

Protokoll

# Akustische Messtechnik 2, LU Planares 64-Kanal Mikrofonarray



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

Gruppe 1

Baumgartner Ralf, Freiberger Karl, Nemitz Wolfgang

18. Juli 2008

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>4</b>
3.1	Pegelkalibrierung . . . . .	4
3.2	Kalibrierung der Übertragungsfunktion . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Messung</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Aufbereitung der Messdaten</b>	<b>7</b>
5.1	Einführung . . . . .	7
5.2	Berechnung der Impulsantworten . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Berechnung des Wellenzahlspektrums</b>	<b>9</b>
6.1	Theorie . . . . .	9
6.1.1	Wellenzahlspektrum einer ebenen Welle . . . . .	9
6.1.2	Auswirkung der Abtastung und Fensterung . . . . .	11
6.1.3	Kreis der ebenen Wellen im k-Space . . . . .	11
6.2	Programmierung . . . . .	12
6.2.1	Amplitudenbestimmung über das Array mittels der bei einer Frequenz ausgewerteten Diskreten Fourier Transformation (DFT) . .	13
6.2.2	Umordnen auf die Arraygeometrie . . . . .	13
6.2.3	2d - Fourier Transformation . . . . .	13
6.2.4	Darstellung . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Ergebnis und Fazit</b>	<b>15</b>

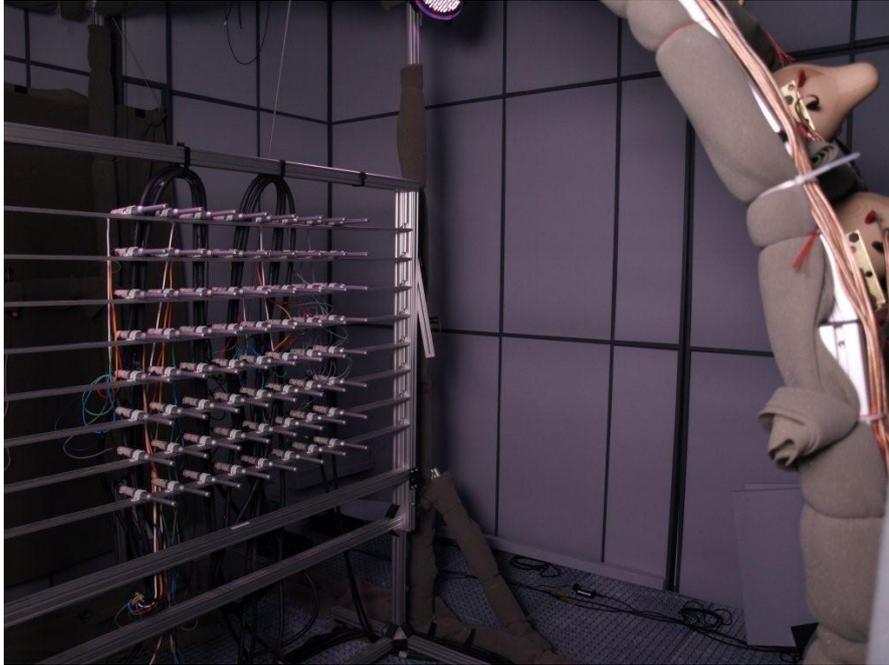


Abbildung 1: 64-Kanal Mikrofonarray mit 70cm x 70cm Apertur

## 1 Einführung

Der erste Teil der Lehrveranstaltung *Akustische Messtechnik 2, Laborübung* war der Messtechnik und -Signalverarbeitung mit einem planaren 64-Kanal Mikrofonarray gewidmet. Durch Anwendung einer 2D Fourier-Transformation über das Array sollte eine Visualisierung des Wellenzahlspektrums durchgeführt werden und eine Schallquellenlokalisierung möglich gemacht werden. Dabei wurden die möglichen Grenzen einer diskreten und endlichen Apertur besprochen und erarbeitet.

Als Basis zu diesem Protokoll dienen die Diplomarbeit [1] und die Laborunterlagen [2].

## 2 Versuchsaufbau

Es wurde das am IEM vorhandene Mehrkanalsetup benutzt. Eine genaue Beschreibung findet sich in [1].

Das Mikrofonarray bestand aus 64 *Behringer ECM8000* Mikrofonen. Zur Mikrofonvorverstärkung und AD-Wandlung standen 8 Stück *Behringer ADA8000* zur Verfügung. Über eine RME-MADI-Bridge wurden die 64 Kanäle mit dem Messrechner verbunden. Als Messsoftware wurde PureData(PD) unter Linux benutzt. Die Auswertung der Messdaten wurde auf einem Windows-Rechner in Matlab vorgenommen.

Die Aperturgeometrie wurde quadratisch - mit einem einheitlichen Kapselabstand von 10 cm - gewählt. Die effektive Apertur hatte somit eine Größe von 70 cm x 70 cm. Als

### 3 Kalibrierung

Schallquelle für die folgenden Messungen kam ein kreissegmentförmiges Lausprecherarray (LSP-Array) zum Einsatz. Um unerwünschte Effekte wie z.B. Pegelschwankungen und große Laufzeitversätze auf Grund einer unsymmetrischen Versuchsanordnung zu vermeiden, wurde das Mikrofonarray ins *akustische Zentrum* des LSP-Arrays gebracht. Die Ausrichtung erfolgte über zwei am LSP-Array fest installierte Laserpointer.

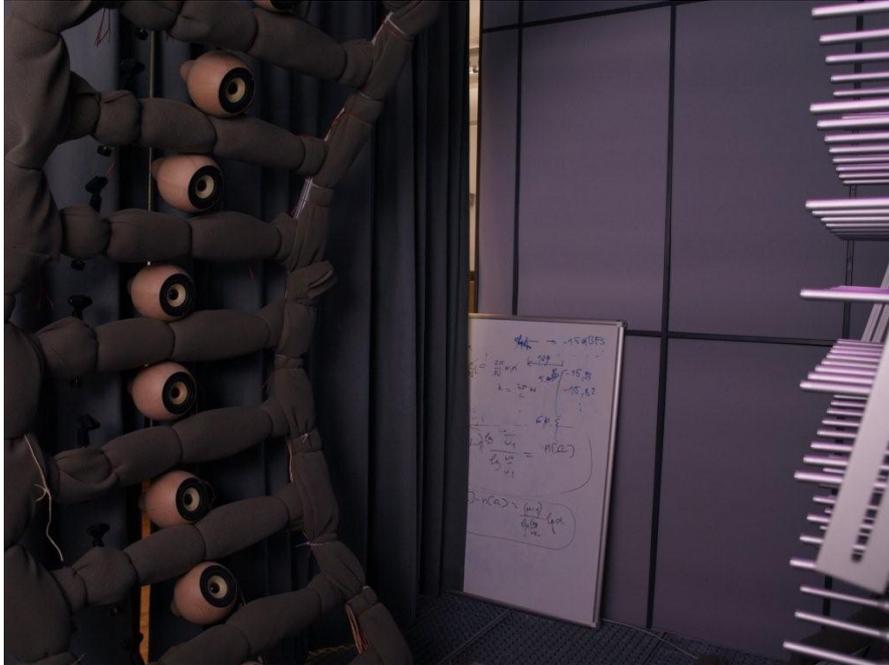


Abbildung 2: Kreissegmentförmiges Lautsprecher-Array

## 3 Kalibrierung

### 3.1 Pegelkalibrierung

Für die Pegelkalibrierung wurde eine Referenzschallquelle mit 94dB@1kHz verwendet, mit der die Mikrofone nacheinander beschallt wurden. Ein Pd-Patch detektierte dabei den verwendeten Kanal - d.h. denjenigen, der im Moment den größten Pegel geliefert hat. Der Pegel wurde abgelesen und die Verstärkung des jeweiligen Kanals per Hand so justiert, dass alle Kanäle ungefähr gleich waren. Nach dieser Grobjustierung wurden alle Kanäle noch einmal mit der Referenzquelle beschallt, wobei der Pd-Patch den Pegel in einem bestimmten Zeitintervall in ein Textfile schrieb. Dieses Textfile konnte dann später in Matlab eingelesen werden und ermöglichte eine pegelmäßige Normierung der Messsignale.

### 3.2 Kalibrierung der Übertragungsfunktion

Nach der Normierung bei 1 kHz wurde beispielhaft für alle Messkanäle auch die Übertragungsfunktion des ersten Kanals linearisiert. Es wird dabei ein Entzerrfilter bestimmt. Dieses ermöglicht es, den Betragsfrequenzgang des zu entzerrenden Mikrofons so verändern, dass er dem eines Referenzmikrofones, das einen möglichst geradlinigen Frequenzgang aufweist, entspricht.

Als Referenz wurde mit einem G.R.A.S.-Mikrofon die Impulsantwort an der Position des ersten Kanals gemessen. Die Messung der Impulsantwort wurde dabei mit einem exponentiellen Sweep als Anregungssignal durchgeführt. Auf diese Methode wird im nächsten Kapitel noch näher eingegangen. Beispielhaft ist in Abbildung 3 die Systemantwort eines Mikrofonkanals auf den Sweep abgebildet.

Über die in Gleichung (1) angegebene spektrale Division kann der Frequenzgang  $D(k)$

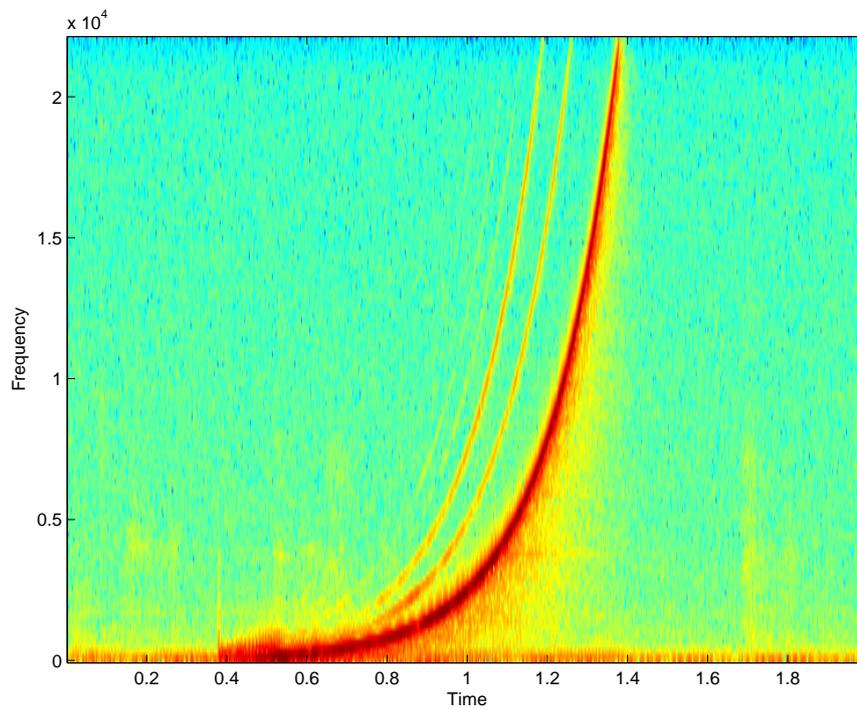


Abbildung 3: Spektrogramm der Antwort eines Mikrofons auf den exponentiellen Sweep aus einem Lautsprecher. Man erkennt das exponentielle Ansteigen der Frequenz über die Zeit. Neben der linearen Systemantwort sind auch nichtlinearen Anteile vorhanden.

eines digitalen Entzerrfilters bestimmt werden. Den verwendeten Größen liegt das Signalfussmodell in Abbildung 4 zu Grunde.  $Y(k)$  bezeichnet also die Fouriertransformierte (FFT) der digitalisierten Impulsantwort  $y[n]$  des G.R.A.S.-Mikrofons. Gleichweise

### 3 Kalibrierung

entspricht  $X(k)$  der Übertragungsfunktion des zu entzerrenden Behringer-Mikrofons.

$$D(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} \quad (1)$$

Durch Rücktransformation von  $D(k)$  in den Zeitbereich mittels der IFFT (Inverse Fast

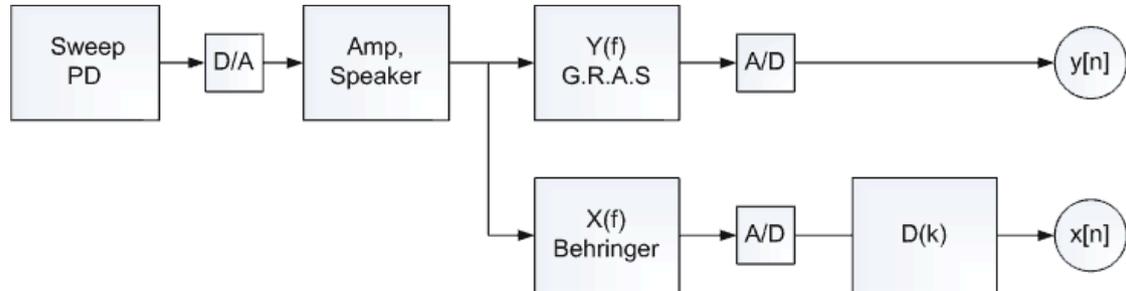


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Messkette: Die Signale der Behringer-Mikrofone können mit einem Filter  $D(k)$  entzerrt werden. Bei passender Wahl von  $D(k)$  wird  $y[n]$  also  $x[n]$  entsprechen. Es ist somit möglich, das Übertragungsverhalten jedes Mikrofonkanals an den selben, gleichmäßigen Frequenzgang des G.R.A.S.-Referenzmikrofones anzupassen. Unzulänglichkeiten, die durch den Verstärker und Lautsprecher entstehen, können damit aber nicht behoben werden.

Fourier Transform) erhält man bereits die Impulsantwort eines digitalen Entzerrfilters mit dem gewünschten Betragsfrequenzgang. Dieses Filter kann aber, aufgrund der Laufzeit bei nicht exakt gleicher Positionierung des Referenz- und zu entzerrenden Mikrofons, akausal sein. Um diesbezügliche Probleme zu umgehen, wurde die Übertragungsfunktion in die cepstrale Domäne gebracht, mit einem kausalen Filter<sup>1</sup> belegt und in die spektrale Ebene zurücktransformiert.

Dadurch erhält man zum gewünschten Betragsfrequenzgang genau jene Phase, die die minimale energetische Verzögerung liefert. Ein solches, sogenanntes Minimalphasen-Filter hat auch die angenehme Eigenschaft, dass seine Inverse stets stabil ist. In unserem Anwendungsfall spielt dies aber keine Rolle, da das Entzerrfilter ja nicht invertiert wird. Das Vorgehen zur Gewinnung des minimalphasigen Filters mittels Liftering im Cepstralbereich ist in Abbildung 5 schematisiert.

Bei allen weiteren Messungen zur Lokalisation und zur Bestimmung des Wellenzahlenspektrums müsste jeder Kanal des Arrays mit dem ihm zugehörigen minimalphasigen Filter entzerrt werden, um bestmögliche Ergebnisse bei der Messung zu erhalten. Aus zeitlichen Gründen ist darauf aber im Labor verzichtet worden. Die Mikrofonsignale wurden lediglich pegelbezogen normiert.

---

<sup>1</sup>bzw. Lifter

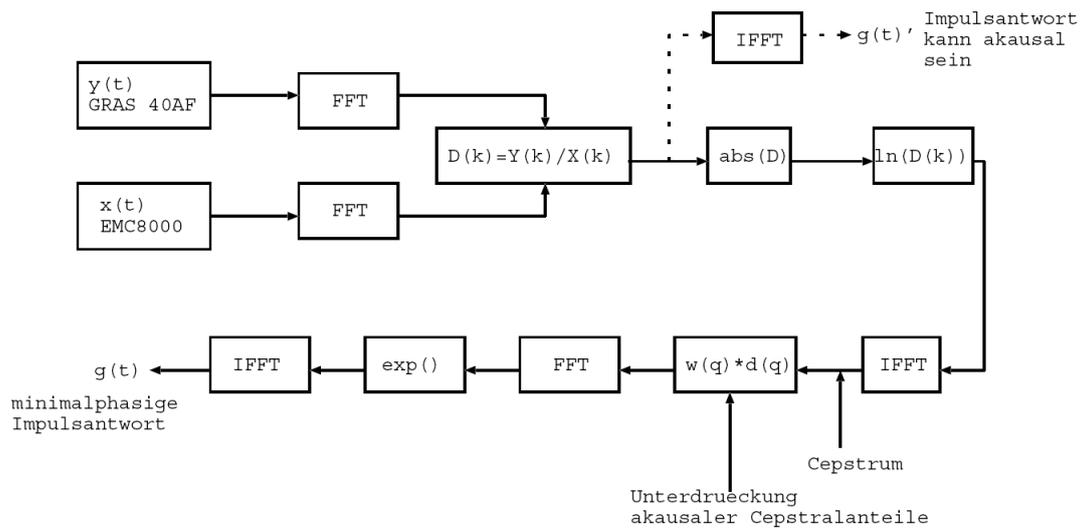


Abbildung 5: Blockschaltbild zur Gewinnung des minimalphasigen Entzerrungsfilters mittels Liftering im Cepstralbereich (aus [1])

## 4 Messung

In Pd wurde ein 1s langer exponentieller Sweep generiert und unter dem Dateinamen `sweep.wav` abgespeichert. Die Abtastfrequenz wurde zu  $f_s = 44.1kHz$  gewählt. Der Sweep wurde dann nacheinander über jeden der 15 Lautsprecher wiedergegeben und die entsprechenden Mikrofonsignale 2s lang aufgezeichnet. Für jeden der Lautsprecher (LS), die wir mit einem Integer  $l \in \{1, 15\}$  durchnummern, wurde aus PD ein 64-Kanal Wave-File mit dem Namen `sweep_kanal_l.wav` gespeichert. Damit ergeben sich 15 solche 64-Kanal Wave-Files, welche jeweils die Antwort aller 64 Mikrofone auf den Sweep, der vom Lautsprecher  $l$  wiedergegeben wird, beinhalten.

## 5 Aufbereitung der Messdaten

### 5.1 Einführung

Alle weiteren Schritte zur Aufbereitung und Auswertung der aufgenommenen Daten wurden nun in Matlab vorgenommen. Das Ziel dabei war, die unterschiedlichen Einfallrichtungen der Lautsprecher darzustellen und die in der Theorie [2] besprochenen Effekte (Aliasing, Abtastung) anhand der realen Messung sichtbar zu machen.

Um die weitere Beschreibung zu vereinfachen und zu präzisieren, sei folgende Nomenklatur verwendet: Der Sweep sei von nun an mit  $s[n]$  und die Antwort des Mikrofons bzw. Kanals mit der Nummer  $m \in \{1, 64\}$  auf den Lautsprecher mit der Nummer  $l$  als  $y_{l,m}[n]$  benannt. Da Matlab die Signale als Vektoren behandelt, sei zudem eine Vektornotation

- also zum Beispiel  $\mathbf{s}[n]$  - benutzt. Die Gesamtheit über alle Indizes - also zum Beispiel  $\mathbf{y}_{l,m}[n]$  für alle Kombinationen aus  $l$  und  $m$  - wird mit  $\mathbf{Y}[n]$  abgekürzt, was in Matlab einer Matrix entsprechen würde.

## 5.2 Berechnung der Impulsantworten

Die zuvor mit PD aufgenommenen .wav-Files werden eingelesen, womit  $\mathbf{s}[n]$  und  $\mathbf{Y}[n]$  zur Verfügung stehen. Weiters wird das Textfile `kalibrierung_060508_94db_.txt`, geladen. Dieses beinhaltet die Kalibrierungsfaktoren, um die Mikrofone im Pegel abzugleichen. Aus  $\mathbf{Y}[n]$  werden nun die Impulsantworten  $\mathbf{H}[n]$  jedes Mikrofons auf die unterschiedlichen Lautsprecher bzw. Einfallrichtungen berechnet.

Dazu sei kurz bemerkt, dass dieser Schritt natürlich nicht unbedingt nötig ist, um später das Wellenzahlspektrum zu berechnen. Dieses könnte auch direkt aus  $\mathbf{Y}[n]$  berechnet werden. Allerdings ist eine kompakte<sup>2</sup> Darstellung des gesamten Frequenzbereichs, wie er durch  $\mathbf{H}[n]$  geliefert wird, natürlich vorteilhaft.

Eine erste, verzögerte und verlängerte Version der Impulsantwort, ergibt sich aus dem Zusammenhang in Gleichung (2)

$$\mathbf{h}_{longl,m}[n] = IFFT_N \left( \frac{FFT_N(\mathbf{y}_{l,m}[n])}{FFT_N(\mathbf{s}[n])} \right) \quad (2)$$

Die Sweepantworten sind ungefähr 2 Sekunden lang, was 88200 Samples entspricht. Für die  $N$ -Punkte FFT in Gleichung (2) wurde deshalb  $N = 131072$ , die nächstgrößten Zweierpotenz von 88200, gewählt.

$\mathbf{h}_{longl,m}[n]$  ist in Abbildung 6 für vier verschiedene Werte von  $l$  und fixes  $m = 1$  dargestellt. Man erkennt die große Länge und Verzögerung, wobei sich die interessante<sup>3</sup> Information ungefähr in einem Indexbereich von 16501 bis 17000 abspielt. Daher wurde  $\mathbf{H}_{long}[n]$  in diesem Bereich ausgeschnitten, womit sich ein auf 500 Samples verkürztes Set von Impulsantworten  $\mathbf{H}[n]$  ergibt.

Um den Bereich (16501 bis 17000) zu bestimmen, wurde einfach eine der langen Impulsantworten mit `plot` dargestellt und Start- und Endpunkt visuell abgeschätzt.

Nach dem Ausschneiden werden die Impulsantworten noch ein und ausgeblendet, was durch Multiplikation mit einer Fensterfunktion geschieht. Diese wird unsymmetrisch aus zwei halben Hanning-Funktionen zusammengebaut. Sie wird innerhalb des Ausschneidebereiches verschoben, wobei sich das erste Maximum der Fensterfunktion nach dem Maximum der jeweilig zu fensternden Impulsantwort richtet. Die ausgeschnittenen und gefensternten Impulsantworten sind in Abbildung 7, die Fensterfunktionen in Abbildung 8 veranschaulicht.

<sup>2</sup>die gefensternten Impulsantworten haben die Länge 500, wohingegen die originalen Signale  $\mathbf{Y}$  die Länge 88200 haben!

<sup>3</sup>Bei der Systemidentifikation mit exponentiellen Sweeps werden Impulsantworten höherer Ordnung (Nichtlinearitäten!) vor die eigentliche lineare Impulsantwort (IR) abgebildet. Zudem ergibt sich eine Verzögerung der IR um die akustische Laufzeit. Raumreflexionen kommen mit einer, der längeren Laufzeit über eine reflektierende Fläche(z.B Boden) entsprechenden, zeitlichen Verzögerung nach dem Direktanteil zu liegen. Durch entsprechendes Ausschneiden bzw. Fenstern, können somit nichtlineare Anteile und Raumreflexionen ausgeblendet werden und man erhält eine 'saubere' Impulsantwort.

## 6 Berechnung des Wellenzahlspektrums

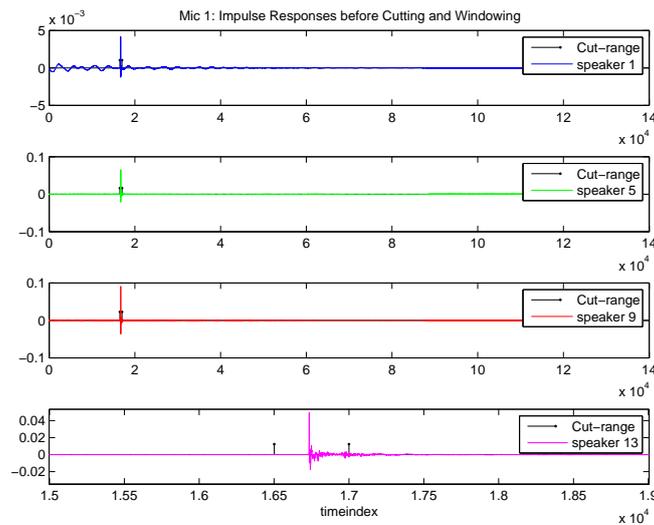


Abbildung 6: Ungefensterte Impulsantworten - wie sie sich aus Gleichung 2 ergeben - für 4 verschiedene Lautsprecherpositionen. Die unterste IR ist gezoomt dargestellt. Der Bereich in dem ausgeschnitten wird, ist mit zwei schwarzen Markern gekennzeichnet

## 6 Berechnung des Wellenzahlspektrums

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie man von den Mikrofonsignalen, bzw. den zuvor beschriebenen Impulsantworten, auf das Wellenzahlspektrum kommt. Zudem soll noch einmal beschrieben werden, was dieses eigentlich aussagt bzw. darstellt. Für die genauen formalen Zusammenhänge sei abermals auf die Laborunterlagen [2] verwiesen.

### 6.1 Theorie

#### 6.1.1 Wellenzahlspektrum einer ebenen Welle

Im idealen Fall - d.h. bei unendlich großer und nicht diskretisierter Apertur - entspricht einer ebenen Schallwelle ein Dirac-Impuls im Wellenzahlspektrum. Darüber sei kurz genauer nachgedacht:

Eine ebene Welle zeichnet sich durch eine bestimmte Frequenz und Richtung aus. Der Frequenz  $f$  entspricht mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda = c/f$ . Die Richtung ist durch den Azimutwinkel  $\varphi$  und Elevationswinkel<sup>4</sup>  $\vartheta$  festgelegt. Bei einem bestimmten  $\varphi$  und  $\vartheta$  wird nun in jede Raumrichtung  $x$ ,  $y$ , und  $z$  eine bestimmte Wellenlänge  $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z]$  festzustellen sein. Eine Veranschaulichung dieses Sachverhaltes findet sich in Abbildung 9. Der mathematische Zusammenhang zwischen

<sup>4</sup>in der in der Mathematik üblichen Definition angegeben!

## 6 Berechnung des Wellenzahlspektrums

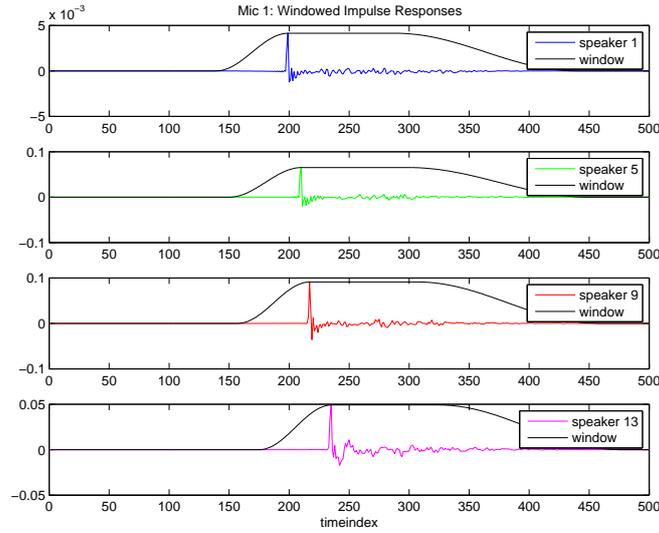


Abbildung 7: Gefensterte und ausgeschnittene Impulsantworten für 4 verschiedene Lautsprecherpositionen. Die angewendeten Fenster sind schwarz angedeutet.

Richtung und Wellenlänge ist mit Gleichung 5 gegeben.

$$\lambda_x = \lambda \cos(\varphi) \sin(\vartheta) \quad (3)$$

$$\lambda_y = \lambda \sin(\varphi) \sin(\vartheta) \quad (4)$$

$$\lambda_z = \lambda \cos(\vartheta) \quad (5)$$

Der Wellenlänge  $\lambda = c/f$  entspricht damit die euklid'schen Norm  $\|\boldsymbol{\lambda}\|$  des Wellenlängenvektors  $\boldsymbol{\lambda}$ . Da natürlich Beziehung (6) zwischen Frequenz, Wellenlänge und Wellenzahl gilt, gibt es zu jedem  $\boldsymbol{\lambda}$  ein eindeutiges  $\mathbf{k} = [k_x, k_y, k_z]$ .

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi f}{c} \quad (6)$$

Damit entspricht einer ebenen Welle genau ein Punkt  $\mathbf{k}$  im Wellenzahlraum. Dieser ist wiederum dem zuvor erwähnten (räumlichen) Dirac-Impuls gleichzusetzen.

Umgekehrt kann man natürlich die Richtung einer ebenen Welle bestimmen, wenn man einen Punkt im Wellenzahlspektrum gegeben hat.

Das Wellenzahlspektrum lässt sich nun mittels örtlicher Fouriertransformation über die (örtliche) Schalldruckverteilung berechnen (Herleitung siehe [2]). Tatsächlich ist dies auch intuitiv verständlich, werden doch mit der örtlichen Fouriertransformation Periodizitäten entlang der Raumrichtungen gefunden, welche ja wiederum durch die Komponente der Wellenlänge bzw. Wellenzahl  $\mathbf{k}$  in diese Richtung bestimmt werden. Anstatt wie gewohnt mit 'zeitlichen Frequenzen', hat man es hier eben mit 'räumlichen' zu tun. Die Methoden und Erkenntnisse der Signalverarbeitung von Zeitsignalen können aber mehr oder weniger direkt übernommen werden.

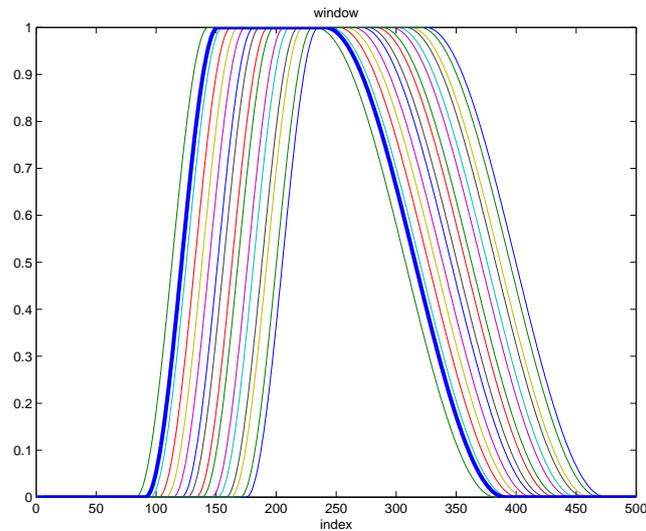


Abbildung 8: Fensterfunktionen bei unterschiedlichen Mikrofonen. Man erkennt den Zeitversatz innerhalb des Ausschneidebereiches

### 6.1.2 Auswirkung der Abtastung und Fensterung

Die örtliche Schalldruckverteilung lässt sich in der Praxis nur auf einer begrenzt ausgedehnten Fläche (endliche Apertur) mit endlich vielen Mikrofonen messen (örtliche Abtastung). Die dadurch auftretenden Effekte sind direkt mit den uns vertrauten Auswirkungen von Abtastung und Fensterung eines Zeitsignales verwandt.

Die Multiplikation mit dem örtlichen Rechteckfenster (endliche Apertur) wirkt sich im Wellenzahlspektrum als Faltung mit der Fouriertransformierten des Fensters - also einer örtlichen Sinc-Funktion - aus.

Die Abtastung wiederum bewirkt die periodische Fortsetzung des Wellenzahlspektrums. Dadurch kann es zu Ambiguitäten in der Richtungsdetektion, dem spatialen Aliasing, kommen. Bei mehreren unterschiedlichen  $\mathbf{k}$  kommt es zu gleich stark ausgeprägten Peaks, wodurch die Richtungszuordnung nicht mehr eindeutig bleibt.

Diese periodische Fortsetzung tritt natürlich bei jeder noch so beliebig feinen Abtastung auf. Die Wiederholungen befinden sich dann allerdings in sehr großem Abstand vom richtigen  $\mathbf{k}$ , das im 'Grundintervall' liegt.

### 6.1.3 Kreis der ebenen Wellen im $\mathbf{k}$ -Space

Das eben genannte 'Grundintervall' sei nun näher beschrieben:

Da ja ebene Wellen die Voraussetzung für alle Überlegungen waren, muss [2] gelten:

$$\|\mathbf{k}\| = k = \omega/c$$

## 6 Berechnung des Wellenzahlspektrums

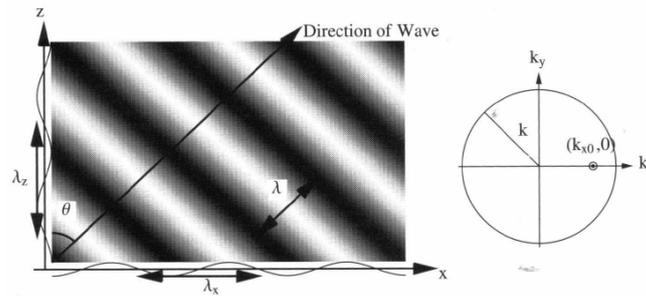


Abbildung 9: Darstellung einer ebenen Welle und zugehörige Wellenzahlen (aus [2])

Dadurch wird ein Kreis mit dem Radius  $k = \omega/c$  im  $k$ -space definiert.

Die Richtungsdektion hat also nur aufgrund der Wellenzahlspektrums innerhalb dieses Kreises (von der Frequenz der Welle abhängig!) Gültigkeit, da sich nur hier ebene Wellen ausbreiten. Nur wenn also die erste Wiederholung (von der örtlichen Samplerrate abhängig!) innerhalb des Kreises zu liegen kommt, kann man von Aliasing sprechen - ansonsten nicht.

Damit tritt das Aliasing, genau wie bei Zeitsignalen, bei im Vergleich zur Samplerrate hochfrequenten Wellen auf. Genauer gesagt, kommt es oberhalb der Grenzfrequenz in Gleichung 7 zu Aliasing.  $\Delta x$  bezeichnet dabei das räumliche Abtastintervall (Einheit Meter), also den Abstand der Mikrofone voneinander. Falls man den möglichen maximalen Einfallswinkel  $\vartheta_{max}$  auf das Array kennt, steigt diese Grenzfrequenz gegebenenfalls, gegenüber dem allgemeinen Fall von  $\vartheta_{max} = 90^\circ$ , an.

$$f_{og} = \frac{c}{2\Delta x \sin(\vartheta_{max})} \quad (7)$$

### 6.2 Programmierung

Ausgangspunkt sind die Zeitsignale, in unserem Fall also die Impulsantworten  $\mathbf{H}[n]$ . Zunächst wird eine fixe<sup>5</sup> Frequenz und Lautsprecherposition  $l$  vorgegeben. Dies entspricht der Betrachtung einer ebenen Welle mit bestimmter Frequenz  $f_i$ , deren Wellenzahlspektrum nun berechnet werden soll.

Es stellt aber prinzipiell keine Einschränkung dar, die Analyse nur für einzelne ebene Wellen bestimmter Frequenz separat machen zu können. Ein komplexes Schallsignal lässt sich nämlich als Überlagerung aus vielen ebenen Wellen unterschiedlicher Frequenz (orthogonale räumliche Basisfunktionen, wie harmonische Schwingungen bei eindimensionalen Signalen) ansehen. Somit kann eine breitbandige Quelle in einzelne Frequenzen aufgesplittet werden und z.B. ihre Abstrahlcharakteristik gemessen werden.

<sup>5</sup>Diese zunächst festen Parameter wurden hernach über ein GUI mittels Schieberegler verändertbar gemacht

### 6.2.1 Amplitudenbestimmung über das Array mittels der bei einer Frequenz ausgewerteten Diskreten Fourier Transformation (DFT)

In diesem Schritt wird die Zeitdomäne verlassen<sup>6</sup>, indem man die Amplitude jedes Mikrofonsignals (bzw. deren Impulsantworten) bei der Frequenz  $f_i$  bestimmt. Damit kommt man von  $[500 \times 64]$  auf  $[1 \times 64]$  Werte für jede der 15 Quellpositionen  $l$ .

Dies geschieht durch Berechnen der DFT bei dieser Frequenz, was in Matlab als einfache Vektor-Matrix Multiplikation implementiert werden kann.

### 6.2.2 Umordnen auf die Arraygeometrie

Jetzt müssen diese 64 Werte dem Aufbau des Arrays entsprechend ( $8 \times 8$ ) angeordnet werden. Die resultierende Matrix ist also ein Abbild der Schalldruckverteilung über das Array für die Frequenz  $f_i$ . Man betrachte dazu Abbildung 10.

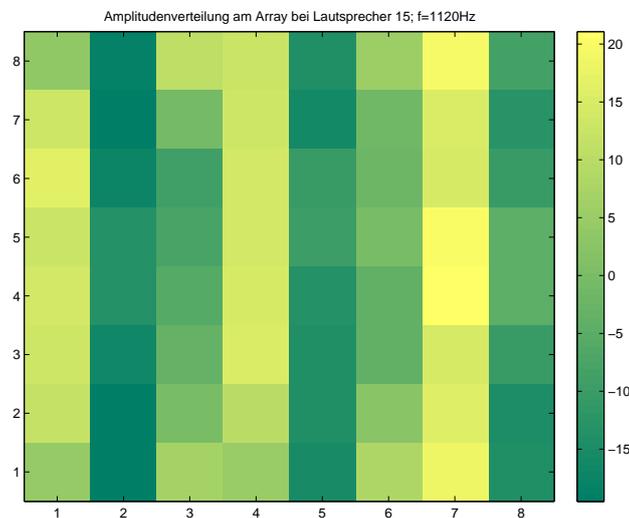


Abbildung 10: Amplitudenverteilung über das Array

### 6.2.3 2d - Fourier Transformation

Mit Hilfe der 2d - Fourier Transformation kann nun die wesentliche Information (die Periodizitäten), die in der zuvor beschriebenen Matrix enthalten ist, sichtbar gemacht werden. Um dabei eine höhere Ortsauflösung zu erzielen, kann z.B. auf  $N_{FFT2} = 128$  'zerogepadded' werden.

<sup>6</sup>Für eine Echtzeitanalyse müsste man hier entsprechend blockweise arbeiten, oder die Begrenzung auf eine Frequenz  $f_i$  mit einem schmalbandigen Bandpassfilter und nachfolgender RMS-Bestimmung durchführen

## 6 Berechnung des Wellenzahlspektrums

Das Ergebnis dieser 2d-FFT ist nun bereits das zuvor diskutierte diskrete Wellenzahlspektrum bei der Frequenz  $f_i$ . Es muss aber natürlich auf die passende Skalierung der Koordinaten (Bins bzw. Wellenzahlen) geachtet werden. Weiters ist zu beachten, dass die Funktion `fft2` welche die 2d-FFT in Matlab realisiert, nur das Grundintervall liefert. Die stets vorhandenen periodischen Wiederholungen müssen also extra hinzugefügt werden. Dies wurde mittels der Funktion `repmat` implementiert.

Aus dem Wellenzahlspektrum lässt sich nun, wie oben beschrieben, die Einfallsrichtung der ebenen Welle ableiten bzw. ist auch - zumindest qualitativ - direkt sichtbar. Eine entsprechende Darstellung des Wellenzahlspektrums bei unterschiedlichen Einfallswinkeln zeigt Abbildung 11.

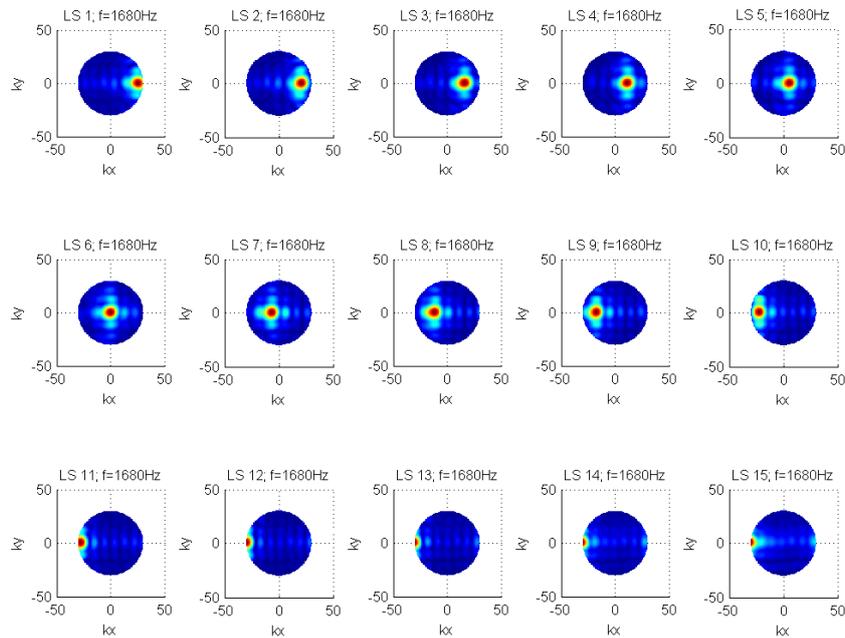


Abbildung 11: Wellenzahlspektrum für unterschiedliche Schalleinfallsrichtungen (Lautsprecherpositionen): Es ist nur der kreisförmige Bereich der ebenen Wellenausbreitung dargestellt. Man kann die Aufstellung der LS gut nachvollziehen

### 6.2.4 Darstellung

Der restliche, größte Teil des Matlab-Codes betrifft nur mehr Darstellung des im vorigen Schritt berechneten diskreten Wellenzahlspektrums.

Das Wellenzahlspektrum wurde mit `mesh` dargestellt und farblich kodiert. Große Werte

## 7 Ergebnis und Fazit

werden rot, kleine blau dargestellt. Zudem wurde der Kreis, in dem ebene Wellenausbreitung stattfindet, eingezeichnet, bzw. das Wellenzahlspektrum überhaupt nur in diesem Bereich visualisiert. Eine entsprechende Darstellung findet sich z.B. in Abbildung 12.

Eine weitere anschauliche Darstellungsform ist die Abbildung des Wellenzahlspektrums

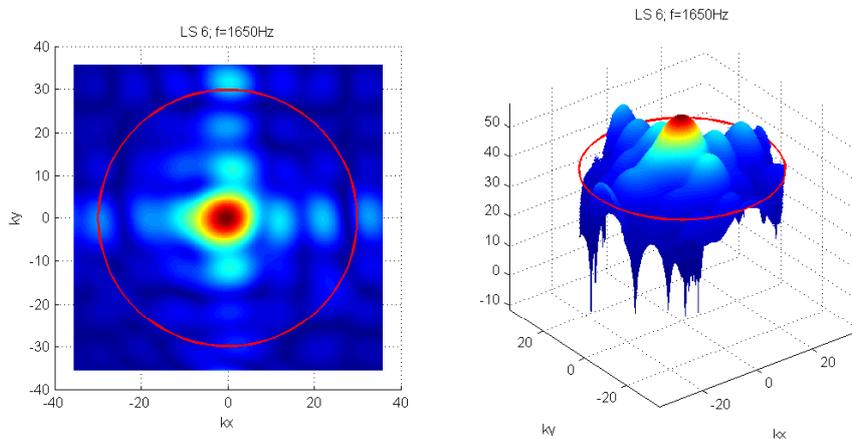


Abbildung 12: Wellenzahlspektrum für LS 6 bei 1650Hz: Man erkennt ein eindeutiges Maximum das bei ungefähr  $[k_x, k_y] = [0, 0]$  liegt. Die Welle ist also frontal auf das Array eingefallen. Der Sinc-förmige Verlauf, der durch die endliche Apertur zustandekommt, ist schön sichtbar.

auf sphärische Koordinaten, womit man einen sogenannten *beamplot* erhält. Die Hauptkeule zeigt dann nämlich in Richtung der einfallenden Welle. Man betrachte dazu Abbildung 13.

Um die Ergebnisse in Abhängigkeit der Parameter Frequenz und Einfallswinkel (also des jeweiligen Lautsprechers *lsp*) zu visualisieren, wurde ein *Graphical User Interface* (GUI) in Matlab erstellt. Dieses besitzt zwei Schieberegler für die Frequenz bzw. den Lautsprecher und berechnet und visualisiert das Wellenzahlspektrum bei jeder Veränderung der Schieberegler für die eingestellten Werte neu. Damit können die Auswirkungen unterschiedlicher Parametereinstellungen auf das Wellenzahlspektrum in einfach zugänglicher Weise visualisiert werden.

## 7 Ergebnis und Fazit

Das Wellenzahlspektrum wurde in Abhängigkeit von Frequenz und unterschiedlichen Quellpositionen abgebildet. Die besprochenen Auswirkungen von Abtastung und endlicher Größe der Apertur sind, wie auch jene von Frequenz und Quellposition, gut erkennbar. Interessanterweise sieht das Wellenzahlspektrum ab ungefähr 2kHz schlagartig anders aus als für Frequenzen kleiner als 2kHz. Dies ist unter anderem in Abbildung 15 zu sehen.

## 7 Ergebnis und Fazit

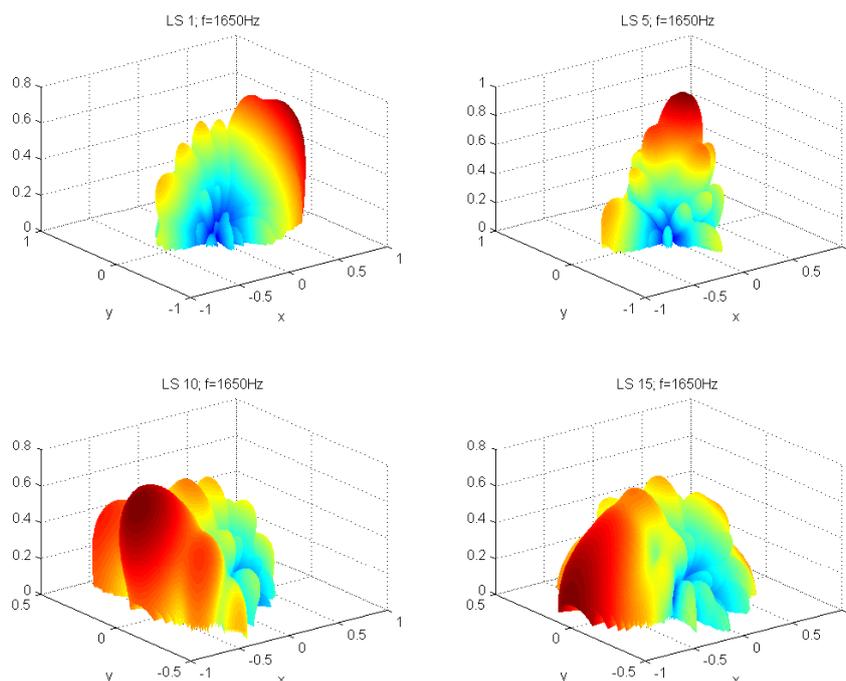


Abbildung 13: Beamplot für 4 verschiedene Schalleinfallrichtungen (Lautsprecherpositionen): Die Spitze der Hauptkeule (dunkelrot) zeigt in Richtung des einfallenden Schalles

Bis 2 kHz scheint das Ergebnis richtig: Jede unterschiedliche Lautsprecherposition wird auf einen entsprechenden Punkt im Wellenzahlspektrum abgebildet. Dabei kommt es durch die endliche Apertur, wie erwartet, zur Faltung mit einer Sinc-Funktion und somit Ausprägung von Nebenkeulen.

Das Ergebnis über 2 kHz ist hingegen nicht verständlich. Es liegt offenbar ein Fehler vor. Gleichung 7 sagt uns, dass wir bei unserem Mikrofonabstand von 10 cm ab ung. 1.7 kHz mit Aliasing zu rechnen haben. Allerdings würde Aliasing bedeuten, dass es mehrere gleichwertige Maxima innerhalb des Kreises der ebenen Wellenzahlspektrum gibt. Eines dieser Maxima sollte aber immer noch beim gleichen und richtigen Punkt wie bei den tiefen Frequenzen zu liegen kommen. In Abbildung 15 ist aber von 1950 Hz auf 2 kHz plötzlich ein sprunghaft anderes Wellenzahlspektrum sichtbar, was eigentlich nicht mit der Theorie zusammenpasst.

Da die Berechnung und Verarbeitung der Daten bei allen Frequenzen vom gleichen Programmcode durchgeführt wird, dürfte der angesprochene Fehler bei den hohen Frequenzen bereits in den aufgenommen Messdaten und nicht in deren Auswertung liegen. Da der Fehler nur in einem Frequenzbereich auftritt, wo ohnehin mit Aliasing zu rechnen ist, wäre er in der Praxis auch nicht weiter schlimm, da der Bereich über dem Aliasing-

## Literatur

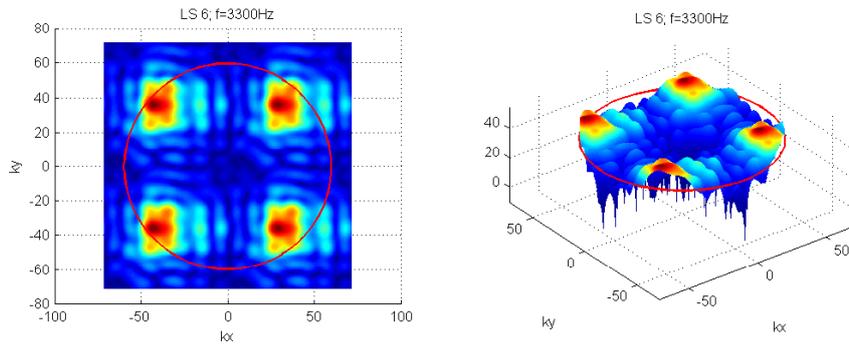


Abbildung 14: Wellenzahlspektrum für LS 6 bei 3320Hz: Es kommt zu Aliasing, da die periodische Kopien innerhalb des Kreises der ebenen Wellenausbreitung zu liegen kommen. Allerdings sollte ein Maximum am gleichen Punkt wie in Abbildung 12 zu liegen kommen. Dieser vermutlich fehlerhafte Umstand wird im Text diskutiert.

Grenzfrequenz ja nicht zur Bestimmung der Richtung einer einfallenden Welle herangezogen werden dürfte.

## Literatur

- [1] D. Hofer, "Implementierung eines 64 kanal mikrofonarrays," M.S. thesis, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz, 2008.
- [2] F. Zotter, "Akustische messtechnik 2, lu - laborunterlagen," 2008.

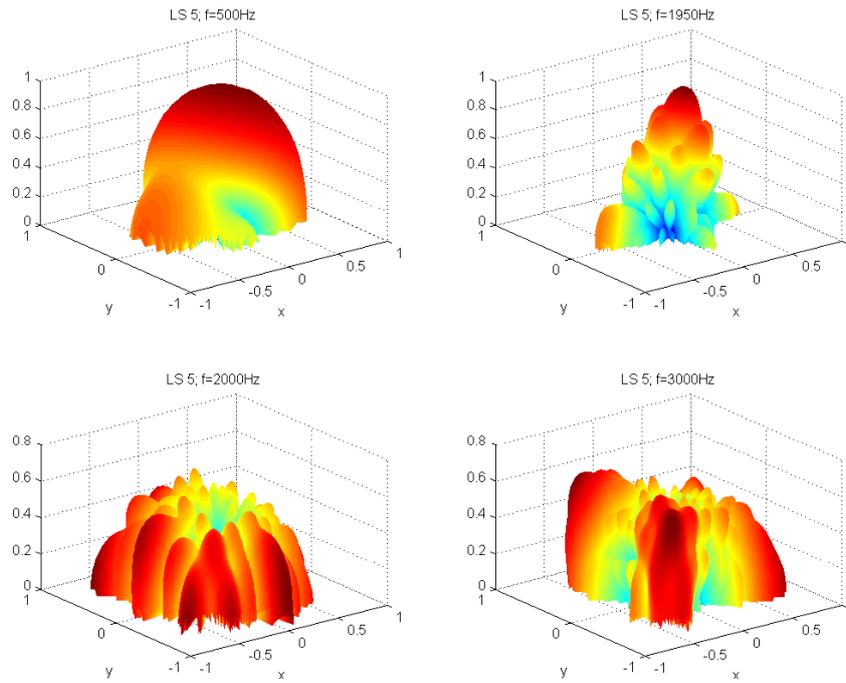


Abbildung 15: Beamplots für den gleichen Lautsprecher, bei unterschiedlichen Frequenzen: Die Spitze zeigt für tiefe Frequenzen in die richtige Richtung. Mit steigender Frequenz fallen mehr Nebenkeulen in den zur Darstellung herangezogenen Bereich ebener Wellenausbreitung. Über 2kHz ist das im Text diskutierte, völlig andere Verhalten als unter 2kHz sichtbar.