

**Institut für Nachrichtentechnik**  
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
Schleinitzstraße 22, 38106 Braunschweig

# Praktikum für Nachrichtentechnik

## Versuch 5

# Beamforming mit Mikrofonarrays

Verfasst von Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Frithjof Hummes  
Überarbeitet von Balázs Fodor und Carsten Monka

Version 1.2  
15. Oktober 2013



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Akustik und akustische Größen . . . . .	5
2.2	Mikrofone . . . . .	10
2.2.1	Schallwandlertypen . . . . .	11
2.2.2	Richtcharakteristiken . . . . .	14
2.3	Beamforming . . . . .	16
2.3.1	Mikrofonarrays . . . . .	16
2.3.2	Delay-and-Sum-Beamformer . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>22</b>
3.1	Audio Analyzer R&S UP300 . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Praktikumsversuch</b>	<b>24</b>
4.1	Vorbereitende Hausaufgaben . . . . .	24
4.2	Versuch 1: Richtcharakteristiken einzelner Mikrofone . . . . .	26
4.3	Versuch 2: Richtcharakteristiken eines Mikrofonarrays . . . . .	31
4.4	Versuch 3: Messungen mit Störquellen . . . . .	33

## Abbildungsverzeichnis

1	Mikrofonarray im Kfz-Innenspiegel . . . . .	5
2	Querschnitt eines Tauchspulnmikrofons . . . . .	12
3	Hilfsbild zum Kondensatormikrofon . . . . .	13
4	Überlagerung idealer Richtcharakteristiken . . . . .	16
5	Laufzeitdifferenzen im Fernfeldfall . . . . .	18
6	Verschiedene Richtcharakteristiken . . . . .	20
7	3D-Richtcharakteristik für Frequenzen von 100 bis 2500 Hz . .	21
8	Gemessenes Spektrum eines Testsignals mit 250Hz . . . . .	25
9	Polardiagramm für Mikrofon A . . . . .	28
10	Polardiagramm für Mikrofon B . . . . .	29
11	Richtdiagramm für Versuch 2 . . . . .	32

# 1 Einleitung

Ob Sprache, Musik oder andere Alltagsgeräusche, Schall ist wohl das wichtigste Kommunikationsmittel für uns Menschen. Das menschliche Gehör hat sich dementsprechend entwickelt, so dass wir Schall auf verschiedenen Ebenen Informationen entnehmen können. Wir erkennen, aus welcher Richtung und welcher Entfernung ein Geräusch kommt, wodurch es verursacht wurde und reagieren äußerst schnell, falls dadurch eine Gefahr signalisiert wird. Sofern wir der entsprechenden Sprache mächtig sind, können wir Schallwellen einzelne Wörter entnehmen und sogar den emotionalen Zustand eines Sprechers einschätzen. Es verwundert daher nicht, dass wir im Alltag von Schallsensoren, besser bekannt als Mikrofone, umgeben sind. Sie befinden sich in jedem Telefon, im Handy, in allen neueren Kraftfahrzeugen und in fast jedem Computer. Kurz gesagt: Es gibt kaum einen Raum oder Moment, in dem wir uns nicht im Aufnahmebereich eines Mikrofons befinden. Bei Kameras löst diese Vorstellung (noch) Unbehagen aus, während wir uns an der Omnipräsenz von Schallsensoren nicht mehr stören, sie im Regelfall überhaupt nicht mehr wahrnehmen. Doch nicht alles, was als Schall an unseren Ohren eintrifft, ist für uns auch relevant. Neben dem gewünschten Nutzschall erreicht oft auch ein hohes Maß an Störschall unsere Ohren. Menschen haben die Möglichkeit, sich auf Schall aus bestimmten Richtungen zu konzentrieren, was als *Cocktailparty-Effekt* bekannt ist, einige Tiere drehen dazu ihre Ohren, aber wie erreicht man eine so genannte Richtwirkung bei einem Mikrofon? Und lässt sich eine bewegte Schallquelle damit auch verfolgen, ohne das Mikrofon zu bewegen? Dieser Praktikumsversuch soll zeigen, wie bestimmte Richtcharakteristiken bei einzelnen Mikrofonen erreicht werden können und wie sich mit Hilfe mehrerer Mikrofone (sog. *Mikrofonarrays*) spezielle Richtcharakteristiken erzielen und sogar in Echtzeit verändern lassen (*Beamforming*). Diese Mikrofonarrays findet man in der Praxis bereits in Laptop-Displays, Innenspiegeln bei Kraftfahrzeugen, Hörgeräten und vielen anderen Anwendungen.

Das vorliegende Skript bietet dazu eine grundlegende Einführung, um die Versuche durchführen und verstehen zu können. Die vorbereitenden Hausaufgaben sind vor dem Praktikumstermin zu erledigen und dienen dazu, einige wichtige Rechnungen und den Umgang mit der „Einheit“ Dezibel (dB) zu trainieren, was für die Durchführung des Praktikums unerlässlich ist.



Abbildung 1: Mikrofonarray im Kfz-Innenspiegel

## 2 Grundlagen

### 2.1 Akustik und akustische Größen

Die Akustik ist die Lehre des Schalls und damit ein ausgesprochen umfangreiches und interdisziplinäres Gebiet, das aus wissenschaftlicher Sicht nicht nur zur Elektrotechnik und Physik gehört, sondern auch im Maschinenbau und Bauingenieurwesen eine große Bedeutung hat, ganz zu schweigen von den Musikwissenschaften.

Der Begriff *Schall* ist dabei nicht weniger allgemein. Grob lassen sich Nutzschaall und Störschall unterscheiden, also Schall, den man hören möchte, und Schall, der lediglich stört. Es gibt aber auch Schall, den Menschen gar nicht hören (Ultraschall) aber trotzdem körperlich wahrnehmen können (Infraschall). Schall benötigt zur Ausbreitung immer ein Medium, meist ist das Luft oder Wasser, aber auch in festen Körpern, wie z.B. Mauern oder Stimmgabeln breitet sich der sogenannte Körperschall aus, der direkt oder indirekt wieder als Luftschall abgestrahlt werden kann.

Grundsätzlich kann man mit Schall Informationen übertragen. Offensichtlich ist das bei Sprache und Musik, aber jedes beliebige Geräusch birgt Merkmale, die über seine Entstehung und Richtung Auskunft geben können. Ultraschall kann zur analogen und digitalen Übertragung moduliert oder wie bei der Sonographie sogar in Bilder umgerechnet werden, mit fokussierten Stoßwellen lassen sich beispielsweise Nierensteine zertrümmern und beim Sonar geben Schallwellen Auskunft über Wassertiefe und Bodenbeschaffenheit.

Auch physiologisch wurde dem Schall eine besondere Bedeutung zugemes-

sen, denn „weghören“ ist uns Menschen im Gegensatz zum Wegsehen oder Augenschließen tatsächlich kaum möglich. Die Abwesenheit von Schall, also totale Stille, empfinden wir Menschen sogar zumeist als unangenehm. Zuviel bzw. zu lauter Schall hingegen schädigt nicht nur das Gehör, sondern auch das vegetative Nervensystem.

Aber was ist Schall überhaupt? Kurz gesagt handelt es sich um einen sich in einem Medium ausbreitenden Wechseldruck, also um eine zeitlich und örtlich veränderliche Größe.

In diesem Praktikumsversuch kann das Thema Schall nur in kleinen Teilen behandelt werden, die für das Verständnis von Mikrofonen, Richtcharakteristiken und Beamforming nötig sind. Im Wesentlichen geht es also um den für Menschen hörbaren Luftschall. Vorweg sollen aber die wichtigsten Grundlagen und Begriffe erläutert werden.

Da in der Akustik unter anderem mit sich ausbreitenden Schallwellen, also mit Schallfeldern, gerechnet wird, muss sauber zwischen linearen *Feldgrößen* und quadratischen *Energiegrößen* unterschieden werden. *Schallfeldgrößen* (z. B. Schalldruck und Schallschnelle) beschreiben den Zustand eines Schallfeldes. Die *Schallenergiegrößen* (z. B. Schallintensität und Schallleistung) sind proportional zu den quadrierten Schallfeldgrößen.

Im Folgenden werden die akustischen Grundlagen erklärt, deren Kenntnis eine Voraussetzung für das weitere Verständnis des Skriptes und zur Durchführung der Versuche ist. Um die Dimension dieses Skriptes in einem angemessenen Rahmen zu halten, sei an dieser Stelle auf die sehr ausführlichen Bücher [1] und [4] verwiesen, deren Inhalt hier sehr stark komprimiert und auf das Nötigste beschränkt wiedergegeben wird.

**Schalldruck** Der Schallwechseldruck  $p$ , kurz Schalldruck genannt, ist die Schallfeldgröße, welche die Abweichung des (Luft-)Drucks vom Ruhewert angibt. Der Ruhewert ist in den meisten Fällen der atmosphärische Luftdruck (s. Wetterbericht!) und die Einheit ist Pascal (Pa).

**Schalldruckpegel** Setzt man den Effektivwert des Schalldruckes ins Verhältnis zu einem definierten Bezugswert und nimmt davon den Logarithmus, erhält man den Schalldruckpegel  $L_p$  (engl. *Sound Pressure Level* = SPL).

Als Bezugsschalldruck wird die kleinste hörbare Druckschwankung von  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa gewählt. Somit lässt sich aus einem (stationären) Schalldruck folgendermaßen der Schalldruckpegel berechnen:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

Die Hilfsmaßeinheit B (Bel) ist für logarithmierte dimensionslose Verhältnisse aus Leistungsgrößen definiert, um große Zahlenbereiche anschaulicher darzustellen, wobei fast ausschließlich das mit dem Faktor 1/10 multiplizierte Dezibel (dB) verwendet. Dadurch erhält man praktische Werte, bei denen die Nachkommastellen zumeist vernachlässigbar sind. Da der Schalldruck eine Feldgröße und keine Leistungsgröße ist, geht er quadratisch in die Pegelrechnung ein, bzw. als Faktor 2 für den Logarithmus. Das menschliche Ohr ist für Schalldrücke über sechs Zehnerpotenzen von etwa  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa bis 100 Pa empfindlich. Der sogenannte A-bewertete Schalldruckpegel (dBA) kann daher von 0 dB (Ruhehörschwelle) bis 140 dB (Schmerzgrenze) angegeben werden.

**Schallintensität** Die Schallintensität  $I$  gibt die Leistung an, die durch eine Fläche tritt. Sie ist also eine Leistungsgröße und trägt die Einheit  $\text{W}/\text{m}^2$ .

**Schallintensitätspegel** Den Schallintensitätspegel berechnet man analog zum Schalldruckpegel wie folgt:

$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

Als Bezugsintensität ist  $I_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$  definiert. Schallintensitäts- und Schalldruckpegel werden gerne durcheinander gebracht. Sie hängen zwar voneinander ab, die Schallintensität  $I$  ist jedoch proportional zum quadrierten Schalldruck  $p^2$ . Tabelle 1 gibt einen Überblick über praktisch sehr häufig vorkommende Pegelwerte.

**Schallgeschwindigkeit** Die Schallgeschwindigkeit  $c$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen in einem bestimmten Medium und hängt außerdem von der Temperatur  $\theta$  ab, da diese eine Dichteänderung des Mediums bedingt. Für Luft bei Raumtemperatur ( $\theta = 20^\circ\text{C}$ ) gilt  $c \approx 343 \text{ m}/\text{s}$ . Näherungsweise wächst  $c$  um  $0,6 \text{ m}/\text{s}$  pro  $^\circ\text{C}$ .

Pegel	Verhältnis zweier Feldgrößen (z.B. $p/p_0$ )	Verhältnis zweier Energiegrößen (z.B. $I/I_0$ )
0 dB	1	1
+3 dB	$\sqrt{2} \approx 1,4$	2
+6 dB	2	4
+10 dB	3	10
+20 dB	10	100
+40 dB	100	10000

Tabelle 1: Faktoren für häufig benötigte dB-Werte

**Schallschnelle** Nicht zu verwechseln mit der skalaren Schallgeschwindigkeit  $c$  ist die vektorielle Schallschnelle  $\mathbf{v}$ , welche die Geschwindigkeit der Teilchenbewegung, in unserem Fall der Luftmoleküle, angibt. Während sich eine Schallwelle konstant mit der Schallgeschwindigkeit ausbreitet, schwingen die Luftmoleküle hin und her, bzw. vor und zurück.

**Schallwellen** Schallwellen sind, wie alle Wellen, zeitliche und örtliche Veränderungen einer physikalischen Größe. Uns interessiert hierbei vor allem der Schalldruck  $p$ , denn Luftschall breitet sich immer als Druckwelle aus und schwingt somit in Ausbreitungsrichtung (Longitudinalwelle). Jedes periodische Signal lässt sich mittels Fourier-Analyse in eine Summe von Sinusschwingungen zerlegen, die jeweils mit ihrer Amplitude, Frequenz und Phasenlage definiert sind. Aus der Frequenz  $f$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  lässt sich folgendermaßen die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

berechnen. Von einer Punktschallquelle breiten sich also kugelförmige Schallwellen aus, wobei Schalldruck und Schallintensität mit der Entfernung  $r$  zur Quelle abnehmen. Die Schallintensität verteilt sich auf eine immer größer werdende Kugeloberfläche und nimmt daher proportional zu  $1/r^2$  ab. Für den Schalldruck gilt demnach eine Abnahme mit  $1/r$ . Befindet man sich nicht mehr im Nahfeld sondern im Fernfeld, also weit genug von der Quelle entfernt, kann man von ebenen Wellenfronten ausgehen.

**Pegelrechnung** Als Pegel bezeichnet man logarithmierte Verhältnisse einer Leistungsgröße zu einer bestimmten Bezugsleistung (s. Gleichung (2)). Im Gegensatz zu einem beliebigen Verhältnis zweier Leistungsgrößen, z.B. einem Übertragungsmaß zwischen Eingang und Ausgang eines Verstärkers, lässt sich aus Pegeln also stets der absolute Wert wieder errechnen. Zu beachten ist, dass Feldgrößen quadratisch in die Formel eingehen, wie man an der Definition des Schalldruckpegels in Gleichung (1) sieht. Das Rechnen mit Pegeln bietet sich wie bereits erwähnt für große Zahlenbereiche an. Außerdem werden Multiplikationen und Divisionen durch den Logarithmus zu Additionen bzw. Subtraktionen, womit sich leichter im Kopf rechnen lässt.

Achtung: Schalldruckpegel dürfen nicht einfach addiert werden, wenn sich zwei Schalldrücke additiv überlagern! Wenn ein gewöhnlicher Staubsauger einen Schalldruckpegel von 70 dB erzeugt, wird durch die Verwendung eines zweiten Staubsaugers vom gleichen Typ noch lange nicht der Schalldruckpegel eines startenden Düsenjets mit 140 dB erreicht! Die einzelnen Schalldruckpegel müssen zunächst in ihren entsprechenden Schalldruck umgerechnet und dann erst addiert werden. Anschließend lässt sich daraus wieder ein Schalldruckpegel errechnen.

Zusätzlich muss unterschieden werden, ob es sich um kohärente oder inkohärente Schallquellen handelt. Bei den beiden Staubsaugern handelt es sich um inkohärente Schallquellen, ihre Schall*intensitäten* können direkt addiert werden, ihre Schall*drücke* müssen also zunächst quadriert werden. Es gilt dann:

$$p_{\text{ges}} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \quad (4)$$

Für unser Beispiel ergibt sich somit:

$$L_{p_1} = L_{p_2} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{p_1}{p_0} \right) = 70 \text{ dB}$$

$$\frac{7}{2} = \log_{10} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)$$

$$p_1 = p_0 \cdot 10^{\frac{7}{2}}$$

$$p_1 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot 10^{\frac{7}{2}} = 2 \cdot 10^{-\frac{3}{2}} \text{ Pa}$$

$$p_1 = p_2 = 0,063 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{ges}} = \sqrt{(0,063 \text{ Pa})^2 + (0,063 \text{ Pa})^2} = 0,09 \text{ Pa}$$

$$L_{p_{\text{ges}}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{0,09 \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} \right) \text{ dB}$$

$$L_{p_{\text{ges}}} = 73 \text{ dB}$$

Die beiden Staubsauger erzeugen also gemeinsam einen Schalldruckpegel von 73 dB. Das bestätigt auch die Faustregel, nach der zwei gleichlaute, inkohärente Schallquellen eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 3 dB erzeugen. Bei kohärenten Quellen hängt die Verstärkung oder Dämpfung vom Phasenwinkel ab. Bei  $0^\circ$  Phasendifferenz gilt  $p_{\text{ges}} = p_1 + p_2$ , wodurch sich der Schalldruckpegel sogar um 6 dB erhöht. Gegenphasige Signale, die also um  $180^\circ$  gegeneinander verschoben sind, löschen sich unter idealen Bedingungen vollständig aus. Es gilt  $p_{\text{ges}} = p_1 - p_2 = 0 \text{ Pa}$ . Aus Formel 1 ergibt sich ein Gesamtschalldruckpegel von  $-\infty \text{ dB}$ . Dieses Phänomen machen sich Beamformer zunutze, indem sie Schallsignale an verschiedenen Stellen empfangen und relativ zueinander verzögern, bevor sie addiert werden. So lässt sich Schall aus bestimmten Richtungen verstärken und aus anderen Richtungen dämpfen. Wie Beamformer im Detail funktionieren, wird in Kapitel 2.3 erläutert. Recht einfach lassen sich aus den in Tabelle 1 genannten wichtigen Verhältnissen andere Werte zusammensetzen.  $7 \text{ dB} = 10 \text{ dB} - 3 \text{ dB}$  entspricht also der Hälfte der zehnfachen Leistung, also der fünffachen Leistung. Eine gute Übersicht über die Verwendung der Einheit Dezibel, das Rechnen mit Pegeln und den typischen Denkfehlern bietet [5].

## 2.2 Mikrofone

Mikrofone sind elektroakustische Wandler, die Schall in elektrische Größen umwandeln. Die Wandlung findet jedoch meist nicht direkt statt. Die erste Stufe ist eine akustisch-mechanische Wandlung, wobei Schall in eine mechanische Bewegung übersetzt wird. Erst diese Bewegung wird dann in eine elektrische Ausgangsgröße gewandelt. Als Eingangsgröße bei den hier behandelten Luftschallmikrofonen dient der Schalldruck bzw. der Schalldruckgradient, die Ausgangsgröße ist eine dazu proportionale Spannung. Im Folgenden werden die grundlegenden Wandlertypen erläutert, anschließend wird kurz auf die wichtigsten bauartbedingten Richtcharakteristiken eingegangen.

### 2.2.1 Schallwandlertypen

Es existieren verschiedene physikalische Möglichkeiten, um Schall in eine dazu proportionale Spannung umzuwandeln. Durchgesetzt haben sich in der Praxis im Prinzip zwei grundsätzliche Verfahren. Im ersten Fall wird ein Leiter im Magnetfeld bewegt, wodurch eine Spannung induziert wird. Mikrofone mit dieser Wandlerart bezeichnet man als dynamisch. Im zweiten Fall wird die Kapazität eines geladenen Kondensators verändert, was ebenfalls eine Spannungsänderung mit sich bringt. Die aus dieser elektrostatischen Wandlung beruhenden Mikrofone nennt man meist Kondensatormikrofone. Im Folgenden werden die beiden Prinzipien erklärt und auf die jeweiligen Eigenschaften eingegangen. Außerdem wird noch eine häufig vorkommende Sonderform der Kondensatormikrofone, die Elektretmikrofone, vorgestellt.

**Dynamische Mikrofone** Dynamische Mikrofone beruhen auf dem Effekt der Lorentzkraft, also einem durch ein Magnetfeld bewegten Leiter, in dem eine Spannung induziert wird. Für die Ausgangsspannung  $U$  in Volt (V) gilt dann in Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte  $B$  in Tesla (T), der Leiterlänge  $l$  in Meter (m) und der Membranschnelle  $v$  in Meter pro Sekunde (m/s) in die Beziehung

$$U = -Blv \cdot \sin(\alpha), \quad (5)$$

wobei der Winkel  $\alpha$  von den eigentlich vektoriellen Größen Membranschnelle  $v$  und magnetischer Flussdichte  $B$  eingeschlossen wird. Bei einem homogenen Magnetfeld besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen der Schnelle der Mikrofonmembran  $v$  und der induzierten Spannung  $U$ . Da die Membranbewegung ebenfalls linear mit der Schalldruckänderung zusammenhängt, verhalten sich Schalldruck und Ausgangsspannung proportional zueinander.

In der Praxis findet man häufig sogenannte Tauchspulenmikrofone (siehe Abbildung 2). Hierbei ist der Leiter durch eine gewickelte Spule realisiert, die mit der dem Schallfeld ausgesetzten Membran verbunden ist und im Magnetfeld eines Permanentmagneten schwingt.

Vorteile sind neben dem einfachen (und preisgünstigen) Prinzip, dass keine Betriebsspannung benötigt wird und sie relativ robust gegenüber hohen Schalldrücken und auch mechanischen Beanspruchungen sind. Die verhältnismäßig große schwingende Masse von Membran und Spule führt jedoch zu einer hohen Körperschallanfälligkeit. Außerdem liegt die Resonanzfrequenz

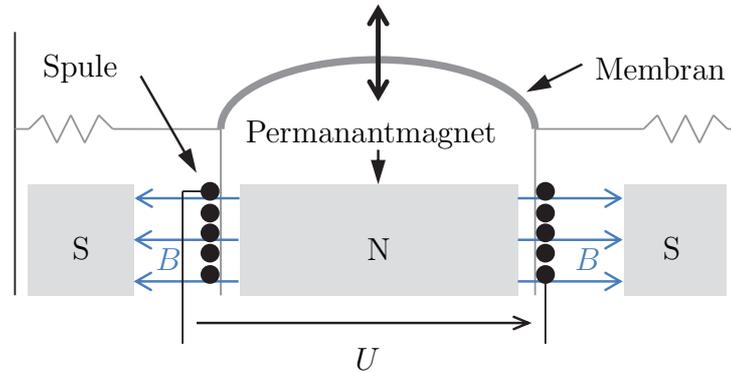


Abbildung 2: Querschnitt eines Tauchspulenmikrofons

im Übertragungsbereich, was dem gewünschten linearen Übertragungsverhalten entgegen wirkt. Die Herausforderung, ein gutes dynamisches Mikrofon zu entwerfen, liegt zu einem großen Teil darin, den Frequenzgang wieder zu glätten oder gegebenenfalls anwendungsspezifischen Erfordernissen anzupassen.

**Kondensatormikrofone** Bei Kondensatormikrofonen bildet die elektrisch leitende und hauchdünne Membran eine Platte eines Plattenkondensators (siehe Abbildung 3). Parallel dazu befindet sich in geringem Abstand die fest montierte Gegenelektrode. Zwischen Membran und Gegenelektrode befindet sich das sog. Dielektrikum, das eine elektrisch isolierende Aufgabe hat. Nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten

$$U = \frac{Q}{C} \quad (6)$$

und

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (7)$$

mit der Membranfläche  $A$  und dem Plattenabstand  $d$ , ergibt sich

$$U = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r} d. \quad (8)$$

Die Ladung  $Q$  wird mit Hilfe eines weiteren Kondensators mit einer Gleichspannung aufgebracht, die in der Praxis als so genannte Phantomspannung

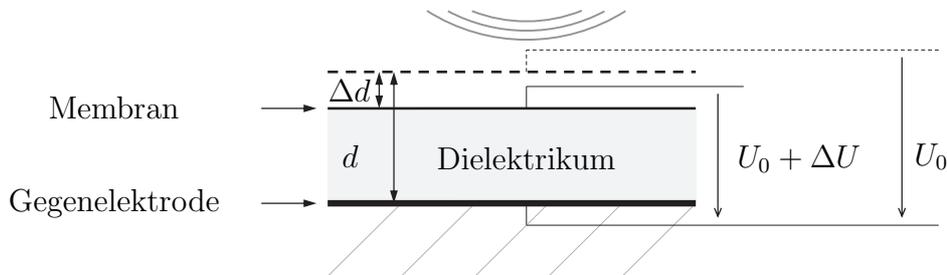


Abbildung 3: Hilfsbild zum Kondensatormikrofon

$U_0 = +48\text{ V}$  auftritt. Die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_0$  und die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  der Luft zwischen den Kondensatorplatten sind Konstanten. Über die Auslenkung  $\Delta d$  der Membran, also der Veränderung des Plattenabstandes  $d$ , wird die Kapazität variiert, was bei konstant gehaltener Ladungsmenge  $Q$  eine dazu proportionale Spannungsänderung bewirkt:

$$U_0 + \Delta U = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (d + \Delta d) \quad (9)$$

Kondensatormikrofone haben im Vergleich zu dynamischen Mikrofonen einen höheren Übertragungsfaktor, in der Praxis oft Empfindlichkeit genannt. Gemeint ist das Verhältnis von Ausgangsspannung zu einem bestimmten Schalldruck. Wegen ihrer sehr geringen Membranmasse haben Kondensatormikrofone außerdem einen flacheren Frequenzgang. Für hochwertige Aufnahmen in Tonstudios werden fast ausschließlich Kondensatormikrofone verwendet. Diese sind jedoch teurer und immer auf eine externe Versorgungsspannung angewiesen.

**Elektretmikrofone** Eine Sonderform der Kondensatormikrofone stellen dauerpolarisierte Elektretmikrofone dar. Bei ihnen besteht die Membran oder die Gegenelektrode aus einem dauerhaft polarisierten Material, wodurch keine externe Polarisationsspannung und die damit verbundene Schaltung nötig ist. Der Übertragungsfaktor ist etwas geringer als bei den oben beschriebenen Kondensatormikrofonen [3]. Elektretmikrofone sind preisgünstig und in sehr geringen Größen erhältlich, so dass sie sich besonders für Mikrofonarrays eignen, bei denen eine größere Anzahl Platz sparend verbaut werden soll.

### 2.2.2 Richtcharakteristiken

Mikrofone haben je nach Bauart eine von der Frequenz  $f$  und dem Einfallswinkel  $\phi$  abhängige Empfindlichkeit. Die Abhängigkeit vom Einfallswinkel kann für eine feste Frequenz als *Richtfaktor* (auch *Richtungsfaktor*)

$$\Gamma(\phi) = \frac{u(\phi)}{u(0^\circ)} \quad (10)$$

angegeben werden, wobei  $u(\phi)$  den Effektivwert der Ausgangsspannung bei Schalleinfall aus dem Winkel  $\phi$  und  $\phi = 0^\circ$  die Frontalrichtung bezeichnet. Damit ergibt sich  $0 \leq \Gamma(\phi) \leq 1$ . Wird der Richtfaktor über der Frequenz aufgetragen, spricht man von der *Richtfunktion*  $\Psi(f, \phi)$ , ebenfalls im Wertebereich  $0 \leq \Psi(f, \phi) \leq 1$ .

Die grafische Darstellung kann auf verschiedene Arten erfolgen und wird *Richtcharakteristik* genannt. In Abbildung 4 sind beispielsweise lineare Polardiagramme dargestellt, aus denen man den Richtfaktor für einen bestimmten Winkel ablesen kann. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen Richtcharakteristiken in kartesischen Koordinaten: In Abbildung 6 ist die Abhängigkeit von  $\phi$  dargestellt, in Abbildung 7 die Abhängigkeit von  $\phi$  und  $f$ . Beide Diagrammtypen kommen auch mit logarithmischer Skala vor. Es werden dann die Dämpfungen im Vergleich zum Maximum (0 dB) angegeben. In Versuch 1 sollen die Messergebnisse beispielsweise in logarithmische Polardiagramme eingetragen werden (Abbildungen 9 und 10).

In diesem Abschnitt sollen nur die idealen Druckempfänger und Druckgradientenempfänger sowie Kombinationen betrachtet werden, die sich für alle Frequenzen gleich verhalten. Bei realen Mikrofonen treten bei höheren Frequenzen Abschattungseffekte für bestimmte Einfallsrichtungen auf. Auch der verwendete Wandlertyp hat Einflüsse auf die Empfindlichkeit für Schall bestimmter Wellenlängen aus verschiedenen Richtungen.

**Druckempfänger** Schließt die Mikrofonmembran ein mit Luft gefülltes Gehäuse ab, hängt ihre Auslenkung vom Luftdruckunterschied zwischen innen und außen ab, es handelt sich also im Prinzip um ein Barometer. Winzige Ausgleichslöcher im Gehäuse ermöglichen einen Luftdruckausgleich für die sehr langsamen Luftdruckschwankungen, die nicht mehr als Schall bezeichnet werden können, so dass es nur auf Schalldruckänderungen reagiert,

worin der Name Druckempfänger begründet ist. Woher die Schalldruckänderung kam, ist irrelevant, weshalb der Druckempfänger für Schall aus allen Richtungen gleich empfindlich ist. Er weist eine omnidirektionale Richtcharakteristik auf. Im 2-dimensionalen Polardiagramm in Abbildung 4 ist dies als Kreis zu erkennen, was im Dreidimensionalen einer Kugel entspricht. Daher verwendet man oft den Begriff Kugelcharakteristik. Der Richtfaktor ist also winkelunabhängig  $\Gamma(\phi) = 1$ .

**Druckgradientenempfänger** Betrachtet man die Membran ohne Gehäuse, so reagiert sie immer noch auf unterschiedliche Drücke zwischen ihrer Vorder- und Rückseite, die zwar einen sehr kleinen, aber nicht zu vernachlässigenden Abstand zueinander haben. Es wird aber nun nicht mehr der außen herrschende Schalldruck mit dem unveränderlichen, innen herrschenden statischen Luftdruck verglichen. Stattdessen wird der Schalldruck an zwei verschiedenen Punkten wahrgenommen. Wegen der sehr geringen Membrandicke misst ein solches Mikrofon also den Druckgradienten. Trifft eine Schallwelle seitlich auf die Membran, herrschen auf beiden Seiten identische Schalldrücke. An dieser Stelle hat die Richtcharakteristik eine Nullstelle. Schall, der senkrecht auf die Membran trifft, bewirkt einen großen Druckgradienten. Zu beachten ist jedoch, ob der Schall von vorne oder von hinten einfällt, da die Membran jeweils in verschiedene Richtungen ausgelenkt wird. Es handelt sich um einen Dipol, also im Prinzip um zwei gegenphasig arbeitende Empfänger. Dessen resultierende Richtfunktion besitzt entgegengesetzte Vorzeichen für Vorder- und Rückseite und wird meist durch Angabe der Vorzeichen wie im Polardiagramm in Abbildung 4 angegeben. Wegen ihrer markanten Form wird sie meist als Acht-Charakteristik bezeichnet. Für den Richtfaktor gilt dann  $\Gamma(\phi) = |\cos \phi|$ .

**Kombinationen** Abbildung 4 deutet schon an, dass Kugel- und Achtcharakteristiken überlagert werden können. Man erreicht dies, indem man entweder zwei verschiedene Mikrofonkapseln direkt nebeneinander betreibt und die Ausgänge miteinander verbindet oder, und so wird es praktisch meist umgesetzt, indem man die Membran in ein Gehäuse mit einer mehr oder weniger offenen Rückwand einbaut. Man erhält dann eine Nierencharakteristik, im Englischen wegen ihrer Herzkurvenform *Cardioid* genannt. Der entsprechende Richtfaktor errechnet sich ebenfalls durch Addition, jedoch unter Berücksichtigung

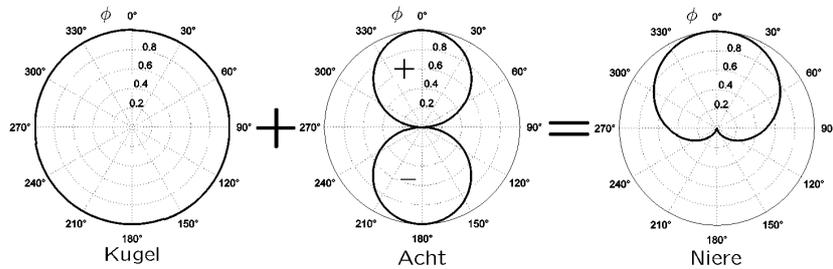


Abbildung 4: Überlagerung idealer Richtcharakteristiken  $0 \leq |\Psi(f, \phi)| \leq 1$ , dargestellt im Polardiagramm

sichtigung der Phasenlage beim Druckgradientenempfänger. Es muss außerdem noch auf  $\Gamma(0^\circ) = 1$  normiert werden, sodass sich  $\Gamma(\phi) = (1 + \cos \phi)/2$  ergibt. Die Gewichtung von Kugel und Acht bei der Überlagerung kann grundsätzlich stufenlos erfolgen, in der Praxis existieren neben der Niere die beiden festen Verhältnisse Hyperniere und Superniere.

## 2.3 Beamforming

### 2.3.1 Mikrofonarrays

Kombinationen mehrerer einzelner Mikrofone nennt man Mikrofonarrays. Mit ihrer Hilfe lassen sich per anschließender Signalverarbeitung spezielle Richtcharakteristiken gestalten und vor allem in Echtzeit verändern. Wie die Ausrichtung der sogenannten Richtkeule (engl. *Beam*) genau funktioniert, wird im Abschnitt 2.3.2 anhand des bekanntesten Beamforming-Verfahrens, dem *Delay-and-Sum-Beamformer*, gezeigt.

Mikrofonarrays können grundsätzlich jede beliebige Struktur aufweisen. Entwurfsparameter sind im Wesentlichen die Anzahl und Positionen der Mikrofone sowie deren Richtwirkung. Für messtechnische Anwendungen, z. B. in akustischen Windkanälen, werden meist 2-dimensionale Arrays mit teilweise über 100 Mikrofonen verwendet. Im Alltag findet man eher Arrays mit 2–4 Sensoren, die sich in einer Linie befinden.

### 2.3.2 Delay-and-Sum-Beamformer

**Signalmodell** Das Funktionsprinzip von Beamformern ist leicht erklärt, für das richtige Verständnis ist jedoch ein wenig Theorie unvermeidbar. Als gründliche Einführung in das Thema sei das Tutorial [2] empfohlen, das der folgenden Einleitung als Grundlage diene.

Aufgrund der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen, der Schallgeschwindigkeit  $c$ , trifft das von einer Quelle ausgehende Schallsignal  $s(t)$  zu unterschiedlichen Zeitpunkten an verschiedenen Orten ein. Bei Mikrofonarrays treffen also an jedem Mikrofon  $m$  ähnliche Signale  $s'_m(t)$  ein, die jedoch gegenüber dem Referenzmikrofon, hier  $m = 1$ , um einen Laufzeitunterschied  $\tau_m$  verzögert sind und daher mit

$$s'_m(t) = s(t - \tau_m) \quad (11)$$

notiert werden. Es gilt  $\tau_1 = 0$ .

Als vereinfachende Einschränkung wollen wir im Folgenden nur den *Fernfeldfall* betrachten, bei dem die Schallquelle in ausreichender Entfernung zum Mikrofonarray steht, um dort das Eintreffen ebener Schallwellen annehmen zu können. Das Szenario ist in Abbildung 5 skizziert, wobei  $l$  den Abstand zwischen zwei benachbarten Mikrofonen und  $\phi$  den Winkel zur Schallquelle bezeichnet. Die Strecke, die der Schall zu einem benachbarten Mikrofon zusätzlich zurücklegen muss, wird Gangunterschied  $g$  genannt.

Die Laufzeitdifferenzen  $\tau_m$  in Bezug zum Referenzmikrofon  $m = 1$  errechnen sich dann folgendermaßen:

$$\tau_m = \frac{g_m}{c} = \frac{l_m}{c} \cos \phi, \quad (12)$$

mit  $l_m = (m - 1) \cdot l$  bzw.  $g_m = (m - 1) \cdot g$ .

Allgemein lassen sich also für einen bestimmten Schalleinfallswinkel  $\phi$  die Laufzeitdifferenzen  $[\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_M]$  angeben.

Werden diese Laufzeitunterschiede durch explizite Verzögerung (*Delay*) der früher eingetroffenen Signale kompensiert und die Ausgangskanäle anschließend addiert (*Sum*), so erhält man für die gegebene Schalleinfallrichtung konstruktive Interferenz. Die Ausbreitung des Quellsignals bis zu den einzelnen Mikrofonen kann man im einfachsten Fall modellieren, indem man nur

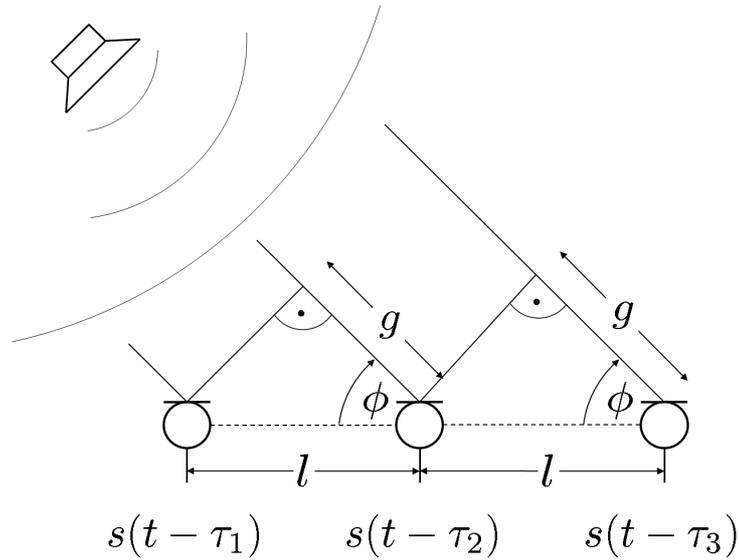


Abbildung 5: Laufzeitdifferenzen im Fernfeldfall

den Direktschallanteil (d.h. die Laufzeit) beachtet. Im Frequenzbereich lässt sich eine Verzögerung um  $\tau$  durch eine (frequenzabhängige) Phasenverschiebung darstellen, ein sog. *Ausbreitungsvektor* lässt sich angeben als

$$\mathbf{D}(f) = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f\tau_1} \\ e^{-j2\pi f\tau_2} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f\tau_M} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Die Fouriertransformierten der einzelnen Mikrofon-signale  $S'_m(f)$  lassen sich dann zu einem Vektor

$$\mathbf{S}'(f) = \mathbf{D}(f) \cdot S(f) \quad (14)$$

zusammenfassen, wobei  $S(f)$  die Fouriertransformierte des Quellsignals  $s(t)$  ist.

**Aufbau des Beamformers** Delay-and-Sum-Beamforming lässt sich nun bewerkstelligen, indem man die Verzögerungen der Mikrofon-signale im Frequenzbereich kompensiert, die Signale addiert und das entstehende Signal

(mit entsprechend größerem Pegel) mit  $1/M$  skaliert. Unter idealen Bedingungen ergibt sich dann am Ausgang des Beamformers das Quellsignal

$$S(f) = \mathbf{W}^H(f) \cdot \mathbf{S}'(f), \quad (15)$$

wobei  $(\ )^H$  die sogenannte Hermitesche eines Vektors bezeichnet (d.h. konjugiert-komplex und transponiert).

Das *Delay and Sum* wird durch die Multiplikation mit dem Zeilenvektor

$$\mathbf{W}^H(f) = \frac{1}{M} \cdot [e^{j2\pi f\tau_1} \ e^{j2\pi f\tau_2} \ \dots \ e^{j2\pi f\tau_M}] = \frac{1}{M} \cdot \mathbf{D}^H(f) \quad (16)$$

durchgeführt, so dass sich mit (14) ergibt:

$$S(f) = \frac{1}{M} \cdot \underbrace{\mathbf{D}^H(f) \cdot \mathbf{D}(f)}_{=M} \cdot S(f) \quad (17)$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es auch andere Beamforming-Techniken, wie z. B. *Filter and Sum* gibt.

Der Ausdruck  $\frac{1}{M} \cdot \mathbf{D}^H(f) \cdot \mathbf{D}(f)$  in Gleichung (17) bleibt nur solange 1, bis der Beamformer in der Hauptrichtung ausgerichtet ist, ansonsten verändert sich dieser Wert. Das heißt, dass man eine Richtungsabhängigkeit beobachten kann.

Die Richtfunktion  $\Psi$  eines Mikrofonarrays mit ungerader Anzahl  $M$  identischer Mikrofone, die sich in gleichen Abständen  $l$  befinden (ein solches Mikrofonarray nennt man *linear*), ist also auch von der Frequenz  $f$  abhängig. Wählt man das erste Mikrofon als Referenz, ergibt sich folgende allgemeine Gleichung für die Richtfunktion:

$$\Psi(f, \phi) = \sum_{m=1}^M W_m(f) e^{j\frac{2\pi f}{c} ml \cos \phi} \quad (18)$$

Die Anzahl  $M$  der Mikrofone und deren Abstände  $l$  sind also entscheidende Entwurfsparameter für einen gegebenen Frequenzbereich. Der Einfluss von  $M$  und  $l$  ist in Abbildung 6 für die Frequenz  $f = 2$  kHz dargestellt.

In Abbildung 6 sind neben dem Hauptmaximum noch weitere, kleinere Nebenkeulen (engl. *Sidelobe*) zu sehen. Bei zu großen Sensorabständen entstehen sogar zusätzliche Maxima mit der gleichen Amplitude wie bei dem

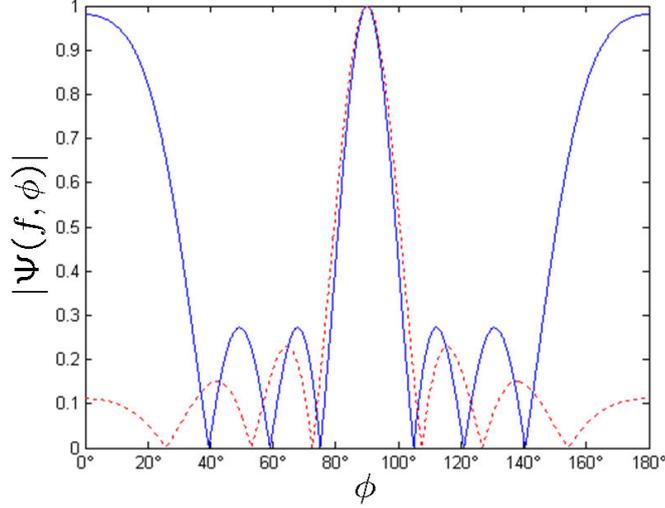


Abbildung 6: Richtcharakteristiken  $|\Psi(f, \phi)|$  für  $M = 4$  Mikrofone (durchgezogene Linie) und  $M = 8$  Mikrofone (gepunktete Linie) bei 2 kHz und  $(M - 1) \cdot l = 0,5$  m Arraylänge.

gewünschten Winkel. Hierbei handelt es sich um Aliaseffekte durch räumliche Unterabtastung (*Spatial Aliasing*). Beträgt der Gangunterschied zwischen zwei Sensoren ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge, so kommt es erneut zu konstruktiver Interferenz. Zwischen zwei Maxima kommt es zunehmend zu Auslöschungen bis hin zu einer Nullstelle, wo der Gangunterschied genau einer halben Wellenlänge entspricht. Analog zum zeitlichen Abtasttheorem  $f_s \geq 2f_{\max}$ , wobei  $f_s$  die Abtastfrequenz (also die Abtastzeitpunkte pro Sekunde) und  $f_{\max}$  die größte zu betrachtende Frequenz ist, existiert das räumliche Abtasttheorem

$$f_{x_s} = \frac{1}{l} \geq 2f_{x_{\max}}. \quad (19)$$

Hierbei ist  $f_{x_s}$  die räumliche Abtastfrequenz, also die Anzahl der Mikrofone pro Meter.  $f_{x_{\max}}$  entspricht der maximalen Anzahl an Schwingungen pro Meter, es gilt also

$$f_{x_{\max}} = \frac{1}{\lambda_{\min}}, \quad (20)$$

wobei  $\lambda_{\min}$  die kleinste vorkommende Wellenlänge ist.

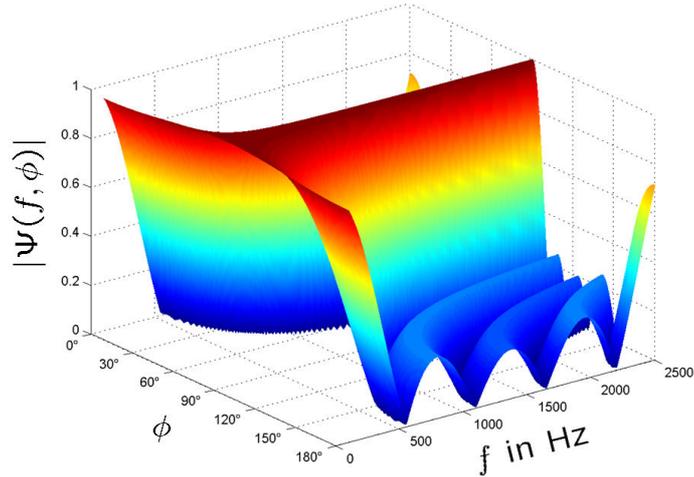


Abbildung 7: 3D-Richtcharakteristik für Frequenzen von 100 bis 2500 Hz

Etwas anschaulicher ist die aus (19) und (20) abgeleitete Bedingung

$$l \leq \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad (21)$$

die besagt, dass der Sensorabstand  $l$  kleiner als die Hälfte der kleinsten vorkommenden Wellenlänge  $\lambda_{\min}$  sein muss, um Nebenmaxima in der Richtcharakteristik zu vermeiden. Signale mit höheren Frequenzanteilen erfordern folglich kleine Mikrofonabstände. Für eine gegebene Sensoranzahl  $M$  verkleinert sich damit jedoch die Gesamtlänge des Arrays, wodurch sich die Richtcharakteristik zu tieferen Frequenzen hin verbreitert. Abbildung 7 sind diese beiden entgegengesetzten Phänomene deutlich zu entnehmen. Abschließend bleibt zu erwähnen, dass die Richtwirkungen der hier betrachteten Zeilenarrays rotationssymmetrisch zur Arrayachse sind. Ein waagrechtes Array kann also nicht unterscheiden, ob sich die Schallquelle vor, hinter, über oder unter ihm befindet.

## 3 Versuchsaufbau

### 3.1 Audio Analyzer R&S UP300

Der R&S Audio Analyzer UP 300 ist ein zweikanaliger Audioanalysator, der den Frequenzbereich von DC bis 80 kHz unterstützt. Kernkomponenten des Gerätes sind ein Signalgenerator, diverse Filterfunktionen, sowie ein FFT-Spektrumanalysator. Das Gerät kann für eine Vielzahl von Messungen in der Audiotechnik, aber auch in höherfrequenten Anwendungsbereichen eingesetzt werden.

#### Testsignal einstellen

- GEN drücken, dann mit   die Ansicht auf SINE ändern, anschließend **FREQ** drücken, dann die gewünschte Frequenz mithilfe des Tastenfeldes eingeben, mit **ENTER** bestätigen.
- Mit   die Ansicht auf **CONFIG** ändern, **OUTPUT ON** drücken, um das Testsignal zu aktivieren.

#### Spektrumanalysator einstellen

- **Graph** drücken, dann mit   die Ansicht auf **X AXIS** ändern, anschließend **MIN** und **MAX** sinnvoll einstellen.
- Das gleiche mit **Y AXIS** durchführen.
- Mit   die Ansicht auf **CURSORS** ändern, dann **X1** drücken. Falls nötig **ON** drücken, um den Cursor zu aktivieren. Mit **FIND**, dann **MAX** und **ENTER** setzt man den Cursor auf das Maximum im Spektrum.
- Mit  erscheint das Analysefenster in groß, so können die Meßwerte leicht abgelesen werden.
- Den **dB<sub>r</sub>**-Wert des Cursors oben links ablesen.
- **ANL** drücken, dann mit   die Ansicht auf **FFT** ändern, **UNIT** drücken, „dB<sub>r</sub>“ wählen, **ENTER** drücken, anschließend den berechneten Wert eingeben, mit **ENTER** bestätigen.

- Die FFT-Länge kann folgendermaßen abgelesen werden: ANL drücken, mit mit  die Ansicht auf FFT ändern, der dortige Wert in der ersten Zeile neben FFT SIZE ist die FFT-Länge.

## 4 Praktikumsversuch

### 4.1 Vorbereitende Hausaufgaben

**Hausaufgabe 1:** Bei einem bestimmten Schalldruckpegel wird am Ausgang eines dynamischen Mikrofons eine Spannung von  $u_d = 5 \text{ mV}$  (Effektivwert) gemessen. Ein Kondensatormikrofon direkt daneben liefert gleichzeitig  $u_c = 200 \text{ mV}$ . Um welchen Wert in dB unterscheiden sich die Übertragungsfaktoren von Kondensatormikrofon und dynamischem Mikrofon?

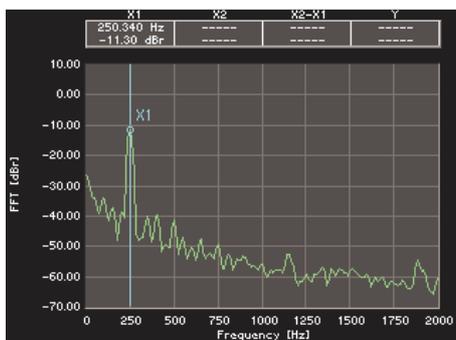
Antwort: \_\_\_\_\_

**Hausaufgabe 2:** Auf der IfN-Weihnachtsfeier wollen zwei Mitarbeiter zusammen ein Lied vortragen. Die erste Strophe spielt Mitarbeiter A alleine auf seiner Trompete und erzeugt dabei an einem bestimmten Punkt im Raum einen Schalldruckpegel von 90 dB. Die zweite Strophe spielt Mitarbeiter B alleine auf seinem Saxophon. Da er nicht ausreichend geübt hat, spielt er lieber etwas leiser mit einem Schalldruckpegel von nur 80 dB am selben Punkt. Wie groß ist der Schalldruckpegel am Messpunkt in der dritten Strophe, die nun zweistimmig gespielt wird, wenn beide ihre Lautstärke nicht verändern? (Hinweis: Die beiden Instrumente können als inkohärente Schallquellen angenommen werden.)

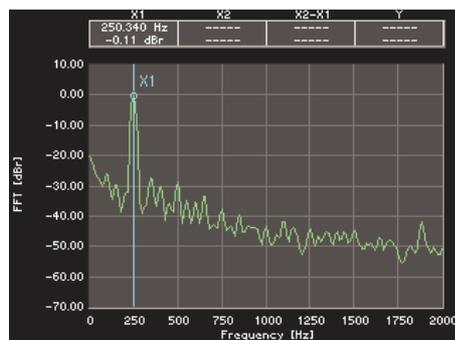
Antwort: \_\_\_\_\_

**Hausaufgabe 3:** (a) Drei Mikrofone befinden sich auf einer Linie mit einem Abstand von jeweils  $l = 20 \text{ cm}$  zum benachbarten Mikrofon. Ein Sprecher steht in 3 m Entfernung in einem Winkel von  $\phi = 70^\circ$  zu dem Array ( $\phi = 90^\circ$  ist die Senkrechte zur Linie, auf der die Mikrofone liegen). Wie groß sind die Gangunterscheide, sowie die Laufzeitdifferenzen zwischen den drei Mikrofonen?

Antwort: \_\_\_\_\_



(a) unkalibriert



(b) kalibriert

Abbildung 8: Gemessenes Spektrum eines Testsignals mit 250Hz

(b) Geben Sie für die berechneten Gangunterschiede jeweils die niedrigste Frequenz an, die sich bei einfacher Addition der Mikrofonssignale ohne Laufzeitkompensation vollständig konstruktiv überlagert.

Antwort: \_\_\_\_\_

**Hausaufgabe 4:** Abbildung 8 (a) stellt das Spektrum eines aufgenommenen Testsignals mit  $f = 250$  Hz dar. Das Testsignal wurde mithilfe des Generators des UP 300 erzeugt, über einen Lautsprecher wiedergegeben und anschließend mit einem Mikrofon aufgezeichnet. Bei der Messung wurde als Referenzspannung willkürlich  $U_{\text{ref}} = 750$  mV gewählt. Berechnen Sie die neu einzustellende Referenzspannung so, dass sich für den Spektralkoeffizienten der Frequenz des Testsignals ein Pegel von  $0 \text{ dB}_r$  einstellt (siehe Abbildung 8 (b)).

Antwort: \_\_\_\_\_

## 4.2 Versuch 1: Richtcharakteristiken einzelner Mikrofone

In diesem Versuch sollen die Richtcharakteristiken einzelner Mikrofone herausgefunden werden. Platzieren Sie dazu eines der Messmikrofone A ca. 30 cm vor einer Lautsprecherbox, so dass es genau auf die Membranmitte zeigt ( $\theta = 0^\circ$ ). Tipp: Die Mikrofonklemme lässt sich auf der Array-Schiene so positionieren, dass die Mikrofonmembran genau auf der Drehachse liegt. Die Schiene sollte sich vor der Lautsprecher-Box gerade noch frei drehen lassen. Dann wird das Mikrofonkabel an einen Eingang des Vorverstärkers angeschlossen. Der entsprechende Ausgang wird mit dem Eingang des **Audio Analyzers** verbunden. Generieren Sie mit dem **Audio Analyzer** einen Sinuston mit der Frequenz 250 Hz und stellen Sie am Lautsprecher die Lautstärke so ein, dass der Ton deutlich hörbar ist.

Stellen Sie den **Audio Analyzer** auf die Einheit dBr und wählen Sie den Referenzwert so, dass der Spitzenwert für den aktuellen Aufbau einen Pegel von 0 dBr erreicht. Feinjustierungen können am Vorverstärker oder am Lautsprecher vorgenommen werden. Sollte kein deutlicher Peak im Spektrum zu sehen sein, überprüfen Sie noch einmal, ob alle Geräte korrekt miteinander verbunden sind. Wählen Sie für die y-Achse einen Anzeigebereich von +10 bis -40 dBr. Skalieren Sie die x-Achse (Frequenz) ebenfalls sinnvoll. Lassen Sie nun den **Audio Analyzer** automatisch das Maximum suchen. Bei welcher Frequenz liegt es genau?

Antwort: \_\_\_\_\_

Wechseln Sie in die Vollbildansicht, in der oben links auch der Pegel angezeigt wird, und kontrollieren Sie noch einmal, ob alle Messeinstellungen korrekt sind und möglichst genau 0 dBr erreicht werden. Drehen Sie nun das Mikrofon in 30°-Schritten um 180° nach links und tragen Sie die jeweilige Dämpfung in dB in Tabelle 2 ein. Die Entfernung der Mikrofonmembran von der Lautsprechermembran sollte bei richtigem Aufbau stets konstant bleiben.

Wiederholen Sie die Messung für 2000 Hz. Welchen Unterschied beobachten Sie?

Antwort: \_\_\_\_\_

Mikrofon A		
$\theta$	250 Hz	2000 Hz
0°		
30°		
60°		
90°		
120°		
150°		
180°		

Mikrofon B		
$\theta$	250 Hz	2000 Hz
0°		
30°		
60°		
90°		
120°		
150°		
180°		

Tabelle 2: Messwerte der Dämpfung in dB für Versuch 1

Tragen Sie die Ergebnisse in das Polardiagramm 9 ein. Verwenden Sie dabei möglichst verschiedene Farben für die unterschiedlichen Frequenzen und gehen Sie davon aus, dass die gemessene Richtcharakteristik symmetrisch ist. Um welche Richtcharakteristik handelt es sich bei Mikrofon A?

Antwort: \_\_\_\_\_

Schalten Sie am Vorverstärker die Phantomspeisung (+48V) aus und beobachten Sie, was passiert! Auf welchen Wandlertyp lässt dich daraus schließen?

Antwort: \_\_\_\_\_

Wiederholen Sie beide Messungen mit Mikrofon B und tragen Sie die Ergebnisse ebenfalls in Tabelle 2 und das Polardiagramm 10 ein. Um welche Richtcharakteristik handelt es sich diesmal?

Antwort: \_\_\_\_\_

Gibt es zwischen den Frequenzen einen Unterschied in der Richtfunktion? Wenn ja, wie kommt er zustande?

Antwort: \_\_\_\_\_

Weichen die Diagramme von der idealen Charakteristik (siehe Kapitel 2.2) ab und wenn ja warum?

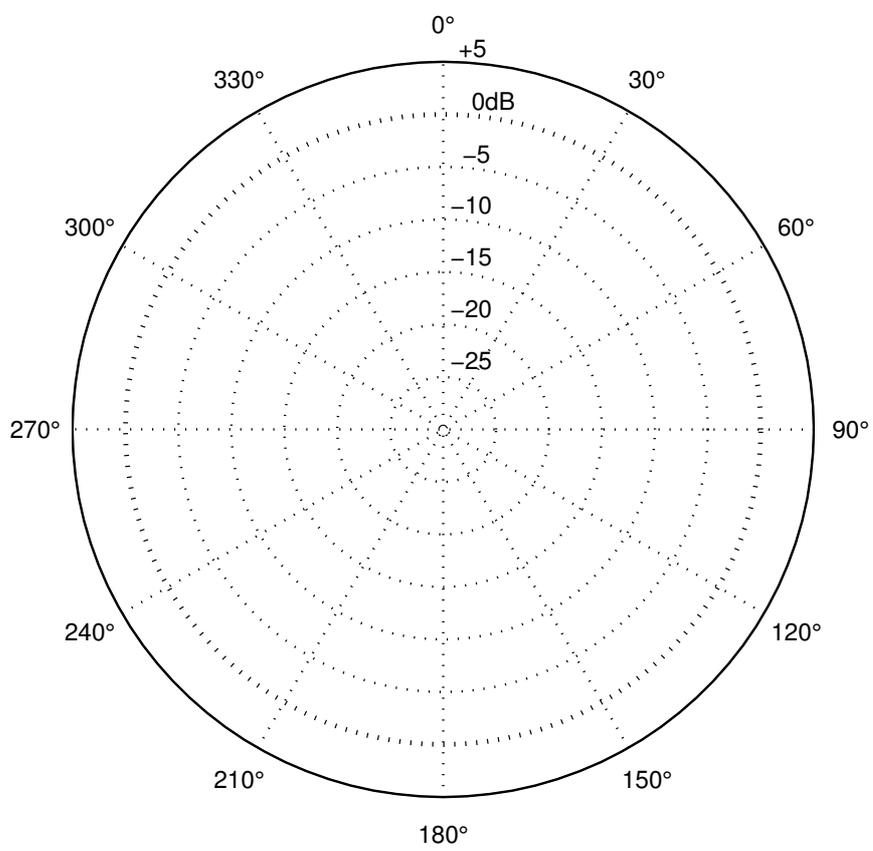


Abbildung 9: Polardiagramm für Mikrofon A

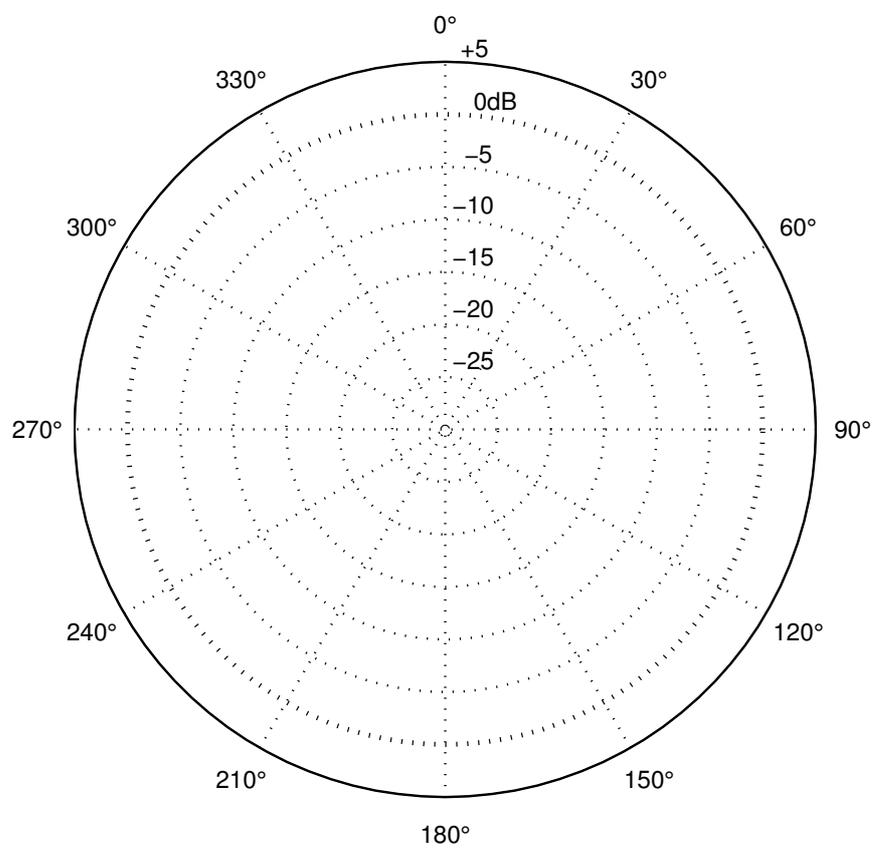


Abbildung 10: Polardiagramm für Mikrofon B

Antwort: \_\_\_\_\_

Schalten Sie auch diesmal am Vorverstärker die Phantomspeisung (+48V) aus und beobachten, was passiert! Um welchen Wandlertyp handelt es sich diesmal?

Antwort: \_\_\_\_\_

Bonusaufgabe: Stellen Sie das Mikrofon noch einmal auf  $\theta = 180^\circ$  und umgreifen Sie die hintere Hälfte des Korbes, wie es Sänger oft tun, mit einer Hand. Wie beeinflusst das die Dämpfung bei einem Sinuston mit der Frequenz 100 Hz und warum? Welche Probleme können dabei auf einer Bühne auftreten?

Antwort: \_\_\_\_\_

### 4.3 Versuch 2: Richtcharakteristik eines Mikrofonarrays

Montieren Sie zunächst alle vier Mikrofone A auf der Array-Schiene im Abstand von jeweils 16 cm und schließen diese an den Vorverstärker an. Verbinden Sie dessen Ausgänge 1-4 in gleicher Reihenfolge mit den Eingängen 5-8 der externen Soundkarte. Der Ausgangskanal 1 wird mit dem ersten Eingangskanal des Audio Analyzers verbunden. An dessen Ausgang wird ein Lautsprecher angeschlossen.

Sie wollen nun diesen Lautsprecher, der einen 2000 Hz Sinuston wiedergibt, möglichst gut aus einem bestimmten Winkel erfassen. Das Mikrofonarray wird dabei als fest eingebautes *Broadside*-Array angenommen und der Lautsprecher steht etwa 2 m entfernt dazu.

Starten Sie die MATLAB-Datei `versuch2.m` und drücken den Start-Button. Der Audio Analyzer sollte einen Peak bei der abgespielten Frequenz anzeigen. Schwenken Sie nun langsam das Array und beobachten dabei die Anzeige des Audio Analyzers. Wie viele Maxima finden Sie und bei welchen Winkeln liegen sie?

Antwort: \_\_\_\_\_

Welchen Abstand sollten die Mikrofone zueinander aufweisen, um für die angegebene Frequenz eine möglichst scharfe Richtcharakteristik ohne Nebenmaxima zu erhalten?

Antwort: \_\_\_\_\_

Welcher Laufzeitunterschied muss zwischen den einzelnen Mikrofonen nun ausgeglichen werden, um das Hauptmaximum des Beamformers auf den Lautsprecher auszurichten, wenn dieser im Winkel von  $120^\circ$  (Achtung:  $90^\circ$  ist die Senkrechte zur Geraden, auf der die Mikrofone liegen!) dazu steht (Fernfeldfall-Annahme)?

Antwort: \_\_\_\_\_

Überprüfen Sie Ihre Berechnungen mit dem Programm `richtdiagramm.m`.

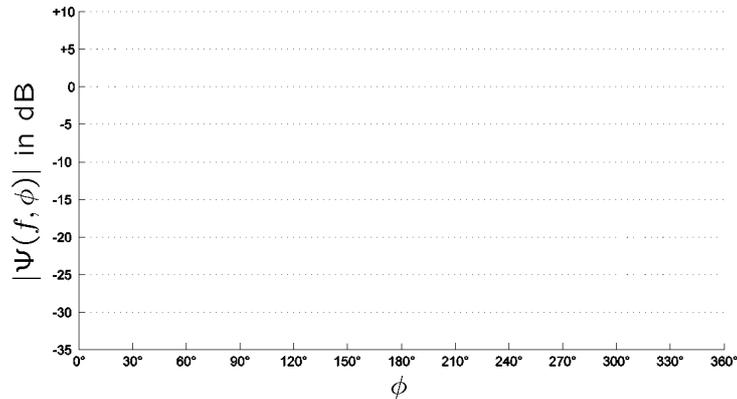


Abbildung 11: Richtdiagramm für Versuch 2

Stellen Sie die Mikrofonabstände entsprechend Ihrer Berechnungen ein. Suchen Sie in der MATLAB-Datei `versuch2.m` die Zeile `tau_1 = [0.0 0.0 0.0 0.0]`; und ersetzen Sie dort die Laufzeitunterschiede in Sekunden entsprechend Ihrer Berechnungen. Starten Sie nun das MATLAB-Programm.

Überprüfen Sie die Richtfunktion des Beamformers analog zu Versuch 1 von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ , aber verkleinern Sie die Messintervalle auf  $15^\circ$ . Die Ergebnisse tragen Sie bitte direkt in das Richtdiagramm in Abbildung 11 ein und überprüfen Sie, ob die Aufgabenstellung damit erfüllt ist.

Aus welchem Einfallswinkel  $\phi$  wird eine Frequenz von 900 Hz am stärksten unterdrückt? Wie sehen die einzelnen Verzögerungen  $\tau$  an den Mikrofonen für diesen Einfallswinkel aus? Schließen Sie die zweite Lautsprecher-Box an den zweiten Ausgangskanal des Audio Analyzers an, generieren Sie dafür das genannte Signal und positionieren Sie ihn in dem gewählten Winkel. Passen Sie die Werte des zweiten Beamformers in der Datei `versuch2.m` so an, dass dieser nun auf die zweite Schallquelle ausgerichtet ist. Starten Sie das Programm und schalten Sie die beiden Beamformer abwechselnd ein. Was zeigt der Audio Analyzer?

Antwort: \_\_\_\_\_

Gibt es hinsichtlich der Richtcharakteristik Symmetrien wie bei Versuch 1?

Antwort: \_\_\_\_\_

## 4.4 Versuch 3: Messungen mit Störquellen

Schließen Sie zunächst die beiden Lautsprecher an die Ausgänge 1 und 2 der externen Soundkarte an und starten Sie die MATLAB-Datei `versuch3.m` und hören Sie sich die beiden Signale (Sprache und Rauschen) an. Stellen Sie die Lautsprecher dabei so ein, dass beide als etwa gleich laut empfunden werden. Tragen Sie in der grafischen Oberfläche die Werte aus Versuch 2 für den ersten Beamformer ein und positionieren Sie den Lautsprecher, der die Sprache ausgibt, so, dass er im Maximum der Richtcharakteristik steht.

Den zweiten Lautsprecher positionieren Sie an einem anderen Ort. Wenn Sie nun den Start-Button drücken, werden Sprache und Rauschen gleichzeitig abgespielt und über das Mikrofonarray aufgenommen. Sie können sich den Ausgang eines einzelnen Mikrofons und den Ausgang des Beamformers anhören und die aufgenommenen Signale auch in ihrer Zeit- und Frequenzdarstellung auf dem Monitor vergleichen. Welchen Unterschied beobachten Sie?

Antwort: \_\_\_\_\_

Wählen Sie nun das Szenario „Zwei Sprecher“ und geben die bereits für Versuch 2 berechneten Werte des zweiten Beamformers ein. Die Lautsprecher werden ebenfalls wie in Versuch 2 positioniert. Diesmal hören Sie verschiedene Sprecher auf den beiden Kanälen. Diese Situation tritt beispielsweise im Kraftfahrzeug auf, wenn Fahrer und Beifahrer reden, aber nur jeweils einer von ihnen von der Freisprecheinrichtung erfasst werden soll.

Hören Sie sich die beiden Sprecher an und stellen Sie die Lautstärke so ein, dass beide etwa gleich laut zu hören sind. Drücken Sie nun wieder den Start-Button und vergleichen die Ausgänge der beiden Beamformer und des einzelnen Mikrofons miteinander.

## Literatur

- [1] Heinrich Kuttruff. *Akustik - Eine Einführung*. S. Hirzel Verlag Stuttgart/Leipzig, 2004.
- [2] I. A. McCowan. *Robust Speech Recognition Using Microphone Arrays*. PhD thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2001.
- [3] Martin Schneider. *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Berlin/Heidelberg, 2008.
- [4] Manfred Zollner und Eberhard Zwicker. *Elektroakustik*. Springer Berlin/Heidelberg, 1993.
- [5] A. Winter. dB or not dB? Rohde&Schwarz, 2005.

## Vorlesungen am IfN

### **Elektroakustik** (Prof. Schmitz)

Elektromechanische Analogie, Grundlagen, Schallquellen, Reflexion und Absorption, Schallausbreitung in Kanälen und Rohren, das menschliche Gehör, Stereophonieverfahren, Wandlerprinzipien, Mikrofone, Lautsprecher, Raumakustik, akustische Messtechnik, akustische Filtertechnik.

### **Digitale Signalverarbeitung** (Prof. Fingscheidt)

Zeitdiskrete Signale und Systeme, Fourier-Transformation für zeitdiskrete Signale und Systeme, die z-Transformation, Entwurf von rekursiven IIR-Filtern, Entwurf von nicht-rekursiven FIR-Filtern, die diskrete Fourier-Transformation (DFT) und die schnelle Fourier-Transformation (FFT), Grundlagen der Multiratenysteme und Filterbänke

### **Sprachkommunikation** (Prof. Fingscheidt)

Sprachentstehung, Sprachwahrnehmung, Lineare Prädiktion und Quantisierung, Sprachcodierung, Störgeräuschreduktion, Echokompensation.