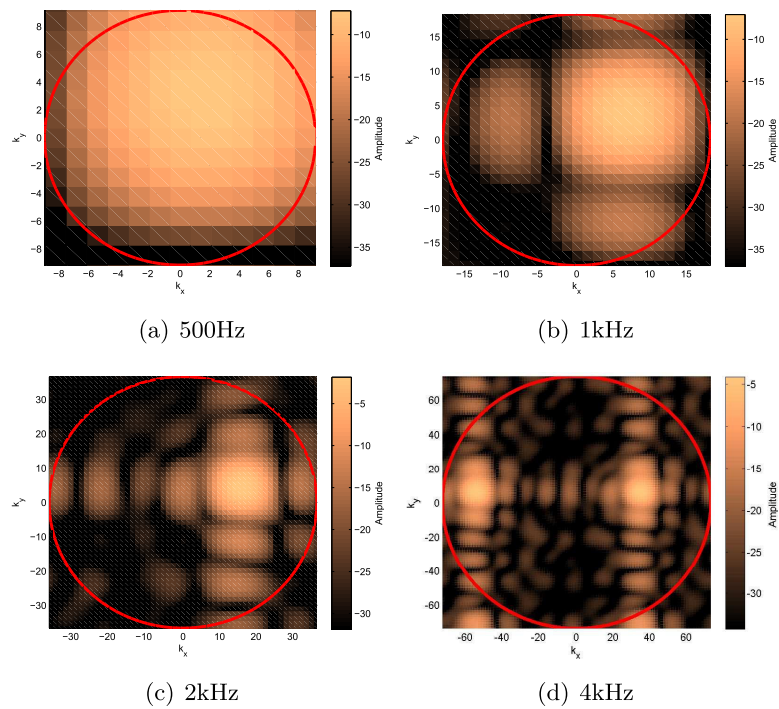


Abbildung 3.4: Direktfeldmessung bei $\varphi = 40^\circ$ und $\vartheta = 0^\circ$

3.2 Messungen im Diffusfeld

Für die Messung im Diffusfeld³ wurde das 64-Kanal Mikrofonarray mit Blick zur Wand platziert, um den Abstand von Mikrofonmembran und Begrenzungsfläche zueinander zu minimieren. An der Grenzschicht muss der Schalldruck stetig verlaufen. Der Abstand der Membran zur Wand ist demnach wie eine Spiegelung um die Begrenzungsfläche anzusehen. Aus statischen Gründen musste für die Fixierung des Arrays, der Rahmen abgebaut und um 90° gedreht werden. Diese Änderung der Raumrichtungen aus dem Blickwinkel des Arrays wurde im MATLAB-Code durch eine Drehung der Matrix wieder ausgeglichen. Es wurden Messungen mit dem oben angeführten exponentiellen Sinussweep an drei unterschiedlichen Lautsprecherpositionen im Raum durchgeführt (vgl. Abbildung 3.5). Dabei ist Position 1 mit einem Abstand von nur $r = 1.13m$ von der Rückseite des Arrays näher am Array als bei der zuvor durchgeführten Direktfeldmessung (vgl. Abbildung 3.5). Position 2 befindet sich mit einem Abstand $r = 3.03m$ weit entfernt im Raum (vgl. Abbildung 3.5(a) und Abbildung 3.5(b)). Beide erstgenannten Lautsprecherpositionen zeigen in etwa normal auf das Mikrofonarray. Position 3 ist in einem mittleren Abstand $r = 2.42m$ und einem Winkel von etwa $\varphi = 49^\circ$ zur Normale auf das Array aufgestellt (vgl. Abbildung 3.5).

Durch die großen zusammenhängende Flächen mit annähernd gleichem Pegel lässt sich in Abbildung 3.6, Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 das theoretische Modell über die Beschaffenheit des Diffusfelds in der Praxis gut erkennen. Vor allem für hohe Frequenzen ist eine Zuordnung der Richtung in der sich eine Schallquelle befindet nicht mehr möglich, da Anteile aus allen Richtungen, ohne wesentlichem Maximum an einer Stelle, vorhanden sind. Allerdings ergibt sich in der betrachteten Stichprobe des Schallfeldes kein perfekt gleichförmiges Muster, da es durch Phasenunterschiede der benachbarten Einfallrichtungen zu Interferenzen am Standort des Mikrofonarrays kommt.

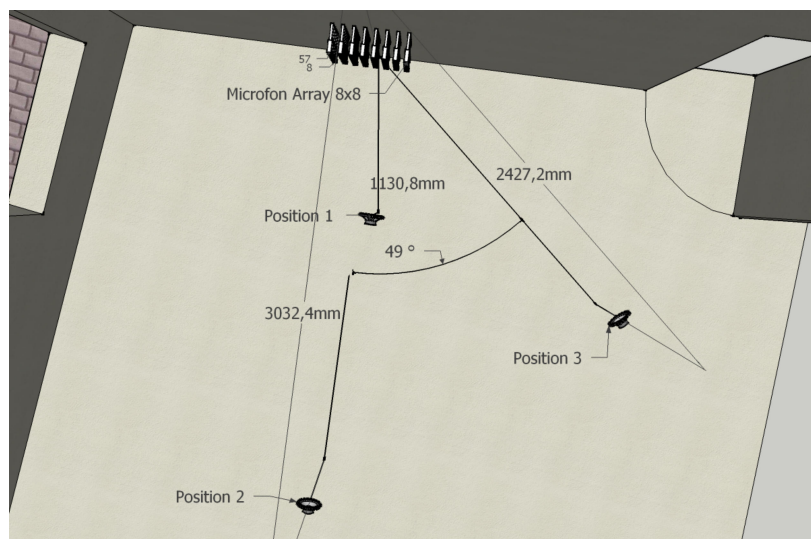
Position 1 ist durch den geringen Abstand vom Lautsprecher zum Mikrofonarray für tiefe Frequenzen einer Direktfeldmessung zuzuordnen (vgl. Abbildung 3.3(a) Direktfeldmessung (500Hz) mit Abbildung 3.6(a) Diffusfeldmessung (500Hz)). Hoch- und niederpegelige Bereiche sind deutlich voneinander unterscheidbar und somit ist auch eine Richtungsinformation vorhanden. Auch in Abbildung 3.3(b) und Abbildung 3.3(c) ist ein Maximum an der annähernd selben Stelle detektierbar. Allerdings sind die Reflexionen hervorgerufen durch den Fußboden und die angrenzenden Wände ebenfalls, aber mit abgeschwächten Pegel, gut erkennbar. Weiters gilt auch hier, dass ab einer Obergrenze von $f = 2450Hz$ Aliasing auftritt.

Im Gegensatz zum klar dominanten Direktfeld an Position 1 befinden sich Position 2 und 3 scheinbar am Rande oder außerhalb des Hallradius⁴ im Raum. Das aufgenommene Schallfeld weist auch bei tiefen Frequenzen schon diffusen Charakter und eine Unterscheidung zwischen Quelle und Reflexion ist grafisch nicht mehr eindeutig. Bei hohen Frequenzen verschwimmen die Bereiche unterschiedlicher Amplituden etwas mehr ineinander als bei Position 1, sind jedoch immer noch deutlich unterscheidbar.

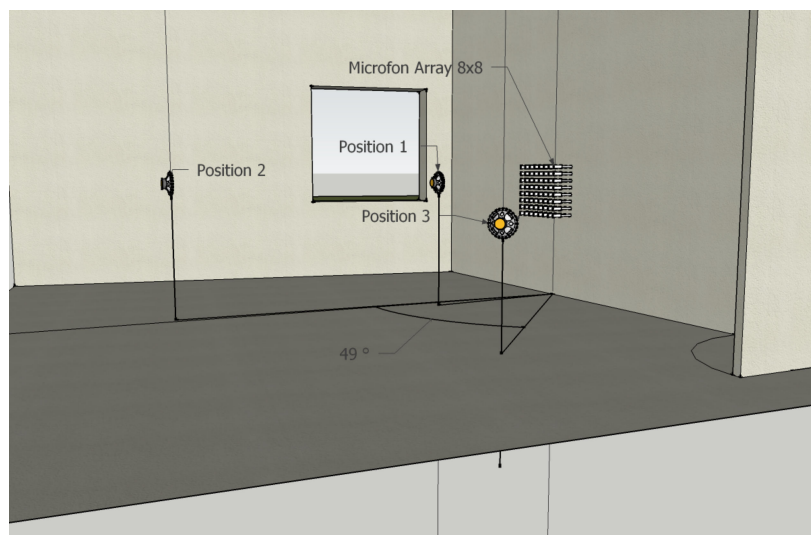
³Das vorhandene Diffusfeld ist eine Annäherung an das theoretische Modell. Die Untersuchungen und Analysen werden in weiterer Folge auf den praktischen Fall einer schlechten Messumgebung mit wenig Direktschall ausgelegt.

⁴Der Hallradius gibt diejenige Entfernung von einer Schallquelle an, an welcher die Energiedichten des Diffusfeldes und des Direktfeldes gleich sind (siehe auch [4]).

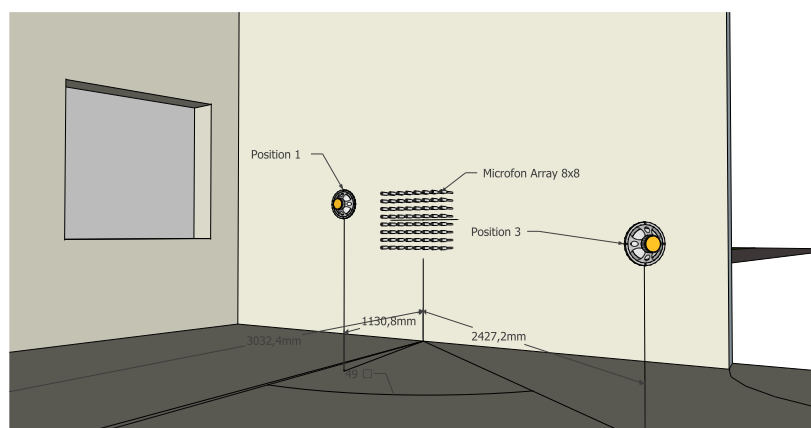
Schaut man sich 45ms nach dem Direktschall einen kleinen Zeitausschnitt (hier: 5ms @ 1kHz) an (vgl. Abbildung 3.9), so kann man Reflexionen innerhalb des Zeitfensters grob erkennen. Man kann also eventuell einzelne Reflexionen in bestimmten Zeitfenstern orten. Es ergeben sich jedoch keine großen Unterschiede zu den vorherigen Abbildungen des Diffusfeldes. Außer bei Position 1 in Abbildung 3.6(b) ist der Einfluss des Direktschalls nicht mehr erkennbar. Bei geeigneter Fensterung ist auch bei größerem Abstand von Quelle und Empfänger zueinander eine Richtungsdetektion des Direktschalls möglich (vgl. Abbildung 3.10).



(a) Ansicht von oben



(b) Ansicht von der Seite



(c) Ansicht von hinten

Abbildung 3.5: Lautsprecherpositionen für die Diffusfeldmessungen (erstellt mit Google SketchUp)

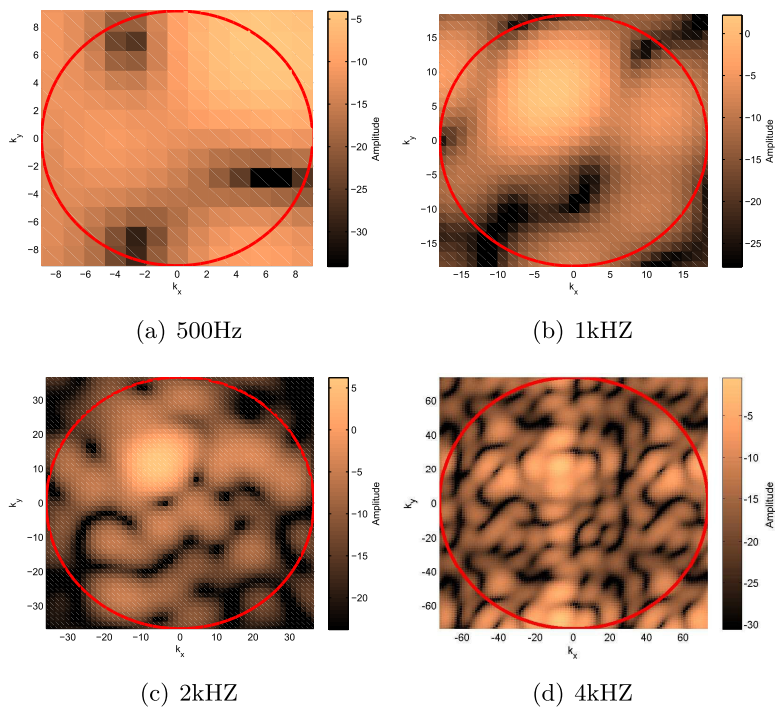


Abbildung 3.6: Diffusfeldmessung an Position 1

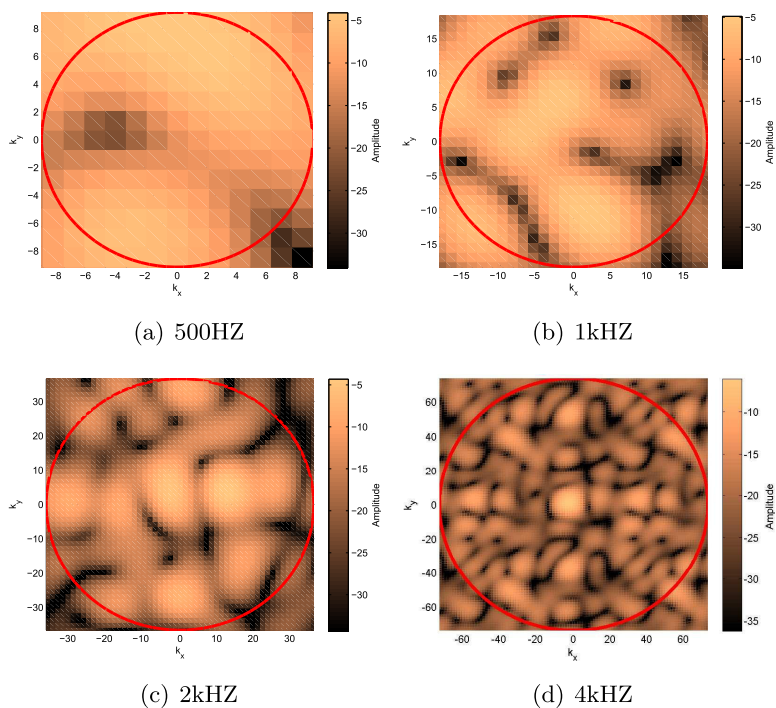


Abbildung 3.7: Diffusfeldmessung an Position 2

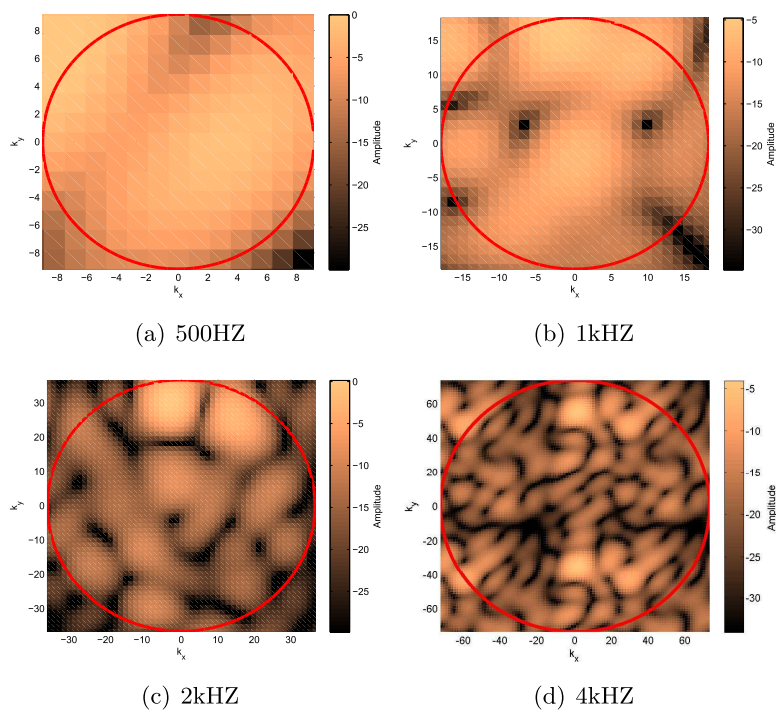


Abbildung 3.8: Diffusfeldmessung an Position 3

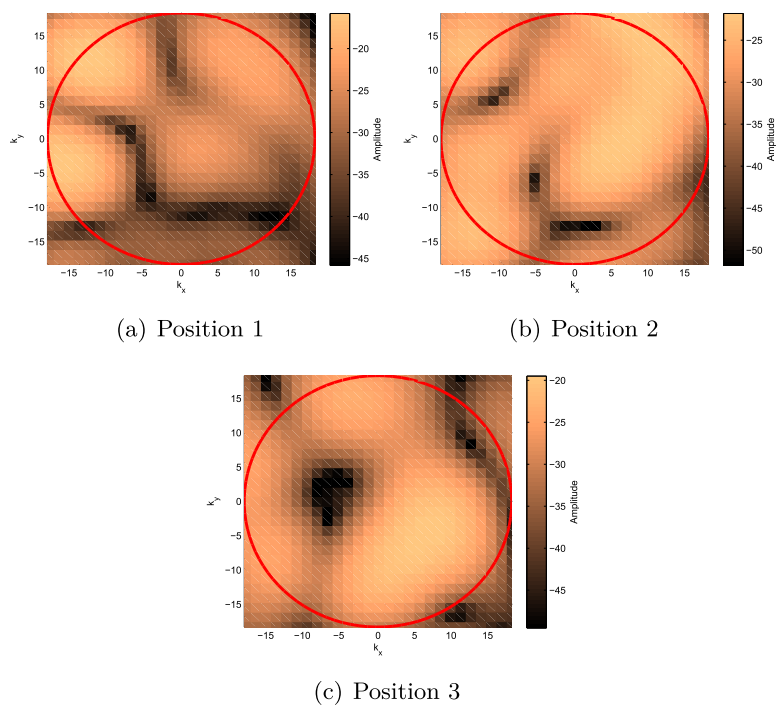


Abbildung 3.9: Diffusfeldauswertung bei $f = 1kHz$ ab 45ms nach dem Direktschall, mit einem Zeitfenster von 5ms

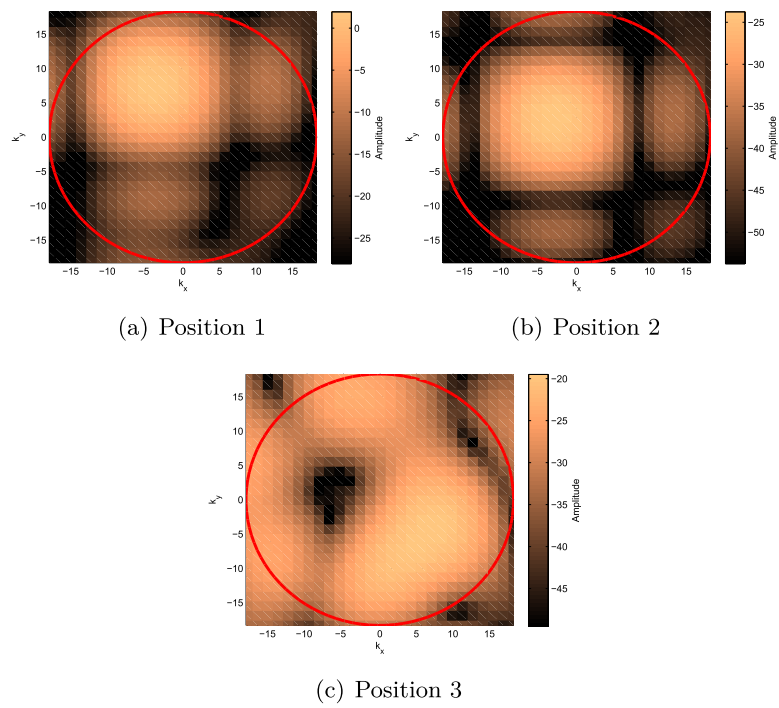


Abbildung 3.10: Diffusfeldauswertung bei $f = 1kHz$ mit Fensterung des Direktschalls

4 Zusammenfassung und Ergebnis

In diesem Versuch wurden zwei Messreihen mit einem planaren Mikrofonarray durchgeführt. Die ersten Messungen dienten der Untersuchung des Direktfeldes und der Schallquellenlokalisierung mittels zweidimensionaler diskreter Fouriertransformation. Dazu wurde an zwei verschiedenen Positionen gemessen und es ergab sich eine gute Lokalisation der Schallquelle für Frequenzen unterhalb der durch die örtliche Abtastrate gegebenen Grenzfrequenz. Für tiefe Frequenzen wird die Genauigkeit jedoch - bedingt durch die kleiner werdenden Apertur des Mikrofonarrays in Wellenlängen deutlich schlechter. Vor der Darstellung als Wellenzahlspektrum wurden die Daten entsprechend aufbereitet. Dabei wurden unter anderem Reflexionen (z.B. vom Boden) durch geeignete Fensterung ausgeblendet. Mit dem verwendeten Verfahren kann unter Verwendung des planaren Arrays, in einem nach oben und unten begrenzten Frequenzbereich, die Schalldruckverteilung zufriedenstellend abgebildet und eine Quellenlokalisierung vorgenommen werden. Für die Darstellung tieferer Frequenzen und Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz muss man jedoch eine größere Apertur und eine dichtere örtliche Abtastrate wählen. In der zweiten Messreihe wurde die Lokalisation im Diffusfeld an drei verschiedenen Lautsprecherpositionen im Raum untersucht. Dabei war das Mikrofonarray sehr nah an der Wand aufgestellt. Die Messergebnisse zeigen, dass eine Lokalisation im angenäherten Diffusfeld abhängig vom Positionsverhältnis vom Lautsprecher zum Mikrofonarray und von der Frequenz mit Einschränkungen möglich ist. Diese Einschränkungen haben sehr verwaschene Richtungslokalisationen zur Folge, welche aus den vielen eintreffenden Reflektionen resultieren. Jedoch ergibt sich eine erstaunlich hohe Gleichförmigkeit, die dem theoretischen Konzept des Diffusfeldes sehr nahe kommt. Dies bestätigt, dass das Diffusfeld ein brauchbares Modell für akustische Berechnungen ist, wenn der Abstand zwischen Quelle und Empfänger hinreichend groß ist. Bei einem Ausblenden des Direktschalls ergibt sich ebenfalls ein diffuses Feld auch für geringere Abstände zwischen Quelle und Empfänger. Wiederum auch bei grösserem Abstand von Quelle und Empfänger ist bei geeigneter Fensterung eine Lokalisation der Quelle sehr grob möglich, wenn man den Direktschall betrachtet und die Reflexionen durch ein Fenster ausgeblendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Hofer, "Implementierung eines 64 Kanal Mikrofonarrays," Master Thesis, Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz und Technische Universität Graz, 2008.
- [2] F. Zotter, "Akustische Messtechnik II Laborunterlagen," 2010.
- [3] E. G. Williams, *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. Academic Press, 1999.
- [4] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. Taylor & Francis, 2000.