

# Einsatz eines Beamsteering-Systems in akustisch schwierigen Umgebungen

Am Beispiel einer Musicalproduktion

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien an der Hochschule der  
Medien Stuttgart

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Engineering“.

Vorgelegt von:	Jona Mack
Matrikelnummer:	38712
E-Mail:	mack.jona@gmx.de
Betreut von:	Prof. Oliver Curdt (Erstprüfer) Prof. Dr. Andreas Koch (Zweitprüfer)
Vorgelegt am:	16.09.2024

## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Jona Mack, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Einsatz eines Beamsteering-Systems in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Ebenso sind alle Stellen, die mit Hilfe eines KI-basierten Schreibwerkzeugs erstellt oder überarbeitet wurden, kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, 16.09.2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jona Mack', is written over a horizontal line.

Jona Mack

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

## Kurzfassung

Diese Arbeit stellt in erster Linie einen Praktischen Bericht zum Einsatz eines Beamsteering-Beschallungssystem im Kontext einer Musicalproduktion dar. Es werden die Nicht-Optimalen raumakustischen Gegebenheiten vor Ort dargestellt und daraus Problemstellungen und Ziele für den Einsatz eines Beschallungssystems entwickelt. Das verwendete Beschallungssystem vom Typ „Fohhn Focus Modular“ wird auf seine Eignung und Möglichkeiten hin betrachtet und die Einsatzweise vor Ort sowie das erzielte Ergebnis beschrieben. Neben einer subjektiven Klangbeschreibung wurden dafür auch Messungen zur Early Decay Time durchgeführt. Im Anhang liegen zudem vor Ort aufgenommene Klangbeispiele bei.

Die Arbeit stellt fest, dass Arrays mit Beamsteering-Technologie für den Vorliegenden Anwendungsfall in der Lage sind, ein sehr gutes, aber nicht Einschränkungsfreies Beschallungsergebnis zu erzielen. Die Early Decay Time und der subjektive Klangeindruck lassen sich durch Zielgerichtete Ausrichtung des Arrays merklich verbessern, im Bassbereich und für sehr hohe Frequenzen zeigen sich klangliche Imperfektionen.

Der Arbeit vorangestellt ist eine Theoretische Abhandlung insbesondere über die Funktionsweise von Arrays und Zeilenlautsprechern, mit besonderem Fokus auf deren Richtcharakteristik sowie die Richtcharakteristik von anderen Lautsprechertypen.

## Abstract

This thesis is primarily a practical report on the use of a beam steering PA-system in the context of a musical production. The non-optimal acoustical conditions on site are presented, problems and objectives for the application of a sound reinforcement system are developed. The “Fohhn Focus Modular” sound reinforcement system that was used is examined in terms of its suitability and possibilities. The way it was used on site and the results achieved are described. In addition to a subjective description of the sound, measurements of the early decay time were carried out. Sound examples recorded on site are also included in the appendix.

The paper concludes that arrays with beam steering technology can achieve a very good, but not unrestricted, sound reinforcement result for the application in question. The early decay time and the subjective sound impression can be noticeably improved by precise aiming of the array, but audible imperfections in the bass range and for very high frequencies were observed.

The work is preceded by a theoretical treatise, in particular on arrays and line source loudspeakers, with a special focus on their directivity and the directivity of other loudspeaker types.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> übersetzt unter Zuhilfenahme der KI “DeepL translator”



## **Danksagung**

Besonderen Dank möchte ich zuerst an die Fohhn Audio AG richten, in Person an Oliver Mack und Simon Baumann, für die freundliche Bereitstellung des hier verwendeten Focus Modular-Systems und die zusätzliche Betreuung und Beratung, die ich von dort erhalten habe.

Ein großer Dank gilt weiter meinem Erstprüfer Prof. Oliver Curdt, der die oben genannte Kooperation möglich gemacht und damit auch zur Themenfindung dieser Arbeit beigetragen hat.

Vielen Dank auch an meine Kollegin und Kommilitonin Henni Lotta Scheitz für die Unterstützung beim Aufbau und der Einrichtung des Systems und die Zusammenarbeit über das gesamte Projekt hinweg.

Beim Team der Musical Academy Tübingen möchte ich mich neben der schönen Zusammenarbeit auch dafür bedanken, dass ich ihr Projekt als Grundlage für diese Arbeit nutzen konnte, und sie mir dazu auch die nötigen Freiräume zum Durchführen von Tests eingeräumt haben.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zentrale Beschallung. Durch die erhöhte Position des Lautsprechers ergibt sich ein gleichmäßiger Direktschallpegel im Publikum.....	7
Abbildung 2: Delay-Line .....	9
Abbildung 3: Nearfill .....	9
Abbildung 4: Skizze eines Horns mit unterschiedlichem Abstrahlwinkel in Vertikaler und Horizontaler Richtung sowie die zugehörigen Polardiagramme. Der Punkt des Seitlichen 6db-Abfalls ist jeweils markiert.....	14
Abbildung 6: D´Appolito-Strahler.....	15
Abbildung 5: Funktionsprinzip des Dipol-Strahlers. ....	15
Abbildung 7: Klassisches Array.....	16
Abbildung 8: Line Array.....	17
Abbildung 9: Abstrahlung desselben Arrays im Nahfeld (schwarz) und Fernfeld (grau). D´ und A´ markieren die räumliche Grenze des Arrays. ....	18
Abbildung 10: Spaltfunktion G (U) (Eigene Darstellung mittels Grafikrechner “GeoGebra”).....	20
Abbildung 11: Polardiagramme einer Linienquelle für verschiedene Verhältnisse $l/\lambda$ .....	20
Abbildung 12: Polardiagramm einer aus diskreten Kugelschallquellen aufgebauten Strahlerzeile für verschiedene Frequenzen. Abstand der einzelnen Treiber: 7cm. ....	21
Abbildung 13: Abstrahlung einer geraden (Links) und konstant gekrümmten (rechts) Strahlerzeile.....	25
Abbildung 16: Bühne und Bühnenbild (eigene Fotografie).....	30
Abbildung 15: Grundriss des Saals der Kulturhalle Dusslingen.....	30
Abbildung 18: Linke Seitenwand der Kulturhalle Dusslingen (Eigene Fotografie)	32

Abbildung 19: Rückwand (Eigene Fotografie) .....	33
Abbildung 17: Rechte Seitenwand (Eigene Fotografie).....	33
Abbildung 20: Simulierte vertikale Abstrahlung der Focus Modular. Links ohne DSP, rechts mit 30° digital geöffnetem Beam. Berechnet für einen Verbund von 2 DFM-400 Modulen, sowie ein einzelnes DFM-110-Modul.( Screenshots aus der Software „Fohn Audio Soft“).....	41
Abbildung 21: Focus Modular-System am Veranstaltungsort. Oben das Hochtonmodul DFM-110, unten 2 Module DFM-400 (eigene Fotografie). .....	42
Abbildung 22: Simuliertes Abstrahlverhalten und Pegelverlauf der DFM-400 mit den für “Rent” gewählten Einstellungen. Oben; 500 Hz, unten: 1Khz (Screenshots aus der Software Fohn Audio Soft). .....	43
Abbildung 23: Simuliertes Abstrahlverhalten und Pegelverteilung der DFM-110 mit den für “Rent” gewählten Einstellungen. Oben: 2KHz, unten: 8KHz (Screenshots aus der Software Fohn Audio Soft), .....	44
Abbildung 24: Frequenzgang des Linken Hauptsystems ohne Subwoofer nach manuellem Einhören. Grün: Mitte des Publikumsbereichs. Lila: FoH-Position bzw. vorletzte Reihe. Blau: vorletzte Reihe in Wandnähe. Grüner Balken: Ziel-Frequenzgang (Screenshot aus der Messsoftware OpenSoundMeter). .....	45
Abbildung 25: Frequenzabhängige EDT für die verwendete Beamsteering-Einstellung (Grün, Rot), und für die Referenzeinstellung (Gelb, Türkis) an den Messpunkten FoH (oben) und Mitte des Publikumsbereichs (unten) (Screenshots aus der Messsoftware Room Eq Wizard). .....	48

## Abkürzungsverzeichnis

EDT Early Decay Time

ARF Active Radiating Factor

DSP Digital Signal Processing

$\lambda$  Wellenlänge

L Länge eines Arrays

d Distanz zwischen den Lautsprechern eines Arrays

# Inhaltsverzeichnis

<b>EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1 RAUMAKUSTIK.....	2
2.1.1 <i>Diffusfeld</i> .....	2
2.1.2 <i>Absorption</i> .....	3
2.1.3 <i>Erste Reflexionen</i> .....	4
2.1.4 <i>Wichtige Kenngrößen der Raumakustik</i> .....	4
2.2 BESCHALLUNG.....	5
2.2.1 <i>Zielsetzungen der Beschallung</i> .....	5
2.2.2 <i>Zentrale und Dezentrale Beschallung</i> .....	7
2.2.3 <i>Beeinflussung des Hallradius</i> .....	9
2.3 ELEKTROAKUSTIK.....	10
2.3.1 <i>Richtcharakteristik</i> .....	10
2.3.2 <i>Richtwirkung einer Kolbenmembran</i> .....	11
2.3.3 <i>Möglichkeiten zur Verbesserung der Richtwirkung von Lautsprechern</i> .....	12
2.4 ARRAYS.....	16
2.4.1 <i>Klassisches Array und Line Array</i> .....	16
2.4.2 <i>Das Schallfeld von Arrays</i> .....	18
2.4.3 <i>Limitierungen des Realen Arrays und Lösungsansätze</i> .....	23
2.4.4 <i>Digitales Beamsteering</i> .....	28
<b>3 ANWENDUNGSFALL RENT</b> .....	<b>29</b>
3.1 VENUE.....	29
3.1.1 <i>Raumakustische Gegebenheiten</i> .....	31
3.2 TONTECHNISCHE ZIELSETZUNG UND PROBLEMSTELLUNGEN.....	35
3.3 DAS VERWENDETE SYSTEM „FOCUS MODULAR“.....	36

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

3.3.1	<i>Vertikale Richtcharakteristik</i> .....	37
3.3.2	<i>Horizontale Richtcharakteristik</i> .....	39
3.4	EINRICHTUNG DES SYSTEMS AM VERANSTALTUNGSORT .....	39
3.4.1	<i>Beamsteering-Konfiguration</i> .....	39
3.4.2	<i>Frequenzgang – Messung und Korrektur</i> .....	45
3.4.3	<i>Subwoofer und Übergangsfrequenz</i> .....	45
3.5	BEWERTUNG UND MESSUNG DES ERGEBNISSES .....	46
3.5.1	<i>Vergleichstest und Messung der Early Decay Time</i> .....	46
3.5.2	<i>Methodik und Auswertung der Messergebnisse</i> .....	47
3.5.3	<i>Subjektive Bewertung des Vergleichstests</i> .....	48
3.6	SUBJEKTIVER GESAMTKLANGEINDRUCK DES SYSTEMS IM RAUM .....	49
3.6.1	<i>Raumeindruck und Klarheit</i> .....	49
3.6.2	<i>Klangfarbliche Aspekte</i> .....	49
3.6.3	<i>Basswiedergabe</i> .....	50
3.7	FAZIT ANWENDUNGSFALL.....	50
<b>4</b>	<b>DISKUSSION UND FAZIT</b> .....	<b>52</b>
4.1	DISKUSSION .....	52
4.2	FAZIT.....	53
<b>5</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>XII</b>
<b>6</b>	<b>ANHÄNGE</b> .....	<b>XIV</b>

## 1 Einleitung

Guter Klang zählt als Kernbestandteil der Gesamtqualität von Bühnendarbietungen verschiedener Art, vor allem bei Theateraufführungen, Konzerten oder Musicals. Mit dem Einsatz von elektroakustischer Beschallung steigt diese Relevanz teils noch - während ein sehr guter Klang das Gesamtprodukt bereichern kann, führt im schlimmsten Fall eine verminderte Sprachverständlichkeit und ein undurchsichtiges Klangbild zu einer ernsthaften Beeinträchtigung des Erlebnisses. Das gilt vor allem in Innenräumen, wo die akustischen Eigenschaften des Raums großen Einfluss auf das Klangbild ausüben. Oft genug sind diese Raumeigenschaften dabei eher störend als zuträglich, besonders wenn der Raum nicht auf die Art der Darbietung spezialisiert ist. Besteht dann wie bei vielen kleineren Projekten nicht die Möglichkeit, durch Umbaumaßnahmen die Raumakustik zu beeinflussen, so verbleibt die Beschallungstechnik als wichtigster Parameter zum Erzielen eines guten Klangs. Um dieser Herausforderung zu begegnen, bietet die moderne Beschallungstechnik eine Reihe von Möglichkeiten, unter anderem die präzise Richtbaren „Beamsteering-Arrays“.

Dieser Arbeit liegt der praktische Einsatz eines solchen Arrays bei einer Musicalproduktion in einem akustisch schwierigen Raum zugrunde. Sie soll aufzeigen, inwiefern die Eigenschaften des Arrays vorteilhaft eingesetzt werden konnten, worin Einschränkungen bestehen und welches Ergebnis damit erzielt werden konnte. In diesem Praxisbericht werden sowohl die akustischen Gegebenheiten des Raums als auch die Eigenschaften des verwendeten Systems beleuchtet, und die Einsatzweise vor Ort beschrieben. Zur besseren Einordnung des Ergebnisses wurden außerdem Akustische Messungen mit verschiedenen Systemeinstellungen durchgeführt.

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

Dem Praxisbericht vorangestellt ist zunächst ein Überblick über das Einsatzfeld der Elektroakustischen Beschallung und über die grundlegenden Abstrahlverhalten von Lautsprechern. Es folgt eine Theoretische Betrachtung des Funktionsprinzips von Arrays mit besonderem Hinblick auf ihre Richtcharakteristik und Ausrichtbarkeit.

Diese Arbeit betrachtet dabei ausschließlich gerade Strahlerzeilen mit Beamsteering-Funktionalität, und lässt die weit verbreiteten „Curved Arrays“, die aus vielen Einzelboxen zusammengesetzt werden, weitgehend außer acht. Ein Großteil der zugrunde liegenden Theorie kann jedoch auf beide Arten von Systemen bezogen werden.

## **2 Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Raumakustik**

Für die erfolgreiche Beschallung von Innenräumen ist die Akustik des beschallten Raums sehr wichtig(Weinzierl, 2008). Daher sollen hier für diesen Anwendungsfall die wichtigsten Raumakustischen Parameter erläutert werden.

#### **2.1.1 Diffusfeld**

In Räumen entsteht durch mehrmalige wiederholte Reflexion des Schalls an den Wänden ein sogenanntes diffuses Schallfeld. Für dieses wird statistisch angenommen, dass an jedem Raumpunkt für jede Einfallrichtung den gleichen Schalldruck aufweist (Möser, 2015). Dieses Diffusfeld klingt nach Anregung über die Zeit ab, da verschiedene durch Absorption in der Luft und vor allem auch an den Wänden den Schallwellen kontinuierlich Energie entzogen wird. Dieses Abklingen des Diffusfelds wird als Nachhall bezeichnet. Wird dem Diffusfeld dagegen kontinuierlich Energie zugeführt, nimmt dessen Energiegehalt einen stationären Zustand an(Weinzierl, 2008).



Allgemein lässt sich die Änderung des Energiegehalts des Diffusfelds bestimmen als Differenz zwischen zugeführter und absorbiertes Energie über einen gewissen Zeitraum(Kutruff, 2004).

### 2.1.2 Absorption

Trifft eine Schallwelle auf eine Oberfläche (hier: auf eine Wand), so wird von dieser immer ein gewisser Anteil der Schallenergie in den Raum zurückreflektiert, und ein Teil absorbiert. Dieses Verhalten wird beschrieben über den Absorptionsgrad  $\alpha$ , der sich als das Verhältnis von Reflektierter zu Absorbierter Energie berechnet. Der Absorptionsgrad hängt mit den Materialeigenschaften zusammen(Kutruff, 2004):

- Eine starre Wand ohne Poren gilt als „Schallhart“, sie reflektiert fast die vollständige eintreffende Energie.
- Wird die Oberfläche dagegen rau, so erhöht sich der Absorptionsgrad.
- Besonders absorbierend wirken poröse Materialien wie bzw. Stoffbahnen, hier geht u.a. durch Reibungsverluste innerhalb der Poren viel Schallenergie verloren.(Kutruff, 2004)

Der Absorptionsgrad ist außerdem Frequenzabhängig. Dabei gilt generell, dass eine wirksame Absorption auftritt, sobald das absorbierende Material eine Schichtdicke in der Größenordnung der betrachteten Wellenlänge aufweist. Befindet sich die absorbierende Schicht in einem gewissen Abstand zur Wand, tritt die Absorption bereits für tiefere Frequenzen ein, sobald deren Wellenlänge ein Viertel der Gesamtdicke der Schicht zur Wand hin beträgt. Dies gilt beispielsweise für Vorhänge(Kutruff, 2004).

Um die akustischen Eigenschaften eines Raums näher zu bestimmen, ist es wichtig, dessen Verlusteigenschaften zu kennen. Vernachlässigt man die Schallabsorption der Luft, so lassen sich diese vor allem über die **Äquivalente Absorptionsfläche** bestimmen. Dafür wird der Raum in  $i$  Einzeloberflächen  $S_i$  mit jeweils klar bestimmtem Absorptionsgrad zerlegt.

$$A = \sum_i \alpha_i S_i$$

### 2.1.3 Erste Reflexionen

Bis sich aus einem Schallereignis ein durchmischtes Diffusfeld aufgebaut hat, vergeht eine gewisse Zeit, für kleine Räume in etwa 200ms. Reflexionen, die innerhalb dieser Zeit beim Publikum eintreffen, werden als Erstreflexionen bezeichnet. Sie tragen einen wesentlichen Teil zum Gesamtklang des Raums bei(Ahnert & Reichardt, 1981). Das Auftreten von Erstreflexionen ist von Lage, Form(Ahnert & Reichardt, 1981) und Reflexionseigenschaften der Wände abhängig(Dickreiter et al., 2023). Zudem sind sie für jede Raumposition anders(Ahnert & Reichardt, 1981) .

### 2.1.4 Wichtige Kenngrößen der Raumakustik

Die **Nachhallzeit T** beschreibt die Dauer des Nachhalls in einem Raum, bis der Pegel des Diffusfelds auf -60db gegenüber einem Initialen Impuls abgefallen ist. Sie ist abhängig vom Raumvolumen und der Äquivalenten Absorptionsfläche:

$$T = 0,163 \frac{V}{A}$$

Bei konstanter Energiezufuhr nimmt wie erwähnt das Diffusfeld einen stationären Zustand an, ein Nachhall bis zum Abfall von -60db tritt quasi nicht auf bzw. wird nicht wahrgenommen. Einen besseren Eindruck für den wahrgenommenen Nachhall bei laufendem Programm bietet die **Early Decay Time EDT**, sie beschreibt die Zeit bis zum Pegelabfall um 10db(Weinzierl, 2008), und bezieht somit auch stark den Verlauf von Erstreflexionen mit ein(Ahnert & Reichardt, 1981). Anders als die Nachhallzeit ist sie zudem auch abhängig von der betrachteten Position im Raum(Weinzierl, 2008).

Betrachtet man eine in einem Raum abstrahlende Schallquelle, so zeigt sich, dass im direkten Umfeld der Quelle der von Ihr abgestrahlte Direktschall im Pegel über

dem des Diffusfelds liegt. Der Abstand von der Quelle, in dem sich Diffusfeld und Direktschall im Pegel gleichen, wird als **Hallradius** bezeichnet. Er berechnet sich vereinfacht als

$$r_h = \sqrt{\frac{A}{16\pi}}$$

und hängt damit ausschließlich von der äquivalenten Absorptionsfläche ab(Kutruff, 2004). Unter 2.2.3 wird gezeigt, dass der Hallradius zusätzlich auch von den Bündelungseigenschaften der Quelle abhängt.

Erstreflexionen machen oft einen großen Teil der beim Publikum eintreffenden Schallenergie aus(Ahnert & Reichardt, 1981). Im Zusammenhang mit Beschallungsanlagen können sie daher und durch ihr verzögertes Eintreffen zum Auftreten von deutlichen hörbaren Kammfiltereffekten führen (Dickreiter et al., 2023).

## 2.2 Beschallung

Als Beschallung wird der Betrieb einer Lautsprecheranlage bezeichnet, die eine Signalquelle auf einer gewissen Fläche bzw. einem größeren Publikum hörbar machen soll. Für den Fall dieser Arbeit gilt dabei zudem, dass die Signalquelle unmittelbar vor Ort erzeugt wird, was generell für Konzerte und Aufführungen vieler Art gilt(Weinzierl, 2008). Somit geht es hier nicht nur um die Wiedergabe eines Tonsignals, sondern um dessen Verstärkung, da rein akustisch ein zu leises Nutzsignal für die Größe des Publikums entstehen würde(Dickreiter et al., 2023).

### 2.2.1 Zielsetzungen der Beschallung

Die Primäre Aufgabe der Beschallung, ein Nutzsignal einem Publikum hörbar zu machen, lässt sich noch um weitere Kriterien erweitern.

Elementar wichtig ist auch die Erzeugung eines angemessenen Pegels, der je nach Anwendungsfall variieren kann. Dies gilt insbesondere bei Musikwiedergabe. So sollte die Beschallung bei einem Klassik-Konzert einen Pegel erzeugen, der dem unverstärkten Pegel in adäquater Umgebung entspricht (z.B. ein Konzertsaal). Konzerte im Pop/Rock-Bereich oder im Bereich der elektronischen Musik erfordern dagegen teils deutlich höhere Pegel von bis zu ca. 105dB (A)(Weinzierl, 2008).

Ebenso wichtig für Beschallung im Musikbereich ist, dass die Anlage eine natürliche und angenehme Klangfarbe aufweist, also keine Frequenzbereiche über- oder unterbetont.

Diese beiden Kriterien können noch darum erweitert werden, dass sie möglichst für den gesamten Beschallungsbereich gelten sollen.(Dickreiter et al., 2023)

Besonders für Beschallungen in Innenräumen muss eine Beschallungsanlage immer auch in Verbindung mit ihrem akustischen Umfeld betrachtet werden, denn Lautsprecher und Raumakustik werden von den Zuhörenden in der Qualität immer gemeinsam wahrgenommen. Wichtigstes Raumakustisches Kriterium ist dabei der Nachhall(Weinzierl, 2008).

Unter Zuhilfenahme des Statistischen Klarheitsmaßes  $C_{80stat}$ , Des Statistischen Deutlichkeitsmaßes  $C_{50stat}$  und des Statistischen Raumeindrucksmaßes  $R_{stat}$  lassen sich weitere Anforderungen an eine Beschallungsanlage stellen. Die aufgeführten Maße geben jeweils einen Erwartungswert für die Musikalische Zeit- und Registerdurchsichtigkeit ( $C_{80stat}$ ), die Sprachverständlichkeit ( $C_{50stat}$ ) und zur Subjektiven empfundenen Räumlichkeit ( $R_{stat}$ ) an. Sie werden als Pegel angegeben, dabei gilt für  $C_{80stat}$  und  $C_{50stat}$ , dass Werte von  $\leq 0db$  als gut anzusehen sind. Beim Raumeindrucksmaß gilt ein Idealwert von 2-6db(Ahnert & Reichardt, 1981).

Diese Werte werden beeinflusst durch die Nachhallzeit des Raums, die Entfernung der Zuhörenden von der Klangquelle und vom Hallradius. (Da sich  $C_{80stat}$  und  $C_{50stat}$

im Hinblick auf diese Parameter ähnlich Verhalten, wird zur Vereinfachung nur  $C_{80stat}$  weiter aufgeführt.) Dabei gilt:

- $R_{stat}$  und  $C_{80stat}$  hängen gegenläufig zusammen.
- Eine höhere Raumnachhallzeit führt zu höherem  $R_{stat}$  und kleinerem  $C_{80stat}$ .
- Größere Abstände zur Klangquelle ebenso.
- Bei gleichbleibendem Abstand führt ein größerer Hallradius ebenfalls kleinerem  $C_{80stat}$ .

Die Nachhallzeit stellt dabei eine feste Raumgröße dar und kann nicht durch den Einsatz eines Beschallungssystems verändert werden. Die Entfernung Lautsprecher-Hörer sowie der Hallradius, sind allerdings beeinflussbar. Daher kann an Beschallungsanlagen die Anforderung gestellt werden, akzeptable Werte für  $R_{stat}$  und  $C_{80stat}$  zu erzielen, besonders jedoch für letzteres, da ein zu geringer Raumeindruck sich auch durch künstlichen Nachhall kompensieren lässt (Ahnert & Reichardt, 1981).

## 2.2.2 Zentrale und Dezentrale Beschallung

Um die genannten Anforderungen zu erfüllen, können zwei grundsätzliche Konzepte unterschieden werden, die Zentrale und Dezentrale Beschallung.

### 2.2.2.1 Zentrale Beschallung

Bei der Zentralen Beschallung erfolgt die Versorgung des gesamten Publikumsbereichs über ein einziges oder ein Stereophones System. Dabei ist vor

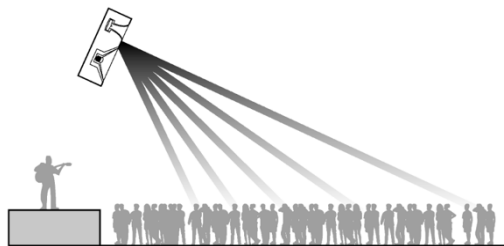


Abbildung 1: Zentrale Beschallung. Durch die erhöhte Position des Lautsprechers ergibt sich ein gleichmäßiger Direktschallpegel im Publikum.

allem wichtig, dass die Position des Systems so gewählt werden kann, dass ein etwa gleicher Abstand zu allen Punkten im Publikum besteht, oder andernfalls, das

System so eingerichtet werden kann, dass der Direktschallpegel überall in etwa gleich ist. Siehe dazu Abbildung 1 (Dickreiter et al., 2023).

Akustisch bietet zentrale Beschallung den Vorteil einer eindeutig definierten Lokalisation zur Bezugsrichtung (Ahnert & Reichardt, 1981). Zudem hält sich der benötigte Material- und Installationsaufwand in Grenzen, da nur ein (bzw. zwei) Lautsprechersysteme aufgebaut werden müssen. Bei großen Beschallungsdistanzen müssen allerdings entsprechend teils hohe Pegel im System erzeugt werden. Bei unpräziser Schallrichtung wird somit auch das Diffusfeld stark angeregt (Dickreiter et al., 2023).

#### *2.2.2.2 Dezentrale Beschallung*

Dieser Ansatz bietet eine effektive Möglichkeit, den Abstand Lautsprecher – Publikum zu verkleinern. Man geht hier genau umgekehrt zur zentralen Beschallung vor und beschallt statt über ein Hauptsystem über viele Einzelsysteme, die möglichst nah am Publikum platziert werden. Dieses Verfahren wird hauptsächlich im Bereich der Sprachbeschallung eingesetzt, da hier der Richtungsbezug zur Bühne weniger wichtig ist als bei einer Musikbeschallung (Ahnert & Reichardt, 1981). Daher wird dezentrale Beschallung vor allem in Plenarsälen eingesetzt, oder in Räumen mit niedriger Deckenhöhe, die nur schwer über ein Hauptsystem beschallt werden könnten. Auch zur Reduktion von Lärmemissionen ist sie ein geeignetes Mittel. Nachteilhaft ist der recht hohe Kosten- und Materialaufwand (Dickreiter et al., 2023).

In der Praxis wird oft eine Kombination von Zentraler- und Dezentraler Beschallung eingesetzt. Zusätzlich zum Hauptsystem versorgen Fülllautsprecher die Publikumsbereiche, die sonst nicht adäquat abgedeckt werden (Dickreiter et al., 2023).

Die wichtigsten Vertreter dieser Art Fülllautsprecher sind die sogenannten Delay-Lines und Nearfills. Delay-Lines werden eingesetzt, um die weiter entfernten Bereiche zur Bühne mit ausreichendem Pegel zu versorgen. Um dabei die Ortung des Publikums nicht vom Hauptsystem abzubringen, werden die Lautsprecher um etwas mehr als die Laufzeit zum Hauptsystem verzögert. Damit wird das Gesetz der ersten Wellenfront ausgenutzt, nach dem das menschliche Gehör Schallereignisse immer in die Richtung lokalisiert, aus der die erste Wellenfront bei ihm eingetroffen ist. Bei korrekt eingestelltem Delay wird also weiterhin das Hauptsystem lokalisiert (Dickreiter et al., 2023).

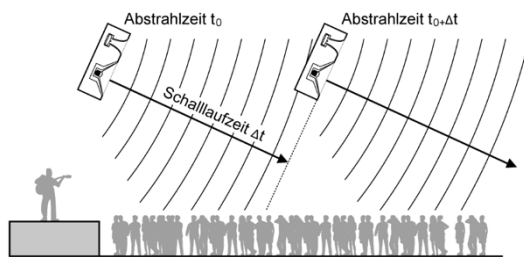


Abbildung 2: Delay-Line

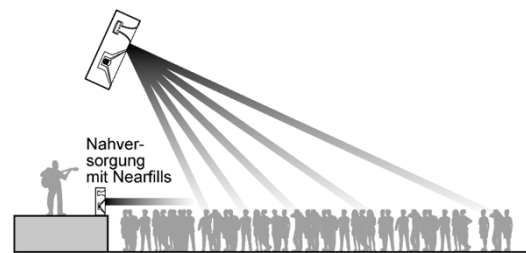


Abbildung 3: Nearfill

Nearfills werden eingesetzt, wenn durch das Abstrahlverhalten des Hauptsystems die ersten Reihen des Publikums nicht mit ausreichend Schalldruck versorgt werden. Dafür werden kleinere Systeme z.B. auf der Bühnenkante platziert. Dadurch ergibt sich zudem für den betroffenen Publikumsbereich auch ein verbesserter Richtungsbezug zur Bühne (Dickreiter et al., 2023). Abbildung 2 und Abbildung 3 verdeutlichen das Prinzip hinter den genannten Fülllautsprechern (Dickreiter et al., 2023).

### 2.2.3 Beeinflussung des Hallradius

Wie zuvor aufgeführt, ist der Hallradius ein wichtiges Kriterium im Zusammenhang mit der Klarheit des wiedergegebenen Materials. Entsprechend ist es bei der Beschallung von Interesse, den Hallradius so zu beeinflussen, dass für alle Punkte im Beschallungsbereich ein guter Wert von  $C_{80stat}$  erzielt wird (Ahnert & Reichardt, 1981). Anders ausgedrückt soll der Direktschallpegel überall möglichst hoch gegenüber dem Pegel des Diffusfelds sein (Weinzierl, 2008).

Der Hallradius um einen Lautsprecher erweitert sich, sobald dieser gebündelt abstrahlt, in Vorzugsrichtung der Bündelung(Ahnert & Reichardt, 1981). Für den Beschallungsfall empfiehlt sich also auf jeden Fall der Einsatz von gerichtet abstrahlenden Systemen, welche auf die Publikumsfläche hin ausgerichtet werden(Dickreiter et al., 2023). Damit kann im Vergleich zu einer Kugelquelle eine höhere Klarheit bei gleichzeitig kleinerem Raumeindruck erzeugt werden(Ahnert & Reichardt, 1981). Eine Einschränkung besteht darin, dass die meisten Schallquellen stark Frequenzabhängig bündeln, das Bündelungsmaß wächst mit steigender Frequenz (siehe 2.3). Somit ergibt sich auch ein größerer Hallradius für höhere Frequenzen, oder anders: Klarheit und Raumeindruck werden Frequenzabhängig. Dies kann für Sprachübertragung teils toleriert werden, für Musikwiedergabe wirkt eine schlechtere Durchsichtigkeit für tiefe Frequenzen jedoch unnatürlich.

Hieraus ergibt sich die Motivation, im Beschallungsbereich Lautsprecher mit klar definiertem Abstrahlverhalten einzusetzen. Dieses soll zudem möglichst Frequenzunabhängig gelten(Ahnert & Reichardt, 1981).

## 2.3 Elektroakustik

Im Folgenden Kapitel wird sich nur auf den Dynamischen Kalotten- oder Konuslautsprecher mit Schwingspule bezogen(Dickreiter et al., 2023). Andere Bauformen und Wandlerprinzipien haben für diese Arbeit keine Relevanz.

### 2.3.1 Richtcharakteristik

Die für diese Arbeit wichtigste Kenngröße eines Lautsprechers ist die sogenannte Richtcharakteristik. Sie beschreibt das Räumliche Schallabstrahlverhalten eines Lautsprechers, und wird mittels eines sogenannten Polardiagramms dargestellt(Weinzierl, 2008). Im Polardiagramm wird der Richtungsabhängig abgestrahlte Schalldruck bzw. Pegel in Polarkoordinaten, sprich über Radius und



Winkel angegeben(Zollner & Zwicker, 1993). Der Radius wird dabei in der Regel als Pegel skaliert und beschreibt den Schalldruck, der Winkel beschreibt den Winkel zum Lautsprecher in der jeweils beschriebenen Ebene(Zollner & Zwicker, 1993).

Wichtige Kenngrößen der Richtcharakteristik sind das Bündelungsmaß und der Abstrahlwinkel.

Das **Bündelungsmaß  $d(\omega)$** (Zollner & Zwicker, 1993, S. 85) beschreibt die Differenz des Pegels einer Schallquelle im Abstand  $r$  in Hauptabstrahlrichtung, zum Pegel einer gedachten Kugelschallquelle mit derselben abgestrahlten Gesamtenergie. Damit kann es unabhängig der genauen Richtcharakteristik einen Eindruck der Stärke der Bündelung geben(Zollner & Zwicker, 1993). Sobald eine Schallquelle in Hauptabstrahlrichtung bündelt, nimmt das Bündelungsmaß werte  $>0\text{db}$  an(Weinzierl, 2008).

Als **Abstrahlwinkel** (im späteren Verlauf der Arbeit auch: Beam Width) wird dazu der Winkelbereich bezeichnet, innerhalb dem der Schalldruck über oder gleich  $-6\text{db}$  gegenüber der Hauptabstrahlrichtung beträgt(Zollner & Zwicker, 1993).

Im Folgenden sollen die Grundlegenden Abstrahlcharakteristiken von Lautsprechern erläutert werden, sowie Möglichkeiten zu deren Beeinflussung genannt werden.

### 2.3.2 Richtwirkung einer Kolbenmembran

Um die Abstrahlung eines Kalottenlautsprechers zu beschreiben, kann vereinfacht eine Kreisförmige, schwingende ebene Fläche, genannt Kolbenmembran, betrachtet werden. Die ist in eine gedachte Schallharte Wand eingelassen und strahlt nur in einer Richtung ab. Die von dieser Kolbenmembran abgestrahlte Wellenfront kann als spezielle Form einer Kugelwelle gesehen werden. Deren Schalldruck hängt neben der Entfernung auch vom Betrachtungswinkel ab(Zollner & Zwicker, 1993), Es liegt somit eine Richtwirkung vor. Dabei gilt:

- Das Schallfeld der Kreisförmigen Kolbenmembran ist Rotationssymmetrisch zur Schwingungsachse.
- Für tiefe Frequenzen, deren Wellenlänge in der Größenordnung der Membran oder darüber liegt, strahlt sie ungerichtet bzw. Kugelförmig ab.
- Für hohe Frequenzen tritt eine mit der Frequenz zunehmende Bündelung auf, der Schalldruck ist dabei in Richtung der Flächennormalen immer am höchsten.
- Für Winkel Abseits der Flächennormalen nimmt der Schalldruck ab, zudem tritt eine Struktur aus Nebentrichtern und Einbrüchen auf(Zollner & Zwicker, 1993).

Die Kolbenmembran weist also ein Bündelungsverhalten auf, dass von der Größe der Membran auch von der Frequenz abhängt.

### 2.3.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der Richtwirkung von Lautsprechern

Nach 2.2.3 ist es für die Beschallung wünschenswert, Lautsprecher mit einem möglichst definierten, Frequenzunabhängigen Abstrahlverhalten zu konstruieren. In diesem Abschnitt werden konstruktionstechnische Möglichkeiten aufgeführt, das Abstrahlverhalten eines Lautsprechers zu beeinflussen.

#### 2.3.3.1 Horngeladener Lautsprecher

Bei einem sogenannten Horngeladenen Lautsprecher oder einfach Hornlautsprecher wird an die Membran ein Horn, also eine Schallführung mit stetiger Querschnittsänderung angesetzt(Weinzierl, 2008). Dies eröffnet weitgehende Möglichkeiten, das Abstrahlverhalten des Lautsprechers zu beeinflussen. Durch Gestaltung der Horngeometrie und die Abmessungen der Hornöffnung kann die gewünschte Bündelung für weite Frequenzbereiche erzielt werden. Dabei ist auch ein Unterschiedlicher Abstrahlwinkel in der Horizontalen und Vertikalen Möglich(Weinzierl, 2008).

Dabei gilt analog zur Kolbenmembran, dass eine Richtwirkung ab einer Wellenlänge in der Größenordnung der Hornaustrittsöffnung festgestellt werden kann. Für größere Wellenlängen strahlen Hörner ungerichtet ab(Keele, 1975).

Die Richtwirkung des Horns basiert darauf, dass sich im Horn eine schwingende Luftsäule ausbildet. Damit entsteht am Hornausgang eine (idealerweise) mit gleicher Phase schwingende Fläche, die in ihrer Abstrahlung wiederum ähnlich zur Kolbenmembran betrachtet werden kann(Dickreiter et al., 2023). Je nach Konstruktionsweise des Horns kann diese Fläche auch einem Kugelsegment entsprechen(Keele, 1975).

Hörner weisen konstruktionsbedingt auch gewisse Einschränkungen auf. Ihre Abstrahlcharakteristik neigt bei hohen Frequenzen zur Ausbildung von Nebenkeulen, und bei Frequenzen, deren Wellenlänge der Öffnungsweite entspricht, entsteht oft ein deutlicher Einbruch in der Abstrahlbreite(Keele, 1975). Zudem können Reflexionen an der Innenwand des Horns auftreten, die wiederum zu ungewollten Interferenzeffekten führen(Weinzierl, 2008). Im Horntrichter entstehen außerdem teils sehr hohe Schalldrücke, durch die es zu nichtlinearen Verzerrungen kommen kann. Dieser Punkt gilt vor allem für sogenannte Kompressionstreiber, bei denen dem Horn noch eine Druckkammer vorgelagert wird, die der Erhöhung des Luftwiderstands und damit des Schalldruckpegels dient(Weinzierl, 2008).

Abbildung 4 (Keele, 1975) zeigt beispielhaft das Abstrahlverhalten eines Hornlautsprechers. Gut zu erkennen ist die kugelförmige Abstrahlung für tiefe Frequenzen sowie die Ausbildung von Nebenkeulen, hier bei 5KHz. Auch kann beobachtet werden, dass der Bündelungsgrad oberhalb 1KHz in der Horizontalen bzw. 5KHz in der Vertikalen nicht weiter ansteigt.

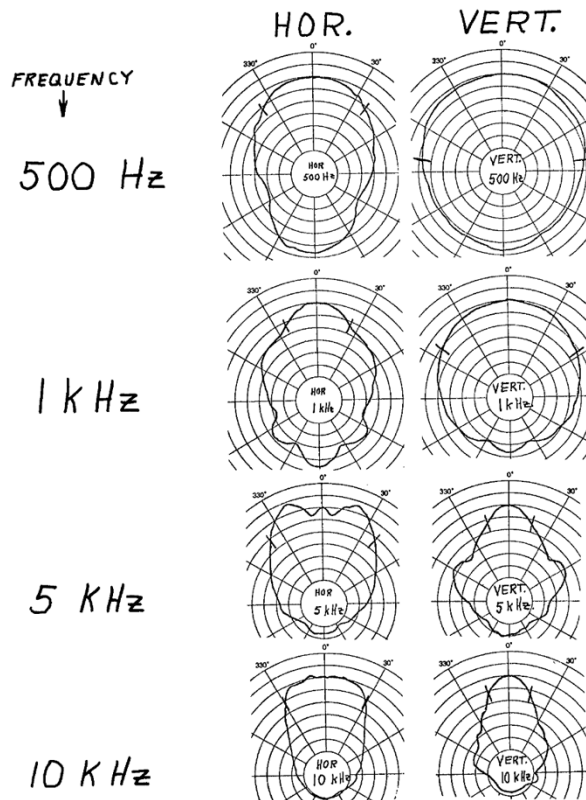
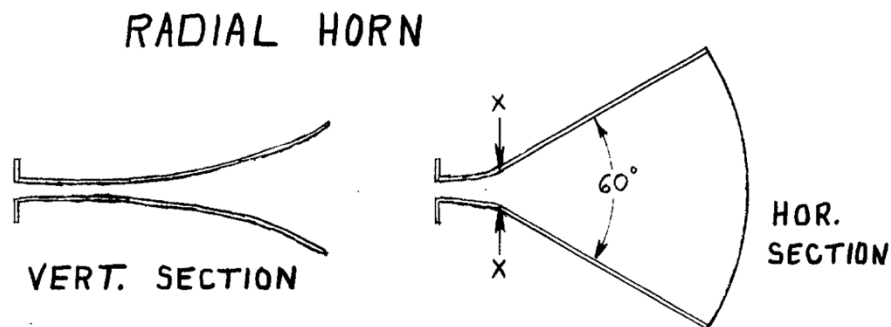


Abbildung 4: Skizze eines Horns mit unterschiedlichem Abstrahlwinkel in Vertikaler und Horizontaler Richtung sowie die zugehörigen Polardiagramme. Der Punkt des Seitlichen 6db-Abfalls ist jeweils markiert.

Wichtige Bauformen von Hörnern sind das Konische und das Exponentielle Horn, deren ihren Querschnitt linear bzw. mit exponentiellem Verlauf ändern. Zudem existiert das sogenannte CE-Horn, welches eine Verbindung beider Hornarten darstellt (Keele, 1975). Es weist ein konstantes Abstrahlverhalten für das gesamte Frequenzspektrum auf (Solange die Wellenlänge in der Größenordnung der Hornabmessungen liegt.) und minimiert gleichzeitig das Auftreten von Nebenkeulen.

### 2.3.3.2 Dipolstrahler

Werden 2 gleiche Lautsprecher nebeneinander betrieben, spricht man vom sogenannten Dipolstrahler. Ein solcher Strahler weist eine Bündelung von Frequenzen in einem gewissen Bereich durch konstruktive und destruktive Interferenzeffekte auf. Besteht zwischen den Lautsprechern ein Abstand von einer halben Wellenlänge, so kommt es zu den Seiten hin zur destruktiven Interferenz, nach vorn allerdings summieren sich beide Quellen auf (Dickreiter et al., 2023). Siehe Abbildung 5 ((Dickreiter et al., 2023).

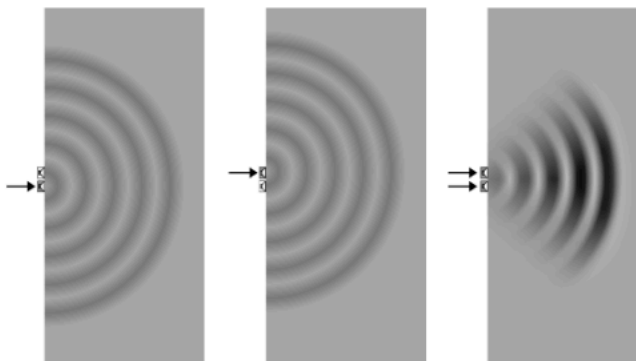


Abbildung 5: Funktionsprinzip des Dipol-Strahlers.

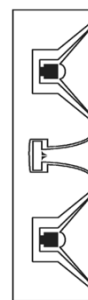


Abbildung 6: D'Appolito-Strahler

Dieses Funktionsprinzip wird in der Praxis gern für die kontrollierte Abstrahlung von mittleren und tiefen Frequenzen verwendet, und dann um ein Hornsystem mit entsprechender Richtcharakteristik für hohe Frequenzen ergänzt. Beispielhaft kann hier der in Abbildung 6 (Dickreiter et al., 2023) aufgeführte D'Appolito-Strahler genannt werden, bei dem ein Hochtonhorn von zwei Tieftonkalottenlautsprechern umrahmt wird (Dickreiter et al., 2023).

Das Grundprinzip eines Dipol-Lautsprechers lässt sich zur Schallzeile bzw. zum Array ausweiten (Dickreiter et al., 2023), welches im folgenden Kapitel ausführlich behandelt wird.

## 2.4 Arrays

In akustisch schwierigen Räumen sind herkömmliche Beschallungssysteme teils nur schwer in der Lage, für den gesamten Zuschauerbereich einen Direktschallpegel zu erzeugen, welcher in angemessenem Maße über dem des Diffusfelds liegt (van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o.J.). Statt breit abstrahlenden Punktschallquellen, deren Schallenergie sich zu sehr im Raum verteilt, kann ein Verbund mehrerer eng abstrahlender Systeme genutzt werden. Ein solcher Lautsprecherverbund wird je nach Art als Array oder Cluster bezeichnet. Er besteht in der Regel aus mehreren Einzelsystemen, diese können gleichen oder unterschiedlichen Typs sein. Zielsetzung eines Arrays oder Clusters ist es, ein klar definiertes Abstrahlverhalten zu erhalten (Weinzierl, 2008).

### 2.4.1 Klassisches Array und Line Array

Es kann unterschieden werden zwischen dem "Klassischen" Array und dem modernen Line-Array.

Das Klassische Array ist eine Anordnung von mehreren Punktschallquellen. Diese sind in ihrem Abstrahlverhalten und ihrer Ausrichtung zueinander so gewählt, dass die einzelnen Quellen sich nur begrenzt überschneiden. Auf diese Weise soll das

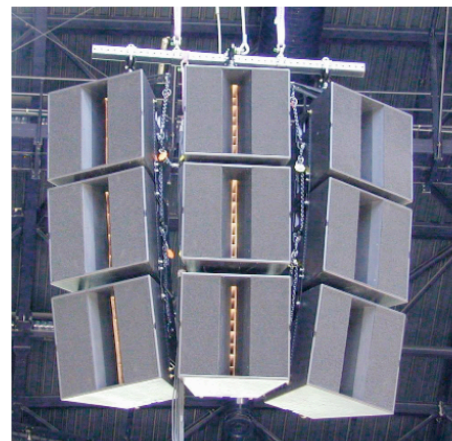


Abbildung 7: Klassisches Array

Auftreten von Kammfiltern zwischen den einzelnen Quellen minimiert werden (Weinzierl, 2008). Siehe Abbildung 7 (Weinzierl, 2008).

Es werden hierfür in der Regel horngeladene Lautsprecher verwendet, die fächerförmig zueinander montiert werden. Die gewählten Winkel zwischen den

Lautsprechern sind entsprechend Abhängig vom Abstrahlwinkel der verwendeten Einzellautsprecher bzw. deren Hörnern.

Da allerdings Punktschallquellen in ihrer Richtcharakteristik Frequenzabhängig sind und zu tiefen Frequenzen hin breiter abstrahlen, gelingt die akustische Verbindung der Systeme nur bedingt. Es kommt zu positionsabhängigen Kammfiltereffekten(Urban et al., 2001).

Im Gegensatz zu „klassischen“ Array aus einzelnen Punktschallquellen steht das sogenannte Line Array. Es handelt sich

hierbei um einen Verbund von Lautsprechern, die möglichst eine kohärente Wellenfront abstrahlen und damit ähnlich einem größeren, einzelnen System agieren. Beispiel siehe Abbildung 8 (Weinzierl, 2008). Line Arrays versuchen in der Regel, dem idealisierten Linienstrahler möglichst nah zu kommen. Sie können damit abhängig vom Betrachtungsabstand als zylindrischer Strahler oder wie ein einzelner Kugelstrahler agieren(Weinzierl, 2008).

Es soll hier noch festgestellt werden, dass die Unterschiede zwischen einer Zylinder- und einer Kugelwelle bei der Betrachtung des Pegelabfalls über Distanz sehr wichtig sind,(Möser, 2015) und eine große Rolle bei der Konstruktion von Arrays spielen(Dickreiter et al., 2023). Der Fokus in dieser Arbeit liegt allerdings auf der Richtwirkung der Arrays, daher wird dieser Themenkomplex weitergehend vernachlässigt.

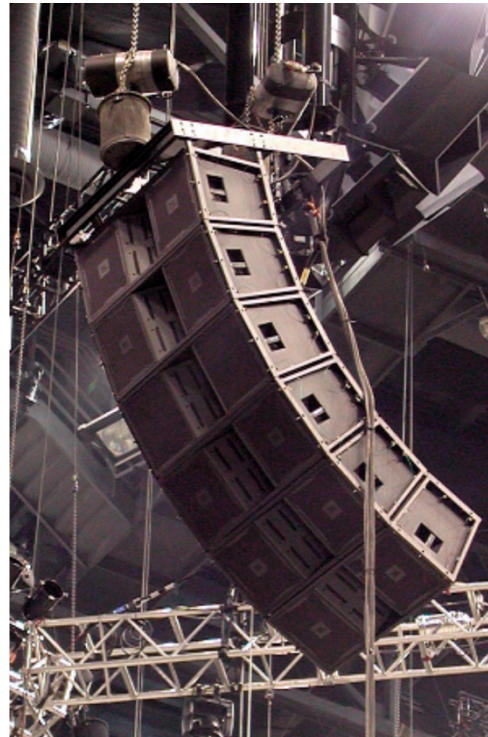


Abbildung 8: Line Array

## 2.4.2 Das Schallfeld von Arrays

### 2.4.2.1 Nahfeld und Fernfeld

Die Unterscheidung in Nahfeld und Fernfeld ist für die meisten Klangquellen sehr relevant, so auch bei Arrays. Hier zeigen sich sowohl im abstandsabhängigen Pegelabfall als auch in der Richtcharakteristik unterschiede für beide Fälle. Im Fernfeld lässt sich die abgestrahlte Wellenfront als Kugelwelle beschreiben, im Nahfeld als Zylinderwelle. Der Übergang zwischen Nahfeld und Fernfeld lässt sich nach (Urban et al., 2001) beschreiben mit:

$$d \frac{3}{4} F H^2$$

Mit  $H$ = Länge des Arrays. Der Übergangsabstand ist also sowohl Frequenzabhängig als auch abhängig von der Zeilenlänge.

### 2.4.2.2 Richtverhalten im Nahfeld

Das Nahfeld-Richtverhalten unterscheidet sich von dem im Fernfeld und kann, anders als beim Fernfeld, nicht über Polardiagramme beschrieben werden (Urban et al., 2001). Es ist abhängig vom Betrachtungsabstand (van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.). Das Nahfeldverhalten von Arrays kann im Falle von Beamsteering-Arrays als dem Fernfeldverhalten annähernd gleich angenommen werden (O. Mack, persönliche Kommunikation, 28. August 2024). Es ist für diese

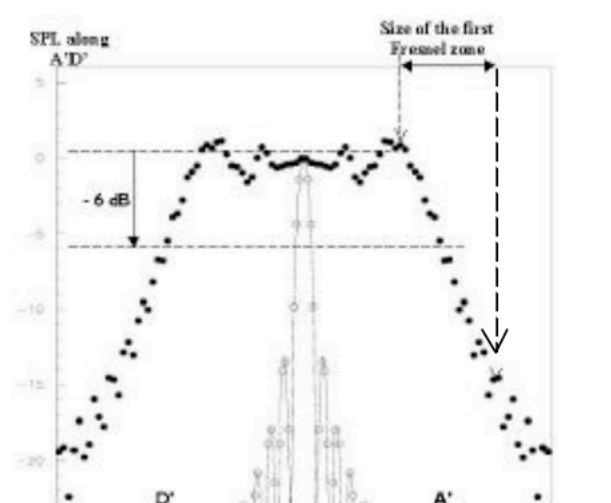


Abbildung 9: Abstrahlung desselben Arrays im Nahfeld (schwarz) und Fernfeld (grau).  $D'$  und  $A'$  markieren die räumliche Grenze des Arrays.

Mack, Jona

Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion



Arbeit nicht von weiterer Relevanz, der Unterschied soll aber in Abbildung 9 (Urban et al., 2001) verdeutlicht werden.

#### 2.4.2.3 Richtverhalten des idealisierten Arrays

Um das Richtverhalten von Arrays zu beschreiben, kann zunächst das Richtverhalten einer gedachten Eindimensionalen Kolbenmembran endlicher Länge betrachtet werden. Deren Richtwirkung kann beschrieben werden über die Spaltfunktion:

$$G(u) = \frac{\sin(\pi * u)}{\pi * u}$$

Mit

$$u = \frac{l}{\lambda} \sin \vartheta_N$$

$\vartheta_N$  beschreibt den Winkel zur Normalen der Zeile,  $l$  ist die Zeilenlänge. (Möser, 2015)

$u=0$  entspricht also der Abstrahlung in Normalenrichtung der Zeile, und nimmt größere bzw. kleinere Werte an für von der Normalen abweichende Betrachtungswinkel.  $u$  skaliert außerdem mit dem Verhältnis  $l/\lambda$ .

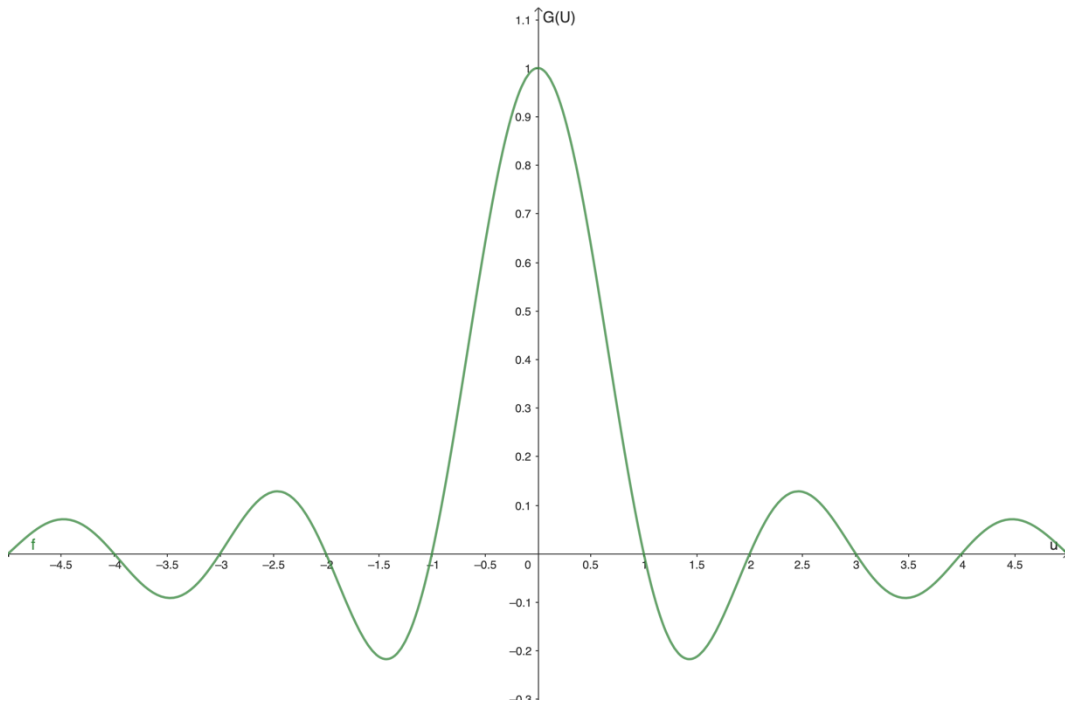


Abbildung 10: Spaltfunktion  $G(u)$  (Eigene Darstellung mittels Grafikrechner "GeoGebra")

Es lassen sich aus dieser Funktion also einige Aussagen über das Abstrahlverhalten der Zeile treffen:

- In Normalenrichtung existiert immer das höchste maximum.
- Abseits der Normalen treten weitere Nebenkeulen und Minima auf. Diese befinden sich bei:  $u = n \pm 0,5$ ;  $n \in \mathbb{N}$ .
- Ob und wo diese Nebenkeulen innerhalb des Winkels zur Normalen von  $\pm 90^\circ$  auftreten, liegt am Verhältnis  $l/\lambda$ .

Diese Eigenschaften können entsprechend in Abbildung 11 (Ureda, 2004) betrachtet werden:

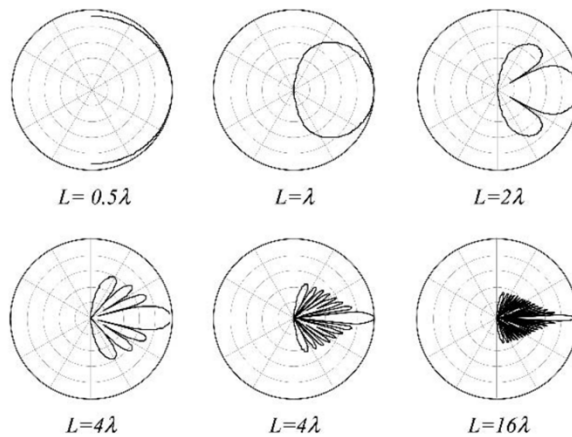


Abbildung 11: Polardiagramme einer Linienquelle für verschiedene Verhältnisse  $l/\lambda$

Mack, Jona

Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion

Die Abstrahlcharakteristik der Eindimensionalen Kolbenmembran lässt sich also folgendermaßen zusammenfassen:

- Für Frequenzen mit  $\lambda > L$  ist die Abstrahlung annähernd Kugelförmig (Ureda, 2004).
- Der Bündelungsgrad nimmt zu hohen Frequenzen hin zu (Weinzierl, 2008).
- Ab  $\lambda = L$  und für höhere Frequenzen treten Nebenkeulen und Minima auf. Diese nehmen mit zunehmendem Winkel von der Normalen im Pegel ab (Ureda, 2004; Weinzierl, 2008).

#### 2.4.2.4 Richtverhalten des realen Arrays

Im nächsten Schritt soll nun betrachtet werden, wie sich das Richtverhalten eines tatsächlichen aus Einzellautsprechern aufgebauten Arrays von dem der gedachten

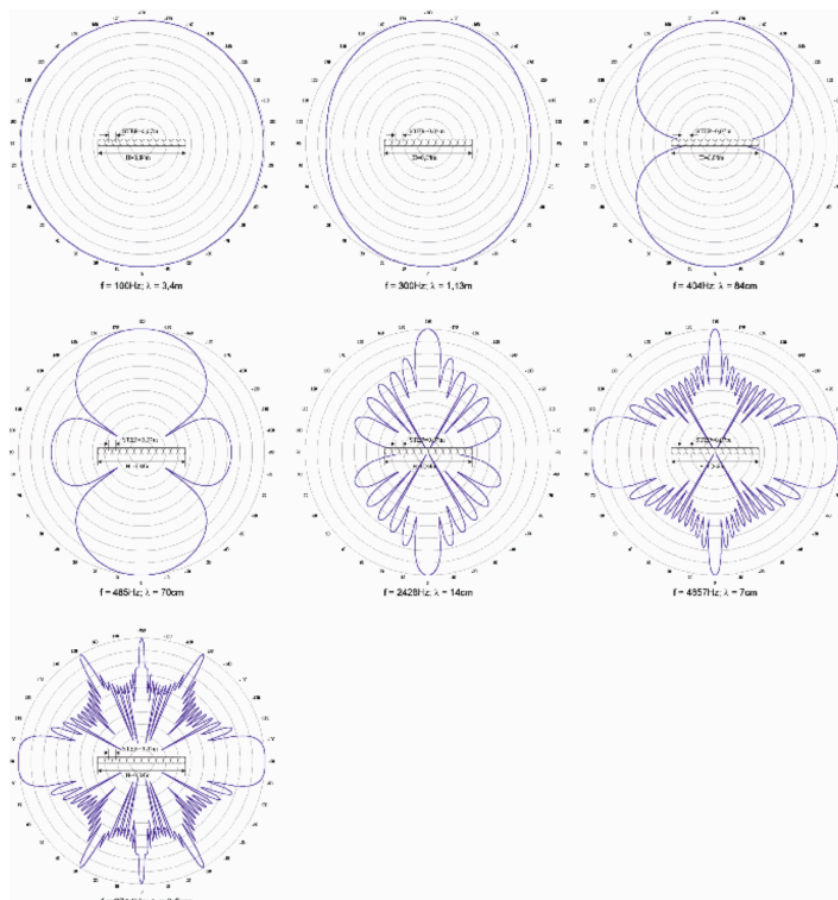


Abbildung 12: Polardiagramm einer aus diskreten Kugelschallquellen aufgebauten Strahlerzeile für verschiedene Frequenzen. Abstand der einzelnen Treiber: 7cm.

Mack, Jona

Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion

Eindimensionalen Kolbenmembran unterscheidet. Dies wird zunächst in Abbildung 12 (Weinzierl, 2008) verdeutlicht.

Die Richtwirkung gleicht für tiefe Frequenzen der der idealisierten Zeile. Ab der Frequenz, bei der die Wellenlänge dem Abstand der Treiber zueinander entspricht, treten allerdings weitere Nebenmaxima abseits der Normalen auf. Diese nehmen mit steigender Frequenz in der Anzahl zu und bewegen sich zur Normalen hin.(Weinzierl, 2008). Es existiert für reale Arrays also eine obere Grenzfrequenz, oberhalb derer die Richtcharakteristik nicht mehr dem gewünschten Verhalten entspricht. Auf diese Grenzfrequenz und die damit in Verbindung stehenden Effekte soll im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden.

#### *2.4.2.4.1 Obere Grenzfrequenz und Nebenmaxima*

Wie bereits festgestellt, existiert eine obere Grenzfrequenz für reale Arrays, oberhalb derer neue seitliche Hauptmaxima entstehen. Diese ist abhängig vom Abstand der einzelnen Lautsprecher zueinander.

Ein solches seitliches Maximum tritt immer dann auf, wenn die Einzelabstände aller Treiber zum Abhörpunkt ein gemeinsames Vielfaches der abgestrahlten Wellenlänge besitzen. Folglich kommt es an der betroffenen Stelle zu konstruktiver Interferenz zwischen allen Lautsprechern(van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.). Diese Bedingung kann logischerweise nur erfüllt werden, wenn der Abstand zwischen den Lautsprechern größer als die Wellenlänge ist.

Mathematisch kann das Auftreten von seitlichen Hauptkeulen über das Shannon-Theorem erklärt werden. Die Unterteilung der Schallzeile in diskrete Lautsprecher lässt sich als räumliches Sampling darstellen. Folglich führt die Verletzung des Theorems zu räumlichem Aliasing, in Form von Wiederholungen der Hauptkeule. Die Bedingung für die Nichtauftreten von räumlichem Aliasing ist hiernach (van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.):

$$d < \frac{1}{2} \lambda_{min}$$

Mit  $d$  als Abstand der einzelnen Lautsprecher zueinander (Membranmitte zu Membranmitte).

Als Einflussfaktor für den Pegel der Nebenkeulen gegenüber der Hauptkeule kann der sogenannte Active Radiating Factor (ARF) herangezogen werden. Er berechnet sich als  $\frac{h_{einzelquelle}}{d}$ , gibt also das Verhältnis von strahlender zu nicht strahlender Fläche des Arrays an (Urban et al., 2001). Es kann gezeigt werden, dass mit steigendem ARF eine Dämpfung der durch räumliches Aliasing verursachten Nebenmaxima einhergeht. Folglich ist diese Größe von hoher Relevanz für die Konstruktion von Lautsprecherarrays. Der ARF ist nicht frequenzabhängig (Urban et al., 2001).

Zudem ist in der Praxis nicht zu vernachlässigen, dass die verwendeten Lautsprecher keine Idealen Punktschallquellen darstellen, sondern selbst gerichtet abstrahlen. Die individuelle Richtcharakteristik jedes Strahlers überlagert sich mit der des Arrays und führt ebenfalls zu einer Dämpfung von seitlichen Maxima (Weinzierl, 2008).

#### 2.4.3 Limitierungen des Realen Arrays und Lösungsansätze

Es wurde gezeigt, dass die Konstruktion einer Strahlerzeile mit definiertem Abstrahlverhalten möglich ist, und über einen Verbund von Einzellautsprechern grundsätzlich realisiert werden kann. Für den realen Einsatz zeigen sich folgende Problemstellungen:

- Wird die Bedingung  $d < \frac{1}{2} \lambda_{min}$  zur Einhaltung der oberen Grenzfrequenz an reale Arrays angesetzt, so ergeben sich für Frequenzen im oberen hörbaren Spektrum sehr kleine Lautsprecherdistanzen, die mechanisch nicht oder nur umständlich zu realisieren sind (*Line Arrays: Theory, Fact and Myth*, o. J.).

- Selbst bei Einhaltung der oben genannten Bedingungen treten immer noch Nebenkeulen wie unter 2.4.2.3 erläutert auf. Diese können sich im Beschallungsfall negativ auswirken(Möser, 2015).
- Für die meisten Beschallungseinsätze ist eine gleichmäßige Richtwirkung über einen möglichst großen Frequenzbereich wünschenswert. Die Richtwirkung eines Arrays nimmt aber grundsätzlich zu höheren Frequenzen immer weiter zu(Weinzierl, 2008). Zusätzlich ist die Richtwirkung auch abhängig von der Arraylänge. Wird also ein sehr langes Array zur gerichteten Abstrahlung von tiefen Frequenzen konstruiert, so wird die entsprechend höhere Richtwirkung im hohen Frequenzbereich kaum noch nutzbar sein(Ureda, 2004).

Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Umgehung dieser Probleme aufgezeigt.

#### 2.4.3.1 *Beam Width und Frequenzunabhängiges Abstrahlverhalten*

Die Abstrahlbreite der Hauptkeule (Winkel bis zum seitlichen Pegelabfall von 6db) wird für Arrays auch als Beam Width bezeichnet.

Beam Width angenähert für stark richtende Hauptkeulen (van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.):

$$BW \approx 1,2 \frac{\lambda}{L}$$

Hier ist, wie bereits im vorigen Abschnitt aufgeführt, die Abhängigkeit der Bündelung von Frequenz bzw. Wellenlänge und Arraylänge zu erkennen.

##### 2.4.3.1.1 *Beeinflussung des Beams mittels Arraybreite*

Gleichzeitig erlaubt dies auch die Schlussfolgerung, dass die Beam Width durch Variation der Arraylänge beeinflusst werden kann. Geschieht dies Frequenzabhängig, so kann eine Frequenzunabhängige Bündelung erzielt werden.

Dazu muss ein invers Proportionaler Zusammenhang zwischen Arraylänge und Frequenz geschaffen werden(van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.).

Bei frühen Arrays wurde dieser Zusammengang teils durch die Akustische Filterung oder mit Hilfe von Integrierten Sub-Arrays hergestellt. Eine andere Möglichkeit ist die Anordnung der Lautsprecher mit logarithmisch steigenden Abständen. Auch die Nutzung von Digitalen Filtern ist hierfür möglich. Dafür muss allerdings auf durch die Filterung hervorgerufene Latenz geachtet werden. Zudem müssen die verwendeten Filter im Bereich der Grenzfrequenz konstante Gruppenlaufzeiten aufweisen(van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.).

#### 2.4.3.1.2 Gebogene (Curved) Arrays

Eine weitere Möglichkeit, um die Abstrahlbreite eines Arrays zu beeinflussen besteht darin, es zu krümmen. Dazu wird beispielhaft in Abbildung 13 (Ureda, 2004) eine Schallzeile mit konstanter Krümmung betrachtet.

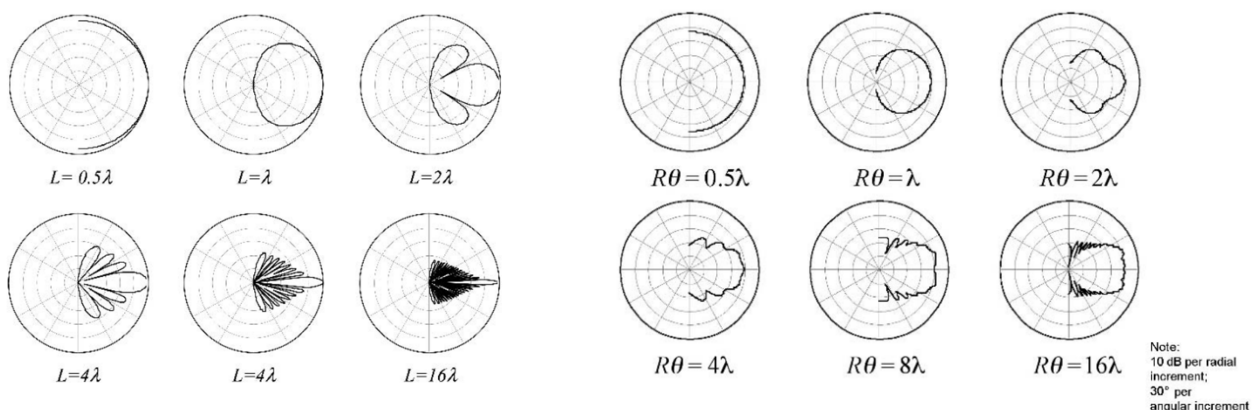


Abbildung 13: Abstrahlung einer geraden (Links) und konstant gekrümmten (rechts) Strahlerzeile.

Ein gebogenes Array weist für den gesamten Frequenzbereich eine breitere Abstrahlung als ein gerades Array derselben Länge auf. Der Abstrahlwinkel nähert sich dabei für hohe Frequenzen dem Winkel des vom Array beschriebenen Kreisausschnitts an.

Es gilt zudem, dass durch Krümmung höhere Frequenzen stärker in der Abstrahlung beeinflusst werden als tiefere, denn mit sinkender Frequenz wird die

Dimension der Krümmung vernachlässigbar gegenüber der Wellenlänge(*Line Arrays: Theory, Fact and Myth*, o. J.). Somit führt Krümmung des Arrays auch zu einer Kompensation der im Verhältnis stärkeren Bündelung für hohe Frequenzen(O. Mack, persönliche Kommunikation, 28. August 2024).

#### 2.4.3.2 Dämpfung von Seitlichen Nebenkeulen

Das Auftreten von Nebenkeulen lässt sich erklären durch die endliche Länge der Zeile und den damit verbundenen abrupten Schallschnelleabriss an den Enden. Durch Fourier-Transformation der Abstrahlfunktion  $G(u) = \frac{\sin(\pi \cdot u)}{\pi \cdot u}$  lässt sich eine Strahlerzeile als räumliche Rechtecksfunktion interpretieren. Die Nebenkeulen stellen entsprechend die in der Rechtecksfunktion enthaltenen hohen Frequenzanteile dar (Möser, 2015).

Will man die Nebenkeulen abdämpfen, muss man also die Rechtecksfunktion in einen Verlauf mit weniger ausgeprägtem hohen Frequenzanteilen umwandeln, ergo den abrupten Abriss des Arrays in einen weichen Übergang umwandeln(Möser, 2015). Dafür wird der Gain der einzelnen Lautsprecher nach außen hin schrittweise reduziert(O. Mack, persönliche Kommunikation, 28. August 2024).

Es sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass eine Unterdrückung der Nebenkeulen mit diesem Verfahren immer auch eine Verbreiterung der Hauptkeule zur Folge hat(Möser, 2015).

#### 2.4.3.3 Dämpfung von Seitlichen Hauptkeulen, Waveguide-Hörner

In Bezug auf seitliche Hauptkeulen wurden bisher folgende Feststellungen gemacht:

- Es ist mechanisch nicht Praktikabel, Arrays zu bauen, die bis ins obere hörbare Frequenzspektrum dem Shannon-Theorem genügen.



- Es existiert ein Zusammenhang mit dem Active Radiating Factor ARF und dem Pegel von auftretenden seitlichen Hauptkeulen. Ein hoher ARF führt dabei zur deren Dämpfung.

Weiter lässt sich zeigen, dass die nach der Spaltfunktion auftretenden Nebenkeulen einen Pegel von -13,5db gegenüber der Hauptkeule nicht überschreiten. Dieselbe Bedingung kann nun an die durch Aliasing auftretenden seitlichen Hauptkeulen gestellt werden(Urban et al., 2001).

Für eine Dämpfung der seitlichen Hauptkeulen von -13,5db wird ein ARF von mindestens 82% benötigt. Anders ausgedrückt: Die Summe der Strahlerfläche muss mindestens 82% der (nach vorn gerichteten) Gesamtfläche des Arrays betragen. Wird diese Bedingung erfüllt, kann das Shannon-Theorem verletzt werden, ohne dass Aliasing-Keulen den Pegel der ohnehin auftretenden Nebenkeulen überschreiten.

Wird ein Array mit Kreisförmigen Kolbenmembranen angenommen, kann diese Bedingung nicht erfüllt werden. Durch ihre Geometrie erreichen Kreisförmige Strahler einen maximalen ARF von etwa 75%. Ein Lösungsansatz besteht also darin, für hohe Frequenzen rechteckige Hornstrahler zu verwenden, um den ARF zu erhöhen. Hörner allerdings strahlen keine Ebenphasige welle ab, sondern, wie in X.X.X.X gezeigt, ein Kugelsegment. Dies bringt wiederum ein eigenes Problem mit sich: Erreicht die Bogentiefe der Wellenfronten die Größenordnung der abgestrahlten Wellenlänge, ergibt sich ein chaotisches Richtverhalten insbesondere für das Nahfeld(Urban et al., 2001).

Daher werden in Arrays sogenannte Waveguide-Hörner verwendet. Diese sind so konstruiert, dass alle akustischen Pfade innerhalb des Horns gleich lang sind, wodurch eine ebene Wellenfront am Hornausgang entsteht. Mit solchen Waveguide-Hörnern kann für den Hochtton-Bereich ein ARF von >80% erreicht werden (Urban et al., 2001). Somit kann auch der Pegel von seitlichen Hauptkeulen oberhalb der Grenzfrequenz auf ein akzeptables Maß gesenkt werden.

#### 2.4.4 Digitales Beamsteering

Es ist möglich, mithilfe von digitaler Signalverarbeitung (DSP) das Richtverhalten eines Arrays zu beeinflussen. Das betrifft neben weiteren Parametern vor allem den Abstrahlwinkel und die Abstrahlrichtung (Weinzierl, 2008). Dieses Verfahren wird als „Beam Steering“ (Fohhn Audio AG, 2021) bezeichnet.

##### 2.4.4.1 Beeinflussung der Abstrahlrichtung

Die digitale Beeinflussung der Hauptabstrahlrichtung wird mittels konstanten Verzögerungszeiten zwischen den einzelnen Lautsprechern realisiert. Dabei gilt für den n-ten Lautsprecher einer Zeile eine Verzögerung von

$$t_n = (n - 1) * \tau$$

Mit

$$\tau = \frac{\sin\theta * d}{c}$$

Wobei  $\theta$  die Neigung gegenüber der Normalen beschreibt. Jedes Element wird also um ein  $\tau$  mehr als das vorhergehende verzögert, wobei  $\tau$  vom gewünschten Winkel und dem Abstand der Elemente voneinander abhängt (van Beuningen, G.W.J. & Start, E.W., o. J.). Visualisiert lässt sich dies als einfache Kippung des Arrays beschreiben.

##### 2.4.4.2 Beeinflussung der Abstrahlbreite

Wie zuvor aufgeführt, kann der Abstrahlwinkel eines Arrays durch Krümmung beeinflusst werden. Dies wird bei vielen Line Arrays, die aus Einzelementen zusammengesetzt werden, mechanisch gelöst. Es ist aber auch möglich, bei einer geraden Lautsprecherzeile mittels DSP ein virtuelles „Curving“ durchzuführen und auf die Weise den Öffnungswinkel beeinflussen (O. Mack, persönliche Kommunikation, 28. August 2024).

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

### 3 Anwendungsfall RENT

Kernstück dieser Arbeit ist die Praktische Durchführung einer Beschallung unter Einsatz eines Beamsteering-Systems der Firma Fohhn Audio AG, welches für diesen Zweck freundlicherweise vom Hersteller selbst zur Verfügung gestellt wurde. Die Beschallung wurde durchgeführt für die Produktion des Musicals „Rent“, aufgeführt vom Verein „Musical Academy Tübingen (MAT)“.

Bei dem Stück handelt es sich um ein Musical von 1996, welches stilistisch im Bereich Rock, Blues und Pop zu verorten ist. In der Produktion der MAT waren insgesamt 25 Schauspielende beteiligt, davon 8 in Hauptrollen, welche auf der Bühne sowohl Gesang als auch Sprache darboten. Die begleitende Band bestand aus 7 Musiker:innen, in der Besetzung: Schlagzeug, E-Bass, 2 mal E-Gitarre und 2 mal Keyboard.

Die Produktion spielte 6 Aufführungen in einem Zeitraum von 2 Wochen, denen insgesamt 6 Technische Aufbau- und Probetage vorangingen.

#### 3.1 Venue

Veranstaltungsort war die Kulturhalle der Stadt Dusslingen. Es handelt sich hierbei um eine Stadthalle, die nicht für Theater-oder Musikdarbietungen optimiert ist und entsprechende akustische Hürden mit sich bringt. Der Saal ohne Bühne hat eine Tiefe von 19,33 m bei einer Breite von 17,75m, Die Bühne ist als Trapezförmiger Grundriss in die vordere Wand der Halle eingelassen (siehe Abbildung 15 (*Unsere Kulturhalle | Kulturhalle Dußlingen, o. J.*)). Das Bühnenbild beinhaltet zudem einen 1m, stellenweise 2m Tiefen Vorbau in den Publikumsbereich hinein.

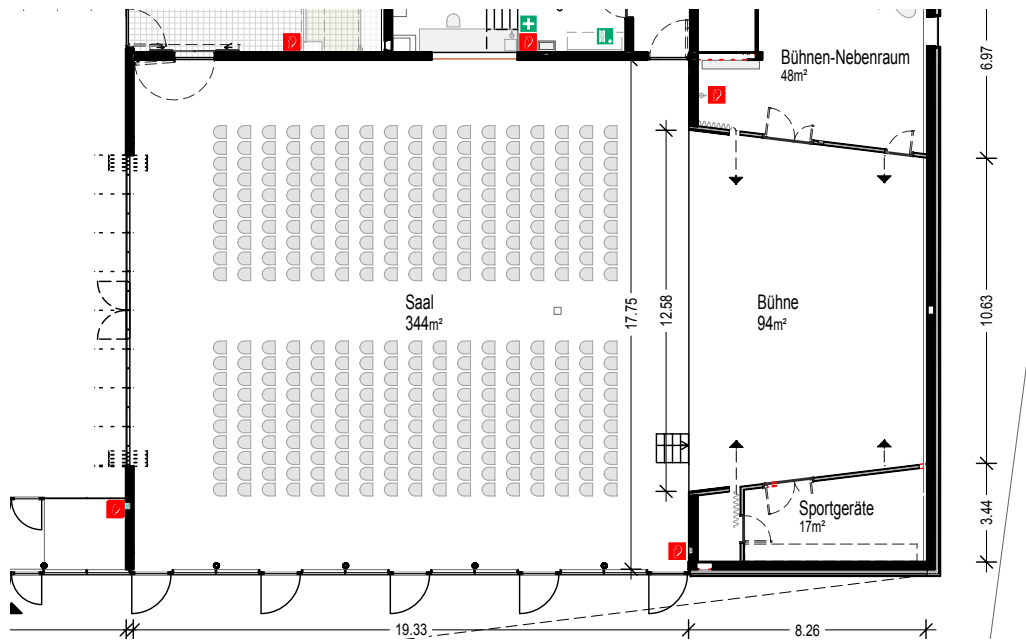


Abbildung 15: Grundriss des Saals der Kulturhalle Dusslingen



Abbildung 14: Bühne und Bühnenbild (eigene Fotografie)

Die zu Beschallende Publikumsfläche beginnt ca. 1m vor dem Bühnenvorbau und reicht bis ca. 2m vor der Rückwand, in der Mitte sowie zu beiden Seiten befinden sich außerdem jeweils 1,5m breite Gänge.

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

### 3.1.1 Raumakustische Gegebenheiten

Im Folgenden werden die Oberflächen der Veranstaltungshalle auf ihre Schallabsorbierende und -reflektierende Qualität untersucht, um daraus eine Erwartung für das Schallfeld in der Halle abzuleiten.

Frequenz	125 Hz	500 Hz	1Khz	4Khz
Beton	0,02	0,03	0,04	0,05
Versiegelter Parkett	0,02	0,03	0,04	0,05
Glas	0,1	0,1	0,05	0,02
Vorhang vor Wand	0,15	0,74	0,9	0,85
Publikum, sitzend	0,5	0,85	0,95	0,90

Tabelle 1: Absorptionsgrad von Materialien ähnlich denen in der Kulturhalle Dusslingen.

Zur besseren Abschätzung wird hier der Absorptionsgrad  $\alpha$  der in der Halle vorkommenden Materialien aufgeführt (Kuttruff, 2004; *raumakustische Grundlagen - Akustikkunst*, o. J.).

#### 3.1.1.1 Beschaffenheit der Oberflächen

Die Halle besitzt an allen Seiten vorwiegend Schallharte Flächen. Die vom FoH aus gesehen linke Seitenwand besteht aus glattem Beton und hat ein eingelassenes Glasfenster von etwa 2-3 Quadratmetern Fläche. Der Absorptionsgrad dieser Wand ist vernachlässigbar. In die Rechte Seitenwand ist eine ca. 3m hohe

Glasfront auf ganzer Länge eingebaut. Diese wird allerdings mit Vorhängen verhängen, die in ca. 20-30 cm Abstand zur Wand hängen. Oberhalb der Glasfront besteht auch die rechte Wand aus glattem Beton und ist entsprechend Schallhart.

Die Rückwand der Halle besteht ebenfalls aus zwei Flächen, einem Rahmen aus Beton und darin eingelassen eine Holzwand. Für diese Holzwand wurde als Referenz in Tabelle 1 versiegeltes Parkett aufgeführt, der Tatsächliche Absorptionsgrad dürfte aufgrund der rauen Beschaffenheit der Wand etwas höher liegen. Dennoch kann die Rückwand als Schallhart angenommen werden.

Oberhalb der Rückwand befindet sich eine Fensterfront auf ganzer Breite. Diese wird von Sonnenblenden verdeckt, welche sich mit wenigen cm Abstand vor den Fenstern befinden. Die Sonnenblenden bestehen aus hartem, dünnem Stoff oder Folie (konnte nicht überprüft werden) und werden entsprechend als wenig absorbierend angenommen. Grundsätzlich lässt sich von dieser Fläche also höchstens eine (geringfügige) Absorption im Hochfrequenten Bereich erwarten.



Abbildung 16: Linke Seitenwand der Kulturhalle Dusslingen (eigene Fotografie)

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*





Abbildung 17: Rechte Seitenwand (eigene Fotografie)



Abbildung 18: Rückwand (eigene Fotografie)

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

Die Decke der Halle besteht aus Holz und wird als Schallhart angenommen. Sie ist in mehrere Lamellen unterteilt, die jeweils von der Bühne weg nach hinten ansteigen.

Der Boden der Halle ist zum größten Teil mit Publikum besetzt. Hier liegt eine sehr gute Absorption im gesamten Spektrum vor.

#### 3.1.1.2 Nachhallzeit

Nimmt man den Absorptionsgrad der Schallharten Flächen jeweils zu null an, und vernachlässigt die freien Bodenbereiche sowie die Bühne, ergibt sich für den Raum eine Äquivalente Absorptionsfläche von etwa  $358\text{m}^2$ . Das Raumvolumen beträgt bei einer angenommenen Deckenhöhe von 5m im Saal und 3m in der Bühne etwa  $2002\text{m}^3$ . Damit besteht nach  $T = 0,163 \frac{V}{A}$  eine Nachhallzeit von  $0,91\text{s} \approx 1\text{s}$  angenommen werden. Dieser Wert stimmt mit tatsächlich in der Halle gemessenen Werten in etwa überein.

Für Nachhallzeiten  $<1,6\text{s}$  kann ein Klarheitsmaß  $C_{80}$  und ein Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  von jeweils  $>0\text{db}$  erwartet werden. (Ahnert & Reichardt, 1981) Der Raum eignet sich also grundsätzlich zur klaren Wiedergabe einer Sprachlichen und Musikalischen Darbietung.

#### 3.1.1.3 Erstreflexionen

Allerdings stellen Decke, Rückwand und Linke Seitenwand Quellen für potenziell sehr starke Erstreflexionen dar. Diese können wie unter 2.1.3 erläutert zum Auftreten von ungewollten Kammfiltereffekten führen. Zudem können sie die Early Decay Time erhöhen und somit den Räumlichkeitseindruck für das Publikum in negativer Weise beeinflussen.



### 3.2 Tontechnische Zielsetzung und Problemstellungen

Die Zielsetzung der Beschallung formuliert sich wie folgt:

1. Da es sich bei RENT in erster Linie um eine Theaterproduktion handelt, soll für alle Zuhörenden in erster Linie gute Sprachverständlichkeit gewährleistet werden.
2. Zudem soll die Band in hoher Klangqualität und voller Bandbreite wiedergegeben werden. Mit Rücksicht auf das Genre sollen dabei auch höhere Pegel bis ca. 95db (A) erreichbar sein.
3. Für den gesamten Zuschauerbereich sollen der Schalldruckpegel und die Klangqualität im Allgemeinen gleich sein.
4. Weiter muss die Sprachwiedergabe nach Punkt 1 jederzeit im Pegel über die Musik angehoben werden können. Dazu ist ein System mit entsprechenden Pegelreserven sowie ausreichende Feedbacksicherheit erforderlich.
5. Die Tontechnik soll optisch nicht in störendem Maß in Erscheinung treten.

(Punkte 5 und 6 sind zwar vor Ort von hoher Relevanz, werden aber in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.)

Daraus sowie aus den Rahmenbedingungen des Veranstaltungsortes ergeben sich weitere Bedingungen:

1. Insbesondere die Schallharte Wand Links und die Rückwand stellen Quellen für potenziell starke Erstreflexionen dar und tragen außerdem zur Ausbildung eines breitbandigen Diffusfelds bei. Beides wirkt sich nachteilig auf Sprachverständlichkeit und Klangqualität aus. Folglich sollte vermieden werden, dass die genannten Flächen mit Direktschall bestrahlt werden.
2. Da aus Budgetären Gründen und mangels Montagemöglichkeiten der Einsatz von Delay-Lines oder anderen Formen von dezentraler Beschallung

nicht möglich ist, muss ein zentrales (Stereo-) System eingesetzt werden.

Dieses muss in der Lage sein:

- Die gesamte Hörfläche besonders im hinteren Teil der Halle gleichmäßig zu beschallen.
- Die in 1. genannten Flächen nicht zu beschallen.
- Zusätzlich auch die Band, welche sich vor der Bühne befindet, nicht zu beschallen.

Das System muss also in seiner Abstrahlcharakteristik möglichst breitbandig präzise ausrichtbar sein.

### 3.3 Das verwendete System „Focus Modular“

Ein System, welches die zuvor genannten Bedingungen erfüllt, wurde dem Autor freundlicherweise von der Firma Fohhn Audio bereitgestellt. Es handelt sich um das Modell „Focus Modular“, eine gerades Line Array mit DSP-gesteuertem Beamsteering und Beamforming. Das System besteht aus getrenntem Hochton (DFM-100, DFM-110) und Mitteltonmodulen (DFM-400). Diese können zu Arrays verschiedener Länge zusammengesetzt werden. Dabei werden Hochton und Mitteltonmodule als getrennte Systeme mit individuellen Beams behandelt. Mehrere Module gleichen Typs werden zu einem einzelnen Array mit gemeinsamer Richtkeule kombiniert (Fohhn Audio AG, 2021).

Im Folgenden werden die technischen Daten und die Funktionsweise des Systems erläutert.

Das System bietet 2 Arten von Hochtonmodulen an, DFM-100 und DFM-110. Diese sind mit Kompressionstreibern bestückt und unterscheiden sich in erster Linie in der Treiberanzahl und damit Arraylänge. Diese beträgt beim Modell DFM-100 8 Treiber bzw. 0,7m , beim Modell DFM-110 jeweils genau das doppelte (Fohhn: DFM-110, o. J.). Beide Modelle sind mit Waveguide-Hörnern ausgestattet, was wie in 2.4.3.3 besprochen eine Dämpfung von Nebenkeulen bei Frequenzen oberhalb

der oberen Array-Grenzfrequenz bewirkt. Bei beiden Modellen werden alle Treiber mit einem eigenen Verstärkerkanal betrieben (Fohhn: DFM-100, o. J.; Fohhn: DFM-110, o. J.), eine Grundvoraussetzung für digitales Beamsteering. Die beiden Module unterscheiden sich laut Hersteller in erster Linie im maximalen Schalldruckpegel, der für die DFM-110 mit 6db höher gegenüber der DFM-100 angegeben wird (Fohhn: DFM-100, o. J.; Fohhn: DFM-110, o. J.).

Das Mitteltonmodul ist mit 32 4“-Kalottenchassis bestückt, die jeweils paarweise über 16 Verstärkerkanäle betrieben werden. Jedes Modul hat eine Array-Länge von 1,64m (Fohhn: DFM-400, o. J.).

Für Rent wurde eine Systemkonfiguration bestehend aus je 2 Mitteltonmodulen DFM-400 und einem Hochtonmodul DFM-110 (pro Seite) gewählt. Ein Vorabtest in der Demonstrationshalle beim Hersteller hatte gezeigt, dass das Modul DFM-100 für die zu beschallende Raumgröße nach subjektiver Wahrnehmung nicht die nötigen Pegelreserven aufweist.

Dieses Hauptsystem wurde unterstützt von 2 Subwoofern mit 2\*18“ Lautsprecherbestückung vom Typ Fohhn PS-850 (Fohhn: PS-850, o. J.).

### 3.3.1 Vertikale Richtcharakteristik

Die vertikale Richtcharakteristik der Focus Modular entspricht grundlegend der eines geraden Arrays wie unter 2.4.2 beschrieben. Der Bündelungsgrad richtet sich entsprechend nach der Arraylänge und steigt mit der Anzahl der miteinander kombinierten Module. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Hochtonmodule und Mitteltonmodule akustisch nicht miteinander koppeln, sondern als separate Arrays mit jeweils eigenem Abstrahlverhalten betrachtet werden. Diese Konstruktionsweise bietet sich an, da für hohe Frequenzen kürzere Arraylängen ausreichen, um einen vergleichbaren Bündelungsgrad wie bei tiefen Frequenzen zu erzielen.

Das System arbeitet allerdings nicht mit einem festen Abstrahlverhalten, sondern implementiert wie unter 2.4.4 aufgeführt DSP-gesteuertes Beamsteering und Beamforming. Dabei stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung (Fohhn Audio AG, 2021):

- Einstellung des Abstrahlwinkels
- Neigung der Abstrahlrichtung
- Optionale Unterdrückung der Nebenkeulen (vgl. 2.4.3.2)
- Verschiebung des Akustischen Zentrums entlang des Arrays
- Die Möglichkeit, eine Zweite Hauptkeule zu generieren, die unabhängig von der ersten ausgerichtet werden kann.

Die Focus Modular arbeitet nicht, wie unter 2.4.3.1 beschrieben, mit einer variablen effektiven Arraylänge, um einen Frequenzunabhängigen Beam zu erzeugen. Eine stärkere Bündelung für höhere Frequenzen wird hier bewusst in Kauf genommen. Damit wird erreicht, dass über den gesamten Frequenzbereich der jeweils höchstmögliche Schalldruck erreicht werden kann. Zudem wird durch die Vermeidung des Einsatzes von FIR-Filtern eine geringere und konstante Systemlatenz erreicht (O. Mack, persönliche Kommunikation, 28. August 2024).

Diese Vernachlässigung ist möglich, da beim Öffnen des Beams, wie unter 2.4.3.1.2 beschrieben, hohe Frequenzen stärker beeinflusst werden. Dadurch kompensiert sich das Frequenzabhängige Bündelungsverhalten in gewissem Maß (O. Mack, persönliche Kommunikation, 28. August 2024). Abbildung 19 zeigt das vertikale Abstrahlverhalten der bei RENT verwendeten Systeme. Hier ist gut die Frequenzabhängigkeit des Öffnungswinkels zu erkennen, sowie die Kompensation dieser Abhängigkeit bei geöffnetem Beam. Für hohe Frequenzen ist ein deutlicherer Unterschied im Abstrahlwinkel zu erkennen als für tiefe.

### 3.3.2 Horizontale Richtcharakteristik

Alle Systeme werden mit einer horizontalen Richtcharakteristik von 90° angegeben (Fohhn: DFM-100, o. J.; Fohhn: DFM-110, o. J.; Fohhn: DFM-400, o. J.). Hier ist davon auszugehen, dass diese zumindest beim Modul DFM-400 frequenzabhängig ist, da dieses mit Kalottenlautsprechern ohne Hörner arbeitet. Aus der Treibergröße von 4" bzw. 10,16cm lässt sich nach 2.3.2 erwarten, dass Frequenzen unterhalb von bereits ca. 3,4KHz ( $\lambda \approx 10\text{cm}$ ) in sehr breitem Winkel abstrahlen. Dies betrifft den gesamten nutzbaren Frequenzbereich des Arrays.

### 3.4 Einrichtung des Systems am Veranstaltungsort

Die Position der PA war vor Ort durch mehrere Bedingungen vorgegeben:

- Möglichst nah an der Bühne, um einen möglichst großen Teil des Publikums effektiv beschallen zu können.
- Möglichst weit am äußeren Rand der Bühne, um keine Sichtverdeckung zu verursachen.
- Mind. 1,5m Fluchtwegbreite mussten zu den Seiten eingehalten werden.

Pro Stack wurde das Hochtonmodul ganz oben angebracht, mit den beiden Tieftonmodulen darunter (Siehe Abbildung 20). Dies lässt wie in 2.2.2.1 aufgeführt für den Hochtonbereich eine gleichmäßigere Pegelverteilung über das Publikum hinweg zu.

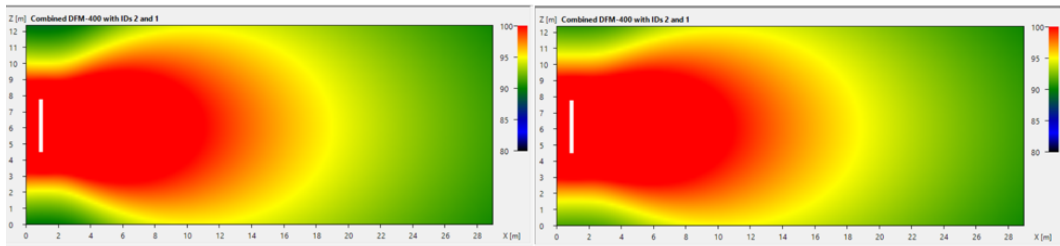
#### 3.4.1 Beamsteering-Konfiguration

Geeignete Einstellungen für das DSP-gesteuerte Beamsteering wurden vor Ort hauptsächlich durch subjektives Einhören bestimmt. Als Referenzsignal wurde Pinkes Rauschen verwendet. Zunächst wurde für beide Systeme eine Einstellung gesucht, die über den ganzen Hörbereich einen gleichmäßigen Pegel hervorruft, anschließend wurden hoch- und Mitteltonmodule im Pegel aneinander

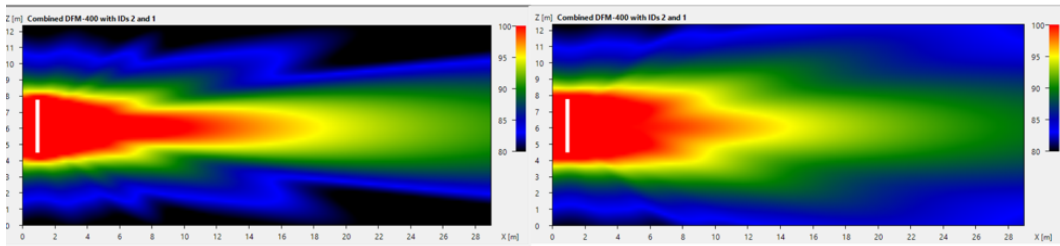
angepasst und sichergestellt, dass deren Pegelverhältnis über den gesamten Hörbereich konstant bleibt. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Bestrahlung der Rückwand bzw. des Bereichs hinter der letzten Reihe im Pegel deutlich abfällt. Außerdem wurden die Systeme jeweils leicht zur Raummitte gedreht. Damit sollte sowohl einer Bestrahlung der Seitenwände entgegengewirkt als auch verhindert werden, dass im Beschallungsbereich eine Lücke in der Mitte entsteht.

## DFM-400

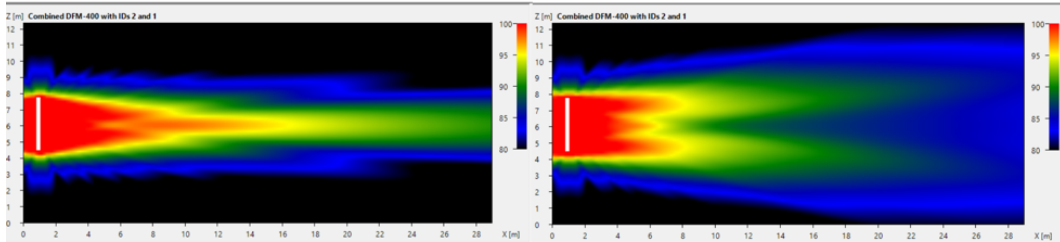
100 Hz



500 Hz

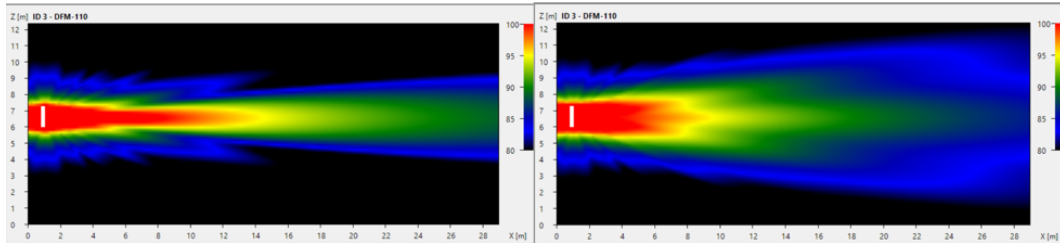


1 KHz



## DFM-110

2 KHz



4 KHz

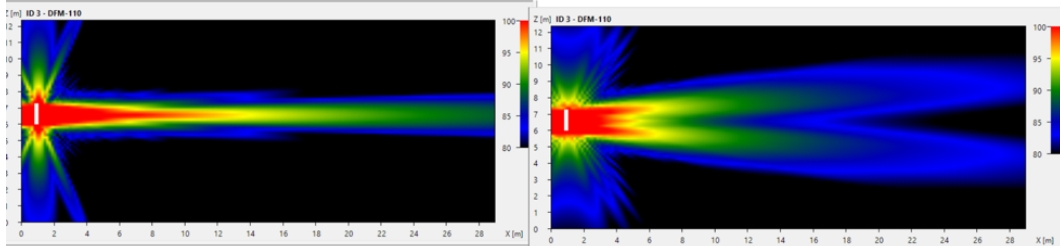


Abbildung 19: Simulierte vertikale Abstrahlung der Focus Modular. Links ohne DSP, rechts mit 30° digital geöffnetem Beam. Berechnet für einen Verbund von 2 DFM-400 Modulen, sowie ein einzelnes DFM-110-Modul. (Screenshots aus der Software „Fohhn Audio Soft“)

Mack, Jona

Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die gewählten Einstellungen der verschiedenen Module sowie das Abstrahlverhalten für verschiedene Frequenzen und deren Pegelverlauf über die Publikumsfläche hinweg. Die Publikumsfläche ist als weiße Linie angezeichnet. Erkennbar ist, dass sich der Pegelverlauf für alle Frequenzen bis etwa 2KHz stark ähnelt, außer in den vordersten 2m der Publikumsfläche. Hier fällt die DFM-110 gegenüber der DFM-400 deutlich erkennbar ab. Als mögliche Ursache hierfür kann angenommen werden, dass sich die enge Richtcharakteristik der Waveforming-Hörner wie unter 2.4.2.4 aufgeführt mit der des gesamten Arrays überlagert. Somit würde die Abstrahlung für steile Winkel entsprechend abgedämpft.

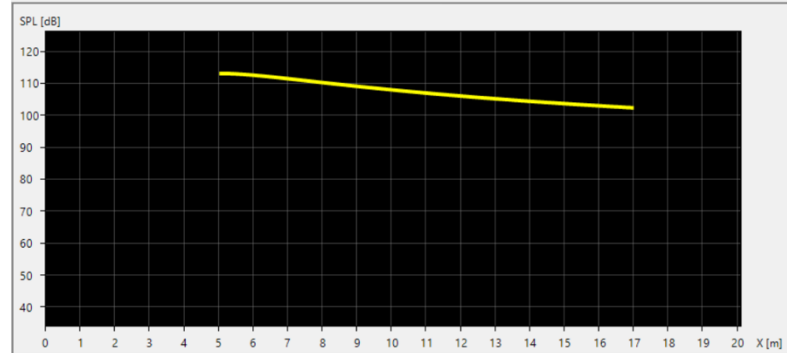
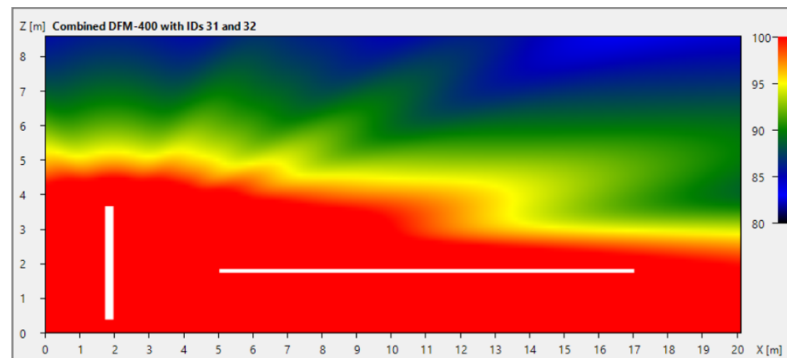
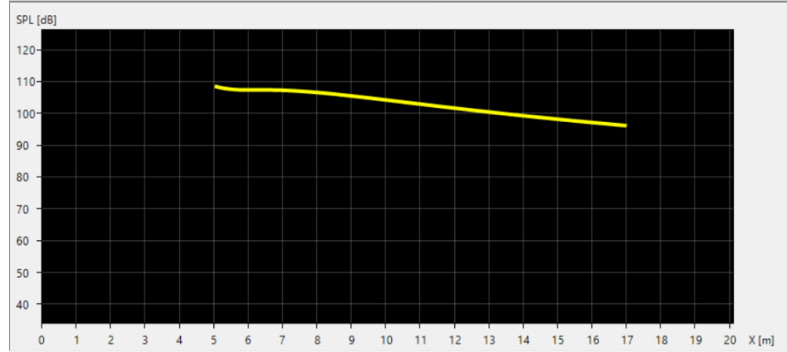
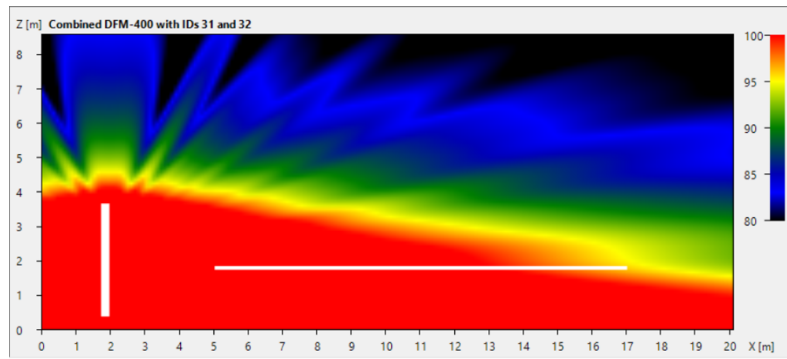


Abbildung 20: Focus Modular-System am Veranstaltungsort. Oben das Hochtönm modul DFM-110, unten 2 Module DFM-400 (eigene Fotografie).

Zudem treten ab Frequenzen von etwa 4 KHz (hier beispielhaft aufgeführt: 8KHz) deutliche Nebenkeulen auf. In Verbindung damit sinkt auch der Direktschallpegel im Publikumsbereich und der Pegelverlauf wird ungleichmäßiger. Nebenkeulen in dieser Ausprägung zeigen sich in der Simulation vor allem bei geneigten Beams. Eine mögliche Ursache kann in den verschiedenen Delayzeiten vermutet werden, die beim Öffnen und Neigen des Beams auf die einzelnen Treiber angewendet werden.

Die Optionale Nebenkeulenunterdrückung wurde nicht aktiviert, um den maximal verfügbaren Schalldruckpegel möglichst hoch zu halten.





Beam 1	
Angle [°]	-5.9
Beam	<input checked="" type="checkbox"/>
Beam [°]	0
Highpass	<input type="checkbox"/>
Highpass [Hz]	10
Side Lobes Optimize	<input type="checkbox"/>
Center [%]	0
Trim [dB]	-21.3

Abbildung 21: Simuliertes Abstrahlverhalten und Pegelverlauf der DFM-400 mit den für "Rent" gewählten Einstellungen. Oben; 500 Hz, unten: 1Khz (Screenshots aus der Software Fohhn Audio Soft).

Mack, Jona

Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion

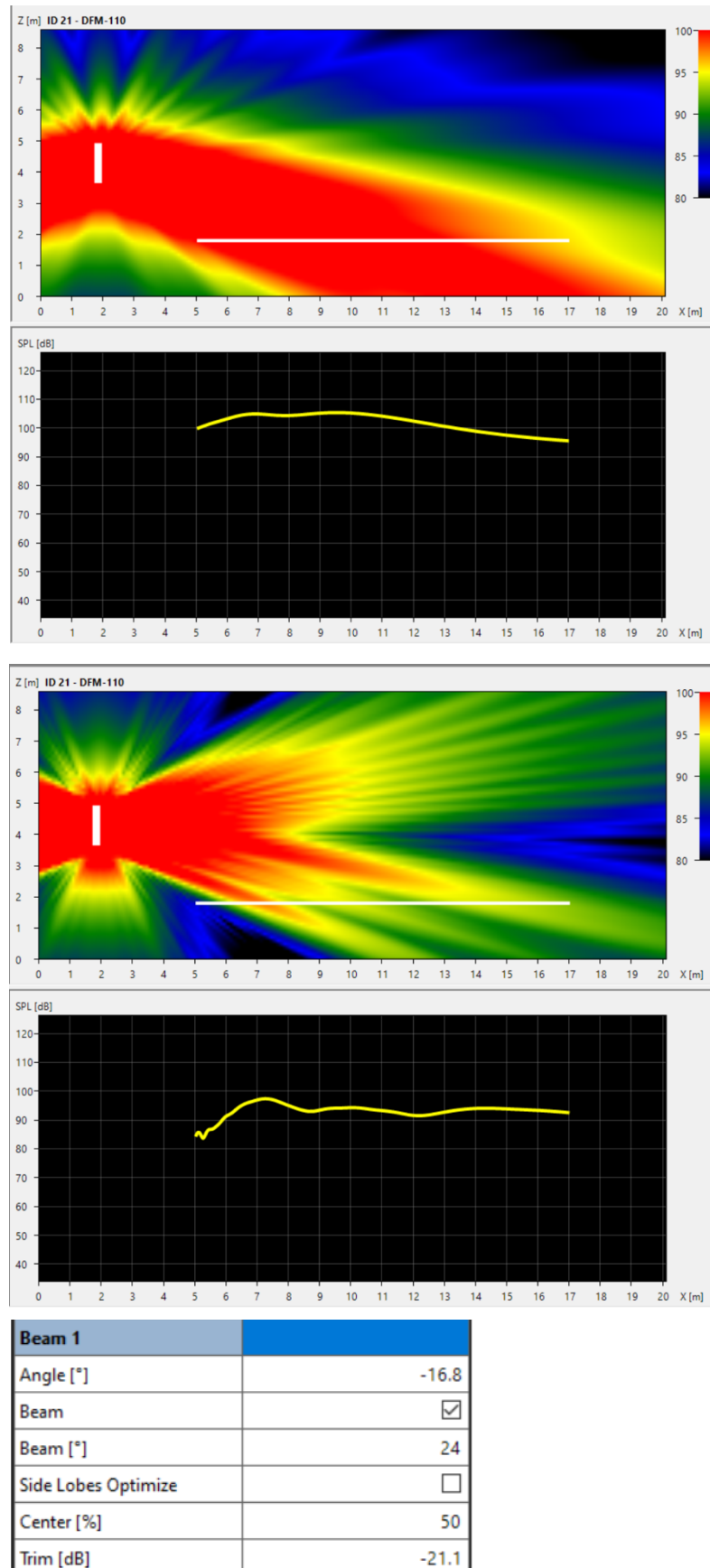


Abbildung 22: Simuliertes Abstrahlverhalten und Pegelverteilung der DFM-110 mit den für "Rent" gewählten Einstellungen. Oben: 2KHz, unten: 8KHz (Screenshots aus der Software Fohhn Audio Soft),

Mack, Jona

Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion

### 3.4.2 Frequenzgang – Messung und Korrektur

Zusätzlich wurde das System im gesamten mittels Messmikrofon an verschiedenen Messpunkten eingemessen. Dabei ließ sich bestätigen, dass das System über den Hörerbereich einen annähernd gleichen Frequenzgang mit Abweichungen von <3-4db aufweist. (Raumresonanzen und Moden ausgenommen).

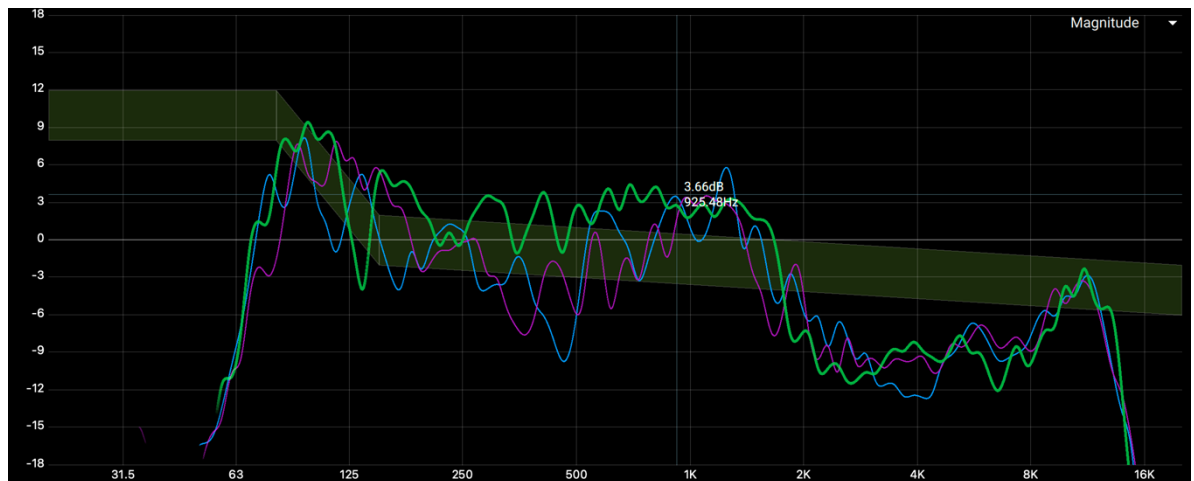


Abbildung 23: Frequenzgang des Linken Hauptsystems ohne Subwoofer nach manuellem Einhören. Grün: Mitte des Publikumsbereichs. Lila: FoH-Position bzw. vorletzte Reihe. Blau: vorletzte Reihe in Wandnähe. Grüner Balken: Ziel-Frequenzgang (Screenshot aus der Messsoftware OpenSoundMeter).

Grobe Abweichungen im Frequenzgang gegenüber der Zielvorgabe, wie der gut zu erkennende Einbruch zwischen 2KHz und 8KHz wurden mittels des Systeminternen Parametrischen EQs korrigiert.

In einem letzten Schritt wurde das System zudem mit Musik eingehört und dabei nach subjektivem empfinden Filterkorrekturen innerhalb des Mischpultes vorgenommen.

### 3.4.3 Subwoofer und Übergangsfrequenz

Um horizontale Interferenzkeulen zwischen den beiden Hauptsystemen zu vermeiden, wurde die Übergangsfrequenz zu den Subwoofern zunächst auf 110Hz gesetzt. Die Subwoofer selbst wurden in einer Dipolkonfiguration aufgestellt. Dabei wurde der Abstand zwischen den beiden Subwoofern so dimensioniert, dass

eine Möglichst gute Richtwirkung im Bereich bis 110Hz erzielt wird, ohne dass Interferenzkeulen entstehen.

Beim subjektiven Einhören wurde jedoch die Impulstreue im oberen Bassbereich (ca. 80-100Hz) als unzufriedenstellend empfunden. Daher wurde die Übergangsfrequenz auf 80Hz abgesenkt, und somit die volle Bandbreite der DFM ausgenutzt. Dies wurde im Hinblick auf die Impulstreue als besser empfunden, Interferenzkeulen ließen sich zudem nicht in störendem Maß wahrnehmen.

### 3.5 Bewertung und Messung des Ergebnisses

Zur klanglichen Bewertung des Ergebnisses wird in erster Linie die Subjektive Empfindung des Autors herangezogen. Außerdem wurde eine Vergleichsmessung mit verschiedenen Einstellungen des Systems durchgeführt.

#### 3.5.1 Vergleichstest und Messung der Early Decay Time

Um das Ergebnis in einen gewissen Kontext zu stellen, wurde ein Vergleichstest mit starr geradeaus gerichtetem Beam durchgeführt, um näherungsweise den Einsatz einer herkömmlichen Punktschallquelle nachzubilden. Dabei wurden Messungen zur Nachhallzeit durchgeführt, um Unterschiede bei der Anregung des Diffusfelds festzustellen.

Dieser Vergleichstest muss allerdings mit bestimmten Einschränkungen betrachtet werden:

- Die Referenzeinstellung würde in dieser Form für keine reale Beschallungssituation gewählt werden, da das Publikum sich nicht im direkten Abstrahlbereich des Systems befindet. Der Schalldruckpegel im Publikumsbereich fällt für die Referenzeinstellung entsprechend auch niedriger aus.

- Die Tieftonmodule wirken in der vertikalen auch für tiefe Frequenzen deutlich stärker richtend, als dies bei Punktschallquellen der Fall wäre.
- Dasselbe gilt auch für die Hochtonmodule in der vertikalen.

Der Test kann also nicht als echter Vergleich zu einer Punktschallquelle dienen, aber einen Eindruck vermitteln, was durch korrekte Ausrichtung der Schallzeile bewirkt werden kann.

### 3.5.2 Methodik und Auswertung der Messergebnisse

Es wurden an verschiedenen Punkten im Raum mittels Messmikrofonen Impulsantworten aufgezeichnet, jeweils mit der tatsächlich verwendeten Beam-Einstellung (nachfolgend: Einstellung A) und mit der „neutralen“ Vergleichseinstellung (Einstellung B).

Ausgewertet wurde die Early Decay Time (EDT), Sie gibt wie in 2.1.4 aufgeführt die Zeit bis zum Pegelabfall von 10db an und lässt gute Rückschlüsse auf die empfundene Intensität des Nachhalls zu.

Es lässt sich für die verwendete Einstellung eine Reduktion der EDT oberhalb 500Hz bzw. 1KHz um bis zu 900ms erkennen. Unterhalb von 500Hz stellt sich kein nennenswerter Effekt ein. Dies überrascht wenig. Wie sich aus Abbildung 19 erkennen lässt, werden Frequenzen um und unterhalb von 500Hz fast unabhängig von der Beamsteering-Einstellung recht breit abgestrahlt.

Dennoch lässt sich aus diesen Messdaten definitiv ein verringerter Raumeindruck erwarten.

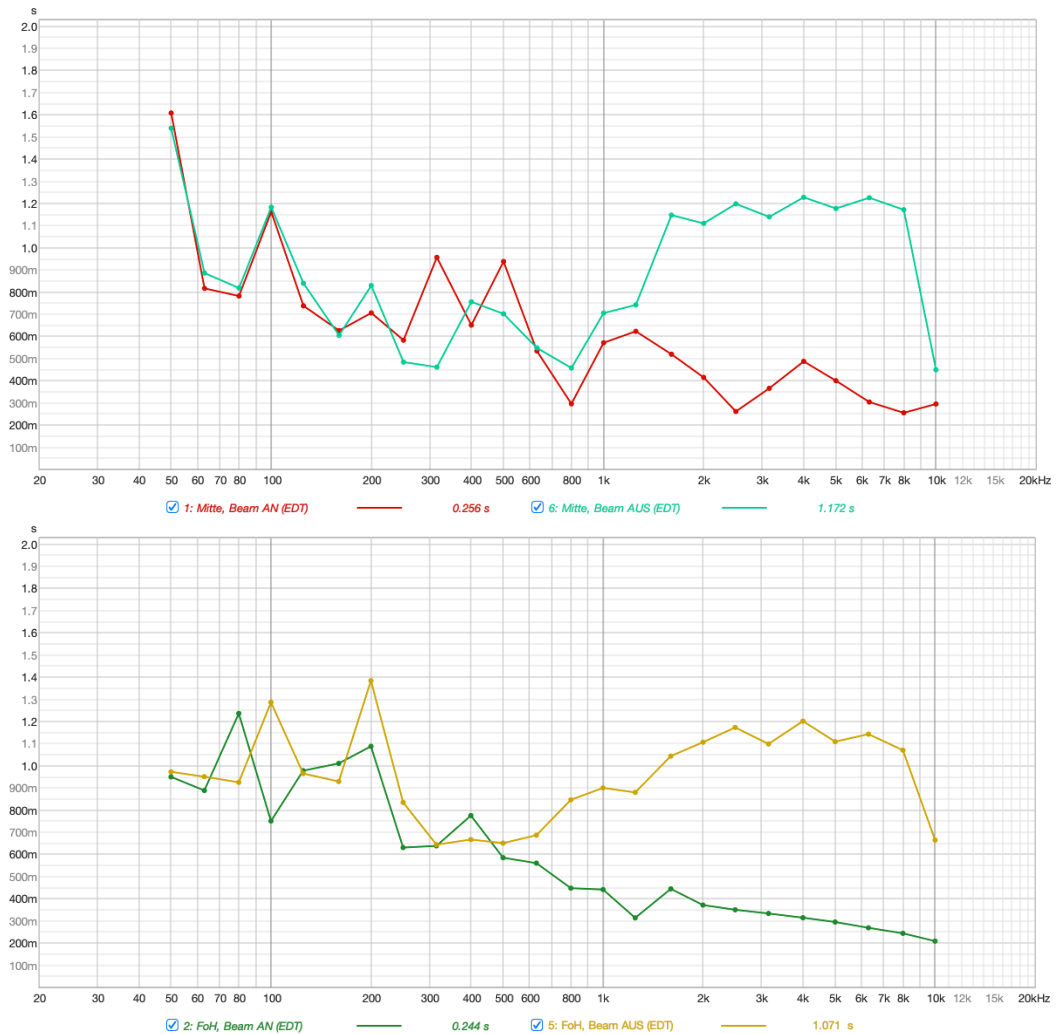


Abbildung 24: Frequenzabhängige EDT für die verwendete Beamsteering-Einstellung (Grün, Rot), und für die Referenzeinstellung (Gelb, Türkis) an den Messpunkten FoH (oben) und Mitte des Publikumsbereichs (unten) (Screenshots aus der Messsoftware Room Eq Wizard).

### 3.5.3 Subjektive Bewertung des Vergleichstests

Neben den Messungen wurden beide Einstellungen auch während eines Soundchecks aufgerufen, um einen Subjektiven Klangeindruck zu gewinnen. Folgende Punkte fielen dem Autor auf:

- Einstellung B verursacht einen wesentlich höheren Raumeindruck als Einstellung A. Dieser wurde als negativ und unpassend empfunden.
- A bewirkt im Gegensatz dazu ein wesentlich direkteres und detaillierteres Klangbild, das insbesondere in den Höhen als transparenter wahrgenommen wurde.

- Auch Transienten werden bei A als deutlich klarer und intensiver empfunden.
- A erhöht die Sprachverständlichkeit.
- A schafft einen besseren Richtungsbezug zur Bühne. B bewirkt einen im Vergleich diffuseren Ortungseindruck. Zudem erscheint die Bühne bei A akustisch näher.

Einstellung A wird vom Autor subjektiv als deutlich besser bewertet. Die aus der Messung erwarteten Effekte (Höhere Sprachverständlichkeit, Geringerer Raumeindruck) konnten bestätigt werden.

Unter Anhang 1 und 2 dieser Arbeit befinden sich Aufzeichnungen eines aufgeführten Musikstückes, mit jeweils Einstellung A und B. Daraus lassen sich die klanglichen Unterschiede gut erkennen.

### 3.6 Subjektiver Gesamtklangeindruck des Systems im Raum

Folgend der subjektive Klangeindruck des Autors. Dieser wird zur Einordnung des Ergebnisses aufgeführt, da im Verlauf der Produktion keine ausführlichen Messungen als der zuvor beschriebene Vergleich, oder andere Möglichkeiten der objektiven Bewertung durchgeführt werden konnten.

#### 3.6.1 Raumeindruck und Klarheit

Das System erzeugt einen trockenen und direkten Klangeindruck, der besonders für die Wiedergabe der Stimmen der Schauspielenden vorteilhaft wirkt. Die Sprachqualität und -verständlichkeit wird durch die akustischen Verhältnisse im Raum nicht merkbar negativ beeinflusst.

#### 3.6.2 Klangfarbliche Aspekte

Im sehr hohen Frequenzbereich oberhalb von ca. 4KHz tritt eine gewisse klangliche Unschärfe auf. Transienten bilden sich etwas weniger detailgenau ab

als wünschenswert wäre, S- und Zischlaute in der Sprache bilden sich ebenso leicht verwaschen ab. Ursächlich können hier die im hohen Frequenzbereich auftretenden Nebenkeulen und der gleichzeitige Pegelabfall im Direktschall gesehen werden.

Abgesehen davon ist die Klangfarbe des Systems nach Korrektur mit Filtern ausgewogen und dem Material angemessen.

### 3.6.3 Basswiedergabe

Der Bassbereich bildet sich unscharf ab, Bassdrum-Schläge wirken wenig Druckvoll und Bassnoten lassen sich teilweise nicht gut voneinander trennen. Dies lässt sich durch die längere EDT bzw. Nachhallzeit im Bassbereich erklären. Davon abgesehen ist der Bassbereich im Pegel ausgewogen, es treten keine merkbaren störenden Moden oder Resonanzen im Publikumsbereich auf.

Die Klangqualität des Systems im Raum wird vom Autor insgesamt als sehr gut für Sprachwiedergabe bewertet. Für Musikwiedergabe ist sie nicht optimal, aber für den Anwendungsfall ausreichend.

## 3.7 Fazit Anwendungsfall

Die unter 3.2 aufgeführten Bedingungen konnten mit dem verwendeten System weitgehend erfolgreich erfüllt werden. Besonders die geforderte Verständlichkeit und Klarheit der Sprachverstärkung wurde erreicht. Auch ein dem Programm angemessener Schalldruckpegel konnte für jeden Punkt in der Publikumsfläche erzeugt werden. Eine erwartbare Einschränkung dabei ist die schlechte Hochttonabdeckung der ersten Reihen, die sich durch die erhöhte Position der DFM-110 ergibt. Zur Kompensation hiervon konnten erfolgreich Nahfeld-Lautsprecher eingesetzt werden (vgl. 2.2.2.2).



Eine weitere Einschränkung besteht in der Wiedergabequalität des sehr hohen Frequenzbereichs von 4KHz aufwärts. Hier konnte in der Simulation gezeigt werden, dass das System mit den gewählten Einstellungen ein ungleichmäßiges Abstrahlverhalten sowie Nebenkeulen aufweist. Entsprechende Klangliche Probleme waren auch hörbar.

Negativ fiel außerdem die eher undeutlichen Basswiedergabe und die vergleichsweise lange Nachhallzeit im Bassbereich auf. Eine mögliche Verbesserung wäre die Verwendung eines liegenden Subwoofer-Arrays mit präziser Ausrichtung (Weinzierl, 2008). Da dieses nur in der Horizontalen Bündeln würde, ist hier jedoch kein zu großer Effekt zu erhoffen. Die Problematik kann also ohne weitreichende akustische Maßnahmen als unumgängliches Problem des Raums angesehen werden.

## 4 Diskussion und Fazit

### 4.1 Diskussion

Grundsätzlich ließ sich für den vorliegenden Anwendungsfall ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielen. Ein Großteil der erwarteten Akustischen Probleme konnte erfolgreich umgangen werden. Vor allem im tiefen Frequenzbereich zeigten sich jedoch noch Raumakustische Schwierigkeiten. Will man diese Probleme durch Schallbündelung minimieren, besagt die zugrunde liegende Theorie, dass noch größer dimensionierte Systeme eingesetzt werden müssten, was hier in Anbetracht der Hallengröße, des Visuellen Eindrucks und des Budgets sicherlich nicht sinnvoll oder gar möglich gewesen wäre.

Der Mehrgewinn gegenüber dem Einsatz von beispielsweise Punktschallquellen-Lautsprechern ließ sich durch diese Arbeit nicht genau bestimmen. Es ist denkbar, dass sich mit stark bündelnden Einzelsystemen zumindest für den Sprachbereich ähnlich gute Ergebnisse erzielen ließen, sofern die Lautsprecher korrekt ausgerichtet werden. Hier besteht allerdings der Vorteil eines Beamsteering-Arrays darin, dass es im Gegensatz zu Punktschallquellen oder auch den meisten anderen Line-Arrays in der vertikalen nicht mechanisch ausgerichtet werden muss. Die Flexibilität in der Einstellbarkeit wurde in der Arbeit geschildert und macht Beamsteering-Arrays sehr unkompliziert einsetzbar.

Ein Problem des Arrays besteht in der eingeschränkten Richtbarkeit und damit einhergehenden klanglichen Problemen bei sehr hohen Frequenzen - Bei der Wahl eines Systems oder dessen Einstellungen kann dies zur Abwägung den möglichen klanglichen Einbußen durch den Raumeinfluss gegenübergestellt werden. Da dieses Problem in der Simulation hauptsächlich für geneigte Beams auftritt, wäre eine Verbesserung durch mechanisches Kippen des Moduls denkbar, dies war aber mechanisch vor Ort nicht ohne Weiteres umsetzbar.

## 4.2 Fazit

Trotz des ungünstigen Umfelds konnte die Aufführung von „Rent“ in hinreichend guter Qualität umgesetzt werden. Es konnte verhindert werden, dass der Raumklang für den Gesamteindruck störend in Erscheinung trat. Davor wurde festgestellt, dass der Raum zwar hinsichtlich seiner Nachhallzeit akzeptabel ist, aber störende starke Erstreflexionen erwarten lässt. Das System wurde entsprechend ausgerichtet, um diese Reflexionen zu minimieren. Ein Vergleichsversuch zeigte danach, dass sich die EDT des Raums bei ungünstiger Beschallung im Vergleich deutlich erhöht.

Im Theorieteil konnte zudem gezeigt werden, dass Arrays eine Breitbandige, teils sehr starke Richtwirkung aufweisen können. Diese ist über digitales Beamsteering in hohem Maß anpassbar. Sie kann mehr oder weniger Frequenzabhängig sein, und der Abstrahlwinkel sowie die Neigung sind veränderbar. Moderne Systeme erlauben sogar wesentlich tiefere Eingriffe. Somit kann präzise Beschallung von ausschließlich Publikumsbereichen erzielen werden, dadurch wird der Hallradius eines Raums deutlich erweitert und entsprechend das Diffusfeld im relativen Pegel abgesenkt. Arrays sind jedoch auch mit Einschränkungen belegt – im hochfrequenten Bereich haben sie mit Nebenkeulen zu kämpfen, und um den Tieffrequenten Bereich effektiv zu Bündeln werden sehr große Längen benötigt. Letzteres ist mit Arrays, anders als mit herkömmlichen Systemen, jedoch durchaus realisierbar.

Beamsteering-Arrays sind also sicherlich kein Allheilmittel für Raumakustische Probleme – sie ersetzen keine Baulichen Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklangs und können den Akustischen Raumeinfluss ebenso wenig „verschwinden“ lassen. Aber sie bieten eine effektive Möglichkeit, um ihn so gering wie möglich zu halten, was im Vorliegenden Praxisfall auch gelang.

## 5 Literaturverzeichnis

Ahnert, W., & Reichardt, W. (1981). *Grundlagen der Beschallungstechnik*. Hirzel.

Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., & Wöhr, M. (2023). *Handbuch der Tonstudioteknik*.

Fohhn Audio AG. (2021). *User Manual—Focus Modular, DFM-100, DFM-110, DFM-400*.

*Fohhn: DFM-100*. (o. J.). Abgerufen 2. September 2024, von <https://www.fohhn.com/de/produkte/dfm-100>

*Fohhn: DFM-110*. (o. J.). Abgerufen 29. Juli 2024, von <https://www.fohhn.com/en/products/dfm-110#section-technicalData>

*Fohhn: DFM-400*. (o. J.). Abgerufen 2. September 2024, von <https://www.fohhn.com/de/produkte/dfm-400>

*Fohhn: PS-850*. (o. J.). Abgerufen 3. September 2024, von <https://www.fohhn.com/de/produkte/ps-850>

Keele, D. B. (1975). *Whats so sacred about exponential Horns? 1975*.

Kutruff, H. (2004). *Akustik—Eine Einführung*. Hirzel.

*Line Arrays: Theory, Fact and Myth*. (o. J.). MEYER SOUND LABORATORIES INC.

Mack, O. (2024, August 28). *AW: Fragen zur Focus Modular für meine Bachelorarbeit* [Persönliche Kommunikation].

Möser, M. (2015). *Technische Akustik* (10. Aufl.). Springer.

Mack, Jona

*Einsatz von Beamsteering-Systemen in akustisch schwierigen Umgebungen am Beispiel einer Musicalproduktion*

*raumakustische Grundlagen—Akustikkunst.* (o. J.). Abgerufen 10. September 2024, von <https://www.akustikkunst.de/raumakustik/raumakustische-grundlagen.html>

*Unsere Kulturhalle | Kulturhalle Dußlingen.* (o. J.). Abgerufen 2. September 2024, von <https://www.kulturhalle-dusslingen.de/de/Unsere-Kulturhalle>

Urban, M., Heil, C., & Bauman, P. (2001). Wavefront Sculpture Technology. *NEW YORK*.

Ureda, M. S. (2004). Analysis of Loudspeaker Line Arrays. *J. Audio Eng. Soc.*, 52(5).

van Beuningen, G.W.J., & Start, E.W. (o. J.). *Optimizing directivity properties of DSP controlled loudspeaker arrays.* Abgerufen 29. Juli 2024, von [https://axystunnel.com/en/site\\_elements/ioa-paper-2000](https://axystunnel.com/en/site_elements/ioa-paper-2000)

Weinzierl, S. (Hrsg.). (2008). *Handbuch der Audiotechnik.* Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1>

Zollner, M., & Zwicker, E. (1993). *Elektroakustik* (3. Aufl.). Springer.

## 6 Anhänge

Dieser Arbeit liegen zwei Anhänge in digitaler Form bei.

*Anhang 1: Hörbeispiel Beamsteering-Einstellung „A“*

Es liegt ein Video bei, welches während eines Soundchecks der Produktion angefertigt wurde. Die Tonaufzeichnung erfolgte über eine XY-Stereomikrofonanordnung. Zu sehen und hören ist der Song „Santa Fe“ aus dem aufgeführten Musical „Rent“, die PA befindet sich in der Beamsteering-Einstellung „A“ (siehe 3.5).

*Anhang 2: Hörbeispiel Beamsteering-Einstellung „B“*

Analog zu Anhang 1. Die PA befindet sich hier in der Beamsteering-Einstellung „B“ (siehe 3.5).