

# Untersuchung früher Reflexionen zur Externalisierung bei Kopfhörerwiedergabe

Bachelorarbeit aus Aufnahmetechnik 1, SE

Felix Perfler

Betreuung: Univ.Prof. DI Dr. Alois Sontacchi

Graz, 5. Juli 2019



institut für elektronische musik und akustik



## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Externalisierung bei Kopfhörerwiedergabe. Im ersten Kapitel werden Begrifflichkeit geklärt und auf Einflüsse, welche zur Externalisierung beitragen, eingegangen. Anschließend wird versucht, ausgehend vom DAGA Beitrag „Evaluating out-of-head localization of a dry source from the front reproduced with cue-preserving headphones“ von Hannes Pomberger et al., durch Messungen eine Erklärung zu finden, warum es zur Bildung zweier Gruppen in Bezug auf deren Präferenz der Signalaufbereitung des Kopfhörersignals kommt. Im dritten Kapitel wird zur Diskussion gestellt, warum es bei den durchgeführten Messungen zu keinen Ergebnissen gekommen ist und darüberhinaus ein kurzer Ausblick gegeben, wie die Messungenauigkeiten eventuell verringert werden könnten.

Besonderer Dank gilt Herrn Alois Sontacchi, welcher diese Arbeit betreut hat sowie Herrn Hannes Pomberger, der bei den Messungen unterstützend zur Seite gestanden hat.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Was trägt zur Externalisierung bei Kopfhörerwiedergabe bei?</b>	<b>4</b>
1.1	Interaurale Zeit/Pegel Differenzen . . . . .	4
1.2	Der Einfluss von individualisierten HRTFs . . . . .	5
1.3	Spektrale Details im Bezug auf die Lokalisation von Schallereignissen	5
1.4	Der Einfluss von Reflexionen . . . . .	5
1.5	Visuelle Einflüsse . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Messung</b>	<b>7</b>
2.1	Motivation . . . . .	7
2.2	Messaufbau . . . . .	8
2.3	Messablauf . . . . .	9
2.4	Aufbereitung der Messdaten . . . . .	11
2.5	Berechnung des Zweiwegesystems . . . . .	12
2.6	Messung am Menschen . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Analyse der Messung</b>	<b>14</b>
3.1	Darstellungen der Messdaten . . . . .	14
3.2	Darstellung des Fehlers bei Kopfhörerwiedergabe . . . . .	16
3.3	Analyse der Messdaten . . . . .	18
<b>A</b>	<b>Vorbereitung des Zwei-Wege Systems für den Hörversuch</b>	<b>20</b>

# 1 Was trägt zur Externalisierung bei Kopfhörerwiedergabe bei?

Ein Schallereignis bei Kopfhörerwiedergabe wird meistens innerhalb des Kopfes lokalisiert. Es ist jedoch möglich, das Ereignis außerhalb des Kopfes, also externalisiert, wahrzunehmen. William M. Hartmann und Andrew Wittenberg konnten feststellen, dass es sich dabei um einen kontinuierlichen Prozess handelt [1]. So gelang es ihnen eine Schallquelle, welche zu Beginn innerhalb des Kopfes lokalisiert wurde, nach außen und wieder zurück innerhalb des Kopfes zu bewegen.

Bevor der Schall die Ohren erreicht, wird er durch Oberkörper, Kopf, und Pinna gefiltert. Für die zwei Ohren entstehen durch diese Filterung Unterschiede in der Laufzeit (ITD - „interaural time difference“) beziehungsweise dem wahrgenommenen Schallpegel (ILD - „interaural level difference“). Für unterschiedliche Positionen einer Schallquelle im Raum gibt es eine bestimmte Kombination der oben genannten Einflüsse welche in der sogenannten Außenohr - Übertragungsfunktion („Head Related Transfer Function“ - HRTF) zusammengefasst werden [2]. Bei Kopfhörerwiedergabe ergeben sich jedoch Probleme im Bezug auf die korrekte Darstellung von Klangereignissen. Einerseits werden Klangbilder oft innerhalb des Kopfes wahrgenommen („In-head localization“ - IHL), andererseits kann es zu Verwechslungen kommen wobei eine Quelle von hinten/vorne zu kommen scheint, obwohl sie sich vorne/hinten befindet [3].

## 1.1 Interaurale Zeit/Pegel Differenzen

Durch die Filterung von Pinna, Torso und Kopf kommt es zu einer Frequenzabhängigkeit der ITD und ILD [1]. Durch Experimente konnten William M. Hartmann und Andrew Wittenberg auch feststellen, dass bis 1.5 kHz die Externalisierung von der Signal Phase abhängt.

Wurde jedoch die ILD auf 0 gesetzt konnte keine Frequenzabhängigkeit festgestellt werden. Dadurch kann man darauf schließen, dass im Gegensatz zur Frequenzabhängigkeit der ITD die ILD nicht frequenzabhängig ist.

Auch im Bezug auf die Distanzeinschätzung spielen ITD und ILD eine Rolle. Einige Studien gehen davon aus, dass durch den Vergleich von ILD und ITD oder durch die Änderung selbiger, was etwa beim rotieren des Kopfes geschieht, für die Distanzeinschätzung verwendet werden [4]. Doch wie Zahorik et al. festhalten sind solche Cues nur für nahe Quellen, bei 1m Entfernung, im Bezug auf die Distanzabschätzung von Bedeutung. Ein weiterer Versuch mit einem 500Hz tiefpassgefilterten Quelle konnte zeigen dass besonders die tieffrequenten Anteile (der ILD) für die Distanzabschätzung von nahen Quellen (in reflexionsarmen Umgebungen) ausschlaggebend sind [5].

## 1.2 Der Einfluss von individualisierten HRTFs

Wird ein Schallereignis in den Ohren einer Testperson aufgezeichnet und später dann durch Kopfhörer wiedergegeben, sollte keine Information im Bezug auf Position im Raum und Distanz verloren gegangen sein [6]. Wird nun ein Kunstkopf zur Aufnahme herangezogen kommt es zu Veränderungen im Bezug zur korrekten Wahrnehmung. Insbesondere konnten Møller et al. [6] einen Zuwachs an Fehlern in der Medianebene feststellen. So wurden Frontalquellen oft als von hinten kommend wahrgenommen, sowie die Distanz zur Quelle falsch abgeschätzt. Jedoch wurden die Quellen nicht im Kopf lokalisiert. Durant et al. [7] konnten zeigen, dass die Vorne-Hinten-Vertauschung durch Head-Tracking verbessert werden kann.

Kim Sang-Myeong und Choi Wonjae konnten nachweisen, dass individualisierte HRTFs die Lokalisation verbessern [3].

## 1.3 Spektrale Details im Bezug auf die Lokalisation von Schallereignissen

Abhiji Kulkarni und Steven H. Colburn gelang es zu zeigen, dass Details im Spektrum nicht wichtig für Externalisierung und Lokalisation sind [8]. In einem schalltoten Raum, ohne Kopfbewegung wurden Stimuli über Lautsprecher und HRTF-Realisation über akustisch transparente Kopfhörer verglichen. Das Spektrum wurde bei der Kopfhörerwiedergabe unterschiedlich stark geglättet, indem weniger Fourierreihenoeffizienten berechnet wurden. Dabei konnte erst bei sehr starker Glättung eine Verschlechterung der Externalisierung festgestellt werden, so war die Abbildung zwar externalisiert, jedoch war der einzig nützliche Hinweis die Elevation der virtuellen Quelle. Im Rahmen eines zweiten Experimentes wurde die ITD konstant gehalten (d.h. das originale Amplitudenspektrum der HRTF aber ein vereinfachtes Phasenspektrum). Auch hier konnten kein Unterschied zum Originalsignal über Lautsprecher in Bezug auf die Externalisierung getroffen werden.

Gert H. Hassager et al. [9] führten ein ähnliches Experiment durch, jedoch mit dem Einfluss von Reflexionen. Dabei konnte eine Verschlechterung der Externalisierung durch Glättung des Direktanteiles festgestellt werden, im Gegensatz zu Abhiji Kulkarni und Steven H. Colburn [8], welche ihr Experiment in einem schalltoten Raum durchgeführt haben. Wird jedoch der Raumanteil geglättet sind kaum Verschlechterungen feststellbar.

## 1.4 Der Einfluss von Reflexionen

Ein wichtiger Faktor im Bezug auf die Externalisierung sind Reflexionen. Alleine schon durch hinzufügen von künstlichen Reflexionen kann es gelingen dass ein Schallereignis externalisiert wahrgenommen wird [10].

W.M. Hartmann führte einige Experimente zum besseren Verständnis von Lokalisation in Räumen durch [11]. Er konnte darauf schließen, dass die Lokalisation von

Impulsen sich zwischen reflexionsarmen beziehungsweise stark reflektierenden Umgebungen nicht unterscheidet. Außerdem bei Versuchen mit Sinus-Tönen stellte sich heraus, dass es schier unmöglich war tieffrequente Sinus zu orten, während sich die Ortung für höher frequente verbessert. Beim Betrachten von breitbandigem Rauschen konnte mit einer Erhöhung des Nachhalles eine Verschlechterung in Bezug auf die Lokalisierung festgestellt werden.

Darüberhinaus wird die Distanzabschätzung in reflektierenden Umgebungen verbessert [4]. Bei nahen Quellen ist das Verhältnis von Direktschall zu reflektierten Schall größer als es bei weiter entfernten der Fall ist.

## **1.5 Visuelle Einflüsse**

Visuelle Stimuli spielen eine wichtige Rolle in Bezug auf Externalisierung. Die Existenz von visuellen Stimuli kann mit akustischen Stimuli verbunden werden und selbigen so beeinflussen [4]. Ein Hörversuch, in welchem visuelle Einflüsse in Bezug auf die Distanzabschätzung untersucht wurde, konnte zeigen, dass die Distanzabschätzung unmöglich wurde nachdem Lautsprecher vor Probanden plaziert wurden, wobei einer sichtbar ist, während weitere hinter selbigen plaziert wurden [12]. Die Teilnehmer an Gardners Versuchsaufbau wählten immer den sichtbaren Lautsprecher als Quelle, auch wenn ein weiter entfernter Lautsprecher spielte.

## 2 Messung

### 2.1 Motivation

Da es besonders schwer ist frontale Schallquellen durch Kopfhörer zu reproduzieren, wurde das Verhalten von Hannes Pomberger et al. [13], unter Zuhilfenahme von Kopfhörer Prototypen (vgl. Abbildung 1), welche über Kleinstlautsprecher verfügen, erforscht. Diese Lautsprecher sollen zur Erhaltung von "Cues", welche bei Filterung durch die Pinna entstehen beitragen. In einem Hörversuch wurden die Kopfhörer Prototypen und unterschiedliche Signalaufbereitungsverfahren (vgl. Abbildung 2) miteinander verglichen.



Abbildung 1 – Kopfhörer Prototypen (vgl. [13])

label	condition
① LS	playback on loudspeaker ( <i>hidden reference</i> )
② mono	mono playback on headphone ( <i>anchor</i> )
③ waves	encoded with Waves-Nx plugin without reverb ( <i>benchmark</i> )
④ $\text{HRTF}_{\text{dry}}$	HRTF
⑤ $\text{HRTF}_{\text{BR}}$	HRTF + binaural reverb
⑥ $\text{HRTF}_{\text{BR+T}}$	HRTF + binaural reverb + emulated torso reflection
⑦ $2\text{-way}_{\text{dry}}$	2-way-system
⑧ $2\text{-way}_{\text{BR}}$	2-way-system + binaural reverb
⑨ $2\text{-way}_{\text{BR+T}}$	2-way-system + binaural reverb + emulated torso reflection

Abbildung 2 – Unterschiedliche Signalaufbereitungsverfahren welche bei dem Hörversuch verglichen wurden (vgl. [13])

Wird das 2-Wege System verwendet, spielt der dynamische Lautsprecher bis 1kHz, während danach die Kleinstlautsprecher übernehmen. Auf das Signal des dynamischen Lautsprechers wurde eine HRTF aus der frontalen Richtung gefaltet.

Es zeigte sich eine Präferenz für das 2-Wege System mit dem Kopfhörer Prototypen B, welche den Referenzlautsprecher am besten nachbilden konnte. Eine zweite Gruppe wählte nicht konsistent. Warum es zu diesem Verhalten kam, gilt es zu erforschen.

Deshalb fanden Messungen statt um festzustellen, ob bei Kopfhörerwiedergabe das Selbe übertragen wird wie bei Lautsprecherwiedergabe. Wäre dies der Fall kann das Reproduktionssystem als Ursache ausgeschlossen werden, weshalb nicht korrekt externalisiert wird.

Zum Messen wurde ein Binauralmikrofon verwendet, welches vor der Öffnung des Ohrkanals angebracht wurde. Diese Messposition ist natürlich nicht ideal, da zwischen selbiger und dem Trommelfeld noch eine Übertragung stattfindet. Dorte Hammershøi und Henrik Møler [14] konnten jedoch nachweisen, dass dieser Einfluss klein genug ist um, trotz der nicht idealen Messposition, auf das Verhalten am Trommelfeld schließen zu können. Es fanden auch Messungen mit zwei Kunstköpfen statt, welche über interne Mikrofone verfügen. Ein Kunstkopf<sup>1</sup> verfügt dabei über keinen Ohrkanal, während der andere über einen Ohrkanal, sowie über einen Torso-Simulator verfügt<sup>2</sup>.

## 2.2 Messaufbau

Ein Lautsprecher wurde in 105cm Entfernung mittig vor dem Kunstkopf gestellt, dessen „Ohren“ auf Höhe der Hochtöner des Lautsprechers positioniert wurden (vgl. Abbildung 3). Es wurde darauf geachtet, dass Reflexionen des Raumes beziehungsweise Gegenstände und ähnliches in der unmittelbaren Messumgebung, keinen Einfluss auf das Messergebnis haben, da durch das Beschneiden der Impulsantworten der Einfluss selbiger bestmöglich vermieden wurde.

---

1. Neumann KU100

2. Brüel & Kjær TYPE 4128-C, „head and torso simulator“-HATS

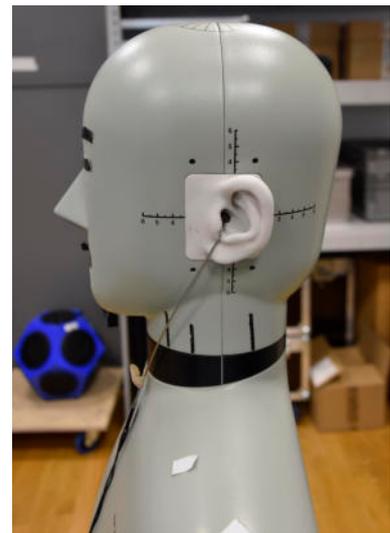


Abbildung 3 – Messaufbau

Messungen fanden sowohl mit den in den Kunstköpfen integrierten als auch mit Binauralmikrofon, welche in der Ohrmuschel der Kunstköpfe platziert wurden statt (vgl. Abbildung 9).



(a) KU100 mit angebrachtem Binauralmikrofon



(b) HATS mit angebrachtem Binauralmikrofon

Abbildung 4 – Position des Binauralmikrofon

## 2.3 Messablauf

Als Anregungssignal wurde ein Exponential-Sweep gewählt (Abbildung 5)(vgl. [15]).

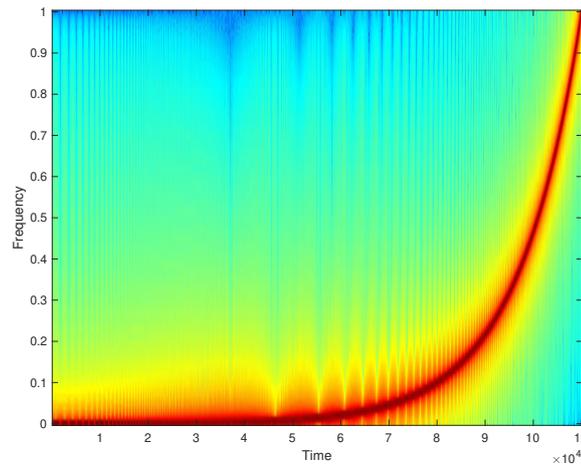


Abbildung 5 – Exponential-Sweep

Zum Abspielen und Aufzeichnen wurde ein PD-Patch verwendet (Abbildung 6).

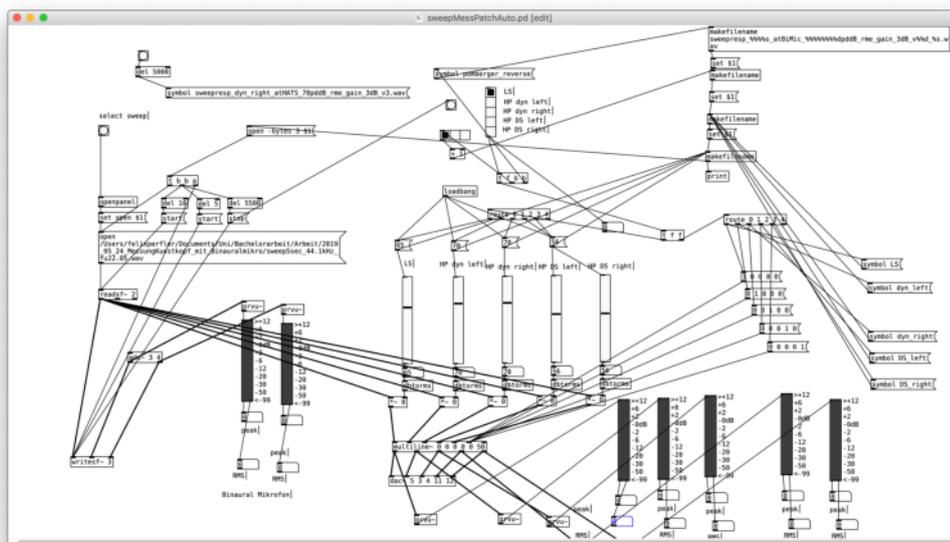


Abbildung 6 – Steuerungspatch der Messung

Zu Beginn wurde die Sweepantwort des Lautsprechers vermessen. Es wurde jeweils für das linke als auch für das rechte Ohr drei Messdurchläufe, sowohl für das Binauralmikrofon als auch für die im Kunstkopf integrierte Mikrofone, durchgeführt. Besonders bei dem Kopfhörer Prototypen ist das mehrmalige Messen unterschiedliche Aufsetzen selbigen Auswirkungen auf die Wiedergabe haben könnte [13]. Bei dem Lautsprecherprototypen handelte es sich um den im Versuch präferierten. Es wurde die gleiche Anzahl an Messungen durchgeführt, wobei einmal nur der dynamische- und einmal nur der Kleinstlautsprecher angespielt wurden.

## 2.4 Aufbereitung der Messdaten

Um die Messung miteinander vergleichen zu können, müssen die erhaltenen Daten auf ihre Pascalwerte zurückgerechnet werden. Dank einer Kalibrierungsmessung bei bekanntem Schalldruckpegel von 94 dB bei 1 kHz kann dies berechnet werden. Zuerst werden die 94dB in Pascal umgerechnet.

$$value_{Pascal} = 10^{\frac{value_{dB}}{20}} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Der Effektivwert („root mean square“ - RMS) eines periodischen Signales  $x(t)$  kann folgendermaßen berechnet werden:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (2)$$

Um nun die korrekten Pascalwerte des Kalibriersignales  $x(t)$  zu erhalten kann ein Faktor berechnet werden (vgl. Gleichung (3)) welcher durch anschließende Multiplikation mit dem gemessenen Signal  $x(t)$  zu den Pascalwerten des Signales führt.

$$factor = \frac{value_{Pascal}}{RMS} \quad (3)$$

$$x(t)_{Pascal} = factor \cdot x(t) \quad (4)$$

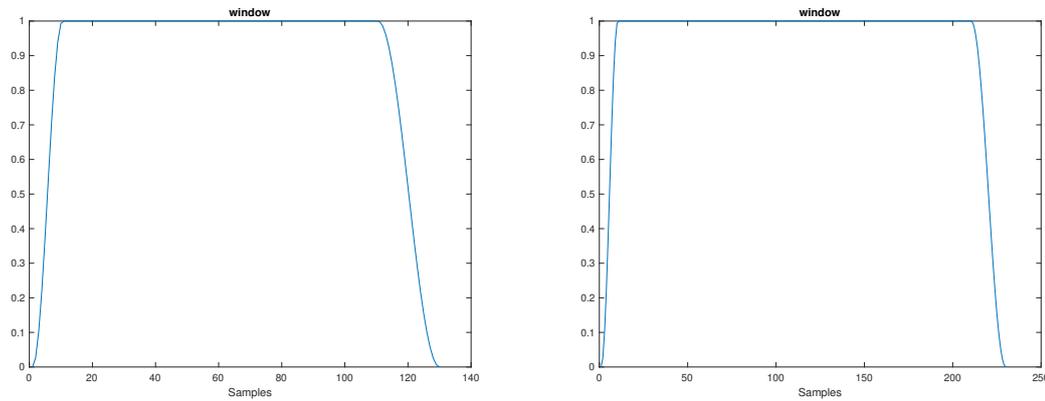
Die selbe Multiplikation mit den durch die Kalibrierungsmessung erhaltenen Faktor (vgl. Gleichung (3)) kann mit den einzelnen Messungen (Lautsprecher, dynamische Lautsprecher des Kopfhörer Prototypen, Kleinstlautsprecher des Kopfhörer Prototypen jeweils mit Binauralmikrofon beziehungsweise mit dem Kunstkopf) durchgeführt werden, um auch für selbige die Pascalwerte zu erhalten. Da die Kleinstlautsprecher, dynamische Lautsprecher des Kopfhörer Prototypen mit unterschiedlichen Pegeln angespielt werden muss dies auch noch mit einem Faktor bedacht werden.

Die Übertragungsfunktion  $h(t)$  kann aus einer Systemantwort  $y(t)$  bei bekanntem Eingang  $x(t)$  entweder durch Entfaltung oder Division im Frequenzbereich (vgl. Gleichung (5)) erhalten werden (vgl. [16]).

$$fft(h(t)) = H(n) = \frac{Y(n)}{X(n)} \quad (5)$$

Die dadurch erhaltenen Übertragungsfunktionen der einzelnen Messungen werden mit einem Fenster (siehe Abbildung (7)) multipliziert. Bei der Lautsprecher Messung wurde das kürzere Fenster gewählt, sodass Reflexionen nicht das Messergebnis verfälschen, während bei der Kopfhörermessung ein längeres Fenster verwendet werden kann.

Diese Fenster bestehen aus drei Teilen. Die ersten 10 Abtastwerte bildet die erste Hälfte eines Hann Fensters, gefolgt von einem Rechteckfensters mit 100 beziehungsweise 200 Abtastwerte Länge. Den Abschluss (20 Abtastwerte) bildet die zweite



(a) gewähltes Fenster bei Lautsprecher Messung (b) gewähltes Fenster bei Kopfhörmessung

Abbildung 7 – gewählte Fensterform: Rechteckfenster mit weichen Übergängen an den Fensterenden durch jeweils halbe Hannfensterverläufe

Hälfte eines Hann Fensters.

Die dadurch erhaltenen Übertragungsfunktion können im Zeitbereich dargestellt werden.

## 2.5 Berechnung des Zweiwegesystems

Der Kopfhörerprototyp ist als Zweiwegsystem konzipiert. Eine Frequenzweiche regelt, dass ab  $1kHz$  die Kleinstlautsprecher übernehmen, während unter  $1kHz$  die dynamischen Treiber zur Reproduktion verwendet werden.

Die Frequenzweiche lässt sich durch Multiplikation, im Frequenzbereich, von passenden Impulsantworten (vgl. Abbildung 8) der Filter für den dynamischen Treiber als auch für den Kleinstlautsprecher und anschließender Addition simulieren.

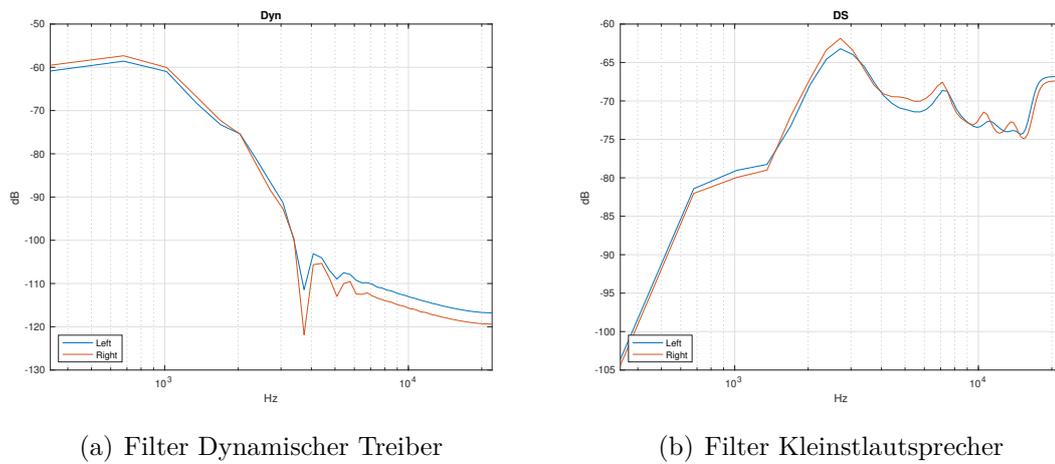


Abbildung 8 – Impulsantworten der Frequenzweiche

## 2.6 Messung am Menschen

Es wurden auch zwei Versuchsteilnehmer vermessen. Dabei wurde sowohl eine Versuchsperson vermessen bei welcher das korrekte Externalisieren funktioniert hat, sowie eine Person, bei welcher dies nicht der Fall gewesen ist. Der Messablauf war derselbe wie bei den Kunstköpfen, jedoch ist natürlich nur eine Messung mit dem Binauralmikrofon durchgeführt worden.



Abbildung 9 – Position des Binauralmikrofon

### 3 Analyse der Messung

Ziel der Messung aus Kapitel 2 war es, eine Erklärung zu finden warum es bei der Bewertung der wahrgenommenen Externalisierung zu einer Bildung von zwei Gruppen kam. Bei einer Gruppe von Personen konnte die Reproduktion mit dem Zwei-Wege Systems des Kopfhörer Prototypen scheinbar nicht überzeugen.

Die Daten welche durch die Messung erhalten wurden, konnten jedoch nicht zur Formulierung einer These beziehungsweise Klärung der Frage verwendet werden.

#### 3.1 Darstellungen der Messdaten

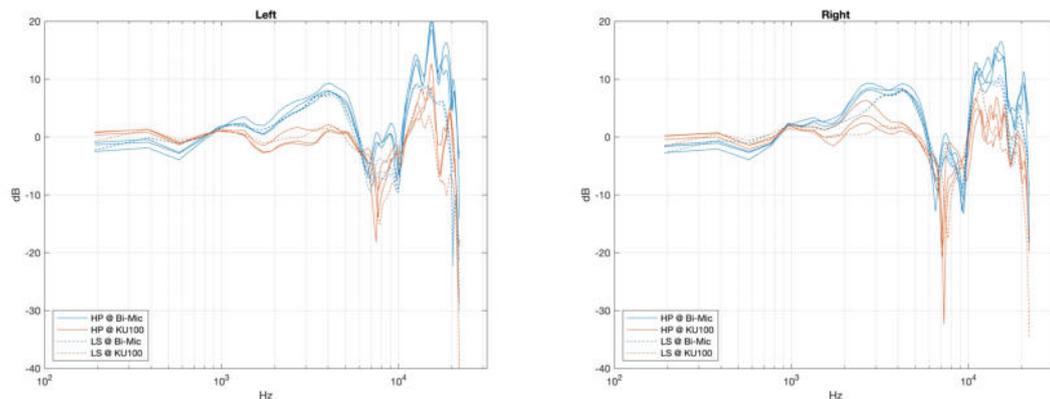
Um die Daten besser miteinander vergleichen zu können werden die erhaltenen Messdatensätze noch normiert. Dabei wurde der quadratische Mittelwert der Messdaten für die Frequenzen von 1 bis  $6kHz$  berechnet.

$$QMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^N x_n^2} \quad (6)$$

Um den Betragsfrequenzgang zu erhalten muss noch folgende Berechnung mit den Übertragungsfunktionen durchgeführt werden:

$$|H(n)| = 20 \cdot \log_{10} |fft(h(t))| \quad (7)$$

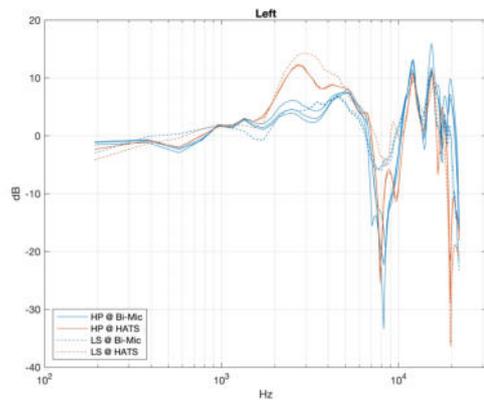
Vor der Darstellung kann dann noch der Quadratische Mittelwert (vgl. Gleichung 6) der jeweiligen Messung von Gleichung 7 abgezogen werden um die Messungen besser vergleichen zu können.



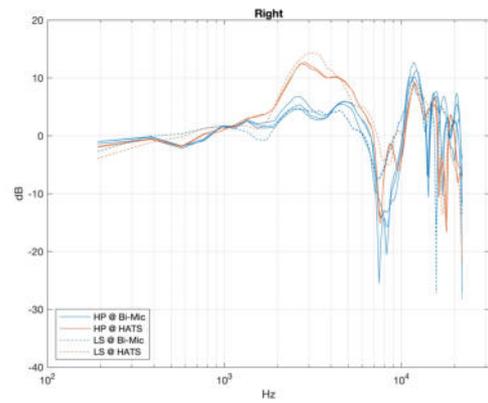
(a) KU100 Messung links

(b) KU100 Messung rechts

Abbildung 10 – KU100 Messung

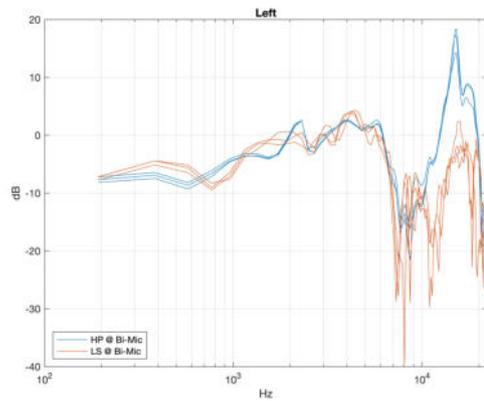


(a) HATS Messung links

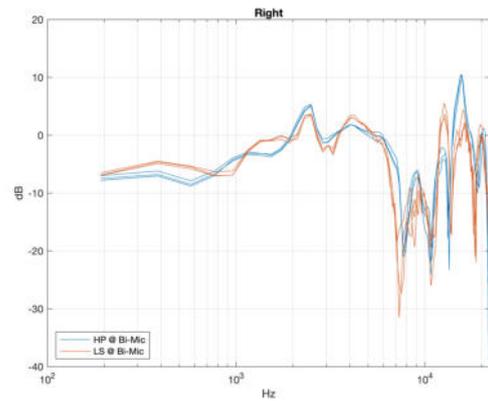


(b) HATS Messung rechts

Abbildung 11 – HATS Messung



(a) Messung Testperson 1 links



(b) Messung Testperson 1 rechts

Abbildung 12 – Messung an Person 1

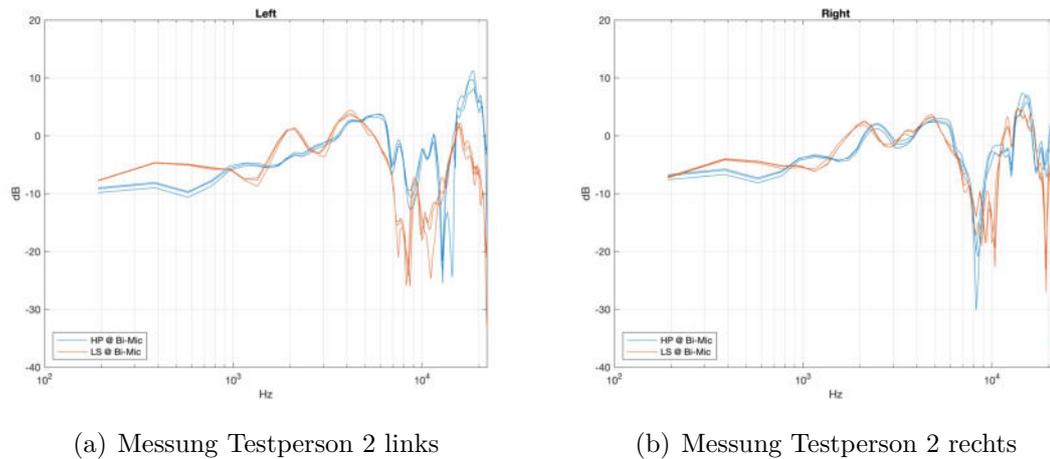


Abbildung 13 – Messung an Person 2

### 3.2 Darstellung des Fehlers bei Kopfhörerwiedergabe

Da das Ziel der Kopfhörerwiedergabe die Lautsprecherwiedergabe möglichst genau abzubilden wird der resultierende Fehler dargestellt. Dabei wird von der Lautsprecher Messung die Kopfhörer Messung abgezogen.

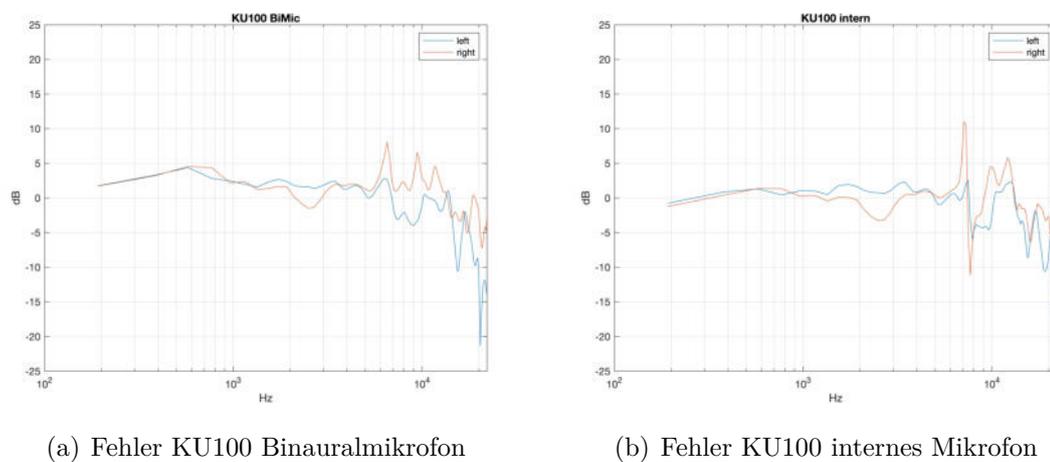
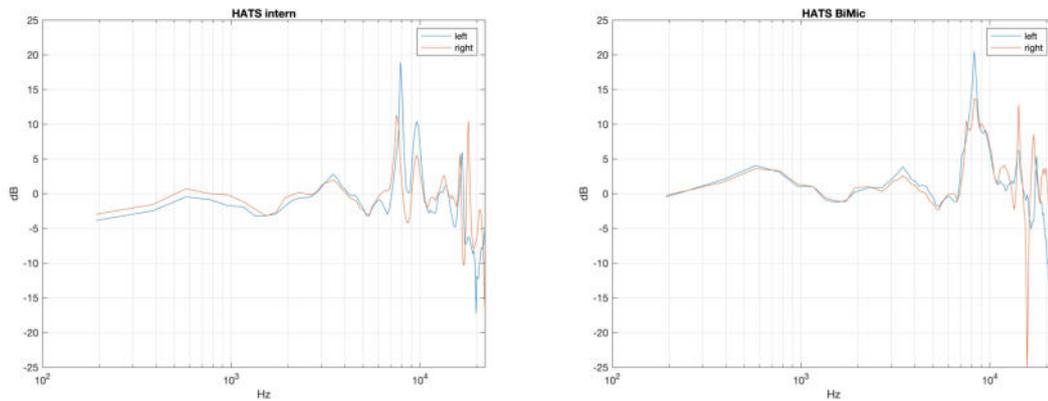


Abbildung 14 – Fehler der Kopfhörerwiedergabe im Vergleich zu Lautsprecherwiedergabe am KU100



(a) Fehler HATS Binauralmikrofon

(b) Fehler HATS internes Mikrofon

Abbildung 15 – Fehler der Kopfhörerwiedergabe im Vergleich zu Lautsprecherwiedergabe am HATS

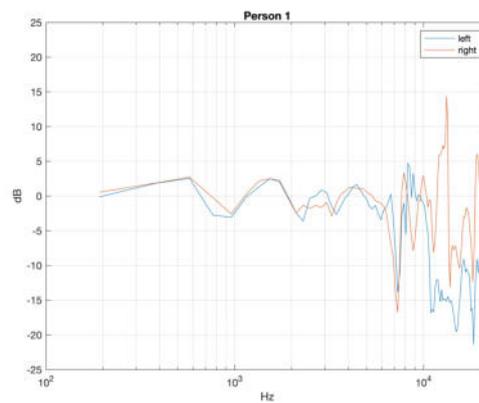


Abbildung 16 – Fehler bei Kopfhörerwiedergabe bei Testperson 1

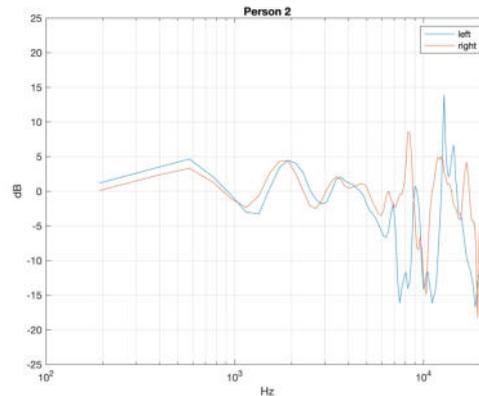


Abbildung 17 – Fehler bei Kopfhörerwiedergabe bei Testperson 2

### 3.3 Analyse der Messdaten

Da das Kopfhörer Zwei-Wege System auf den KU100 Kunstkopf angepasst wurde wird hier auch der geringste Fehler zur Lautsprecher Messung erwartet (vgl. 3.2). Dies ist auch der Fall, jedoch fallen schon bei dieser Abbildung 14 einige nicht zu vernachlässigende Messungenauigkeiten auf.

Bei der KU100-Kunstkopf Messung standen keine Markierungen zur Verfügung, an denen eine Orientierung beim Aufsetzenmöglich war, weshalb es auch zu höherer Varianz zwischen den Messungen (bei jeder Messung wurde der Kopfhörer neu aufgesetzt), welche in Abbildung 10 auch sichtbar sind, kam. Vergleicht man dazu die Messdaten der Personen beziehungsweise jene des HATS Kunstkopfes sind deutlich weniger Abweichungen erkennbar, weil Markierungen (HATS) beziehungsweise konnten die Testpersonen durch Feedback beim Aufsetzen gewährleisten, dass die Kopfhörer für die Messdurchgänge annähernd gleich sitzen (vgl. 3.1).

Da auf der Kopfhörer Prototyp auf den KU100 Kunstkopf abgestimmt wurde, würde man hier den geringsten Fehler erwarten (vgl. internes Mikrofon Abbildung 10). Dies ist auch der Fall, jedoch nur bis etwa  $6\text{kHz}$ . Nachher sind die Abweichungen zu groß um sinnvolle Aussagen ableiten zu können. Dieser Frequenzbereich ist jedoch, in Hinblick auf die Externalisierung nicht vernachlässigbar. Im Gegenteil ab dieser Frequenzereich ( $6\text{kHz}$  und höher) ist unter anderem in Bezug auf Pinna Reflexionen wichtig.

Die Messposition des Binauralmikrofons hat natürlich auch Auswirkungen auf den Betragsfrequenzgang im Vergleich zu der Messposition des in den Kunstkopf eingebauten Mikrofons der Kunstköpfe.

Wie zu erwarten ist bei der HATS-Kunstkopfmessung am intern verbauten Mikrofon eine Anhebung bei etwa  $3\text{kHz}$  sichtbar(vgl. Abbildung 11). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dem HATS-Kunstkopf ein Ohrkanal ausgeführt ist, welcher wie auch der menschliche Ohrkanal eine Resonanzfrequenz zwischen  $2 - 3\text{kHz}$  besitzt.

Falls die Messposition der Hauptgrund der nichtaussagekräftigen Messversuche war, könnte eine andere Messmethode gewählt werden. Florian Denk et al. erarbeiteten einen Messaufbau welcher die Messposition nahe ans Trommelfeld bringt [17]. Darüberhinaus wird von einen neuen Kopfhörerprototypen (vgl. Abbildung 18) eine verbesserte Externalisierung erhofft.

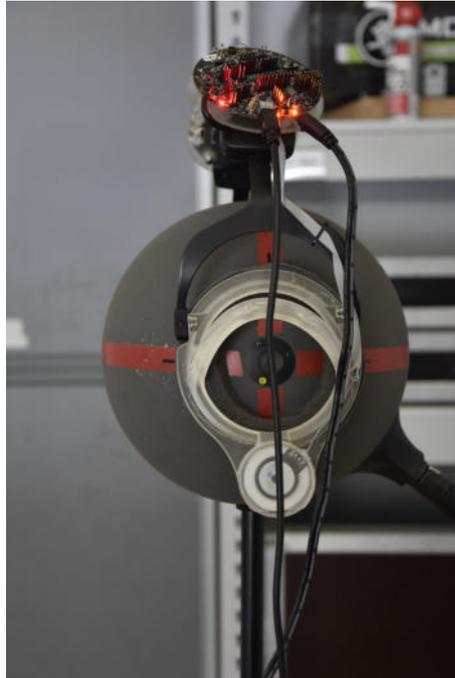


Abbildung 18 – Neuer Kopfhörerprototyp

## A Vorbereitung des Zwei-Wege Systems für den Hörversuch

Für den Kopfhörerprototypen mit einem dynamischen Treiber und vier Kleinstlautsprecher (vgl. Abbildung 18) soll beispielhaft die Signalaufbereitung für den Hörversuch, wie er in [13] durchgeführt wurde, gezeigt werden.

Um die einzelnen Lautsprecher zu entzerren wird zuerst ihre Sweepantwort aufgezeichnet. Dabei fanden Messungen sowohl mit einem Kunstkopf<sup>3</sup> als auch mit einem Kugelflächenmikrofon<sup>4</sup> statt (vgl. Abbildung 19).



(a) Messung mit Kunstkopf



(b) Messung mit Kugelflächenmikrofon

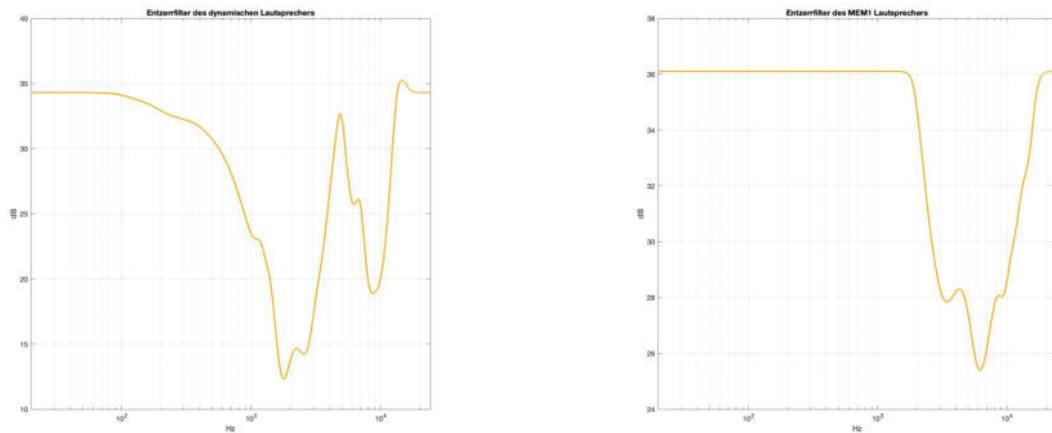
Abbildung 19 – Messung der Sweepantworten

Um die Entzerrfilter zu generieren wurde für den dynamischen Lautsprecher die Messung am Kunstkopf verwendet, da das Erhalten der Filterung durch den Kunstkopf hier erwünscht ist, während für die Kleinstlautsprecher dieser Einfluss nicht erforderlich ist, weshalb hier die Messung mithilfe des Kugelflächenmikrofones bevorzugt wurde. Aus den Betragsfrequenzgängen wird ein minimalphasiges, geglättetes Filter berechnet. Die dynamischen Lautsprecher werden breitbandig, von 100 bis 15500, während die Kleinstlautsprecher, aufgrund ihrer Bauform unter 2kHz kaum spielen, von 1950 bis 15500 entzerrt (vgl. Abbildung 20).

---

3. Neumann KU100

4. Schoeps KFM 6



(a) Entzerrfilter des dynamischen Lautsprechers

(b) Entzerrfilter eines Kleinstlautsprechers

Abbildung 20 – Entzerrfilter

In der DAW („digital audio workstation“), welche zur Steuerung verwendet wird, kann der dynamische Lautsprecher bis 1,95 kHz tiefpassgefiltert und die Kleinstlautsprecher ab 1,95 kHz hochpassgefiltert werden. Hier können die Lautsprecher auch noch entsprechend verzögert und die Pegel aufeinander abgestimmt werden. Zur Verifikation des Wiedergabesystems kann die am KU100 aufgenommenen Sweepantwort mit den berechneten Filter entzerrt werden. Vergleicht man selbige anschließend mit der bekannten Sweepantwort des KU100 sollten die Betragsfrequenzgänge strukturell in etwa übereinstimmen (vgl. Abbildung 21).

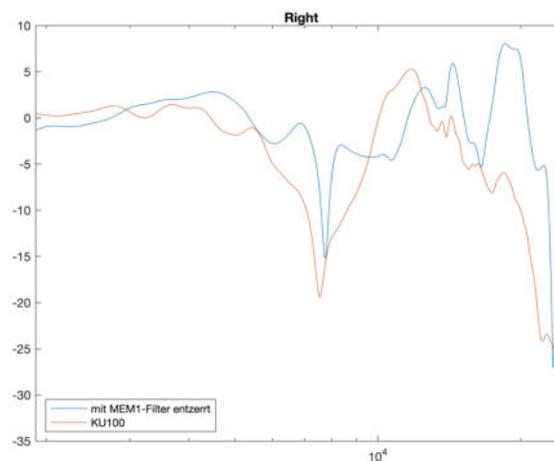


Abbildung 21 – Vergleich der mit Filter entzerrten KU100-Messung zum Betragsfrequenzgang des KU100

## Literatur

- [1] W. M. Hartmann and A. T. Wittenberg, “On the externalisation of sound images,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, pp. 3678–3688, jun 1996.
- [2] J. Catic, *Human Sound Externalization in Reverberant Environments*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2014.
- [3] S.-M. Kim and W. Choi, “On the externalization of virtual sound images in headphone reproduction: A wiener filter approach,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117, no. 6, pp. 3657–3665, 2005.
- [4] P. Zahorik, D. S. Brungart, and A. W. Bronkhorst, “Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research,” *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, vol. 91, pp. 409–420, 2005.
- [5] D. S. Brungart, N. I. Durlach, and W. M. Rabinowitz, “Auditory localization of nearby sources. ii. localization of a broadband source,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no. 4, pp. 1956–1968, 1999.
- [6] H. Møller, M. F. Sørensen, C. B. Jensen, and D. Hammershøi, “Binaural technique: Do we need individual recordings?,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, no. 6, pp. 451–469, 1996.
- [7] D. R. BEGAULT, E. M. WENZEL, and M. R. ANDERSON, “Direct comparison of the impact of head tracking, reverberation, and individualized head-related transfer functions on the spatial perception of a virtual speech source,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 49, pp. 904–916, oct 2001.
- [8] A. Kulkarni and H. S. Colburn, “Role of spectral detail in sound-source localization,” *Nature*, vol. 396, pp. 747–9, 12 1998.
- [9] H. G. Hassager, F. Gran, and T. Dau, “The role of spectral detail in the binaural transfer function on perceived externalization in a reverberant environment,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 139, no. 5, pp. 2992–3000, 2016.
- [10] N. Sakamoto, T. Gotoh, and Y. Kimura, “On -out-of-head localization- in headphone listening,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 24, no. 9, pp. 710–716, 1976.
- [11] W. Hartmann, “Localization of sound in rooms,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 74, pp. 1380–1391, nov 1983.
- [12] M. B. Gardner, “Proximity image effect in sound localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 43, no. 1, pp. 163–163, 1968.
- [13] H. Pomberger, A. Sontacchi, R. Höldrich, T. Gmeiner, and M. Lucchi, “Evaluating out-of-head localization of a dry source from the front reproduced with cue-preserving headphones,” *DAGA*, 2019.
- [14] D. Hammershøi and H. Møller, “Sound transmission to and within the human ear canal,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, no. 1, pp. 408–427, 1996.

- [15] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” in *Audio Engineering Society Convention 108*, Feb 2000.
- [16] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 3rd ed., 2009.
- [17] F. Denk, F. Brinkmann, A. Stirnemann, and K. Birger, “The pirate: an anthropometric earplug with exchangeable microphones for individual reliable acquisition of transfer functions at the ear canal entrance,” *Fortschritte der Akustik - DAGA, Rostock, Germany*, 2019.