

# Beuth Hochschule für Technik Berlin

Thema:

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

**Exposé**  
*zur Bachelorarbeit*

Studiengang: Theatertechnik  
Fachbereich VIII

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

Ausgabetermin: 30. April 2021  
Abgabetermin: 23. Juli 2021

vorgelegt von: Adrian Peter Domzig  
Matrikelnr.: 853646

## 1 Einleitung

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.“ (Weinzierl 2008, S. 441) Diese Eigenschaft von Arrays kann genutzt werden, um die Schallverteilung im Publikumsbereich zu optimieren.

Beschallungsanlagen werden häufig in Tieftonbeschallung und Mittel-/Hochton-Beschallung unterteilt. Für die Mittel-/Hochton-Beschallung kommen meist vertikal aufgehängte Line-Arrays zum Einsatz. Die Tieftonbeschallung wird mittels Subwoofer realisiert, die ebenfalls wie im vorangegangenen Absatz erläutert, zu Arrays angeordnet werden können. Hierfür gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. Die in der aktuellen Anwendung meist verbreitetste 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.

Während einzelne Subwoofer eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik haben, breitet sich der Schall eines linearen Broadside-Arrays wegen des Bündelungseffekts eher senkrecht zur Arrayreihe aus. Je breiter, bzw. länger das Array, desto enger wird die Abstrahlung. 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 z. B. 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.

## 2 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, 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. 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.

## 3 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. Bei dem Experiment wurde ein delay-gekrümmtes Broadside-Array mit  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$  und  $100^\circ$  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.

Bei allen Testkonfigurationen konnte der Unterschied zum LR-Setup erkannt werden. Es lässt sich mit zunehmendem Öffnungswinkel ein Anstieg der prozentualen Wahrnehmbarkeit erkennen.

## 4 Methodik

### 4.1 Testkonfiguration

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

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

Aus Kombination der drei verschiedenen Anzahlen an Subwoofern mit jeweils zwei verschiedenen Abstandsvarianten ergeben sich sechs verschiedene Test-Setups. Diese werden mit jeweils acht Öffnungswinkeln getestet. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 48 Testkonfigurationen.

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

### 4.2 Hörtestmethode

Als Testmethode wird der 3AFC-Test verwendet. Hierbei werden der Versuchsperson je Testkonfiguration drei Stimuli vorgespielt. Zwei Referenzen R und ein Teststimulus T. Bei den Referenzen wird das Testsignal über das jeweilige ungekrümmte Array abgespielt, während beim Teststimulus die Verwendung von Delays zum Einsatz kommt, um den jeweils zu testenden Öffnungswinkel zu erhalten.

Die Versuchsperson muss dann entscheiden, bei welchem der drei Stimuli sie einen Unterschied zu den anderen beiden gehört hat. Wenn die Versuchsperson keinen Unterschied erkennen konnte, wird 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 werden die Testsignale randomisiert. Dies gilt sowohl für die Signaltripel untereinander, das heißt die Lage des Testsignals im Signaltripel (RTR-TRR-RRT), als auch für die Reihenfolge der Testkonfigurationen. Die randomisierte Gesamtabfolge sollte aber für jede Versuchsperson neu randomisiert werden, um sogenannte Reihenfolgeeffekte, wie z. B. durch Ermüdung zum Ende hin, durch Zufall auf die verschiedenen Testkonfigurationen aufzuteilen.

### **4.3 Testsignal**

Als Testsignal wird ein kurzer Musikclip (ca. 10s) mit entsprechend impulshaltigem Inhalt verwendet. Da es hier um praxisrelevante Wahrnehmungsschwellen geht, wird bewusst kein synthetisch generierter mathematischer Impuls verwendet.

### **4.4 Versuchsdurchführung**

Für die Versuchsdurchführung wurden zwei Möglichkeiten festgelegt, zwischen denen zu einem späteren Zeitpunkt entschieden wird:

- Möglichkeit 1: Simulation

Hierfür wird das Testsignal mit der Systemreaktion des Arrays für eine bestimmte Hörerposition mittels Faltungsintegral gefaltet und somit die Reaktion des Arrays simuliert. Diese Simulation wird dann der Versuchsperson monophon über einen einzelnen Subwoofer mit ergänzendem full-range Lautsprecher vorgespielt.

Vorteil dieser Möglichkeit ist ihr einfacher, schneller und kostengünstiger Aufbau. Es wird wenig Equipment benötigt und der Platzbedarf für den Testaufbau ist relativ gering, weshalb der Aufbau auch in einem geeigneten Raum in der Hochschule stattfinden kann. Allerdings müsste Zeit und Aufwand aufgebracht werden, um die Simulationen zu erstellen.

- Möglichkeit 2: Realer Testaufbau

Der reale Testaufbau beinhaltet den Aufbau aller sechs Test-Setups des Subwoofer-Arrays mit ergänzenden full-range Lautsprechern im Freifeld. Hierfür würde ein großflächiges Gelände, wie zum Beispiel ein stillgelegter Flugplatz gemietet, um möglichst optimale Umgebungsbedingungen zu haben.

Diese Möglichkeit wird angestrebt, bedingt allerdings auf Grund des höheren logistischen und finanziellen Aufwands zusätzliche Planungszeit.

#### **4.5 Versuchspersonen**

Die Gruppe von Versuchspersonen wird zur Hälfte aus Experten (tonaffine Personen z. B. Tonmeister) und zur anderen Hälfte aus Nicht-Experten bestehen. Es wird eine Gruppengröße von 20 Versuchspersonen angestrebt.

Die Akquise der Versuchspersonen würde abhängig von der in 4.4 gewählten Möglichkeit variieren. Bei „Möglichkeit 1: Simulation“ würde die Akquise von mir durchgeführt und hauptsächlich durch Aufrufe in sozialen Medien und Mailverteilern der Hochschule realisiert werden. Bei „Möglichkeit 2: Realer Testaufbau“ würden die Versuchspersonen über die Firma Adamson Systems Engineering akquiriert. Adamson würde in diesem Fall auch das Testgelände wählen und entsprechend ortsansässige Teilnehmer suchen.

#### **4.6 Pegelkalibrierung**

Da sich bei einem Subwoofer-Array mit Anzahl, Abstand und Öffnungswinkel auch der Schalldruckpegel bzw. die Schallenergieverteilung ändert, wird für jeden Testaufbau eine Pegelkalibrierung vorgenommen. So kann sichergestellt werden, dass die Versuchspersonen nicht auf eine Veränderung des Schalldruckpegels, bzw. eine Verschiebung des Verhältnisses von Tiefton- zu Mittel-/ Hochtonteilen reagieren. Die Versuchspersonen werden also ausschließlich einer Veränderung im Impulsverhalten ausgesetzt.

Auf temporäre Veränderungen der Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel sich ändernde Windverhältnisse, kann nicht bzw. lediglich mit einer möglichst guten Auswahl des Testgeländes Einfluss genommen werden.

#### **4.7 Datenerfassung und -auswertung**

Die Datenerfassung wird voraussichtlich per Google-Forms stattfinden. Dies ist ein webbasiertes Umfragetool. Es kann ein Fragebogen erstellt werden, der für jeden Einzeltest die Frage enthält, bei welchem der drei Testsignale ein Unterschied wahrgenommen wurde. Die Einzeltests werden anonymisiert mit fortlaufender Nummer benannt, sodass weder der Versuchsleiter, noch die Versuchsperson erkennen kann, welche Testkonfiguration 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.

Um bei der späteren Datenauswertung die Antworten der Versuchspersonen den entsprechenden Testkonfigurationen zuordnen zu können, wird im Vorfeld eine Matrix angelegt, in der die Verknüpfungen zwischen Fragebogen und Testkonfiguration in ihrer jeweiligen Randomisierung zu erkennen sind.

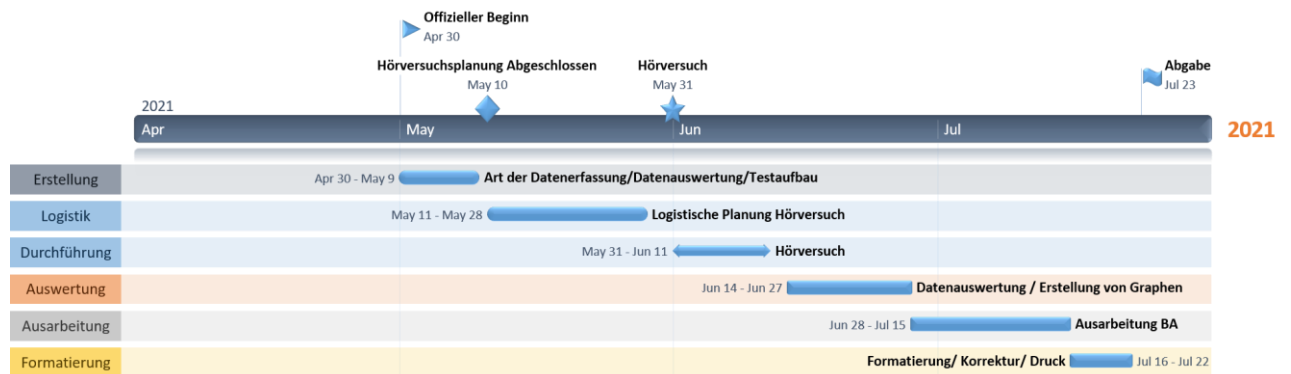
Das in Google-Forms integrierte Auswertungstool kann nicht zur Datenauswertung genutzt werden, da die Reihenfolge der Testsignale für jede Person unterschiedlich ist. Es würden also je Frage im Fragebogen bei jeder Person andere Testkonfigurationen miteinander verglichen werden. Die Daten müssen daher in Excel exportiert werden und mit Hilfe der Matrix zusammengeführt werden.

Zuerst wird für jede Testkonfiguration ermittelt, wie viele der Versuchspersonen das Testsignal unter den Referenzen richtig erkannt haben. Diese Anzahl wird relativiert und in einen Prozentsatz umgerechnet. Anschließend werden die Daten für jeden einzelnen Testaufbau grafisch als Funktion der Wahrnehmbarkeit über dem Öffnungswinkel dargestellt.

### **5 Erwartetes Ergebnis**

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.

## 6 Zeitplan



## 7 Literaturverzeichnis

BERRYMAN, Jeff: *Subwoofer Arrays A Practical Guide*. 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

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. 2008.

URL [https://www2.ak.tu-](https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/abschlussarbeiten/2008/OttoStefanie_MagA.pdf)

[berlin.de/~akgroup/ak\\_pub/abschlussarbeiten/2008/OttoStefanie\\_MagA.pdf](https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/abschlussarbeiten/2008/OttoStefanie_MagA.pdf) –

Überprüfungsdatum 23.03.2021

SHABALINA ET AL.: *A Study of Human Perception of Temporal and Spectral Distortion Caused by Subwoofer Arrays*. URL

[https://www.researchgate.net/publication/344296639\\_A\\_Study\\_of\\_Human\\_Perception\\_of\\_Temporal\\_and\\_Spectral\\_Distortion\\_Caused\\_by\\_Subwoofer\\_Arrays](https://www.researchgate.net/publication/344296639_A_Study_of_Human_Perception_of_Temporal_and_Spectral_Distortion_Caused_by_Subwoofer_Arrays) –

Überprüfungsdatum 23.03.2021

WEINZIERL, Stefan: *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008