



Thema:

**Untersuchung der Wahrnehmbarkeit von  
Impulsverzerrungen bei der Anwendung von  
Beamforming-Delays auf Subwoofer-Arrays**

**Bachelorarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering**

Studiengang: Theatertechnik  
Fachbereich VIII

Betreuer: Dr. Florian Straube  
Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau

Ausgabetermin: 30. April 2021  
Abgabetermin: 17. Dezember 2021

vorgelegt von: Adrian Peter Domzig  
Matrikelnr.: 853646

## I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	1
II.	Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme .....	2
1	Einleitung .....	3
1.1	Thematische Einführung.....	3
1.2	Definition Öffnungswinkel.....	5
1.3	Problemstellung und Forschungsfrage .....	6
1.4	Stand der Forschung .....	7
1.5	Erwartetes Ergebnis.....	9
2	Methodik.....	10
2.1	Variablen .....	10
2.2	Referenzen.....	11
2.3	Hörtestmethode.....	14
2.4	Testsignal.....	14
2.5	Versuchspersonen.....	14
2.6	Datenerfassung und -auswertung .....	15
3	Hörversuch .....	18
3.1	Versuchsdurchführung als Simulation .....	18
3.2	Simulationsaufbau .....	18
3.3	Versuchsaufbau .....	20
3.4	Umfeld.....	21
3.5	Position der Versuchspersonen.....	22
4	Auswertung der Daten .....	23
4.1	Test-Setups im Vergleich .....	23
4.2	Getrennte Betrachtung - Fachleute/ Laien.....	25
4.3	Gesamtdurchschnitt .....	26
5	Subjektive Einschätzungen.....	27
5.1	Berichte der Versuchspersonen .....	27
5.2	Eigene Einschätzung der Störfaktoren .....	27
5.3	Erkenntnisse .....	28
6	Resümee und Schlussfolgerung.....	29
6.1	Schwellwert .....	29
6.2	Empfehlung .....	29
6.3	Weiterführende Versuche .....	30
III.	Abbildungsverzeichnis.....	31

IV. Tabellenverzeichnis .....	32
V. Literaturverzeichnis .....	32

## II. Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Sub	Subwoofer
LR-Setup	Links-Rechts-Setup
3AFC	3 Alternative Forced Choice
SPL	Sound Pressure Level (Schalldruckpegel)
uV	unabhängige Variable
$\lambda$	Wellenlänge der Trennfrequenz
R	Referenzstimulus
T	Teststimulus
h	Arraybreite
r	Abstand der Abhörposition zum Arraymittelpunkt
LFD	fortlaufende Nummer
T.N°	Tripel Nummer

# 1 Einleitung

## 1.1 Thematische Einführung

Im Bereich der professionellen Veranstaltungstechnik spielen Beschallungsanlagen eine wichtige Rolle. Sie haben die Aufgabe, jeden Platz im Publikum möglichst gleich gut zu beschallen. Wenn auf Grund der Größe der zu beschallenden Fläche einzelne Lautsprecher nicht ausreichen, um dies zu erreichen, werden Lautsprecher-Arrays eingesetzt. Ein Array [eng.: Anordnung, Reihe, Matrix (Langenscheidt.com 2021)], im Sinne einer Beschallungsanlage, ist eine Anordnung von Lautsprechern. „Lautsprecher-Arrays oder Cluster bestehen aus mehreren Einzelsystemen gleichen oder unterschiedlichen Typs mit dem Ziel, ein möglichst definiertes räumliches Abstrahlverhalten zu erhalten.“ (Goertz 2009, S. 441). Diese Eigenschaft von Arrays kann genutzt werden, um die Schallverteilung im Publikumsbereich zu optimieren.

Beschallungsanlagen werden häufig in Tieftonbeschallung und Mittel-/ Hochtton-Beschallung unterteilt. Für die Mittel-/ Hochtton-Beschallung kommen meist vertikal aufgehängte Line-Arrays zum Einsatz. Die Tieftonbeschallung wird mittels Subwoofer („Subs“) realisiert, die ebenfalls wie im vorangegangenen Absatz erläutert, zu Arrays angeordnet werden können. Hierfür gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Die in der aktuellen Anwendung meistverbreitete Variante ist das Broadside-Array (Berryman 2010, S. 7) - ein Line-Array aus Subwoofern. Es stellt das Pendant zum full-range Line-Array dar und kann vertikal oder horizontal gebaut werden. Durch die Anordnung mehrerer Subwoofer in einer Reihe soll eine möglichst homogene Schalldruckpegelverteilung im Publikumsbereich erreicht werden.

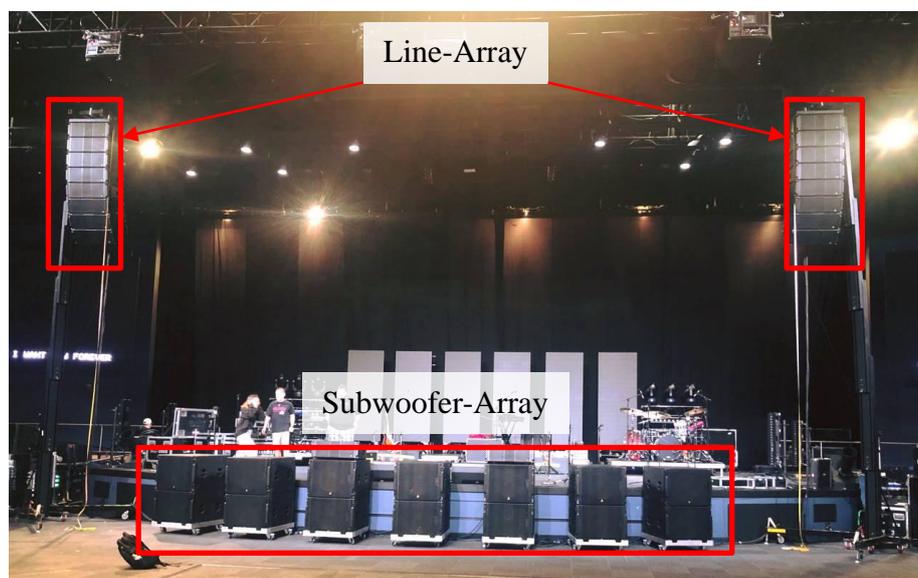
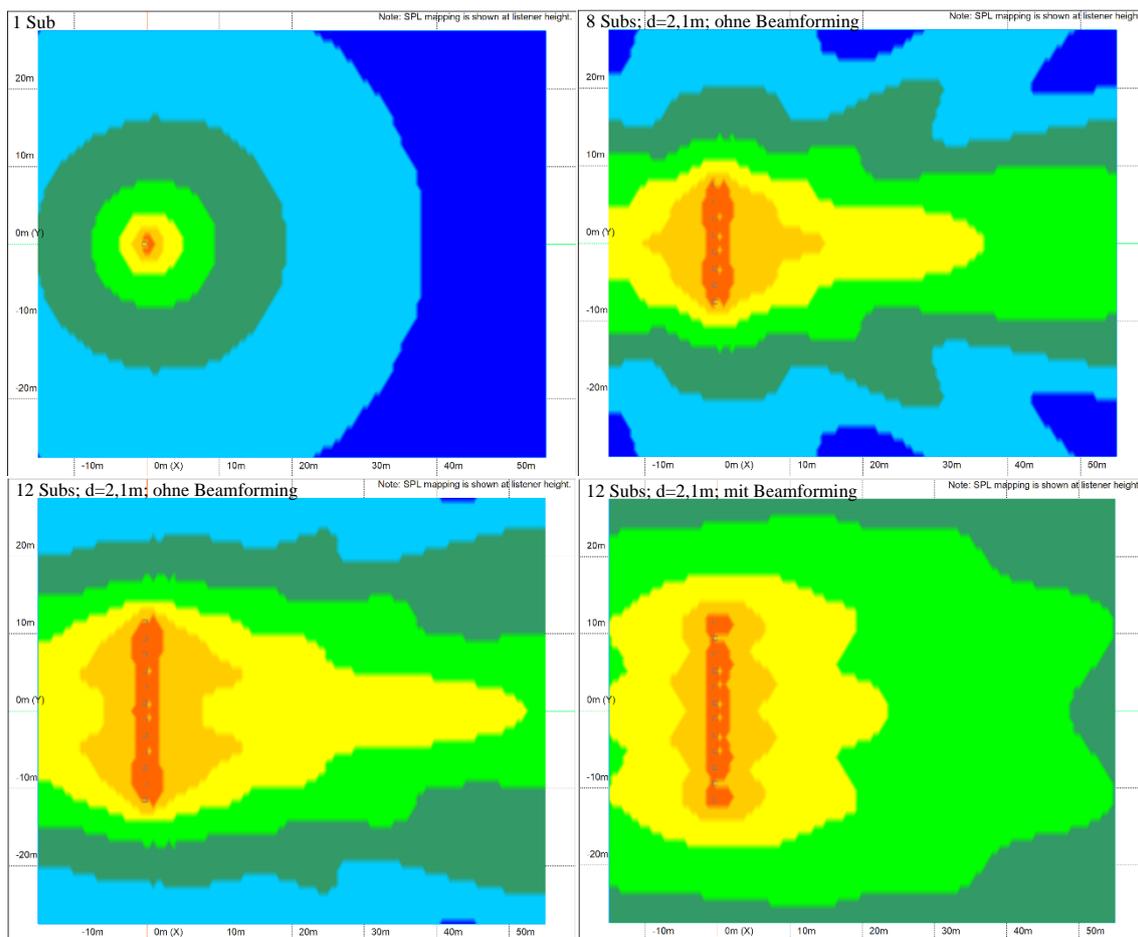


Abbildung 1: Line-Array und Subwoofer-Array (Adamson Systems Engineering 2019) – bearbeitet (rote Markierungen und Textfelder)

Während einzelne Subwoofer eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik haben, breitet sich der Schall eines linearen Broadside-Arrays wegen des Bündelungseffekts eher senkrecht zur Arrayreihe aus (siehe Abbildung 2). Je breiter, bzw. länger das Array, desto enger wird die Abstrahlung in Relation zur Arraybreite. Man spricht auch vom Öffnungswinkel des Arrays. Um die Abstrahlcharakteristik solcher Arrays an die individuellen Anforderungen vor Ort anzupassen, kann der Öffnungswinkel durch Krümmen des Arrays beeinflusst werden. Dies kann auf verschiedene Arten geschehen. So z. B. durch ein physikalisches Krümmen des Arrays, in dem die einzelnen Subwoofer auf einem Kreisbogen, statt einer Geraden aufgestellt werden. Eine andere Möglichkeit, die auch gleichzeitig Thema dieser Arbeit sein wird, ist das virtuelle Krümmen durch spezifisches Verzögern der Einzelsysteme. Dabei werden die Subwoofer auf einer Geraden aufgestellt. Durch einen zeitlichen Versatz (Delay) im Ansteuerungssignal wird der physikalische Versatz imitiert, sodass der Öffnungswinkel verändert werden kann, ohne das Array physikalisch zu krümmen. Da hierbei die Abstrahlung der Schallwellen verändert bzw. bewusst geformt wird, spricht man von Beamforming.



**Abbildung 2: SPL-Mapping bei 50Hz von 1, 8 und 12 Subwoofer im Vergleich zu 12 Subwoofer mit Beamforming - erstellt mit ArrayCalc V10 2018**

## 1.2 Definition Öffnungswinkel

Die Firma Adamson Systems Engineering, welche auch diese Bachelorarbeit betreut und unterstützt, definiert den Öffnungswinkel von Subwoofer-Arrays folgendermaßen:

„Der 6-dB-Öffnungswinkel eines Subwoofer-Arrays ergibt sich durch Betrachtung des Schalldruckpegelverlaufs (für verschiedene Subwoofer-relevante Frequenzen) auf einem Kreis um den Mittelpunkt des Subwoofer-Arrays.

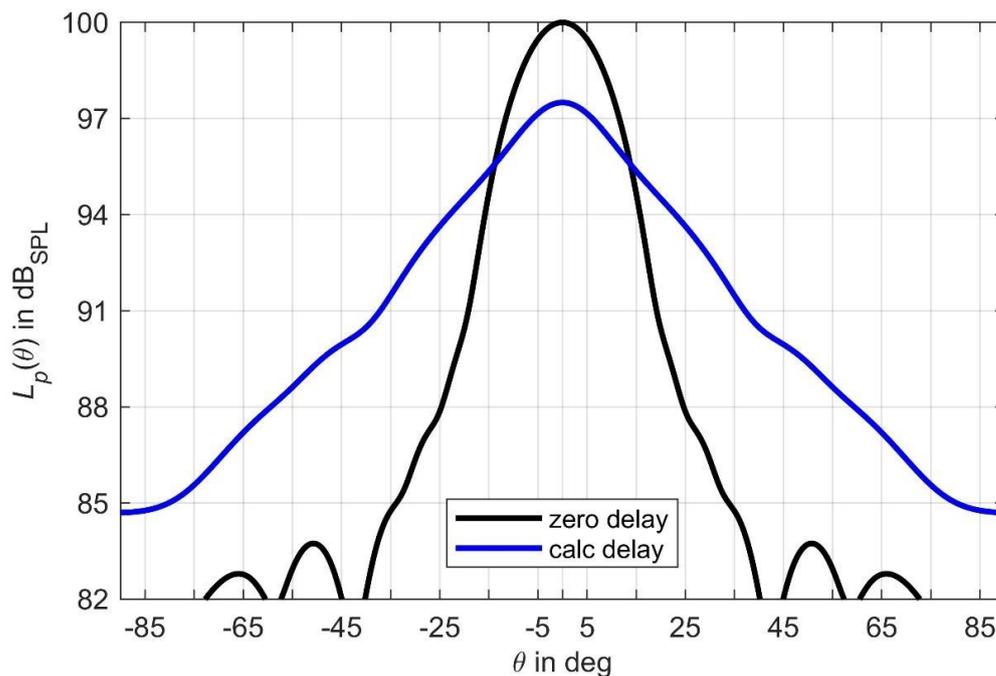
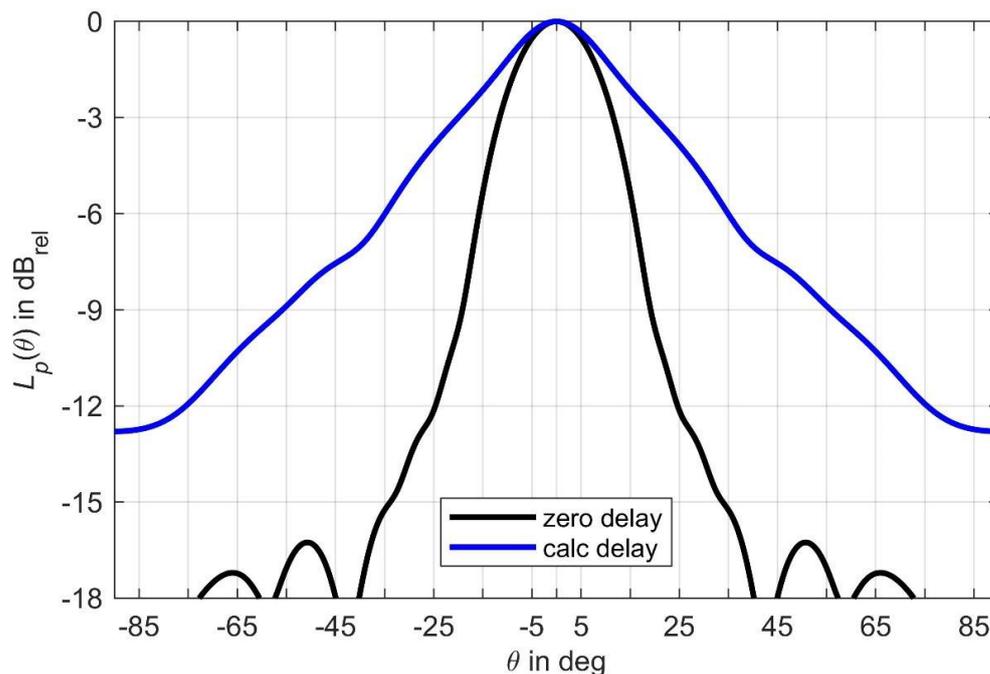


Abbildung 3: Directivity (absolute) in the reference distance, in this case in 40 m

Der Radius des Kreises entspricht einer gewählten Referenz-Entfernung, üblicherweise dem Abstand zwischen Subwoofer-Array und FOH.

Diese Schalldruckpegelverläufe werden auf den jeweiligen Maximalwert normiert -- der sich üblicherweise bei  $\theta = 0^\circ$  befindet.



**Abbildung 4: Directivity (relative to the maximum sound pressure value) in the reference distance, in this case in 40 m**

Im Subwoofer-Frequenzbereich werden diese Schalldruckpegelverläufe über die Frequenzen gemittelt.

Im nunmehr normierten und gemittelten Schalldruckpegelverlauf wird der Winkel bei -6 dB verdoppelt -- da die Directivity symmetrisch ist -- und dieser verdoppelte Winkel wird folglich als 6-dB-Öffnungswinkel (in einer gewählten Referenzdistanz) genutzt.

Somit korrespondiert dieser angegebene 6-dB-Öffnungswinkel mit der tatsächlichen Coverage am Veranstaltungsort (in einer bestimmten Entfernung) und nicht mit dem sonst betrachteten Fernfeld-Verhalten, das für lange Arrays praktisch erst in deutlich größeren Entfernungen vorliegt.“ (Straube, persönliche Korrespondenz vom 03.05.2021)

### 1.3 Problemstellung und Forschungsfrage

Der Einsatz von unterschiedlichen Verzögerungswerten in der Ansteuerung von Lautsprechern innerhalb eines Arrays hat einen Einfluss auf das Impulsverhalten des Arrays. Dies zeigen die Messungen sowie der Hörversuch von Shabalina et al. (2011). Die Systemantwort wird zeitlich gedehnt und die Flanken der Impulse verformt, was eine Verzerrung des Eingangssignals darstellt.

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Broadside-Arrays wird durch Beamforming meist eine Vergrößerung des Öffnungswinkels angestrebt. Hierbei werden die in der Reihe

außen stehenden Subwoofer in Bezug auf die inneren mit einem Delay versehen. Dies geschieht in der Regel stufenweise mit zunehmenden Werten von innen nach außen.

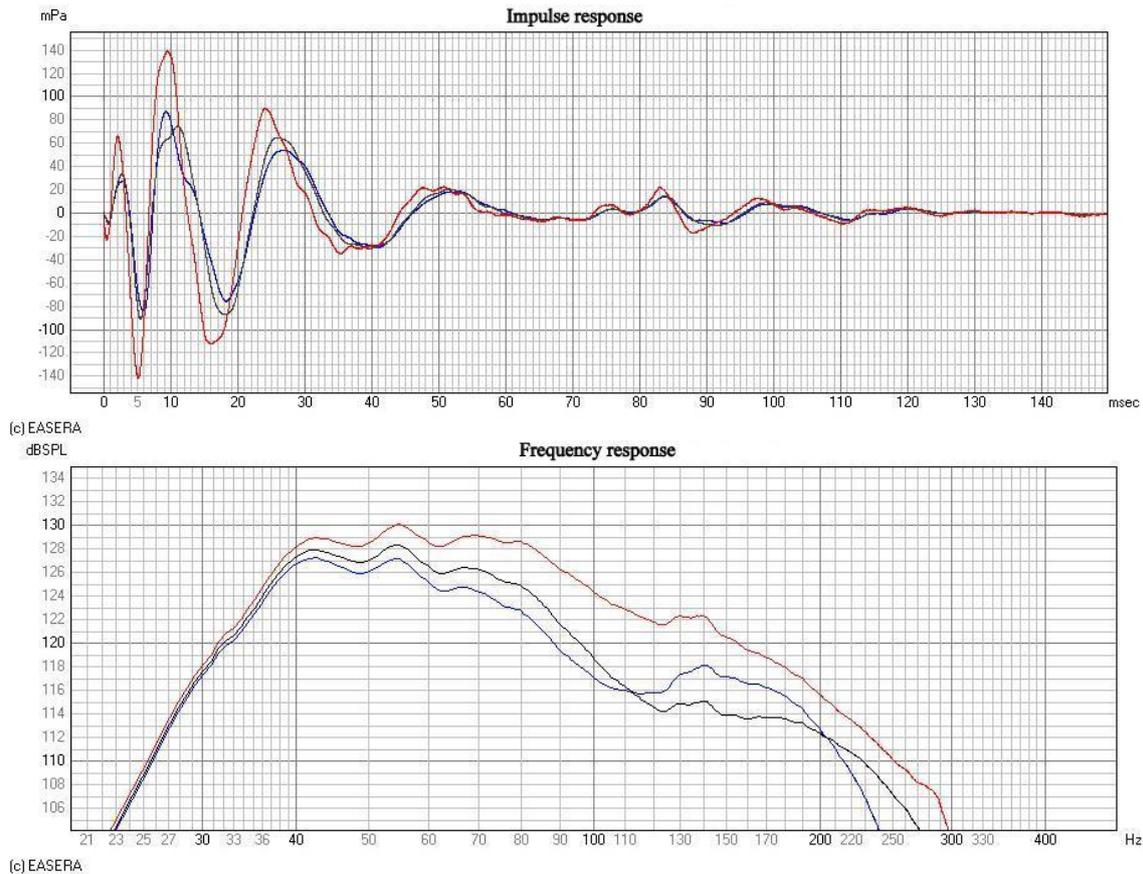
In dieser Arbeit soll es um die menschliche Wahrnehmbarkeit dieser Impulsverzerrung bei Anwendung von Beamforming-Delays auf Subwoofer-Arrays gehen. Daher soll die Wahrnehmbarkeit in einem Hörversuch empirisch ermittelt werden. Ziel ist es, für die Praxisanwendung in der Veranstaltungsbranche eine Nutzbarkeitsschwelle bestimmen zu können, bis zu welchen Öffnungswinkeln eine solche Verzerrung für praxisnahe Beschallungskonfigurationen nicht wahrnehmbar ist.

#### **1.4 Stand der Forschung**

Mit „A Study of Human Perception of Temporal and Spectral Distortion Caused by Subwoofer Arrays“ (Shabalina et al. 2011) wurde die menschliche Wahrnehmbarkeit von zeitlichen und spektralen Verzerrungen bei Subwoofer-Arrays untersucht. In den folgenden Absätzen werden die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst dargestellt.

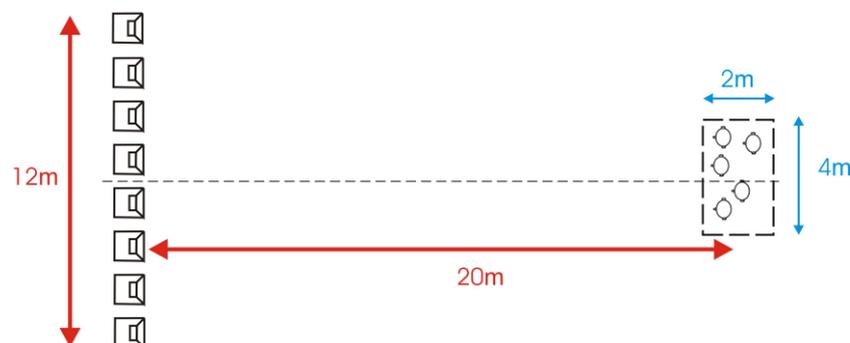
Freifeld-Messungen der Impulsantwort (impulse response) auf der Hauptachse eines Arrays mit acht Subwoofern und  $80^\circ$  bzw.  $100^\circ$  Öffnungswinkel zeigten deutliche Abweichungen im Vergleich zu einem einzelnen Subwoofer. Auch Abweichungen in der Frequenzantwort (frequency response) besonders zu „höheren“ Frequenzen hin konnten gemessen werden, wobei diese nicht nur durch Betrachtung der Impulsantwort abgeleitet werden können (Shabalina et al. 2011, S. 2).

In Abbildung 5; Impulse response kann man erkennen, dass die Winkel der Flanken nicht übereinstimmen. Bei den Arrayantworten steigen sie flacher an, bzw. sinken flacher wieder ab, als bei dem einzelnen Subwoofer. Auch den zeitlichen Versatz der Kurve kann man besonders bei den Nulldurchgängen sowie den Hoch- und Tiefpunkten gut erkennen.



**Abbildung 5: Impulse response and frequency response of an array of 8 subwoofers with 80° (black) and 100° (blue) horizontal directivity against those of a single subwoofer (red) (Shabalina et al. 2011, S. 2)**

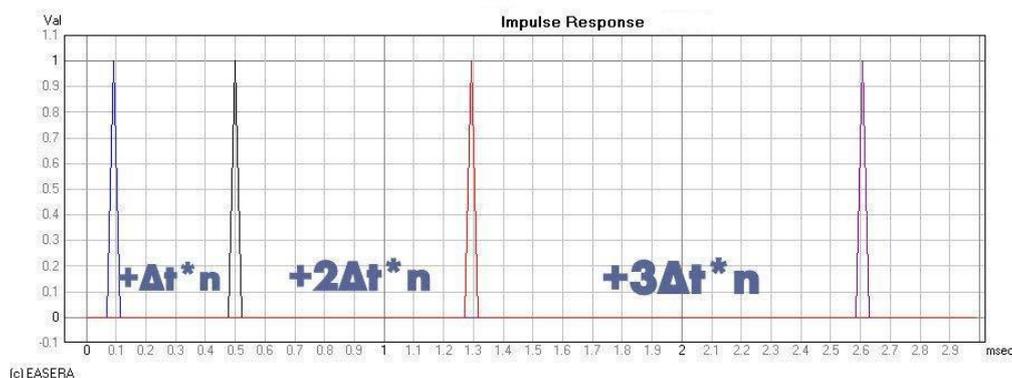
Bei dem Hörversuch wurde ein delay-gekrümmtes Broadside-Array mit 0°, 60°, 80° und 100° Öffnungswinkel mit einem mutmaßlich stereophonen LR-Setup (Links-Rechts-Setup) als Referenz verglichen. Es wurde mit vier Gruppen á 20 bis 27 Personen getestet. Die Gruppen bestanden aus tonaffinen Hörern, Live-Toningenieuren und Technikern. Der Hörversuch wurde mittels 3AFC-Test (3 Alternative Forced Choice) durchgeführt. Der Versuchsaufbau im Inneren eines Stadions ist in Abbildung 6 zu sehen.



**Abbildung 6: Experimental Setup (Shabalina et al. 2011, S. 2)**

Der Test wurde mit und ohne Frequenzkalibrierung gegenüber dem LR-Setup durchgeführt. In beiden Fällen wurde die Lautstärke angepasst. Als Testsignal wurde ein 25 sekundiger Musikclip verwendet.

Im zweiten Teil des Hörversuchs wurden mehrfach abgespielte Impulse mit unterschiedlichen Zeitabständen als Testsignal verwendet. Hier wurde nach einer Abhängigkeit von einem „stretching factor“ gesucht, der die Zeitabstände zwischen den Impulsen vergrößerte, während der Öffnungswinkel durch steigende Delaywerte vergrößert wurde.



**Abbildung 7: Multiple arrivals,  $n$  is the “stretching factor” of the impulse response,  $\Delta t=0.2$  ms (Shabalina et al. 2011, S. 3)**

Bei allen Testkonfigurationen konnte der Unterschied zum LR-Setup erkannt werden. Es lässt sich mit zunehmendem Öffnungswinkel ein Anstieg der prozentualen Wahrnehmbarkeit erkennen. Die Frequenzkalibrierung hat dabei keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse bewirkt. Auch eine zunehmende Wahrnehmbarkeit bei steigendem „stretching factor“ konnte gezeigt werden. Da das Experiment in einem geschlossenen Stadion stattfand, können Einflüsse durch Reflexionen nicht ausgeschlossen werden.

Weitere Forschungsergebnisse sind zu diesem Thema noch nicht vorhanden, bzw. konnten nicht gefunden werden.

## 1.5 Erwartetes Ergebnis

Die Ergebnisse aus dem Hörversuch von Shabalina et al. lassen schon einen Trend erkennen. In diesem Hörversuch soll die Testauflösung jedoch stark angehoben werden, um detailliertere Ergebnisse zu erhalten. Es wird also mehr Testkonfigurationen geben und eine engere Schrittweite zwischen den Öffnungswinkeln.

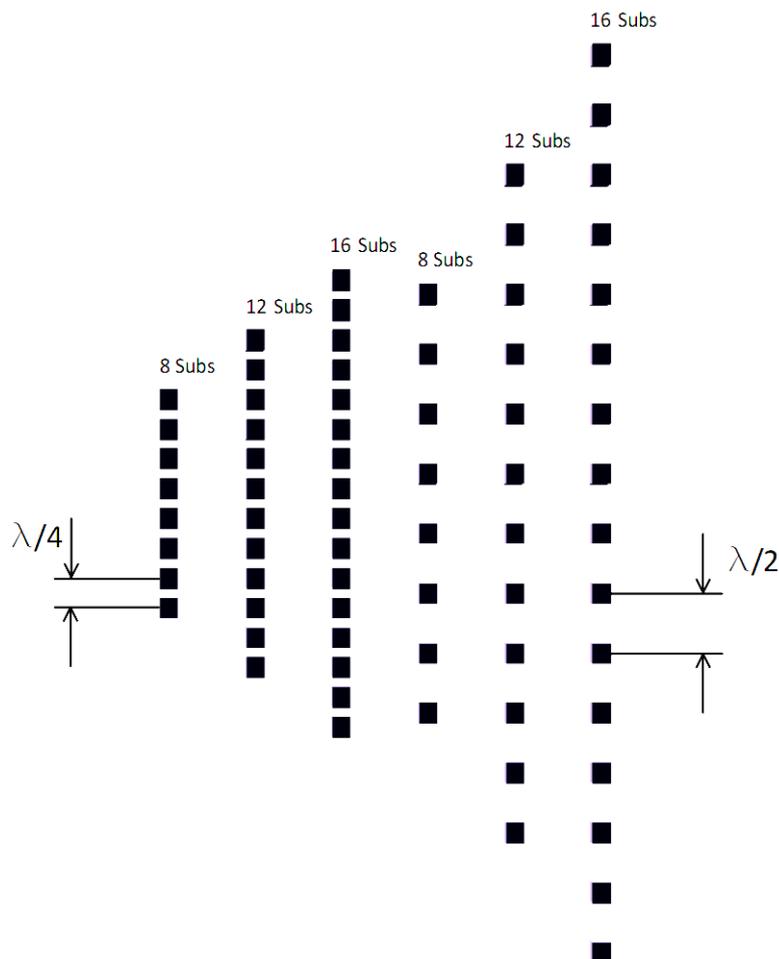
Es wird erwartet, dass die Wahrnehmbarkeit der Veränderung des Impulsverhaltens mit steigendem Öffnungswinkel zunimmt. Ein prägnanter Schwellwert, der einen sprunghaften Wechsel von nicht wahrnehmbar zu wahrnehmbar darstellt, wird nicht erwartet. Wenn es einen Wendepunkt in der Funktion gibt, an dem ein Wechsel von starkem zu schwachem Anstieg der Wahrnehmbarkeit stattfindet, so wird voraussichtlich dieser als Schwellwert definiert.

## 2 Methodik

### 2.1 Variablen

Untersucht wurden praxisrelevante Öffnungswinkel für verschiedene Versuchsaufbauten. Dabei wurden sowohl die Anzahl der Subwoofer im Array als auch deren Abstand zueinander variiert. Konkret gab es folgende unabhängige Variablen (uV):

- uV 1: Anzahl 8/ 12/ 16 Subwoofer
- uV 2: Abstand  $\lambda/2$  und  $\lambda/4$  der Trennfrequenz
- uV 3: Öffnungswinkel  $50^\circ/ 60^\circ/ 70^\circ/ 80^\circ/ 90^\circ/ 100^\circ/ 110^\circ/ 120^\circ$



**Abbildung 8: Schematischer Vergleich der 6 Test-Setups - Abstand = Mittlenabstand**

Aus Kombination der drei verschiedenen Anzahlen an Subwoofern mit jeweils zwei Abstandsvarianten ergaben sich sechs unterschiedliche Test-Setups. Diese wurden mit jeweils acht Öffnungswinkeln getestet. Daraus ergab sich eine Gesamtzahl von 48 Testkonfigurationen.

## 2.2 Referenzen

Diese 48 Testkonfigurationen wurden jeweils einer Referenz gegenübergestellt. Als Referenz wurde das ungekrümmte Array (ohne Einsatz von Delays) des jeweiligen Test-Setups verwendet.

In diesem Punkt unterscheidet sich dieser Versuch maßgeblich von dem Versuch von Shabalina et al. In deren Versuch wurde ein LR-Setup als Referenz verwendet, welches schon prinzipielle Unterschiede zum Broadside-Array aufweist. Es handelt sich beim LR-Setup um zwei Punktschallquellen, die in Relation zur Wellenlänge meist weit auseinander aufgebaut werden und ein starkes Interferenzmuster bilden.

Der ideale Vergleich für ein gekrümmtes Broadside-Array wäre in der Theorie eine Punktschallquelle, da das gekrümmte Broadside-Array nach dem Huygensschen Prinzip eine Punktschallquelle in entsprechend großer Entfernung simuliert (siehe Abbildung 9 rechts). Das ungekrümmte Broadside-Array hingegen kommt einer Linienschallquelle nahe (siehe Abbildung 9 links), deren Punktquelle mathematisch gesehen im Unendlichen liegt.

Abbildung 9 zeigt die Wellenausbreitung von planaren und sphärischen Wellenfronten in einer zweidimensionalen Darstellung. In dieser zweidimensionalen Ansicht lässt sich die axiale Ausbreitung der Wellenfront eines Linienstrahlers mit der eines Flächenstrahlers gleichsetzen.

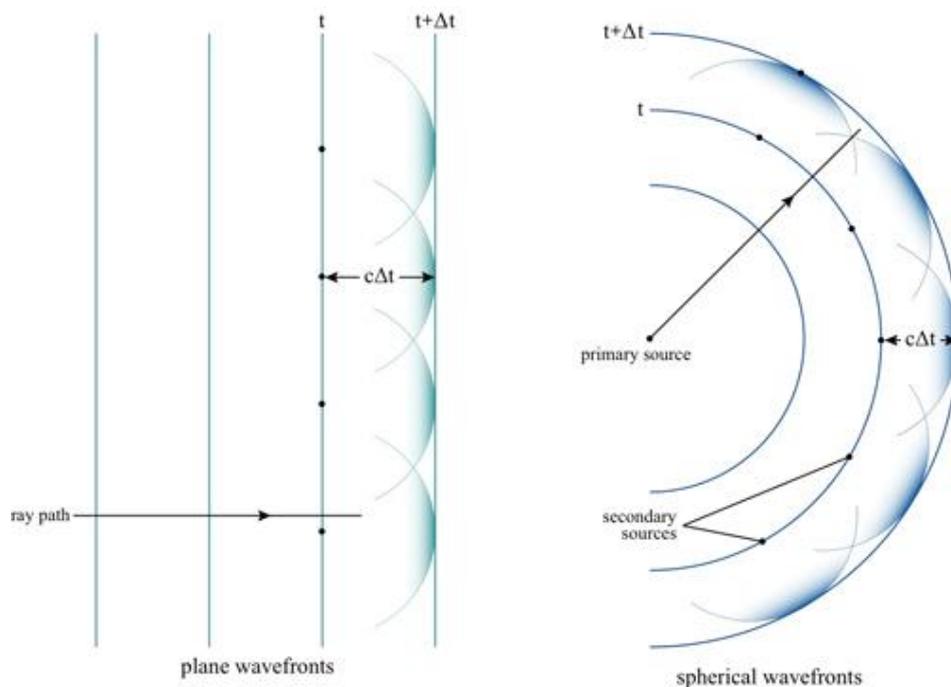


Abbildung 9: Huygens Prinzip – Ausbreitung von planaren und sphärischen Wellen (2D-Betrachtung) (Discovery of Sound in the Sea 2017)

Diese Vergleiche beziehen sich jedoch auf die Nahfeldbetrachtung. Im Fernfeld verhält sich auch ein ungekrümmtes Broadside-Array wie eine Punktschallquelle (Hauck 2007, S. 30), da für die ideale Betrachtung die Linienquelle unendlich lang sein müsste.

Das Nahfeldverhalten hängt aber vom Abstand zur Quelle sowie der Frequenz ab (Hauck 2007, S. 8). Zwar dominiert im Nahfeld das Linienmodell für das ungekrümmte Broadside-Array, allerdings ist z. B. die Richtcharakteristik innerhalb des Nahfelds über die Entfernung nicht konstant (Hauck 2007, S. 30), bis schließlich im Fernfeld auch der Linienquellen-Charakter verloren geht. Aber auch für das gekrümmte Broadside-Array lassen sich in unmittelbarer Nähe des Arrays Eigenschaften (3 dB Pegelabnahme bei Abstandsverdoppelung) des Linienstrahlers erkennen (Hauck 2007, S. 45), die jedoch über die Distanz schnell abnehmen.

Die Definitionen des Nahfeld-Fernfeld-Übergangs ist in der Literatur je nach betrachteten Kriterien sehr unterschiedlich. Wenn man sich auf die Arraygröße in Abhängigkeit der Frequenz fokussiert, so findet man unter anderem folgende Mindestabstände für das Fernfeld:

- (1)  $r > h^2/\lambda$  (Möser zit. nach Weinzierl 2009, S. 36)
- (2)  $r > h^2/(2\lambda)$  (Goertz zit. nach Weinzierl 2009, S. 37)
- (3)  $r > h^2/(4\lambda)$  (Fasold und Sonntag zit. nach Weinzierl 2009, S. 37)

mit  $r$ : Abstand der Abhörposition zum Arraymittelpunkt  
 $h$ : Arraybreite  
 $\lambda$ : Wellenlänge

In diesem Hörversuch ist  $r$  immer gleich 40 m und  $\lambda$  der Trennfrequenz (80 Hz) gleich 4,2 m (bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von 336 m/s). Die Arraybreiten  $h$  sind nach Größe sortiert folgende: 8,09 m; 12,29 m; 15,44 m; 16,49 m; 23,84 m; 32,24 m (weitere Details zum Aufbau unter 3.2)

Während beim kleinsten Aufbau (8 Subs;  $\lambda/4$ ) der Radius  $r$  vom Mittelpunkt des Arrays zur Abhörposition mehr als vierfach so groß ist, wie das Ausmaß  $h$  des Arrays, beträgt das Ausmaß des größten Array-Aufbaus (16 Subs;  $\lambda/2$ ) schon gut  $3/4$  des Radius  $r$ .

Beispielrechnungen für 15,44 m Arraybreite:

Nach (1) Fernfeld ab  $r > h^2/\lambda$ :

$$h^2/\lambda_{80 \text{ Hz}}$$

$$(15,44 \text{ m})^2/4,2 \text{ m} = 56,8 \text{ m} > r (40 \text{ m}) \quad \Rightarrow \text{Fernfeld (bei Trennfrequenz)}$$

$$h^2/\lambda_{40 \text{ Hz}}$$

$$(15,44 \text{ m})^2/8,4 \text{ m} = 28,4 \text{ m} < r (40 \text{ m}) \quad \Rightarrow \text{Nahfeld (bei 40 Hz)}$$

Nach (3) Fernfeld ab  $r > h^2/(4\lambda)$ :

$$h^2/(4\lambda_{80 \text{ Hz}})$$

$$(15,44 \text{ m})^2/(4 \cdot 4,2 \text{ m}) = 14,2 \text{ m} < r (40 \text{ m}) \quad \Rightarrow \text{Nahfeld (bei Trennfrequenz)}$$

$$h^2/(4\lambda_{40 \text{ Hz}})$$

$$(15,44 \text{ m})^2/(4 \cdot 8,4 \text{ m}) = 7,1 \text{ m} < r (40 \text{ m}) \quad \Rightarrow \text{Nahfeld (bei 40 Hz)}$$

Es liegen also einige in diesem Hörversuch vorkommende Abhörpositionen in Bezug auf die Test-Setups je nach Auslegung und Frequenz im Nahfeld **oder** im Fernfeld.

Somit gibt es zwar auch zwischen gekrümmten und ungekrümmten Broadside-Arrays prinzipielle Unterschiede, aber auch Gemeinsamkeiten, die je nach Abhörposition und Frequenz variieren. Im Vergleich zum LR-Setup sowie auch der einzelnen Punktschallquelle liegt hier jedoch in der praktischen Anwendung der engere Bezug vor, da physikalisch dasselbe Array aufgebaut wird. Des Weiteren können die Delaywerte auch so gewählt werden, dass die virtuelle Krümmung keinen Kreisbogen darstellt und somit das Array auch keine Punktschallquelle simuliert. Deshalb sollte das ungekrümmte Array als Referenz dienen.

### **2.3 Hörtestmethode**

Als Testmethode wurde der 3AFC-Test (3 Alternative Forced Choice) (Pilgrim und Peryam 1996, S. 27) verwendet. Hierbei wurden der Versuchsperson je Testkonfiguration drei Stimuli vorgespielt. Zwei Referenzen R und ein Teststimulus T. Bei den Referenzen wurde das Testsignal über das jeweilige ungekrümmte Array abgespielt, während beim Teststimulus die Verwendung von Delays zum Einsatz kam, um den jeweils zu testenden Öffnungswinkel zu erhalten.

Die Versuchsperson musste dann entscheiden, bei welchem der drei Stimuli sie einen Unterschied zu den anderen beiden gehört hat. Wenn die Versuchsperson keinen Unterschied erkennen konnte, wurde sie durch den Mangel an Alternativen zum Raten gezwungen. Die Ratewahrscheinlichkeit liegt bei  $1/3$  (Otto 2008, S. 28). Das heißt ab 33,3% korrekter Antworten kann der Unterschied zwischen Test und Referenz als gerade wahrnehmbar angesehen werden.

Für den Hörtest wurden die Testsignale randomisiert. Dies gilt sowohl für die Signaltupel untereinander, das heißt die Lage des Testsignals im Signaltupel (RTR-TRR-RRT), als auch für die Reihenfolge der Testkonfigurationen. Die randomisierte Gesamtfolge wurde dann für jede Versuchsperson neu randomisiert, um sogenannte Reihenfolgeeffekte, wie z. B. durch Ermüdung zum Ende hin, durch Zufall auf die verschiedenen Testkonfigurationen aufzuteilen.

### **2.4 Testsignal**

Als Testsignal wurde ein zehn sekündiger Ausschnitt aus dem Intro des Songs „Hella Good“ von No Doubt mit entsprechend impulshaltigem Inhalt verwendet. Der Ausschnitt beginnt mit einem Rhythmus aus Bassdrum, Snare und HiHat und wird zum Ende hin mit einer Bassline und einem Synthesizer-Sound ergänzt. Da es hier um praxisrelevante Wahrnehmungsschwellen geht, wurde bewusst kein synthetisch generierter, mathematischer Impuls verwendet.

### **2.5 Versuchspersonen**

Die Gruppe der Versuchspersonen bestand zu ca. einem Drittel aus Fachleuten (tonaffine Personen z. B. Musiker\*innen, Tontechniker\*innen) und ca. zwei Dritteln aus Laien. Insgesamt haben 20 Versuchspersonen unterschiedlichen Alters mit intaktem Hörvermögen (Feststellung per Fragebogen) teilgenommen.

## 2.6 Datenerfassung und -auswertung

Die Datenerfassung erfolgte über eine Excel-Tabelle. Diese Tabelle gab es in drei Ausführungen. Eine Vorgabetabelle, eine Eingabemaske und eine Auswertungstabelle. Die Vorgabetabelle diente der Erstellung der Testreihenfolge. Hier wurde für jede Versuchsperson eine eigene randomisierte Testreihenfolge erstellt. Die einzelnen Testkonfigurationen (Anzahl der Subwoofer, Abstand zwischen den Subwoofern und getesteter Öffnungswinkel) wurden mit einer fortlaufenden Nummer (LFD) versehen, um bei der Auswertung die Randomisierung rückgängig zu machen.

Die Randomisierung der Signaltripel erfolgte über zufallsgenerierte Zahlen zwischen eins und drei in der Spalte T.N° (Tripel Nummer). Die Zahl in dieser Spalte zeigt an, wo sich der Teststimulus innerhalb des Signaltripels befindet. In folgendem Beispiel liegt demnach bei LFD 1 der Teststimulus zwischen den beiden Referenzen an zweiter Stelle (RTR).

**Tabelle 1: Randomisierungsliste mit zufallsgenerierten Zahlen in Spalte 5 & 6**

LFD	Subs	Abst.	Ö.W.	T.N°	
1	8	L/2	50	2	0,271755807
2	8	L/2	60	1	0,913618317
3	8	L/2	70	2	0,274122699
4	8	L/2	80	1	0,823446511
5	8	L/2	90	3	0,574186426
6	8	L/2	100	2	0,526555516
7	8	L/2	110	2	0,0471908
8	8	L/2	120	1	0,022984274
9	8	L/4	50	3	0,921043607
10	8	L/4	60	2	0,505058785
11	8	L/4	70	2	0,190771825
⋮					

Anschließend wurden alle 48 Testkonfigurationen (hier exemplarisch für elf dargestellt) nach ebenfalls zufallsgenerierten Zahlen (Tabelle 1; rechte Spalte) von null bis eins sortiert. Somit ergibt sich eine vollständig zufällige Reihenfolge aus Testkonfigurationen mit jeweils wiederum zufälligen Signaltripeln. Diese Reihenfolge wurde kopiert und in die jeweilige Spalte der Versuchspersonen eingefügt (Tabelle 2). Dieser Vorgang wurde für alle Versuchspersonen mit erneuter Randomisierung wiederholt.

**Tabelle 2: Vorgabetabelle für die Datenerfassung und Auswertung**

		LFD	Subs	Abst.	Ö.W.	T.N°	LFD	Subs	Abst.	Ö.W.	T.N°					
Test NR	Vp:	1					2					→ Versuchspersonen				
1		43	16	L/4	70	3	19	12	L/2	70	2					
2		38	16	L/2	100	2	14	8	L/4	100	2					
3		20	12	L/2	80	1	8	8	L/2	120	3					
4		42	16	L/4	60	3	17	12	L/2	50	3					
5		27	12	L/4	70	2	4	8	L/2	80	3					
6		3	8	L/2	70	1	5	8	L/2	90	3					
7		13	8	L/4	90	2	26	12	L/4	60	2					
8		33	16	L/2	50	1	43	16	L/4	70	3					
9		7	8	L/2	110	2	42	16	L/4	60	2					
10		45	16	L/4	90	1	40	16	L/2	120	1					
11		36	16	L/2	80	2	21	12	L/2	90	1					
⋮																

Alle drei Tabellen enthalten dieselben Informationen über die jeweiligen Testkonfigurationen. Bei der Tabelle für die Eingabemaske wurden allerdings die charakteristischen Informationen (Anzahl der Subwoofer, Abstand zwischen den Subwoofern und getesteter Öffnungswinkel) ausgeblendet. Somit wurde sichergestellt, dass auch der Versuchsleiter nicht weiß, was gerade getestet wird. Dies stellt einen Doppelblindversuch dar und soll die Beeinflussung der Versuchsperson sowohl durch den Versuchsleiter als auch durch das Wissen über das Testobjekt verhindern. Die Zellen in den Spalten T.N° wurden in der Eingabemaske geleert, damit sie von den Versuchspersonen während des Hörversuchs ausgefüllt werden konnten.

**Tabelle 3: Eingabemaske für die Datenerfassung**

		T.N°	T.N°	T.N°	T.N°		T.N°
Test NR	Vp:	1	2	3	4	...	20
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
⋮							

Die Versuchspersonen hatten lediglich eine Tastatur neben sich, auf der sie die Eingabe (1, 2, 3) vornehmen konnten. Die Überwachung der Tabelle, damit eine korrekte Zuordnung der Eingabe sichergestellt werden konnte, wurde vom Versuchsleiter durchgeführt.

In der Auswertungstabelle wurden die Testkonfigurationen dann nach der fortlaufenden Nummer sortiert, um sie zwischen den Versuchspersonen in einer Zeile vergleichen zu können. Es wurden die Eingaben der Versuchspersonen mit der Vorgabe aus der Vorgabetabelle verglichen. Lag die Versuchsperson richtig, hatte sie die gleiche Zahl in die Eingabemaske eingegeben, die auch in der Vorgabetabelle eingetragen war. In der Auswertungstabelle wurden Vorgabetabelle und Eingabemaske verglichen und bei Übereinstimmung mit „wahr“ gekennzeichnet. Um für jede Testkonfiguration ein Gesamtergebnis über alle Versuchspersonen zu erhalten, wurde gezählt wie viele Versuchspersonen richtig lagen. Dies wurde relativiert und in einen prozentualen Anteil umgerechnet. Somit erhält man für jede der 48 Testkonfigurationen eine Aussage, wie hoch die Wahrnehmbarkeit ist.

**Tabelle 4: Auswertungstabelle für die Datenauswertung – Vergleich von Vorgabetabelle und Eingabemaske**

					T.N°	T.N°	T.N°	T.N°		T.N°		
LFD	Subs	Abst.	Ö.W.	Vp:	1	2	3	4	...	20	Anz. korrekt	% korrekt
1	8	L/2	50		FALSCH	FALSCH	FALSCH	FALSCH		FALSCH	6	30%
2	8	L/2	60		WAHR	FALSCH	WAHR	FALSCH		FALSCH	11	55%
3	8	L/2	70		WAHR	FALSCH	FALSCH	WAHR		WAHR	11	55%
4	8	L/2	80		FALSCH	FALSCH	WAHR	FALSCH		WAHR	11	55%
5	8	L/2	90		FALSCH	FALSCH	FALSCH	WAHR		WAHR	7	35%
6	8	L/2	100		FALSCH	FALSCH	WAHR	WAHR		FALSCH	10	50%
7	8	L/2	110		FALSCH	FALSCH	FALSCH	WAHR		WAHR	7	35%
8	8	L/2	120		FALSCH	FALSCH	FALSCH	FALSCH		FALSCH	4	20%
9	8	L/4	50		FALSCH	WAHR	FALSCH	FALSCH		FALSCH	4	20%
10	8	L/4	60		FALSCH	FALSCH	WAHR	FALSCH		FALSCH	4	20%
11	8	L/4	70		FALSCH	FALSCH	FALSCH	WAHR		WAHR	7	35%
⋮												

Die Ergebnisse wurden grafisch als Funktion der Wahrnehmbarkeit über dem Öffnungswinkel dargestellt, um einen Trend erkennen zu können (siehe Kapitel 4 Auswertung der Daten).

## 3 Hörversuch

### 3.1 Versuchsdurchführung als Simulation

Ursprünglich sollte der Hörversuch mit einem realen Array im Freifeld durchgeführt werden. Es sollte ein Flugplatzgelände gemietet werden, um möglichst gute Umgebungsbedingungen zu haben und die vollständigen Testkonfigurationen aufbauen zu können. Auf Grund der Regulierungen während der Corona-Pandemie war dies jedoch nicht möglich. Somit wurde der Hörversuch als Simulation in einem großräumigen Labor der Berliner Hochschule für Technik (ehemals: Beuth Hochschule für Technik Berlin) durchgeführt.

Hierfür wurde das Testsignal mit der Systemreaktion jeden einzelnen Arrays für eine bestimmte Hörerposition mittels Faltungsintegral gefaltet und somit die Reaktion des Arrays simuliert. Als Grundlage für die Berechnung der Systemreaktion diente das Complex-Directivity-Point-Source-Modell (CDPS) nach D. G. Mayer. Hierbei wird zur Berechnung der Systemreaktion für jede einzelne Schallquelle ihre komplexe, frequenzabhängige und dreidimensionale Richtcharakteristik herangezogen. Die Erstellung der Simulations-Audioclips erfolgte durch Dr. Straube, den Betreuer dieser Arbeit.

Diese Simulation wurde dann den Versuchspersonen monophon über einen einzelnen Subwoofer mit ergänzendem full-range Lautsprecher vorgespielt.

### 3.2 Simulationsaufbau

Wie bei horizontalen Broadside-Arrays üblich, wurden alle Subwoofer mit speziellem Abstand zueinander auf einer Geraden nebeneinander platziert. Dieser Abstand ist der Mittenabstand von einem Lautsprechertreiber zum benachbarten.

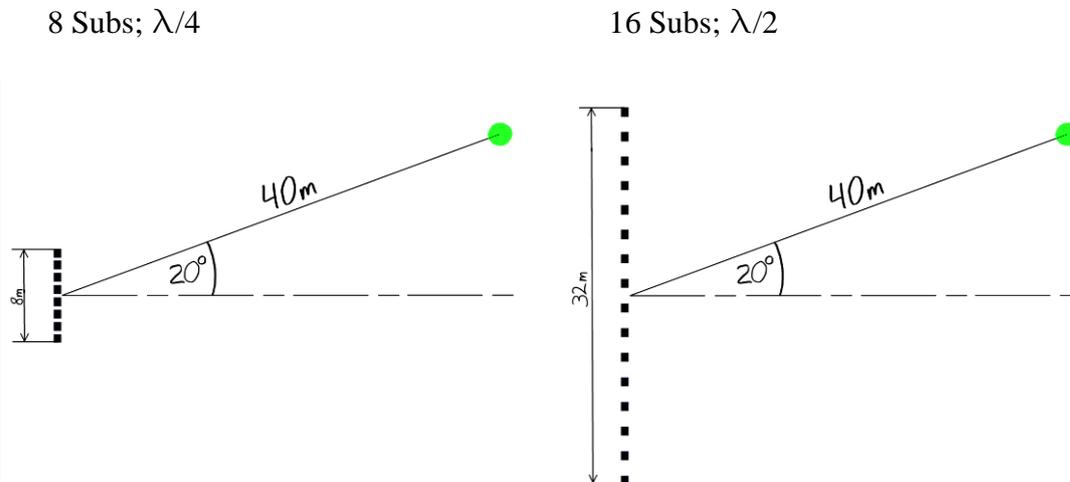
Die Trennfrequenz wurde auf 80 Hz festgelegt und die Wellenlänge  $\lambda$  der Trennfrequenz beträgt 4,2 m bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von 336 m/s. Somit ergeben sich für die beiden Abstandsvarianten  $\lambda/2 = 2,1$  m und  $\lambda/4 = 1,05$  m.

Die Delaywerte für das Beamforming der jeweiligen Test-Setups sind in Tabelle 5 aufgeführt. Da die Delaywerte symmetrisch zur Mittelachse sind, werden nur die Werte für die rechte Seite (von der Mitte nach außen) des Arrays aufgeführt.

Tabelle 5: Delaywerte [in ms] der 48 Testkonfigurationen

Setup	Sub 1R	Sub 2R	Sub 3R	Sub 4R	Sub 5R	Sub 6R	Sub 7R	Sub 8R
<b>8 <math>\lambda/4</math></b>	50°: 0	50°: 0,1	50°: 0,4	50°: 1,0				
	60°: 0	60°: 0,3	60°: 0,9	60°: 2,4				
	70°: 0	70°: 0,3	70°: 1,1	70°: 3,1				
	80°: 0	80°: 0,4	80°: 1,4	80°: 3,6				
	90°: 0	90°: 0,5	90°: 1,6	90°: 4,0				
	100°: 0	100°: 0,5	100°: 1,8	100°: 4,4				
	110°: 0	110°: 0,6	110°: 1,9	110°: 4,7				
	120°: 0	120°: 0,6	120°: 2,1	120°: 4,9				
<b>8 <math>\lambda/2</math></b>	50°: 0	50°: 0,4	50°: 1,2	50°: 3,4				
	60°: 0	60°: 0,4	60°: 1,4	60°: 4,0				
	70°: 0	70°: 0,5	70°: 1,6	70°: 4,5				
	80°: 0	80°: 0,6	80°: 1,8	80°: 5,1				
	90°: 0	90°: 0,7	90°: 2,2	90°: 6,2				
	100°: 0	100°: 0,7	100°: 2,3	100°: 6,5				
	110°: 0	110°: 0,7	110°: 2,3	110°: 6,5				
	120°: 0	120°: 0,8	120°: 2,6	120°: 6,9				
<b>12 <math>\lambda/4</math></b>	50°: 0	50°: 0,1	50°: 0,5	50°: 1,0	50°: 1,8	50°: 3,4		
	60°: 0	60°: 0,2	60°: 0,5	60°: 1,2	60°: 2,2	60°: 4,4		
	70°: 0	70°: 0,2	70°: 0,6	70°: 1,4	70°: 2,6	70°: 5,0		
	80°: 0	80°: 0,2	80°: 0,7	80°: 1,6	80°: 2,9	80°: 5,4		
	90°: 0	90°: 0,3	90°: 0,8	90°: 1,7	90°: 3,2	90°: 5,7		
	100°: 0	100°: 0,3	100°: 0,9	100°: 1,8	100°: 3,4	100°: 6,1		
	110°: 0	110°: 0,3	110°: 0,9	110°: 1,9	110°: 3,6	110°: 6,5		
	120°: 0	120°: 0,3	120°: 1,0	120°: 2,1	120°: 3,9	120°: 6,9		
<b>12 <math>\lambda/2</math></b>	50°: 0	50°: 0,1	50°: 0,4	50°: 0,8	50°: 1,4	50°: 3,0		
	60°: 0	60°: 0,2	60°: 0,6	60°: 1,2	60°: 2,2	60°: 4,1		
	70°: 0	70°: 0,2	70°: 0,7	70°: 1,4	70°: 2,6	70°: 5,2		
	80°: 0	80°: 0,3	80°: 0,8	80°: 1,7	80°: 3,3	80°: 6,8		
	90°: 0	90°: 0,3	90°: 0,9	90°: 1,9	90°: 3,5	90°: 7,2		
	100°: 0	100°: 0,3	100°: 1,0	100°: 2,1	100°: 4,0	100°: 8,0		
	110°: 0	110°: 0,4	110°: 1,2	110°: 2,5	110°: 4,8	110°: 9,6		
	120°: 0	120°: 0,4	120°: 1,2	120°: 2,5	120°: 4,8	120°: 9,6		
<b>16 <math>\lambda/4</math></b>	50°: 0	50°: 0,1	50°: 0,3	50°: 0,6	50°: 1,0	50°: 1,6	50°: 2,5	50°: 4,1
	60°: 0	60°: 0,1	60°: 0,3	60°: 0,7	60°: 1,2	60°: 1,9	60°: 3,0	60°: 4,9
	70°: 0	70°: 0,1	70°: 0,4	70°: 0,8	70°: 1,4	70°: 2,2	70°: 3,4	70°: 5,6
	80°: 0	80°: 0,1	80°: 0,4	80°: 0,9	80°: 1,6	80°: 2,6	80°: 4,0	80°: 6,3
	90°: 0	90°: 0,2	90°: 0,5	90°: 1,0	90°: 1,8	90°: 2,8	90°: 4,4	90°: 7,1
	100°: 0	100°: 0,2	100°: 0,5	100°: 1,1	100°: 2,0	100°: 3,2	100°: 4,9	100°: 7,6
	110°: 0	110°: 0,2	110°: 0,6	110°: 1,2	110°: 2,1	110°: 3,4	110°: 5,2	110°: 8,1
	120°: 0	120°: 0,2	120°: 0,6	120°: 1,3	120°: 2,3	120°: 3,7	120°: 5,6	120°: 8,6
<b>16 <math>\lambda/2</math></b>	50°: 0	50°: 0	50°: 0,1	50°: 0,2	50°: 0,3	50°: 0,5	50°: 0,8	50°: 1,2
	60°: 0	60°: 0,1	60°: 0,2	60°: 0,4	60°: 0,7	60°: 1,1	60°: 1,7	60°: 3,0
	70°: 0	70°: 0,1	70°: 0,3	70°: 0,5	70°: 0,9	70°: 1,5	70°: 2,3	70°: 4,3
	80°: 0	80°: 0,1	80°: 0,4	80°: 0,7	80°: 1,3	80°: 2,1	80°: 3,3	80°: 5,9
	90°: 0	90°: 0,1	90°: 0,4	90°: 0,9	90°: 1,5	90°: 2,4	90°: 3,8	90°: 6,9
	100°: 0	100°: 0,2	100°: 0,6	100°: 1,2	100°: 2,1	100°: 3,4	100°: 5,4	100°: 9,8
	110°: 0	110°: 0,2	110°: 0,6	110°: 1,3	110°: 2,2	110°: 3,6	110°: 5,7	110°: 10
	120°: 0	120°: 0,2	120°: 0,6	120°: 1,3	120°: 2,3	120°: 3,6	120°: 5,7	120°: 10

Die Abhörposition in der Simulation liegt 40 m vom Arraymittelpunkt entfernt und  $20^\circ$  außerhalb der Mittelachse. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den kleinsten und den größten Aufbau der sechs Test-Setups.



**Abbildung 10: Größenverhältnisse der Simulationsaufbauten; kleinster gegen größter Aufbau**

Es wurde bewusst eine Position außerhalb der Mittelachse gewählt. Diese Abhörposition ist praxisnäher, da sich in der Regel der Großteil der Zuhörer nicht auf der Mittelachse befindet.

Diese Position bringt allerdings auch die Eigenschaft mit sich, dass der Pegel auf zwei Arten vom Öffnungswinkel abhängt. Mit steigendem Öffnungswinkel breitet sich das Schallenergiezentrum von der Mitte heraus aus und führt somit zu einem Pegelanstieg an der Abhörposition. Dem wirkt der Umstand entgegen, dass die Schallenergie mit größerem Öffnungswinkel auch auf einen breiteren Raum aufgeteilt wird, was wiederum zu einem allgemeinen Pegelabfall führt (siehe Abbildung 3). Die Test-Clips wurden daher nach Erstellung der Simulation im Pegel angeglichen.

### 3.3 Versuchsaufbau

Die monophone Wiedergabe der Simulation erfolgte über folgendes Setup:

Als Subwoofer wurde ein Adamson S119 verwendet. Ein passiver Single-Subwoofer mit 19“ Treiber. Als full-range Lautsprecher diente ein Adamson IS7p. Ein passiver Zweiwege-Lautsprecher.

Der Subwoofer sowie der full-range Lautsprecher wurden mit der Vorderseite in den Raum zeigend ca. 1,5 m von der Wand entfernt aufgestellt. Der full-range Lautsprecher befand sich auf Kopfhöhe.

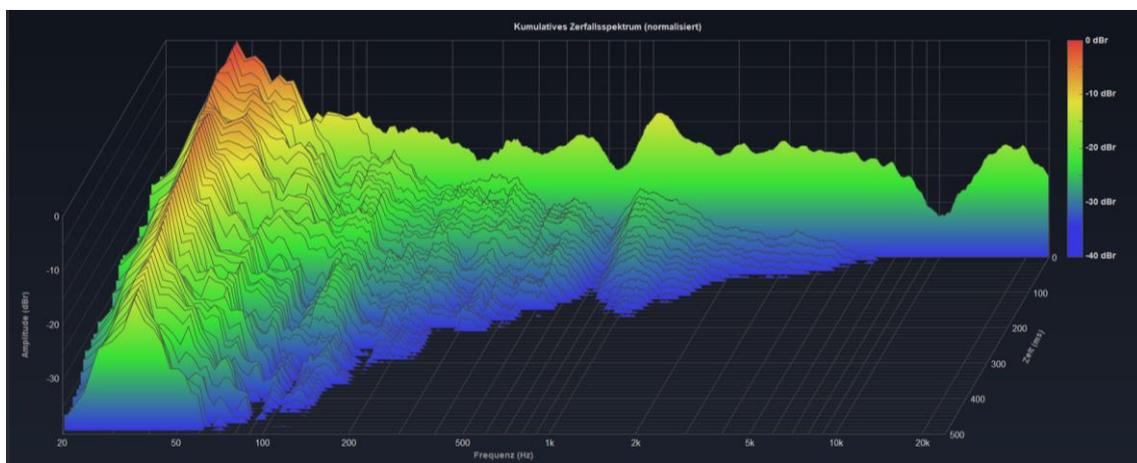
### 3.4 Umfeld

Da der Versuch, wie bereits geschildert, in einem Labor der Berliner Hochschule für Technik stattfand, musste in diesem Zuge auch auf die akustischen Vorteile des Freifelds verzichtet werden.

Als Versuchslabor wurde aus technischen und organisatorischen Gründen das Theaterlabor im Dachgeschoss der Berliner Hochschule für Technik gewählt. Der Raum ist ca. 10 m auf 9,3 m groß. Die Deckenhöhe des Raumes beträgt ca. 7 m.

Um die Raumakustik zu verbessern, wurde über die gesamte Raumhöhe Molton an allen Wänden angebracht. Zudem wurde auch der Boden im Versuchsbereich mit Molton ausgelegt.

Trotz der Verbesserungen war die Raumakustik nicht ausreichend gut. Besonders im für diesen Versuch relevanten Bassbereich gab es auf Grund der Raumgeometrie unvermeidbare Beeinflussungen durch stehende Wellen und Nachhall. Die folgende Abbildung zeigt das normalisierte kumulative Zerfallsspektrum gemessen an der Position der Versuchsperson auf Kopfhöhe. Zur Anregung wurde ein Sweep über die Versuchslautsprecher abgespielt.



**Abbildung 11: Normalisiertes, kumulatives Zerfallsspektrum der Raumakustik des Versuchslabors**

Des Weiteren gab es Störgeräusche durch einen Rollladenkasten, der bei Basswiedergabe zu vibrieren begann. Die Versuchspersonen wurden daher vom Versuchsleiter angehalten, sich auf den Sound der Beschallungsanlage zu konzentrieren und Geräusche aus dem Raum möglichst auszublenden.

### 3.5 Position der Versuchspersonen

Die Versuchspersonen haben jeweils einzeln an dem Versuch teilgenommen und standen auf der weißen Markierung (Kreuz), die in Abbildung 12 zu sehen ist. Um die Beeinflussung des Versuchs durch die Raumakustik möglichst gering zu halten, wurden die Versuchspersonen in einem geringen Abstand von 1,5 m zu den Lautsprechern platziert. Somit ist die Gewichtung des Diffusschalls gegenüber dem Direktschall möglichst gering.

Die Tastatur zur Eingabe lag auf einem Stativ neben den Versuchspersonen.

In 2 m Entfernung rechts der Versuchsperson befand sich der Platz des Versuchsleiters.



Abbildung 12: Laboraufbau

## 4 Auswertung der Daten

Der rot markierte Bereich in den Graphen ist die 33,3 %-Hürde. Wie unter 2.3 beschrieben, wird alles unter 33,3 % als geraten eingeordnet. Erst wenn diese Hürde überschritten wird, können die Ergebnisse als wahrnehmbar bezeichnet werden.

Hierbei sollte jedoch beachtet werden, dass dies keine harte Grenze darstellt, sondern aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung heraus gebildet wird. Somit sind auch Werte, die knapp darüber liegen nicht als eindeutig wahrnehmbar zu werten.

### 4.1 Test-Setups im Vergleich

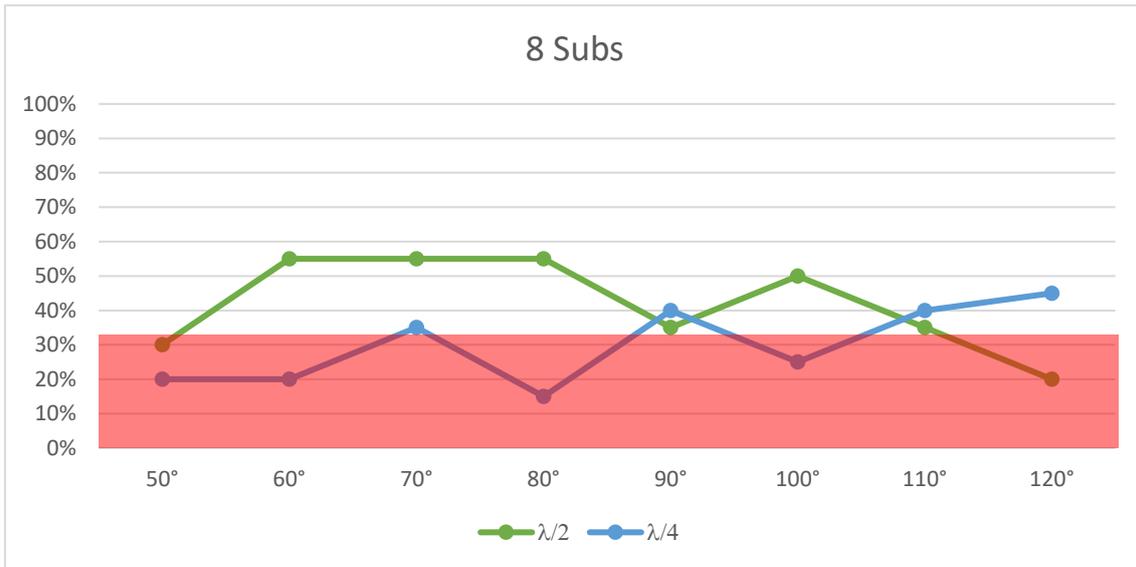
In den folgenden Graphen der Abbildung 13, 14 und 15 wurden je Testaufbau (Anzahl der Subwoofer) die beiden Abstandsvarianten ( $\lambda/4$  &  $\lambda/2$ ) gegenübergestellt.

Bei einigen Test-Setups lässt sich ein deutlicher Anstieg ab  $90^\circ/100^\circ$  verzeichnen.

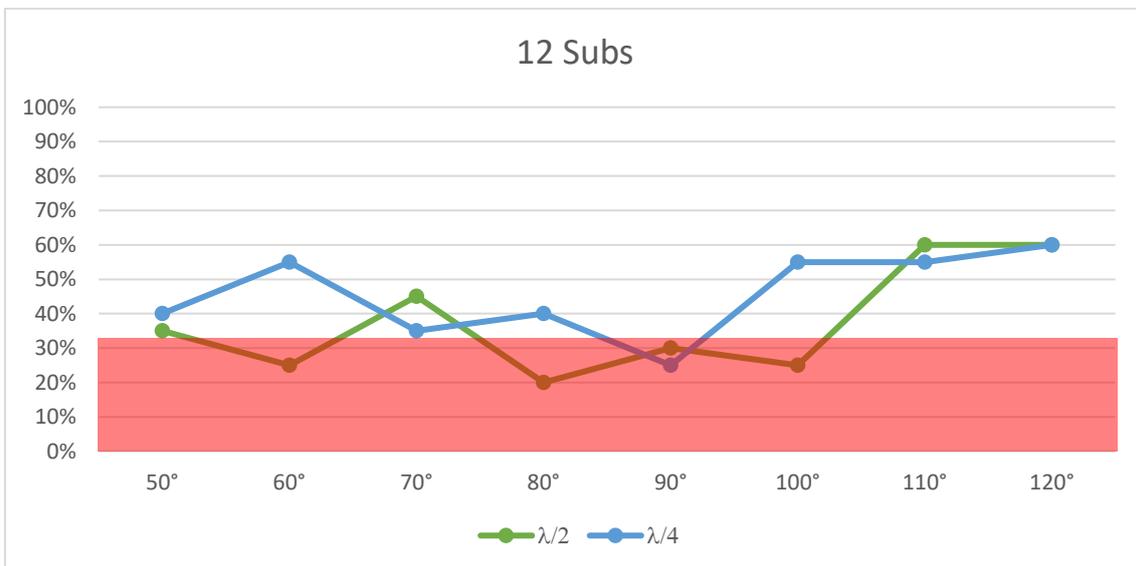
Andere Graphen zeigen währenddessen einen umgekehrten Trend mit einer sinkenden Wahrnehmbarkeit zu hohen Öffnungswinkeln hin.

Bei manchen Test-Setups zeichnet sich aber auch eine Wahrnehmbarkeit im Bereich um  $60^\circ/70^\circ$  ab.

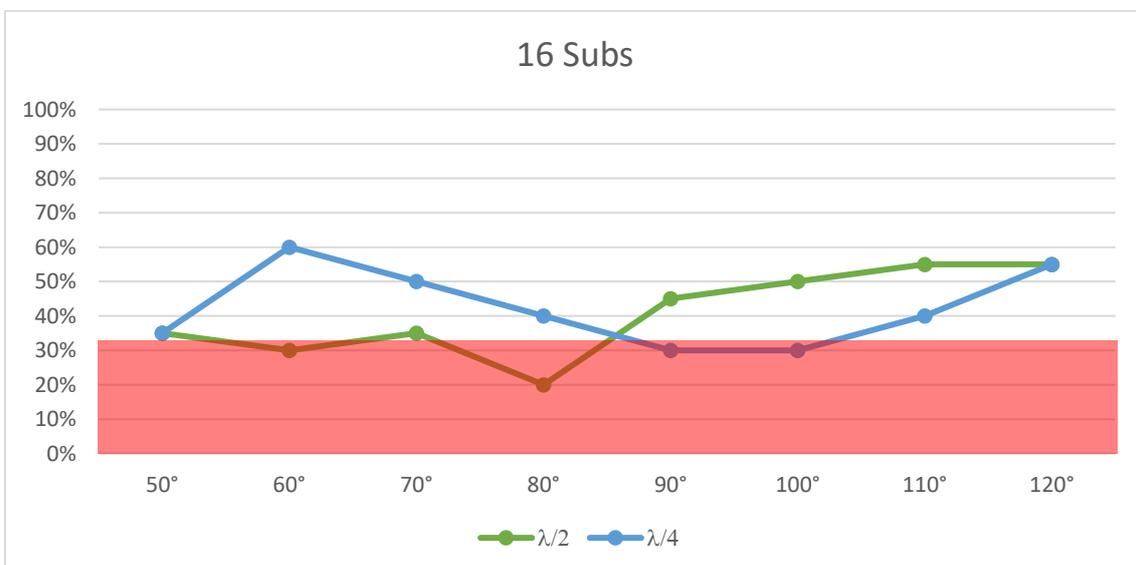
Die Höchstwerte liegen hier bei 60 %, was dafür spricht, dass das untersuchte Phänomen allgemein nicht sehr stark wahrnehmbar ist. Auch der Zick-Zack-Verlauf deutet darauf hin, dass allgemein viel geraten wurde.



**Abbildung 13: Versuchsauswertung - 8 Subwoofer; Vergleich der Abstandsvarianten**



**Abbildung 14: Versuchsauswertung - 12 Subwoofer; Vergleich der Abstandsvarianten**



**Abbildung 15: Versuchsauswertung - 16 Subwoofer; Vergleich der Abstandsvarianten**

## 4.2 Getrennte Betrachtung - Fachleute/ Laien

Betrachtet man die Ergebnisse getrennt nach Fachleuten und Laien, zeichnet sich ab, dass die Laien im Bereich um 60°/70° häufiger richtig lagen und die Fachleute die Änderungen im Bereich ab 90° besser erkannt haben. Von den Fachleuten wurden teils recht hohe Werte von bis zu 86 % erreicht. Man kann auch teilweise widersprüchliche Trends zwischen den jeweiligen Abstandsvarianten beobachten.

Fachleute:

Laien:

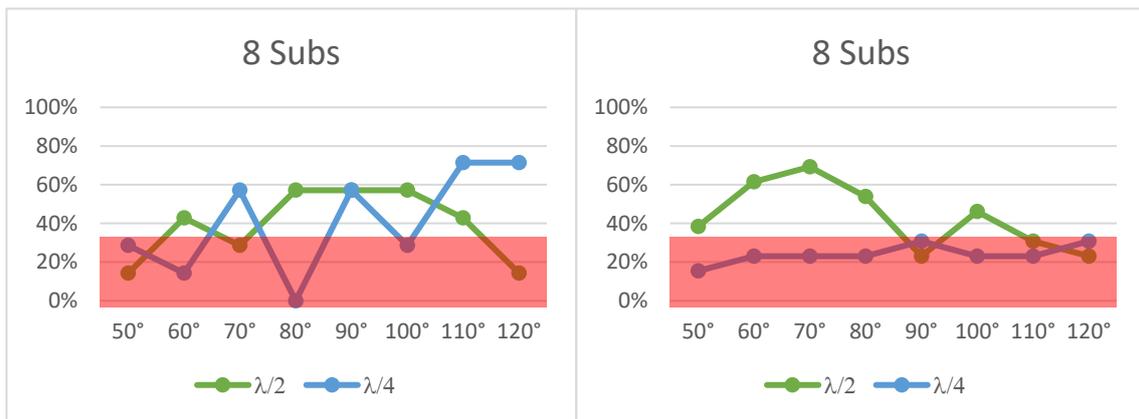


Abbildung 16: Versuchsauswertung - 8 Subwoofer; Fachleute (L) gegen Laien (R)

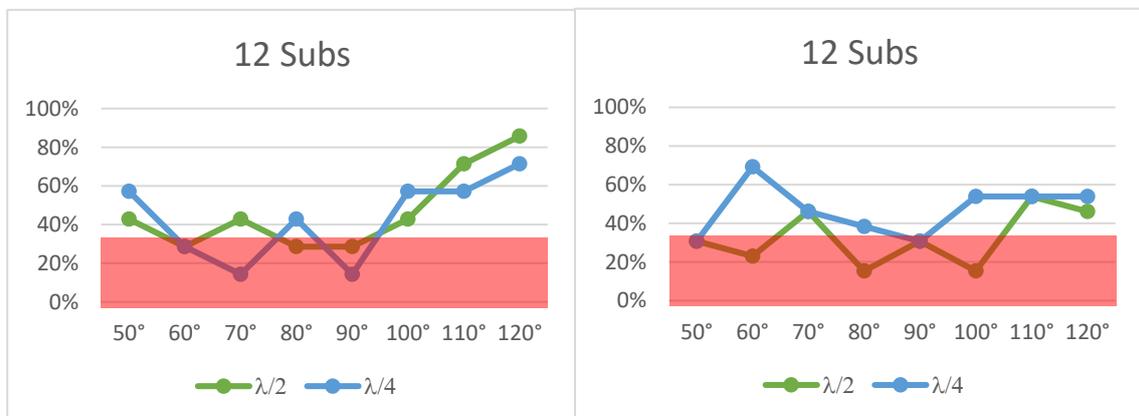


Abbildung 17: Versuchsauswertung - 12 Subwoofer; Fachleute (L) gegen Laien (R)

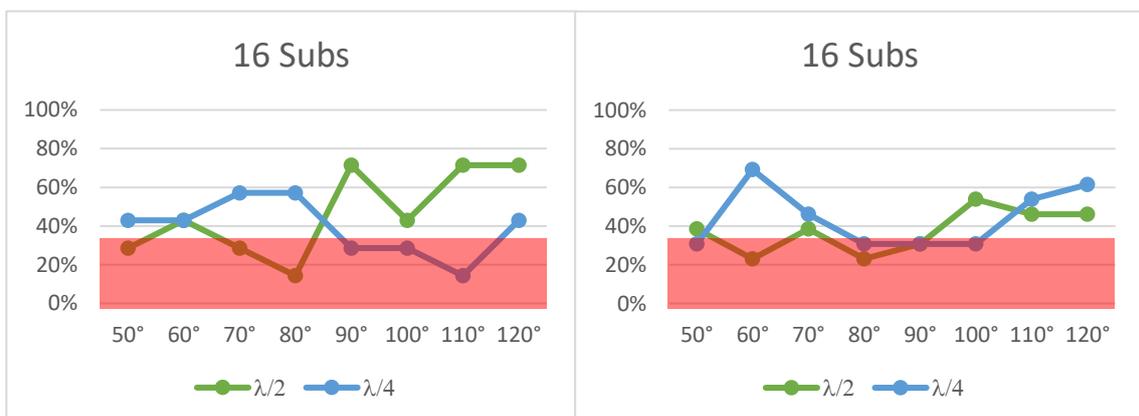
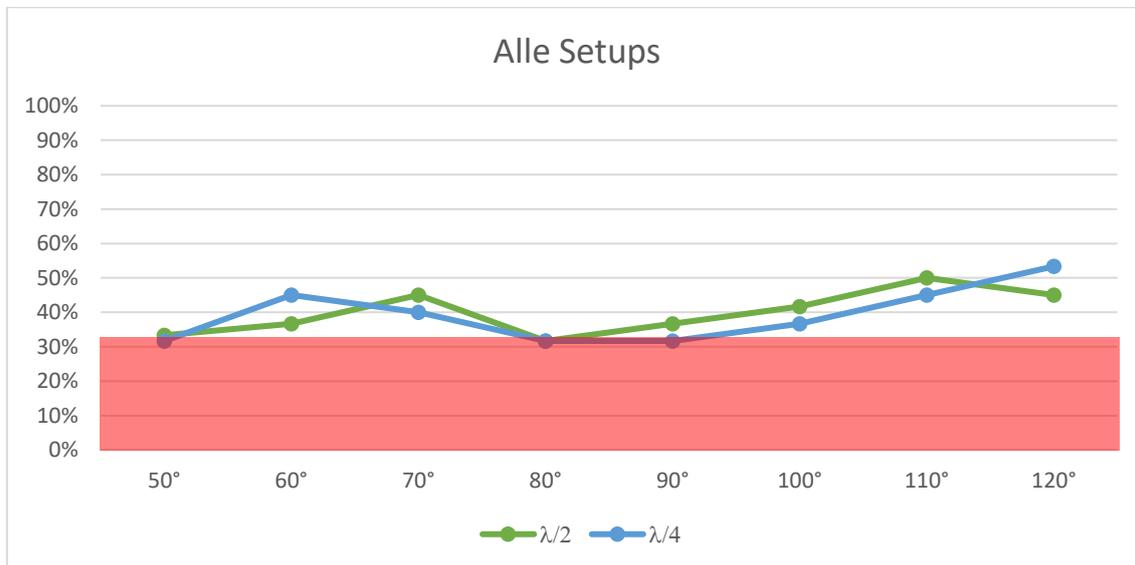


Abbildung 18: Versuchsauswertung - 16 Subwoofer; Fachleute (L) gegen Laien (R)

### 4.3 Gesamtdurchschnitt

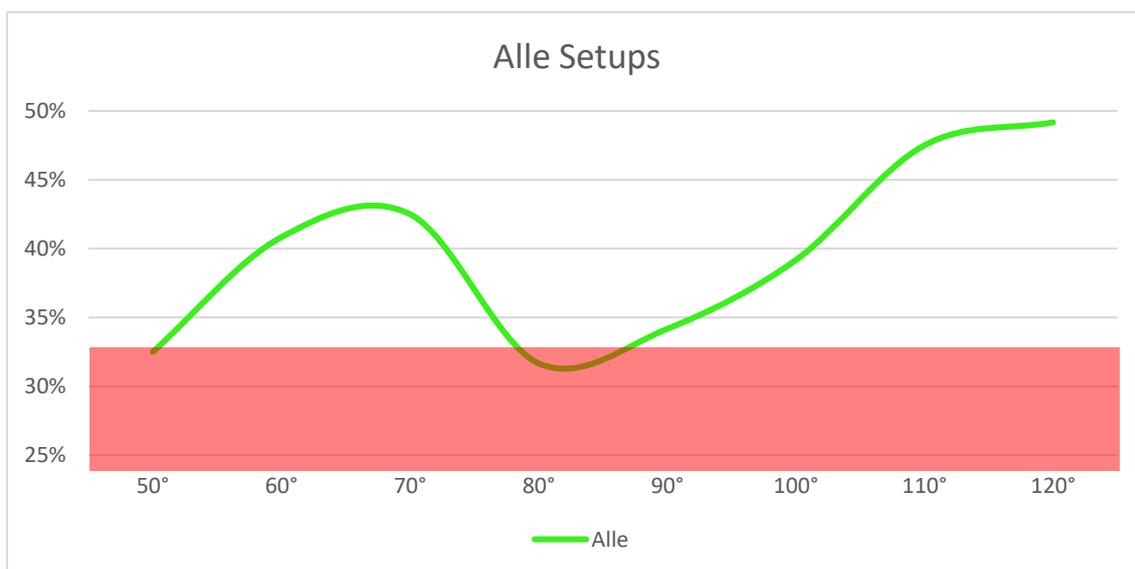
Betrachtet man den Durchschnitt aus allen Subwoofer-Anzahlen ergibt sich folgender Graph:



**Abbildung 19: Versuchsauswertung – Durchschnitt aller Subwoofer-Anzahlen; Vergleich der Abstandsvarianten**

Fasst man nun auch die beiden Abstandsvarianten zusammen, ergibt sich ein Durchschnitt aus allen Test-Setups. Zusätzlich wurde der folgende Graph geglättet und in der Y-Achse gedehnt, um den Trend besser erkennen zu können.

Man kann hier deutlich die beiden Wahrnehmbarkeitsbereiche erkennen, die in den Einzelbetrachtungen der verschiedenen Setups zu sehen sind. Zum einen im niedrigen Bereich um 60°/ 70° und zum anderen bei steigendem Öffnungswinkel ab 90°.



**Abbildung 20: Versuchsauswertung – Durchschnitt aller Setups**

## 5 Subjektive Einschätzungen

### 5.1 Berichte der Versuchspersonen

Nach dem Hörversuch wurden die Teilnehmer\*innen vom Versuchsleiter zu ihren subjektiven Eindrücken befragt. Die Versuchspersonen sollten angeben, in welchen Bereichen sie Unterschiede wahrgenommen haben und wie sie sie beschreiben würden.

Tabelle 6: Subjektive Aussagen der Versuchspersonen

Subjektive Selbsteinschätzung und Beschreibung	Anzahl
Keine Unterschiede wahrgenommen	sehr wenige
Manchmal Unterschiede wahrgenommen	Viele
Unterschiede treffend beschrieben („Bass schwammig“/ „unterschiedlich knackig“)	Wenige
Unterschiede auch in anderen Bereichen "wahrgenommen" (Veränderungen in den Höhen/ Mitten)	Wenige
Konzentrationsprobleme (Wärme/ Maske/ Dauer)	Einige

Da der Hörversuch mit 32 Minuten reiner Spielzeit recht lang dauerte, berichteten einige der Teilnehmer\*innen von Konzentrationsnachlass und Ermüdung über die Dauer des Versuchs. Deshalb wurde der Versuch auf Wunsch der Versuchspersonen ein- oder mehrfach kurz pausiert. Auch die hohen Temperaturen im Theaterlabor, welches im vierten Obergeschoss liegt, trugen an manchen Tagen zu Unwohlsein bei. Außerdem musste laut Hygienekonzept über die gesamte Dauer des Versuchs eine Mund-Nasen-Bedeckung getragen werden.

### 5.2 Eigene Einschätzung der Störfaktoren

Da wie unter 2.3 beschrieben die Testreihenfolge für jede Person anders war, stellen die Ermüdungserscheinungen zum Ende hin statistisch kein Problem dar. Ebenso wenig die individuell eingelegten Pausen, die meist zur Hälfte der Testdauer stattfanden.

Dass wenige Versuchspersonen auch in anderen Frequenz-Bereichen Unterschiede vermeintlich wahrgenommen haben, spielt für das Ergebnis des Hörversuchs keine Rolle. Es könnte lediglich sein, dass die Versuchspersonen sich hierdurch auf „falsche“ Aspekte des Klangs konzentriert haben und somit die eigentlichen Veränderungen überhörten. Da sich in der Praxis auf Konzerten oder ähnlichen Veranstaltungen aber auch niemand explizit auf Impulsverzerrungen im Bassbereich konzentriert, ist das lediglich praxisnah.

Die Raumakustik sowie die Störgeräusche im Raum beeinträchtigen allerdings das Ergebnis. Hierdurch könnten Veränderungen im Signal zusätzlich indiziert oder kaschiert worden sein.

### **5.3 Erkenntnisse**

Durch die Störfaktoren in der Raumakustik lassen sich Unregelmäßigkeiten in den Graphen erklären. So können zum Beispiel Raummoden bei bestimmten Testkonfigurationen zu einer zusätzlichen Indikation oder Kaschierung führen, was zu widersprüchlichen Ergebnissen zwischen den verschiedenen Test-Setups führen kann. Manche Unregelmäßigkeiten können aber auch durch Zufall entstanden sein, da methodisch bedingt viel geraten wurde und die Versuchspersonen nach eigenen Angaben selten einen echten Unterschied wahrgenommen haben.

Die unerwartete hohe Wahrnehmbarkeit bei 60°/ 70° lässt sich hierdurch jedoch nicht erklären. Es sei jedoch an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass es sich bei diesem Hörversuch ausschließlich um die Wahrnehmbarkeit von Veränderungen handelt. Die Tendenz der Veränderung, ob es also besser oder schlechter klingt, wurde nicht erfasst.

Die hohe Wahrnehmbarkeit bei großen Öffnungswinkeln bestätigt allerdings auch die eigene subjektive Einschätzung nach mehreren Selbsttests. Hier sind Verzerrungen in Form von „mulmen“ und „schwammiger“ Basswiedergabe wahrnehmbar. Wie die Aufschlüsselung nach Fachleuten und Laien unter 4.2 aber schon zeigt, wird dies meist nur von tonaffinen Hörer\*innen erkannt.

## 6 Resümee und Schlussfolgerung

### 6.1 Schwellwert

Wie eingangs beschrieben soll der Wendepunkt von starkem zu schwachem Anstieg der Wahrnehmbarkeit als Schwellwert definiert werden. Dies scheint auch nun nach Betrachtung der Ergebnisse sinnvoll zu sein. Hierzu wird der Durchschnitt aller Test-Setups, wie in Kapitel 4.3; Abbildung 20 dargestellt, herangezogen. Der Wendepunkt von starkem zu schwachem Anstieg liegt hier zwischen  $100^\circ$  und  $110^\circ$ .

Somit wird der Schwellwert **vorläufig** auf  $100^\circ$  festgelegt.

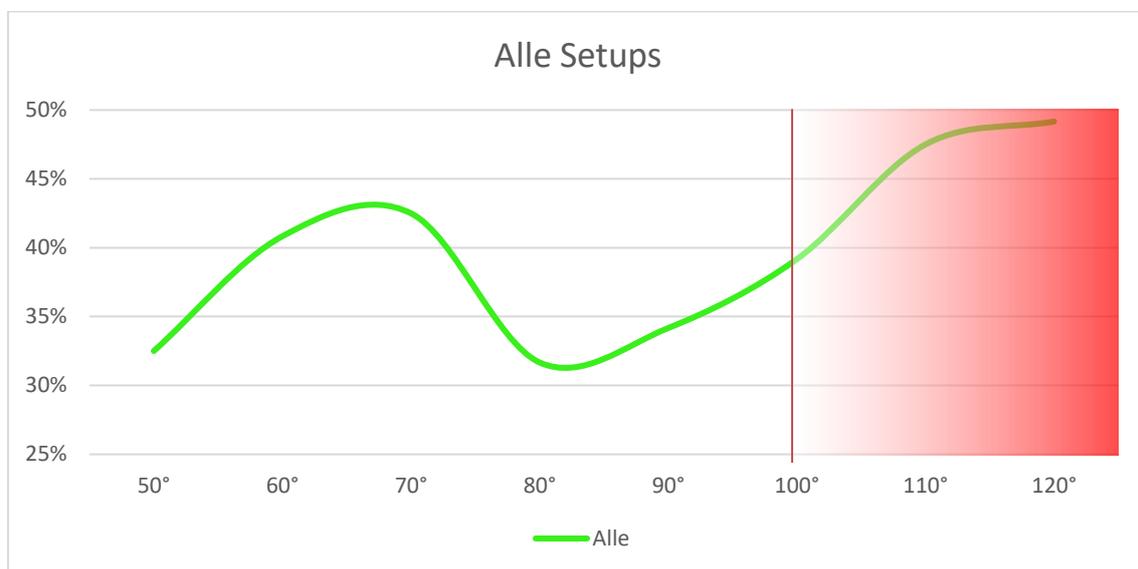


Abbildung 21: Schwellwert am Durchschnitt aller Setups

### 6.2 Empfehlung

Um eine klare Empfehlung für Öffnungswinkel mit geringster Impulsverzerrung auszusprechen, müssten noch einige weiterführende Versuche durchgeführt werden. Trotzdem ist es auf Grundlage dieser Ergebnisse empfehlenswert, Öffnungswinkel bis maximal  $100^\circ$  zu verwenden.

Die Ergebnisse dieser Simulationsstudie sollten jedoch in einer weiteren Studie mit realem Aufbau verifiziert werden. Zum einen auf Grund der Störfaktoren, zum anderen aber auch um bestätigen zu können, wie gut die Ergebnisse aus der Simulation auf ein reales Array übertragen werden können. Denn auch durch die Simulationsmethodik könnten gegebenenfalls Fehler entstanden sein, die eine eindeutige Übertragbarkeit auf reale Arrays nicht zulassen.

### 6.3 Weiterführende Versuche

Um die unerwartet hohe Wahrnehmbarkeit um  $60^\circ/70^\circ$  weiter zu erforschen, könnte ein qualitativer Versuch durchgeführt werden, der erkennen lässt, ob sich der Klang subjektiv verbessert oder verschlechtert. Auch Messungen, aus denen die Impulstreue hervorgeht, können hier hilfreich sein.

Da dieser Versuch häufig widersprüchliche Ergebnisse bei den beiden Abstandsvarianten  $\lambda/4$  und  $\lambda/2$  zeigte, wären auch weiterführende Versuche mit mehr Abstandsvarianten interessant. So könnte eine Abhängigkeit vom Abstand gefunden oder ausgeschlossen werden.

### III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Line-Array und Subwoofer-Array (Adamson Systems Engineering 2019) – bearbeitet (rote Markierungen und Textfelder) .....	3
Abbildung 2: SPL-Mapping bei 50Hz von 1, 8 und 12 Subwoofer im Vergleich zu 12 Subwoofer mit Beamforming - erstellt mit ArrayCalc V10 2018 .....	4
Abbildung 3: Directivity (absolute) in the reference distance, in this case in 40 m.....	5
Abbildung 4: Directivity (relative to the maximum sound pressure value) in the reference distance, in this case in 40 m .....	6
Abbildung 5: Impulse response and frequency response of an array of 8 subwoofers with 80° (black) and 100° (blue) horizontal directivity against those of a single subwoofer (red) (Shabalina et al. 2011, S. 2).....	8
Abbildung 6: Experimental Setup (Shabalina et al. 2011, S. 2).....	8
Abbildung 7: Multiple arrivals, n is the “stretching factor” of the impulse response, $\Delta t=0.2$ ms (Shabalina et al. 2011, S. 3) .....	9
Abbildung 8: Schematischer Vergleich der 6 Test-Setups - Abstand = Mittenabstand ..	10
Abbildung 9: Huygens Prinzip – Ausbreitung von planaren und sphärischen Wellen (2D-Betrachtung) (Discovery of Sound in the Sea 2017) .....	11
Abbildung 10: Größenverhältnisse der Simulationsaufbauten; kleinster gegen größter Aufbau .....	20
Abbildung 11: Normalisiertes, kumulatives Zerfallsspektrum der Raumakustik des Versuchslabors.....	21
Abbildung 12: Laboraufbau.....	22
Abbildung 13: Versuchsauswertung - 8 Subwoofer; Vergleich der Abstandsvarianten ..	24
Abbildung 14: Versuchsauswertung - 12 Subwoofer; Vergleich der Abstandsvarianten .....	24
Abbildung 15: Versuchsauswertung - 16 Subwoofer; Vergleich der Abstandsvarianten .....	24
Abbildung 16: Versuchsauswertung - 8 Subwoofer; Fachleute (L) gegen Laien (R).....	25
Abbildung 17: Versuchsauswertung - 12 Subwoofer; Fachleute (L) gegen Laien (R) ...	25
Abbildung 18: Versuchsauswertung - 16 Subwoofer; Fachleute (L) gegen Laien (R) ...	25
Abbildung 19: Versuchsauswertung – Durchschnitt aller Subwoofer-Anzahlen; Vergleich der Abstandsvarianten.....	26
Abbildung 20: Versuchsauswertung – Durchschnitt aller Setups .....	26
Abbildung 21: Schwellwert am Durchschnitt aller Setups.....	29

#### IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Randomisierungsliste mit zufallsgenerierten Zahlen in Spalte 5 & 6 .....	15
Tabelle 2: Vorgabetabelle für die Datenerfassung und Auswertung.....	16
Tabelle 3: Eingabemaske für die Datenerfassung .....	16
Tabelle 4: Auswertungstabelle für die Datenauswertung – Vergleich von Vorgabetabelle und Eingabemaske .....	17
Tabelle 5: Delaywerte [in ms] der 48 Testkonfigurationen.....	19
Tabelle 6: Subjektive Aussagen der Versuchspersonen .....	27

#### V. Literaturverzeichnis

- ADAMSON SYSTEMS ENGINEERING: *Hillsong Young & Free are amidst their #III U.S. tour, carrying an Adamson system supplied by Soundbox Productions. The band is world-renowned ... [Status Update]. linkedin: Photo: Bleasdell, Jamal.* URL [https://www.linkedin.com/posts/adamson-systems-engineering\\_iii-teamadamson-teamhillsong-activity-6584789605529210881-OH1d](https://www.linkedin.com/posts/adamson-systems-engineering_iii-teamadamson-teamhillsong-activity-6584789605529210881-OH1d). – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum 01.11.2021
- ArrayCalc V10*: d&b audiotechnik GmbH, 2018
- BERRYMAN, Jeff: *Subwoofer Arrays: A Practical Guide*. Minnesota. 2010. URL [https://electrovoice.com/media/downloads/wp\\_subwoofer\\_arrays\\_v04.pdf](https://electrovoice.com/media/downloads/wp_subwoofer_arrays_v04.pdf) – Überprüfungsdatum 23.03.2021
- DISCOVERY OF SOUND IN THE SEA: *How does sound move? Wave Propagation and Huygens' Principle*. URL <https://dosits.org/science/advanced-topics/how-does-sound-move-wave-propagation-and-huygens-principle/>. – Aktualisierungsdatum: 18.09.2020 – Überprüfungsdatum 21.11.2021
- GOERTZ, Anselm: Lautsprecher. In: WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009 (VDI-Buch), S. 421–490
- HAUCK, Thomas: *Simulation und Optimierung von Arrays aus Tieftonlautsprechern*. Berufsakademie Baden-Württemberg. Diplomarbeit. 2007
- LANGENSCHIEDT.COM: *array*. URL <https://de.langenscheidt.com/englisch-deutsch/array> – Überprüfungsdatum 23.03.2021
- OTTO, Stefanie: *Vergleichende Simulation adaptiver, psychometrischer Verfahren zur Schätzung von Wahrnehmungsschwellen*. Berlin, Technische Universität Berlin. Magisterarbeit. 2008
- PILGRIM, Francis J.; PERHAM, David R.: Sensory testing methods, A manual. In: CHAMBERS, Edgar; WOLF, Mona Baker (Hrsg.): *Sensory testing methods*. 2nd ed. West Conshohocken, Pa: ASTM, 1996 (ASTM manual series, MNL 26).

SHABALINA, Elena; RAMUSCAK, Janko; VORLÄNDER, Michael: *A Study of Human Perception of Temporal and Spectral Distortion Caused by Subwoofer Arrays*. London: Audio Engineering Society, 2011

WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009 (VDI-Buch)

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Sonnefeld, den 16.12.2021

---

Adrian Domzig



**Berliner Hochschule  
für Technik**