

Diplomarbeit

---

# Untersuchung von Phantomschallquellen vertikaler Lautsprecheranordnungen

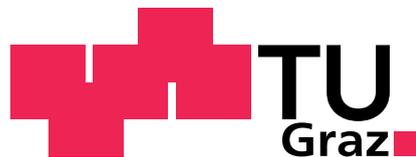
---

Florian Wendt

Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Institut für Elektronische Musik und Akustik

Technische Universität Graz



Betreuer:

Dr. Matthias Frank, Dr. Franz Zotter

Beurteiler:

Univ.Prof. Dr. Robert Höldrich

Graz, im Oktober 2013

## Eidesstattliche Erklärung<sup>1</sup>

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am \_\_\_\_\_

Datum

\_\_\_\_\_

Unterschrift

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, \_\_\_\_\_

Date

\_\_\_\_\_

Signature

---

<sup>1</sup>Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008

# Kurzfassung

Die Lokalisation einzelner Schallereignisse auf der Horizontalebene ist durch Auswertung interauraler Unterschiede von Pegel und Zeit (engl.: inter-aural time und inter-aural level differences, ITD bzw. ILD) möglich. Entlang einer beliebigen vertikalen Normalebene auf die interaurale Achse sind diese Unterschiede jedoch nur teilweise oder überhaupt nicht vorhanden. In solchen Fällen nützen Lokalisationsmechanismen im menschliche Gehör spektrale Unterschiede. Diese richtungsabhängigen spektralen Merkmale sind durch die Außenohrübertragungsfunktionen (engl.: head-related transfer functions, HRTFs) geprägt. Studien haben gezeigt, dass hierzu vor allem spektrale Änderungen oberhalb von 4kHz für die Lokalisation verantwortlich sind. Diese werden größtenteils durch die Filterwirkung der Ohrmuschel hervorgerufen.

Wird dasselbe Signal von zwei oder mehreren örtlich getrennten Lautsprechern wiedergegeben, so entsteht in der Lokalisation eine Phantomschallquelle, die zwischen den Lautsprechern wahrgenommen wird. Die Lokalisation von Phantomschallquellen horizontaler Lautsprecheranordnungen funktioniert analog zur Lokalisation einzelner Schallquellen, da die Überlagerung der HRTFs von linkem und rechtem Lautsprecher zu ähnlichen interauralen Unterschieden wie bei Einzelschallquellen führt.

Der Versuch einer Erklärung von Phantomschallquellen durch vertikale Lautsprecheranordnungen ist nicht mehr auf gleichartige Weise möglich. Die überlagerten HRTFs liefern zwar konsistente Ergebnisse im Bezug auf ILD und ITD von Einzelschallquellen, die spektralen Merkmale weichen jedoch von jenen der Einzelschallquelle ab. Trotzdem haben Studien gezeigt, dass vertikale Phantomschallquellen bei geeigneten Lautsprecheranordnungen existieren [Pul01, KA12].

Im Rahmen der Arbeit wird die Lokalisation vertikaler Phantomschallquellen genauer untersucht. Dazu werden in einem ersten Schritt bestehende Lokalisationsmodelle hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit untersucht und validiert.

Im nächsten Schritt wird ein Hörversuch durchgeführt. Dieser gibt Aufschluss über die Lokalisierbarkeit von Phantomschallquellen verschiedener vertikaler Lautsprecheranordnungen. Des Weiteren wird die Möglichkeit analysiert, Phantomschallquellen durch Pegelunterschiede innerhalb der Lautsprecherkonfiguration zu positionieren. Dieses Panoramisieren wird im Hörversuch untersucht, um eventuelle Gesetzmäßigkeiten aufzuzeigen.

Neben der quantitativen Betrachtungsweise der Richtung wird auch eine qualitative Beurteilung bezüglich Klangfarbe sowie Quellbreite und -höhe verschiedener Lautsprecherkonfigurationen durchgeführt. Diese soll Anstoß zur Diskussion neuer, geeigneter Lautsprecheranordnungen geben.

# Abstract

Localization is well studied for single sound sources in the horizontal plane, and inter-aural level and time differences (ILD and ITD) are proven as localization cues. For localization in vertical planes, and especially in the median plane, such cues are weak or absent. Nevertheless, the localization of elevated single sound sources is possible and other cues such as spectral properties play an important role complementing the inter-aural differences. These direction-dependent spectral cues are characterized by the head-related transfer functions (HRTFs). Previous studies showed that the human auditory localization mechanism is mainly sensitive to spectral cues above 4kHz, which are caused by the pinna.

A single phantom source is typically created by two loudspeakers playing the same signal. For the horizontal plane, well-known studies explain phantom source localization in terms of ILD and ITD. This is because the superposition of the HRTFs for the left and right loudspeaker yields inter-aural differences resembling those of a single sound source.

Phantom sources created by a vertical pair of loudspeakers arranged in the median plane largely deliver correct but indifferent ILD and ITD cues. However, the superimposed HRTFs of the loudspeaker pair do not necessarily yield a spectral shape that is sufficiently similar to one of a single sound source. Still a few studies exist which imply that localization of vertical phantom sources is possible.

Therefore, this thesis deals with the localization of vertical phantom sources. To begin with, existing localization models are applied to vertical phantom sources and their functional principle is analyzed and validated. As a next step, a listening test is performed to evaluate the localizability of phantom sources of different vertical loudspeaker setups. Furthermore, the positioning of the phantom source within the loudspeaker array by use of inter-channel level differences is examined in the listening test.

In addition to this quantitative approach, a qualitative evaluation of vertical phan-

tom sources is performed. Besides coloration, subjects were asked to evaluate the apparent source width and height of phantom sources created by different loudspeaker arrays. The results are meant to inspire the development of new and suitable loudspeaker arrays for a stable creation of vertical phantom sources.

# Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde im Studienjahr 2012/13 am Institut für Elektronische Musik und Akustik an der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz durchgeführt.

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen am Projekt beteiligten Personen für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima bedanken.

Ein besonderer Dank geht dabei an Dr. Matthias Frank sowie Dr. Franz Zotter für ihre hervorragende Betreuung und die gute Atmosphäre bei den Gesprächen, die mir einige fundamentale Erkenntnisse schenkten.

Mein Dank geht auch an Univ.Prof. Dr. Robert Höldrich, Leiter des Instituts für Elektronische Musik und Akustik für die Begutachtung meiner Diplomarbeit und für das professionelle und freundliche Gefühl, welches dieses Institut vermittelt.

Ein weiterer Dank geht an die Teilnehmer des Hörversuchs, deren Beitrag die Grundlage der Studien in dieser Diplomarbeit ist.

Meinen Studien- und Wohnungskollegen danke ich für die Unterstützung und Motivation sowie die schöne Zeit, die wir miteinander verbringen durften.

Nicht zuletzt möchte ich einen liebevollen Dank an meine Eltern und Familie aussprechen. Ohne ihr Vertrauen, ihre Unterstützung und ihre Geduld wäre mir dieser Weg in die wunderbare Welt des Wissens nicht möglich gewesen.

Danke.

Graz, im Oktober 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Lokalisationsmodelle</b>	<b>8</b>
2.1	Datenbankbasierte Lokalisationsmodelle . . . . .	9
2.2	Der interne Datensatz . . . . .	10
2.3	Die periphere Verarbeitungsstufe . . . . .	10
2.4	Die Vergleichsstufe . . . . .	11
2.5	Modell-Validierung . . . . .	13
2.5.1	Modell nach Blanco-Martin . . . . .	14
2.5.2	Modell nach Iida/Blanco-Martin . . . . .	15
2.5.3	Modell nach Langendijk/Bronkhorst . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Vorstudien</b>	<b>18</b>
3.1	ICLD vs. ICTD . . . . .	18
3.2	Validierung durch erste Hörversuche . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>24</b>
4.1	Lautsprecheranordnungen . . . . .	24
4.2	Lautsprecheraufbau . . . . .	25
4.3	Die Lokalisation . . . . .	27
4.3.1	Aufgabenstellung . . . . .	27
4.3.2	Anordnungen . . . . .	29
4.3.3	Bedingungen . . . . .	29
4.4	Die räumliche Ausdehnung des Hörereignisses . . . . .	30
4.4.1	Aufgabenstellung . . . . .	30
4.4.2	Anordnungen . . . . .	32
4.5	Klangfarbe . . . . .	32

<b>5</b>	<b>Versuchsergebnisse zur Lokalisation</b>	<b>35</b>
5.1	Validierung des Hörversuchs und der Versuchspersonen . . . . .	35
5.2	Linienförmige Lautsprecheranordnungen . . . . .	39
5.2.1	Lokalisation bei unterschiedlichen ICLDs . . . . .	42
5.2.2	Lokalisation bei dezentraler Hörposition . . . . .	46
5.2.3	Die laterale Lokalisation . . . . .	47
5.2.4	Zusammenfassung . . . . .	48
5.3	Lautsprechertripel . . . . .	48
5.3.1	Panoramisierung unter Verwendung von VBAP . . . . .	49
5.3.2	Die Lokalisation bei dezentraler Hörposition . . . . .	53
5.3.3	Die laterale Lokalisation . . . . .	54
5.3.4	Zusammenfassung . . . . .	55
5.4	Lautsprecherquadrupel . . . . .	55
5.4.1	Die Lokalisation bei dezentraler Hörposition . . . . .	56
5.4.2	Die laterale Lokalisation . . . . .	56
5.4.3	Panoramisierung unter Verwendung von Pegelunterschieden .	57
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	61
5.6	Übersicht . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Qualitative Attribute</b>	<b>66</b>
6.1	Räumliche Ausdehnung der Phantomschallquelle . . . . .	66
6.1.1	Vergleich der Lautsprecheranordnungen . . . . .	66
6.1.2	Einfluss des Center-Lautsprechers . . . . .	68
6.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	70
6.2	Klangfarbe . . . . .	70
6.2.1	Klangfarbenänderung durch Panoramisieren . . . . .	71
6.2.2	Klangfarbenänderung durch Kopfbewegung . . . . .	74
6.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Conclusio</b>	<b>77</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Motivation für die Studien in dieser Arbeit ist eine Diskussion, die sich auf der ICSA, der *International Conference on Spatial Audio* in Detmold, 2011, entsponnen hatte.

Konkret wurde nach einem Plenarvortrag über Ambisonics (Franz Zotter) die darin stets angenommene Möglichkeit zur vertikalen Steuerbarkeit eines Hörereignisses zwischen den Lautsprechern (einer Phantomschallquelle) kritisch hinterfragt.

Eine solche erschien auch in einer weiteren, nicht öffentlichen Diskussion mit den bekannten Wahrnehmungsmodellen nicht oder zumindest nur schwer erklärbar zu sein (Piotr Majdak), während eine solche Problematik in der Praxis bislang nicht benannt wurde.

In dieser Hinsicht sei den Kollegen Piotr Majdak und Robert Baumgartner vom Institut für Schallforschung in Wien Anerkennung ausgesprochen, die mit der Implementierung der in späterer Folge verwendeten Auditory Modeling Toolbox [Søn] mit vertikalem Richtungshörmodell [Bau12, LB02] sowie einem Datensatz von Außenohrübertragungsfunktionen wichtige Werkzeuge geliefert zu haben.

Interessanterweise wurde auf der selben Konferenz ein Nachweis einer solchen Steuerbarkeit im Posterbeitrag und Artikel von Sebastian Braun und Matthias Frank [BF11] erbracht. Es wurde bald klar, dass die Bearbeitung der Thematik offenbar damit nicht erledigt war. Insbesondere schien die praktische Umsetzung von Ambisonics, mathematisch und akustisch gesehen, unter nichtidealen Laborbedingungen Misstrauen zu erwecken.

Neben Ambisonics gibt es weitere Wiedergabesysteme, wie Dolby Atmos [Dol], AU-

RO 3D [Aur] oder 22.2 [HHO05], welche die Wahrnehmung durch vertikale Lautsprecheranordnungen erzeugter Phantomschallquellen als Grundlage voraussetzen. Die letzteren beiden Konzepte basieren dabei auf bewährten zweidimensionalen Stereophonieverfahren wie 5.1, welches hauptsächlich Pegeldifferenzen zwischen benachbarten Lautsprechern (ICLD, engl.: inter-channel level difference) verwendet, um Phantomschallquellen zu positionieren. Deren Neuerung liegt somit lediglich in der Erweiterung dieser Aufstellung in die dritte Dimension.

Im Folgenden wird nun auf die konzeptionellen Herausforderungen eingegangen, welche sich aufgrund der Physiologie des Gehörs für die Lokalisation eines Hörereignisses zwischen vertikalen Lautsprecheranordnungen ergeben.

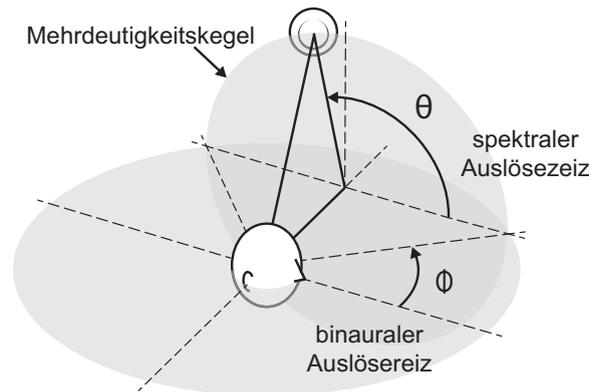
Untersuchen wir zunächst die Fähigkeit des Gehörs, sich in Bezug auf ein Schalleignis räumlich zu orientieren, d.h. aufgrund des wahrgenommenen Schalls ohne visuelle Unterstützung, die Lokalisierung einer Schallquelle vorzunehmen.

Dazu behilft sich das Gehör in erster Linie der Auswertung interauraler Reizunterschiede von Pegel und Zeit (engl.: inter-aural level difference, ILD; inter-aural time differences, ITD). Diese bestimmen die laterale Auslenkungen von Schallquellen. Ihr Beitrag zur Lokalisation ist frequenzabhängig: ITDs sind vor allem bei tiefen Frequenzen ( $f < 800\text{Hz}$ ) wirksam und ILDs bei hohen Frequenzen ( $f > 1600\text{Hz}$ ).

Diese als Duplex-Theorie [Ray07, WK92, MM02] bekannte Sichtweise hat jedoch den Nachteil, dass sie aus geometrischen Gründen keine eindeutige Quellposition ausdrücken kann. So kann z.B. keine Aussage getroffen werden, ob sich eine Schallquelle direkt vor, über oder hinter der Person befindet, da in allen Fällen die Werte für ITD und ILD gleich sind. Das führt uns zum bekannten Mehrdeutigkeitskegel der Lokalisation (engl.: cone of confusion, siehe Abbildung 1.1). Er beschreibt jene Oberfläche auf der interauralen Mittelachse, auf welcher näherungsweise alle Schalleinfallrichtungen mit gleiche interauralen Reizunterschieden liegen.

Entlang des Weges von Schallquelle zum Ohr wird der emittierte Schall durch Reflexionen und Beugungen an Ohrmuschel (Pinna), Kopf und Torso richtungsabhängig gefiltert. Diese richtungsabhängige Filterwirkung wird durch Außenohrübertragungsfunktionen (engl.: head-related transfer functions, HRTFs) beschrieben. Solche spektrale Änderungen ermöglichen dem Gehör aufgrund von Hörerfahrungen, trotz mangelnder interauraler Unterschiede, wahrgenommene Hörereignisse bestimmten Richtungen zuzuordnen. Dabei haben Studien gezeigt, dass vor allem spektrale Eigenschaften oberhalb von 4kHz dafür verantwortlich sind. Diese

spektralen Charakteristika sind hauptsächlich auf die Filterwirkung der Pinna zurückzuführen [Iid08, AAD01].



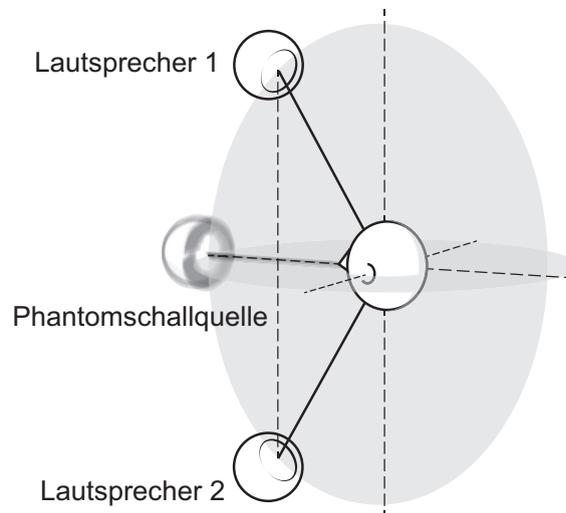
**Abbildung 1.1:** Auslöseerize zur Lokalisation einer Schallquelle.

Sind in einer akustischen Situation dieselben Schallquellen mehrfach und örtlich getrennt vorhanden, so kommt es zu einer Überlagerung der einzelnen Schallfelder am Ohr. Unter bestimmten Umständen kann eine solche Überlagerung der HRTFs dem Gehör eine künstliche Schallquelle, die sogenannten Phantomschallquelle, suggerieren. Diese Tatsache ist die Grundlage der Stereofonie.

Für Lautsprecherpaare auf der Horizontalebene (oder einer Parallelebene dazu) erklärt sich die Entstehung der Phantomschallquelle hinsichtlich ILDs und ITDs [PK01, Wen63]. Die Überlagerung der HRTFs der Lautsprecher führt zu interauralen Reizunterschieden, die jenen einer Einzelschallquelle im Bereich zwischen den Lautsprechern ähneln. Durch die Überlagerung weicht das Spektrum solcher horizontal erzeugter Phantomschallquellen jedoch deutlich vom Spektrum des Quellsignals ab. Besonders für hohe Frequenzen ( $f > 1.5\text{kHz}$ ) sind diese Unterschiede beträchtlich [Fra13a].

Eine andere Situation ergibt sich, wenn die Lautsprecher vertikal, also übereinander positioniert sind (siehe Abbildung 1.2). Ein frontales Lautsprecherpaar entlang der Medianebene befindet sich nämlich auf dem selben Mehrdeutigkeitskegel. Dabei führt eine Überlagerung der Schallfelder der beiden Lautsprecher zwar wiederum zu konsistenten Ergebnissen hinsichtlich ILD und ITD, beinhaltet jedoch keine relevanten Informationen. Auch das Spektrum der überlagerten HRTFs der Lautsprecher ist nicht identisch mit jenem einer Einzelschallquelle. Somit ist keiner der beiden Auslöseerize, welche vom Gehör nach unseren bisherigen Erkenntnissen zur Lokalisation von Schallquellen ausgewertet werden können, im Allgemeinen

deutlich vorhanden.



**Abbildung 1.2:** Existiert diese Phantomschallquelle?

Aufgrund dieser Tatsache kann man nicht davon ausgehen, dass sich mit vertikalen Lautsprecheranordnungen eine Phantomschallquellen erzeugen lassen muss.

Wie soll nun ein psychoakustisch verallgemeinerter Nachweis solcher Phantomschallquellen gelingen, ganz ohne die mathematische und modulare Vielschichtigkeit von Ambisonics?

In der Dissertation meines Betreuers Matthias Frank [Fra13a] wurde schon ein entscheidender Gedanke vorgelebt, bevor die Arbeit an dieser Diplomarbeit begann: Um vertikale Phantomschallquellen von 3D Ambisonics glaubhaft zu untersuchen, ist es besser, das Problem so einfach wie möglich zu behandeln - oder konkret vertikale Phantomschallquellen unter Verwendung von zwei und mehr Lautsprechern zu untersuchen.

Aber gibt es dazu nicht schon brauchbare Vorstudien?

Tatsächlich finden wir neben den genannten Artikel von Braun und Frank [BF11] weitere Anknüpfungspunkte in der Literatur, die auf die Möglichkeit der Erzeugung vertikaler Phantomschallquellen hindeuten.

Diese Studien liefern zwar in Bezug auf die Fragestellung der Existenz solcher Phantomschallquellen eine eindeutige Aussage, die quantitativen Attribute bezüglich deren Lokalisation sind jedoch teilweise widersprüchlich.

In weiterer Folge werden nun die bestehenden Studien mit Informationen über die

Existenz bzw. Wahrnehmung von Phantomschallquellen vertikaler Lautsprecheranordnungen angegeben. Dies soll Einblick in deren Motivation und Arbeitsmethoden geben.

Majdak brachte in der Diskussion um die vertikale Steuerbarkeit von Phantomschallquellen bei Ambisonics eine Studie von Bremen, van Wanrooij und van Opstal ein.

Diese Arbeit [BvWvO10] aus dem Bereich der Neurowissenschaften untersucht die Lokalisation eines akustischen Ziels gegen einen Hintergrund. Dazu wurden zwei unterschiedliche Signale (Zielsignal: breitbandige Burst-Signale, Hintergrundsignal: weißes gaußsches Rauschen) jeweils über Lautsprecher angeordnet entlang der Medianebene mit unterschiedlichen Positionen und ICLDs gleichzeitig dem Testhörer dargeboten.

Die Auswertung der Daten ergab, dass die Lokalisation abhängig von ICLD sowie dem Lautsprecheröffnungswinkel ist. So bestimmt ab einer ICLD von  $\Delta g = 5\text{dB}$  die Position des lautereren Signals die Lokalisation. Die Antworten der Versuchspersonen für einen Lautsprecheröffnungswinkel kleiner  $45^\circ$  waren unimodal-verteilt, wogegen für größere Öffnungswinkel die Antwortverteilung je ein Maximum an der Position der beiden Lautsprecher besaß.

Die Aufgabenstellung als solche (Lokalisation von Zielsignal oder akustischem Hintergrund) und zeitliche Einschränkungen der Richtungsbestimmung hatten hingegen keinen Einfluss. Diese Erkenntnisse sind vor allem für den Entwurf eines Hörversuches von Bedeutung.

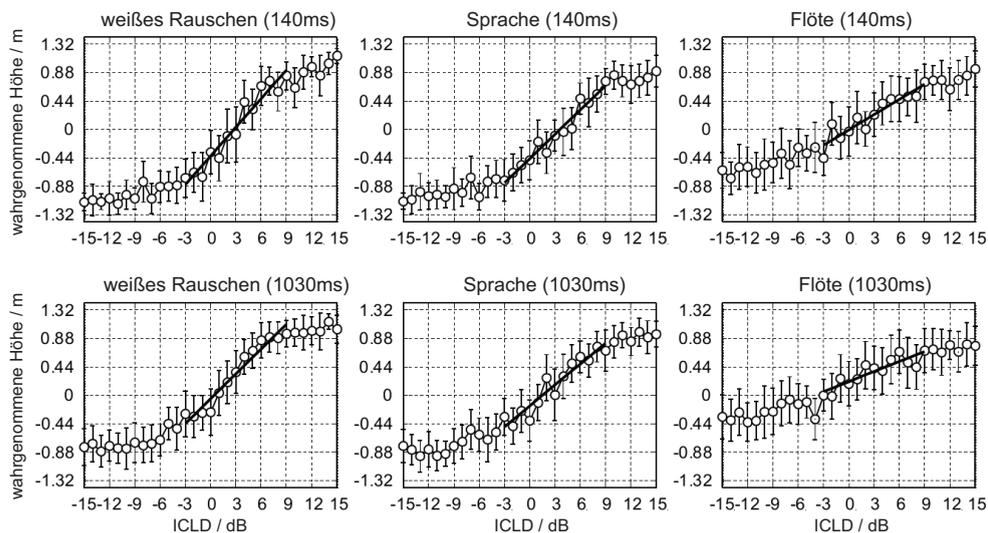
Bei der mathematischen Formulierung des dreidimensionalen Wiedergabeverfahrens VBAP (Vector-Base Amplitude Panning) beschäftigte sich Pulkki in [Pul01] unter anderem mit der Lokalisation von Phantomschallquellen unterschiedlicher dreieckförmiger und damit vertikaler Lautsprecheranordnungen.

Die Auswertung der durchgeführten Hörversuche ergab, dass die vertikale Lokalisation intersubjektiv variiert. Diese wichtige Erkenntnis ist nach Pulkki auf die individuellen Unterschiede der Feinstrukturen der Pinna zurückzuführen, welche die HRTFs im Bereich zwischen 3–5kHz so beeinflussen, dass auch die Lokalisation individuell erfolgt.

Kimura und Ando [KA12] führten einen Hörversuch durch, um die Lokalisation von Phantomschallquellen für ein vertikales Lautsprecherpaar zu untersuchen. Die Anordnung befand sich entlang der Medianebene in einem Abstand von  $r =$

5.5m und die Entfernung zwischen den beiden Lautsprechern betrug 2.64m. Dadurch ergibt sich ein Öffnungswinkel von  $\theta = 27^\circ$ . Untersucht wurden unterschiedliche Anregungssignale (weißes Rauschen, Sprache, Flöte) sowie Nachhallzeiten (140ms, 1030ms). Zusätzlich wurde versucht, die Phantomschallquelle mittels ICLDs innerhalb des Lautsprecherpaares zu panoramisieren.

Abbildung 1.3 zeigt die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle aller getesteten Konditionen. Es scheint, dass neben der Existenz der Phantomschallquelle im Mittel sogar ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen ICLD und ihrer Position für alle Konditionen besteht, zumindest im Bereich zwischen  $\Delta g = -3\text{dB}$  und  $9\text{dB}$ . Dieser kann in Form von Regressionsgeraden zusammengefasst werden.



**Abbildung 1.3:** Mittelwerte und 95% Konfidenzintervalle getesteter ICLDs für unterschiedliche Anregungssignale und Nachhallzeiten sowie Regressionsgeraden, aus [KA12].

Basierend auf diesen Regressionsgeraden wurde eine Lokalisationskurve erstellt, welche die wahrgenommene Elevation der Phantomschallquelle aufgrund von ICLDs vorhersagt. Dieses Modell ist jedoch lediglich auf diese bestimmte Lautsprecheranordnung und Sitzhöhe limitiert.

Eine Intersubjektivität der Lokalisation kann in [KA12] aufgrund der Zusammenfassung der Daten aller Versuchspersonen zu einem Datensatz nicht untersucht werden.

Weitere Hinweise zur Lokalisation von Phantomschallquellen können in Richtungs-

wahrnehmungsmodellen gefunden werden.

Basierend auf Hörversuchen zur Lokalisation wurden Prädiktoren entwickelt, welche die wahrgenommene Position einer Einzelschallquellen vorhersagen sollen.

Wir wissen, dass sich die horizontale Auslenkung einer Einzelschallquelle aufgrund der binauralen Auslösereize eindeutig bestimmen lässt. Damit kann mit einem binauralen Modell, dessen Eingangsgrößen die interauralen Unterschiede von Zeit und Pegel sind, der Azimutwinkel  $\phi$  der einzelnen Schallquelle auf einfache Weise bestimmt werden.

Es hat sich gezeigt, dass diese Modelle auch für horizontal erzeugte Phantomschallquellen gültig sind [Fra13a, PK01]. Dabei bilden die Unterschiede von Verzögerung und Pegel der beteiligten horizontal angeordneten Lautsprecher die Eingangsgrößen des Lokalisationsmodells.

Der Lokalisationsprädiktion elevierter Schallquellen wurde bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt, weswegen es lediglich wenige Ansätze zur Modellbildung gibt. Die Überprüfung der Gültigkeit bestehender Modelle für vertikal erzeugte Phantomschallquellen fehlt sogar vollends.

Somit liegt ein wichtiger Punkt dieser Arbeit in der Untersuchung der Anwendbarkeit bestehender Lokalisationsmodelle auf vertikal erzeugte Phantomschallquellen, wodurch wichtige Hinweise zu Lokalisationsmechanismen gewonnen werden können.

# Kapitel 2

## Lokalisationsmodelle

Allgemein werden Lokalisationsmodelle so gebaut, dass sie grundsätzliche Lokalisationsmechanismen des Gehörs und bekannte Versuchsdaten nachbilden können. Daher sind sie auch geeignet, ohne Durchführung eines Hörversuches, eine Abschätzung der wahrgenommenen Richtung einer Einzelschallquelle zu erhalten. Wie bereits erwähnt sind horizontale Lokalisationsmodelle auch auf Phantomschallquellen anwendbar und liefern dadurch einen wichtigen Hinweis psychoakustischer Phänomene zur Schallquellenlokalisierung.

Für unseren Untersuchungsgegenstand verschaffen wir uns zunächst einen Überblick über die bestehenden Lokalisationsprädiktoren elevierter Schallquellen.

Die Lokalisationsmodelle für elevierte Schallquellen können in zwei Gruppen unterteilt werden [Bau12].

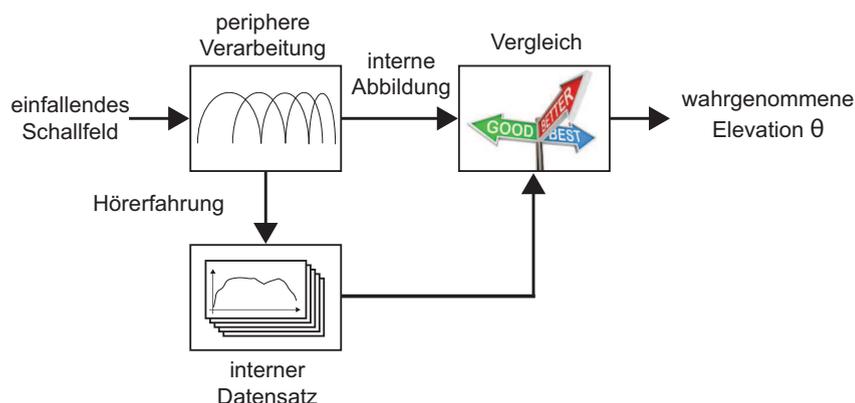
Erstere basiert auf dem Prinzip des maschinellen Lernens: Dabei werden künstliche neuronale Netzwerke mit Datensätzen trainiert, um die Aktivität einzelner Neuronen im auditorischen System zu modellieren [JSC00]. Dazu bedarf es einer großen Menge an Daten, um hinreichende Ergebnisse zu erhalten. Die eigentliche Schwierigkeit jedoch liegt in der Auswertung und Verallgemeinerung der erhaltenen Parameter. Ihr Einsatzgebiet liegt vor allem in der Identifizierung spektraler Auslösereize sowie der Extraktion von Inhalten aus verhaltenen Signalen, wodurch sie vor allem für medizinische Anwendungen von großer Bedeutung sind.

Die zweite Gruppe verfolgt einen funktionellen Ansatz. Ihr Ziel ist das Finden von Modellparametern, welche den physiologischen bzw. psychophysischen Lokalisationsparametern des Gehörs entsprechen.

## 2.1 Datenbankbasierte Lokalisationsmodelle

Unser Fokus liegt deshalb auf der letzteren Gruppe. Diese Modelle bilden die Stufen des Hörprozesses abstrakt nach, mit dem Ziel eine direkte Aussage über die Lokalisation aufgrund eines einfallenden Schallfeldes zu erhalten. Ihre grundlegende Struktur ist in Abbildung 2.1 dargestellt [BML13].

Der Kern der Modelle liegt in der räumlich-spektralen Zuordnung des einfallenden Schallfeldes unter Zuhilfenahme der hörspezifischen Datenbank, bestehend aus richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen. Grundlage dafür ist die Annahme, dass diese individuelle interne Datenbank (siehe Absatz 2.2) durch Hörerfahrung im Gehirn gespeichert wird ([HVRVO98, VWVO05]). Zur Erstellung der Datenbank der Modelle werden die individuellen HRTFs herangezogen, welche einen zusätzlichen peripheren Verarbeitungsschritt (siehe Absatz 2.3) erfahren, um den Übergang des Schalls vom Ohrkanal zu den inneren Haarzellen zu simulieren.



**Abbildung 2.1:** Grundlegende Struktur eines vereinfachten datenbankbasierten Lokalisationsmodells für elevierte Schallquellen.

Die räumlich-spektrale Zuordnung des Schallfeldes bildet das Herzstück des Modells. Um dieser Verarbeitungsstufe die höchste Aufmerksamkeit schenken zu können wird die laterale Richtung als fixiert angenommen. Dies bedeutet, dass die festgelegte azimutale Auslenkung der tatsächlichen Auslenkung des Hörereignisses entspricht. Dadurch beinhaltet die Datenbank des Lokalisationsmodells lediglich Übertragungsfunktionen des richtigen Mehrdeutigkeitskegels. Auch die Entfernungskodierung wird vernachlässigt, und die interauralen spektralen Unterschiede der HRTFs werden außer Acht gelassen, wodurch die gesamte Verarbeitung mo-

naural erfolgt.

## 2.2 Der interne Datensatz

Wie bereits erwähnt bilden die individuellen HRTFs die Basis des internen Datensatzes. Zur Validierung der Modelle wurde der frei zugängliche HRTF-Datensatz des Instituts für Schallforschung<sup>1</sup> (ISF) in Wien herangezogen. Zum Zeitpunkt der Modellierung beinhaltete diese die gemessenen HRTFs von 66 Versuchspersonen, wobei stetig neue dazu kommen und ihre Anzahl auf mittlerweile 87 gestiegen ist. Für die Bestimmung der individuellen HRTFs wird ein Mikrofon in den Gehörgang der Versuchsperson platziert, wodurch dieser blockiert wird. Die Versuchsperson selbst befindet sich während der Messung im Zentrum einer Sichel, welche in 2.5°-Schritten horizontal relativ zur Versuchsperson gedreht werden kann. Auf der Sichel befinden sich in einer Elevation von  $\theta = -30^\circ$  bis  $80^\circ$  insgesamt 22 Lautsprecher. Daraus ergibt sich eine horizontale Auflösung von  $5^\circ$  mit einer Lücke zwischen  $70^\circ$  und  $80^\circ$ . Somit werden insgesamt 1550 Richtungen für beide Ohren vermessen, welche zusammen den HRTF-Datensatz einer Person ergeben.

## 2.3 Die periphere Verarbeitungsstufe

Das Ziel der peripheren Verarbeitungsstufe ist die Modellierung der Physiologie des Ohrkanals, des Mittelohrs und der Cochlea bezüglich der Verarbeitung spektraler Auslösereize. Eingangsgrößen dieser Vorverarbeitung sind die individuellen HRTFs, die bereits die positionsabhängige Filterung des einfallenden Schallfeldes durch Torso, Kopf und Außenohr beschreiben.

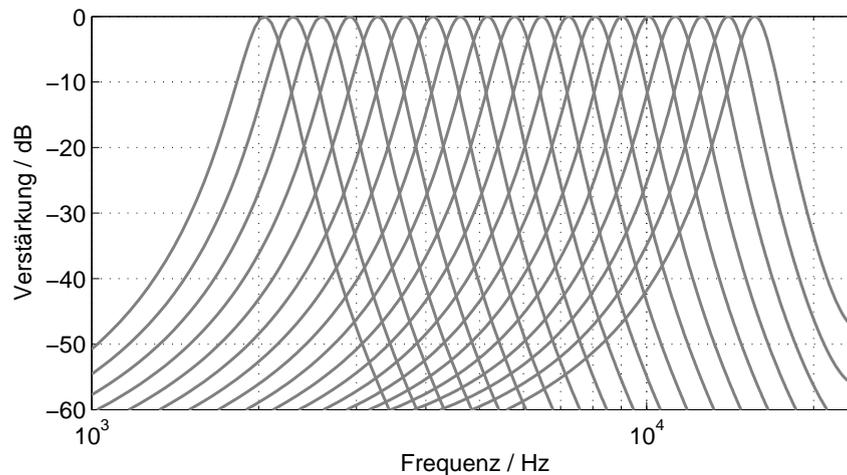
Je nach Einsatzgebiet wurden mehr oder weniger komplexe Modellierungen dieser Verarbeitungsstufe entwickelt. Ein Hauptaugenmerk erfährt hierbei die Nachbildung der Arbeitsweise der Cochlea. Der Übergang des Schalls von einer Welle in neuronale Impulse, welche vom Gehirn weiterverarbeitet werden, geschieht entlang der Basilarmembran. Diese sitzt in der Cochlea und führt eine ortsabhängige Frequenzaufteilung des Schalls durch. Die Frequenzauflösung der Basilarmembran ist dabei keineswegs unendlich: Vielmehr entspricht das periphere auditorische Sys-

---

<sup>1</sup>Online: <http://www.kfs.oeaw.ac.at/hrtf>, Stand: Mai 2013

tem einer Kaskade von Bandpass-Filtern mit unterschiedlichen Mittenfrequenzen, deren Bandbreite als *kritische Bandbreite* bezeichnet wird [Fle40]. Die Bandbreite dieser kritischen Bänder steigt dabei mit deren Mittenfrequenz. Zur effizienten Modellierung dieser Kaskade an Bandpassfiltern hat sich die Verwendung der Gammaton-Filterbank (GT-Filterbank) bewährt ([PNSHR87], [HO98]).

Die Abbildung 2.2 zeigt die Betragsfrequenzgänge einer GT-Filterbank, bestehend aus 18 Bändern.



**Abbildung 2.2:** Betragsfrequenzgänge einer GT-Filterbank, bestehend aus 18 Bändern im Bereich von 2 – 16kHz.

## 2.4 Die Vergleichsstufe

Die Herausforderung aller Modelle liegt in der Realisierung der Vergleichsstufe, welche aufgrund der Eingangsgröße (Übertragungsfunktion der zu bestimmenden Elevation) mithilfe der internen Datenbank (vorverarbeiteter HRTF-Datensatz) auf den Elevationswinkel  $\theta$  schließt (siehe Abbildung 2.1).

Im Folgenden werden die untersuchten Modelle vorgestellt sowie auf die Funktionsweise der jeweiligen Vergleichsstufe eingegangen.

**Blanco-Martin.** Ein sehr einfaches Modell zur Prädiktion elevierter Schallquellen stammt aus Blanco-Martin *et al.* [BM<sup>+</sup>11]. Grundlage dieses Modells ist ein Algorithmus zur Minimierung der kleinsten Fehlerquadrate (engl.: Least Squares Error,

LSE), welcher gleichzeitig die Vergleichsstufe darstellt. Der LSE-Algorithmus ist wie folgt definiert:

$$l^2(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_k [H_{PSQ,k} - H_{HRTF,k}(\theta)]^2}{\sum_k H_{PSQ,k}^2}}, \quad (2.1)$$

wobei  $H_{PSQ}$  der Betrag der Übertragungsfunktion der Eingangsgröße und  $H_{HRTF}$  jener der HRTFs der Datenbank unterschiedlicher Elevationswinkel  $\theta$  ist. Der Index  $k$  definiert das jeweilige GT-Band und die geschätzte Elevation wird aufgrund des Minimums der Funktion  $l^2(\theta)$  bestimmt.

**Iida/Blanco-Martin.** Neben dem LSE-Modell bietet Blanco-Martin in [BM<sup>+</sup>11] einen weiteren Ansatz zur Modellbildung, welcher auf der Auswertung spektraler Minima und Maxima der HRTFs basiert.

Die Grundlage dieses Modells finden wir in der Arbeit von Iida [Iid08], in welcher der Beitrag lokaler Minima und Maxima der HRTFs zur Lokalisation untersucht wurde. Demnach ermöglichen künstliche HRTFs, die lediglich aus den ersten beiden spektralen Kerben im Bereich von 4kHz – 10kHz, sowie der ersten Spitze im Bereich von 7kHz – 9kHz bestehen, fast die selbe Lokalisationsgenauigkeit wie gemessene HRTFs. Zusätzlich besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den spektralen Merkmalen und dem Elevationswinkel  $\theta$ . Der Kern des Modells liegt somit in der Detektion lokaler Minima und Maxima der HRTFs, deren Mittenfrequenzen Aufschluss über die wahrgenommene Elevation geben soll.

**Langendijk/Bronkhorst.** Die Grundlage des dritten und letzten Modells ist wiederum der Vergleich zweier HRTF-Spektren. Dazu wird ein von Zakaruskas und Cynedar [ZC93] inspirierter Differenzierer verwendet. Die Ähnlichkeit der HRTFs wird nach Langendijk und Bronkhorst mittels Kreuzkorrelation oder des euklidischen Abstandes der HRTFs bestimmt. Daraus ergibt sich ein Ähnlichkeitsindex, aus dem die Lokalisationswahrscheinlichkeit bestimmt wird. Dieses Modell ist Bestandteil der Auditory Modeling Toolbox für MATLAB [Søn]. Trotz der bestehenden Erweiterungen des Modells (siehe [Bau12, BML13]), welche im Laufe der Zeit eingeführt wurden, wird in diesem Zusammenhang das Standardmodell verwendet.

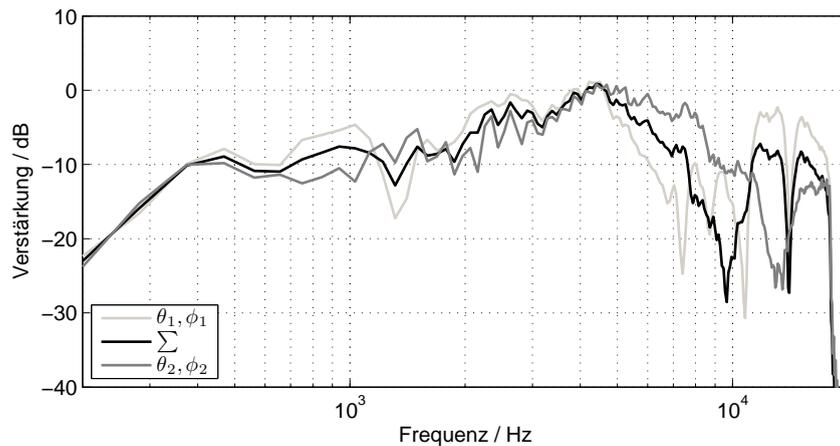
## 2.5 Modell-Validierung

Um nun eine Aussage über die Funktionsweise der aufgeführten Modelle zu erhalten, werden diese zur Untersuchung auf eine vertikal erzeugte Phantomschallquelle angewendet.

Wie bereits in der Einleitung (Kapitel 1) erwähnt, werden die Schallfelder einzelner Lautsprecher am Ohr linear überlagert. Zur Simulation dieser Überlagerung und zur Generierung der Eingangsgrößen der Lokalisationsmodelle werden die binauralen Impulsantworten (engl.: head-related impulse response, HRIR)  $h_{\theta_1, \phi_1}$  bzw.  $h_{\theta_2, \phi_2}$  für die entsprechenden Lautsprecherpositionen addiert. Diese berechnen sich aus den HRTFs und wir erhalten mit  $h_{PSQ}(k)$  die HRIR der simulierten Phantomschallquelle:

$$h_{PSQ}(k) = \frac{1}{2} \sum_k h_{\theta_1, \phi_1}(k) + h_{\theta_2, \phi_2}(k). \quad (2.2)$$

Die Erzeugung der Phantomschallquelle entlang der Medianebene ( $\phi_{1,2} = 0^\circ$ ) vermeidet den Einfluss binauraler Reizunterschiede. Der Elevationswinkel der simulierten Lautsprecher beträgt dabei  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ . Abbildung 2.3 zeigt die HRTFs des linken Ohres der ersten Versuchsperson des ISF-Datensatzes (VP1) für  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$  und  $\phi_{1,2} = 0^\circ$  sowie deren Überlagerung.

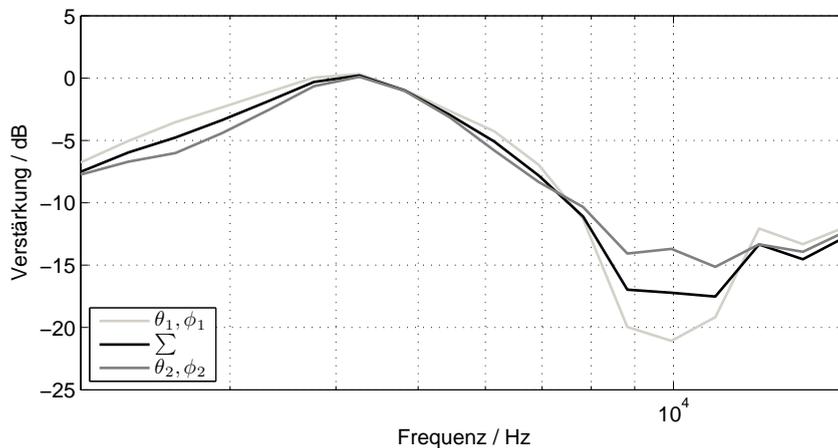


**Abbildung 2.3:** Betragsfrequenzgang der HRTFs des linken Ohres der VP1 für  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$  und  $\phi_{1,2} = 0^\circ$  sowie deren Überlagerung, normiert auf den Betrag bei 4kHz.

Daraus ist zu erkennen, dass vor allem im Frequenzbereich oberhalb von 4kHz

große spektrale Unterschiede der realen HRTFs zu finden sind.

Der nächste Schritt liegt in der Vorverarbeitung der HRTFs. Die Auditory Modeling Toolbox schlägt hierzu die Verwendung einer GT-Filterbank mit 18 Bändern im Bereich zwischen 2kHz bis 16kHz vor, deren Bandbreite der kritischen Bandbreite entspricht. Abbildung 2.4 zeigt die aus Abbildung 2.3 bekannten HRTFs nach der peripheren Verarbeitung.



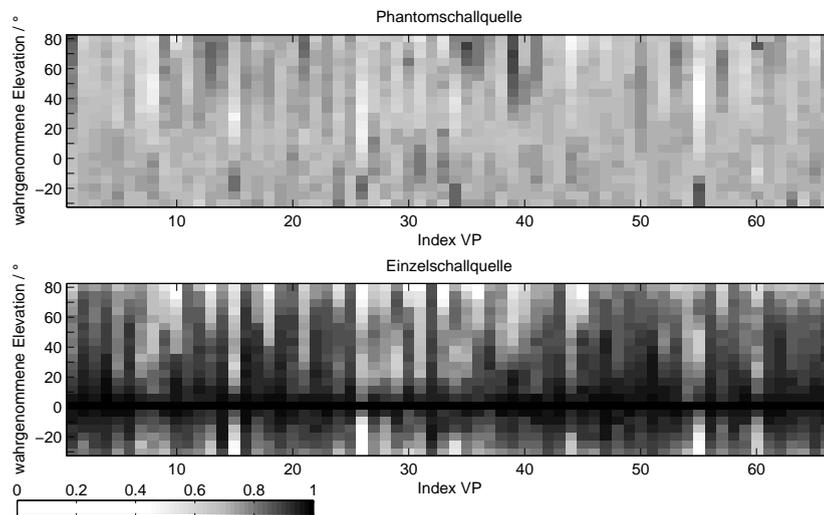
**Abbildung 2.4:** Betragsfrequenzgang der mittels GT-Filterbank gefilterten HRTFs des linken Ohres der VP1 für  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$  und  $\phi_{1,2} = 0^\circ$  sowie deren Überlagerung, normiert auf den Betrag bei 4kHz.

Um die Vergleichbarkeit der Modelle zu gewährleisten, wird der periphere Verarbeitungsschritt aller Modelle mittels GT-Filterbank, bestehend aus 18 Bändern (siehe Abbildung 2.4), realisiert. Insgesamt werden 66 überlagerte HRTFs des linken Ohres erzeugt, welche eine Phantomschallquelle, generiert durch 2 vertikale Lautsprecher mit  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ , simulieren. Im Vergleich dazu wird das Modell zusätzlich zur Vorhersage der Lokalisation einer Einzelschallquelle direkt vor dem Hörer ( $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$ ) eingesetzt.

## 2.5.1 Modell nach Blanco-Martin

Die Abbildung 2.5 zeigt die Lokalisationswahrscheinlichkeiten für jede Versuchsperson bei Anwendung des LSE-Modells nach Blanco-Martin *et al.* [BM<sup>+</sup>11] auf eine Phantomschallquelle und eine Einzelschallquelle.

Das Modell liefert weder konsistente noch präzise Aussagen über die Existenz



**Abbildung 2.5:** Ergebnisse des Lokalisationsmodells nach Blanco-Martin [BM<sup>+</sup>11] angewendet auf eine Phantomschallquelle generiert von vertikaalem Lautsprecherpaar ( $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ , oben) und auf eine Einzelschallquelle ( $\theta = 0^\circ$ , unten).

bzw. Lokalisation einer vertikal erzeugten Phantomschallquelle. Im Vergleich dazu liefert die Anwendung für Einzelschallquellen brauchbare Ergebnisse.

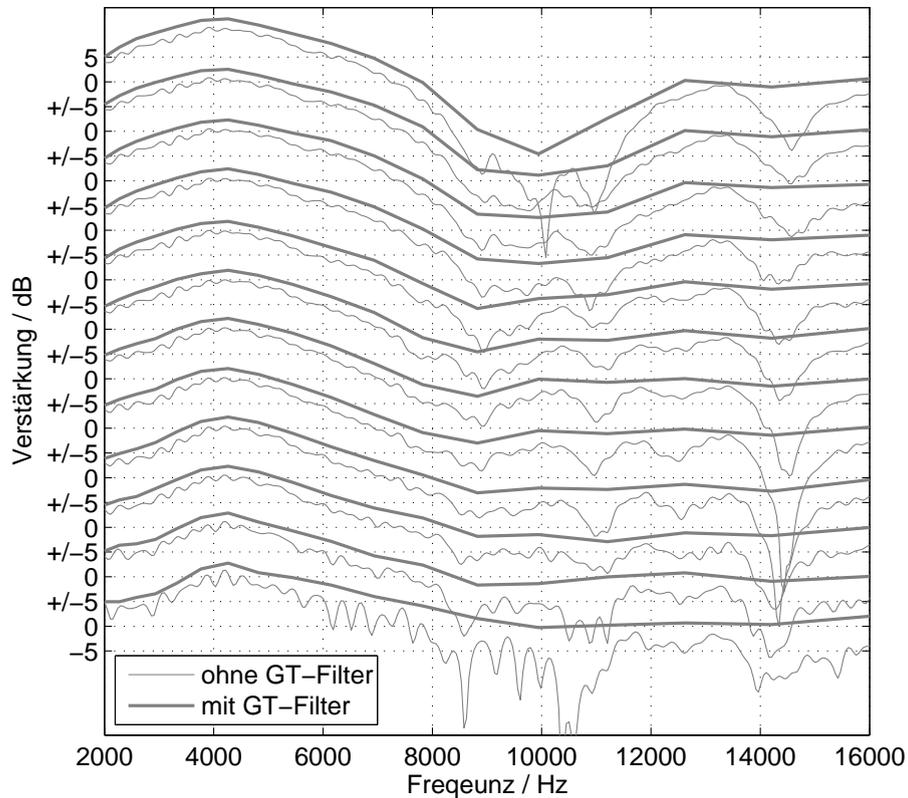
## 2.5.2 Modell nach Iida/Blanco-Martin

Die Herausforderung der Realisierung des Modells nach Iida/Blanco-Martin [BM<sup>+</sup>11] liegt in der Auswahl der richtigen Extrema. Zusätzlich müssen deren Verläufe in Abhängigkeit vom Elevationswinkel  $\theta$  bestimmt werden. Abbildung 2.6 zeigt den internen Datensatz für unterschiedliche Elevationswinkel der ersten Versuchsperson aus dem Datensatz.

Die Abbildung zeigt, dass durch die Vorverarbeitung die Spektren soweit geglättet wurden, dass eine exakte Bestimmung lokaler Minima und Maxima sehr schwierig wird.

Doch auch ohne GT-Filterbank müssen die HRTF-Datensätze individuell auf spektrale Eigenheiten hin untersucht werden, da der Einsatz von Algorithmen zum Auffinden lokaler Extrema keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Zudem sind die Verläufe der Spitzen und Kerben nicht immer monoton über die Elevation, weshalb die Ergebnisse des Modells sehr stark von den HRTFs abhängen.

Dieses Modell scheint somit für eine Realisierung mittels eines Algorithmus nicht

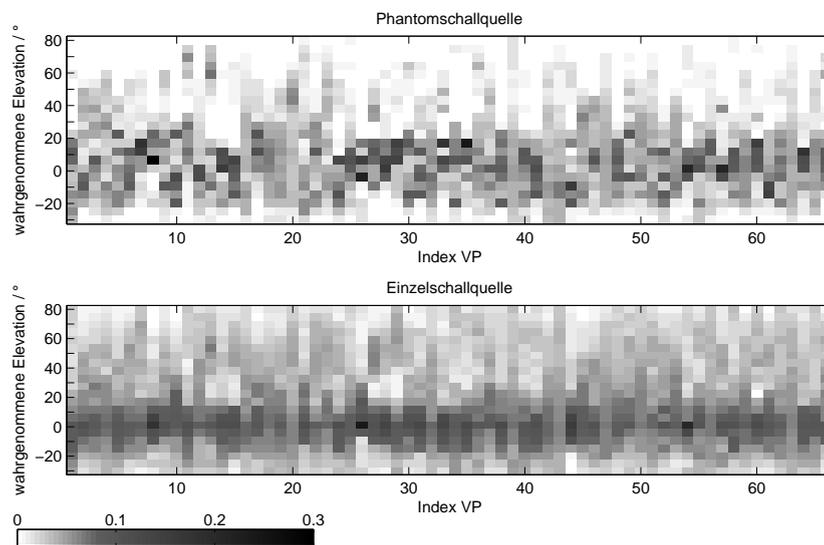


**Abbildung 2.6:** Vergleich der HRTFs des linken Ohres von VP1 verschiedener Elevationswinkel  $\theta$  vor und nach der peripheren Verarbeitungsstufe.

geeignet zu sein und wird deshalb nicht weiter untersucht.

### 2.5.3 Modell nach Langendijk/Bronkhorst

Die Abbildung 2.7 zeigt die erhaltenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen für jede Versuchsperson bei Anwendung des Modells nach Langendijk/Bronkhorst [LB02]. Der Frequenzbereich wurde auf einen Bereich von 4kHz–16kHz beschränkt. Im Vergleich zum LSE-Modell nach Blanco-Martin (siehe Abbildung 2.5), scheint für die meisten Versuchspersonen eine Phantomschallquelle lokalisierbar zu sein. Die wahrgenommene Elevation weist jedoch eine große Streuung zwischen den Versuchspersonen im Bereich zwischen der Lausteprecheranordnung ( $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ ) auf.



**Abbildung 2.7:** Ergebnisse des Lokalisationsmodells nach Langendijk/Bronkhorts [LB02] angewendet auf eine Phantomschallquelle generiert von vertikalem Lautsprecherpaar ( $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ , oben) und auf eine Einzelschallquelle ( $\theta = 0^\circ$ , unten).

Die Ergebnisse der Lokalisationsmodelle können wir nun mit jenen aus Hörversuchen vergleichen (siehe Kapitel 1). Dabei verdeutlicht Abbildung 2.7, dass das von Langendijk/Bronkhorst entwickelte Modell zumindest Pulkkis Aussage in [Pul01] bestätigt, wonach die Lokalisation vertikal erzeugter Phantomschallquellen möglich ist, aber höchst subjektiv bleibt.

# Kapitel 3

## Vorstudien

Zur Überprüfung der Erkenntnisse der angeführten Studien in Kapitel 1, und um eine eindeutige Aussage über die Existenz und Wahrnehmung von Phantomschallquellen vertikaler Lautsprecheranordnungen zu ermöglichen, bedarf es eines Hörversuchs. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Vorversuchen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Die Erkenntnisse daraus sind Grundlage des in weiterer Folge realisierten Hörversuches.

### 3.1 ICLD vs. ICTD

Neben der ICLD werden in der Stereophonie auch Laufzeitunterschiede zwischen den Lautsprechern (ICTD, engl.: inter-channel time difference) verwendet, um Phantomschallquellen innerhalb der horizontalen Lautsprecheranordnung beliebig zu positionieren. Und auch für vertikale Lautsprecheranordnungen scheint dies zumindest für ICLDs möglich zu sein [KA12, Pul01].

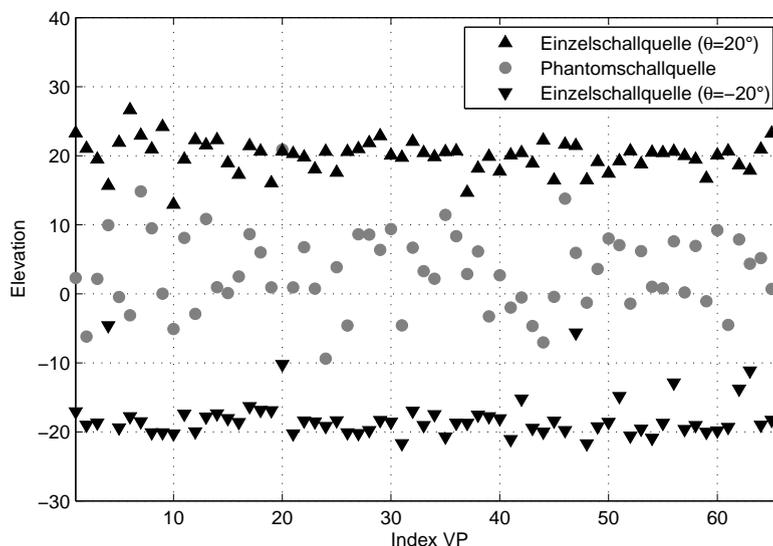
Bei der Validierung des Lokalisationsmodells nach Langendijk/Bronkhorst wurde bereits die Annahme der individuellen Wahrnehmung elevierter Phantomschallquellen aus [Pul01] bestätigt. Im nächsten Schritt wird das Modell für unterschiedliche ICLDs angewendet, um ein Panoramisieren der Phantomschallquelle zu simulieren. Die Ergebnisse werden mit der aus [KA12] erstellten Lokalisationskurve verglichen.

Das datenbankbasierte Lokalisationsmodell nach Langendijk/Bronkhorst berechnet für jeden HRTF-Datensatz der internen Datenbank eine Lokalisationswahr-

scheinlichkeit. Um nun eine Lokalisationskurve erstellen zu können, wird das Modell dahin modifiziert, dass die Ausgangsgröße lediglich *eine* Antwort (wahrgenommene Elevation  $\theta_w$ ) pro Datensatz liefert. Lindemann [Lin86] schlägt für horizontale Lokalisationsmodelle die Verwendung des Schwerpunkts der interauralen Kreuzkorrelationsfunktion vor. Für vertikale Lokalisation liefert der Schwerpunkt jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse, weshalb sein Vorschlag durch Einführung des Exponenten  $n$  erweitert wird. Gleichung 3.1 zeigt die Berechnung der wahrgenommenen Elevation  $\theta_w$  aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $p$  unter Zuhilfenahme des Exponenten  $n$ :

$$\theta_w = \frac{\sum_{\theta=-30^\circ}^{80^\circ} \theta p^n}{\sum_{\theta=-30^\circ}^{80^\circ} p^n}. \quad (3.1)$$

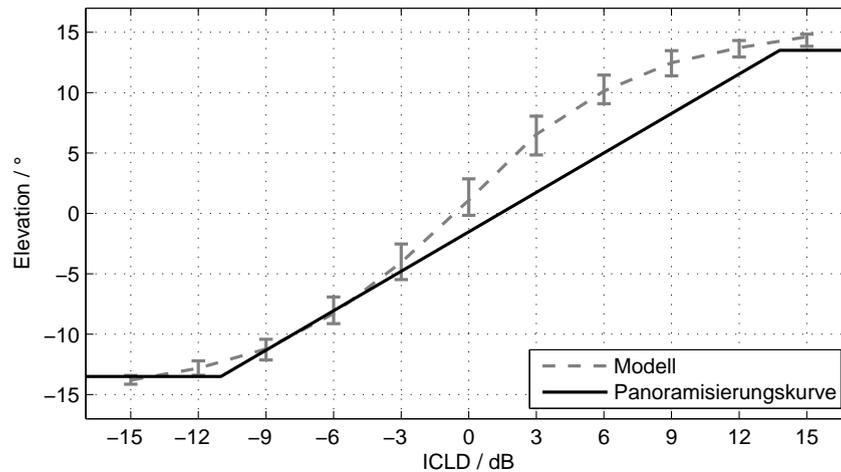
Zur Auswahl eines geeigneten Exponenten  $n$  werden dem Modell HRTFs mit bekannten Elevationen übergeben und dieser soweit verändert, bis die Modellantworten mit den Erwartungen übereinstimmen. Abbildung 3.1 zeigt die prognostizierte Lokalisation für einzelne Schallquellen bei  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ , sowie eine durch beide Quellen erzeugte Phantomschallquelle, entlang des ISF HRTF-Datensatzes.



**Abbildung 3.1:** Prognostizierte Elevation unter Verwendung des modifizierten Schwerpunktes mit  $n = 8$  angewendet auf Einzelschallquellen bei  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$  sowie einer Phantomschallquelle erzeugt durch ein vertikales Lautsprecherpaar bei  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$ .

Durch diese Modifikation ist es nun möglich eine Lokalisationskurve für verschiedene ICLDs zu erzeugen. In Abbildung 3.2 wird die Lokalisationskurve aus dem

modifizierten Modell nach Langendijk/Bronkhorst mit der Panormisierungskurve aus [KA12] verglichen.



**Abbildung 3.2:** Vergleich der Lokalisationskurve des modifizierten Modells nach Langendijk/Bronkhorst (Median und 95%-Konfidenzintervalle,  $n = 12$ ) sowie der Panoramisierungskurve aus [KA12].

Es wird ersichtlich, dass das modifizierte Modell durchaus in der Lage ist, eine Lokalisationskurve zu prognostizieren, wenngleich die Panoramisierungskurve von Kimura nicht überall genau getroffen wird.

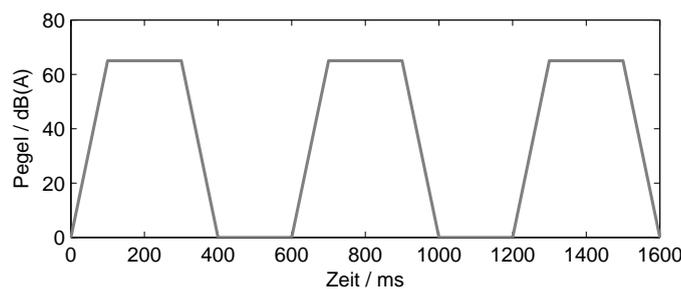
Der zweite mögliche Steuerparameter im Hinblick auf die Lokalisation einer Phantomschallquelle ist die ICTD. Über ihre Verwendung bei vertikal positionierten Lautsprechern schweigen sich jedoch alle bisher untersuchten Studien aus.

Einen ersten Hinweis dazu können wir in der Anwendung des Modells nach Langendijk/Bronkhorst finden. Ähnlich wie für ICLDs wurde versucht durch ICTDs eine Lokalisationskurve zu erstellen. Trotz der Verwendung unterschiedlicher Grenzfrequenzen sowie der Variation des Exponenten  $n$ , liefert das Modell keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

## 3.2 Validierung durch erste Hörversuche

Diese ersten Indizien wurden mithilfe eines Hörversuchs validiert. Dabei wurde versucht eine Phantomschallquelle unter Verwendung von ICLDs und ICTDs zu posi-

tionieren. Der Versuchsaufbau bestand aus zwei Lautsprecher auf der Medianebene bei  $\theta_{1,2} = \pm 20^\circ$  (siehe Abbildung 1.2). Für jeden Stimulus wurde rosa Rauschen in Form von Rauschbursts bei einer Lautstärke von 65dB(A), gemessen an der Abhörposition, von den Lautsprechern wiedergegeben. Rosa Rauschen hat sich für die Lokalisation elevierter Schallquellen als Anregungssignal bewährt [CT03]. Die Rauschbursts hatten eine Länge von  $3 \times 400\text{ms}$ , wobei deren Amplitude über eine Dauer von 100ms ein- bzw. ausgeblendet wurde. Die Pausen zwischen allen Bursts betragen 200ms. Abbildung 3.3 zeigt die schematische Darstellung des Amplitudenverlaufes des Burstsignals.



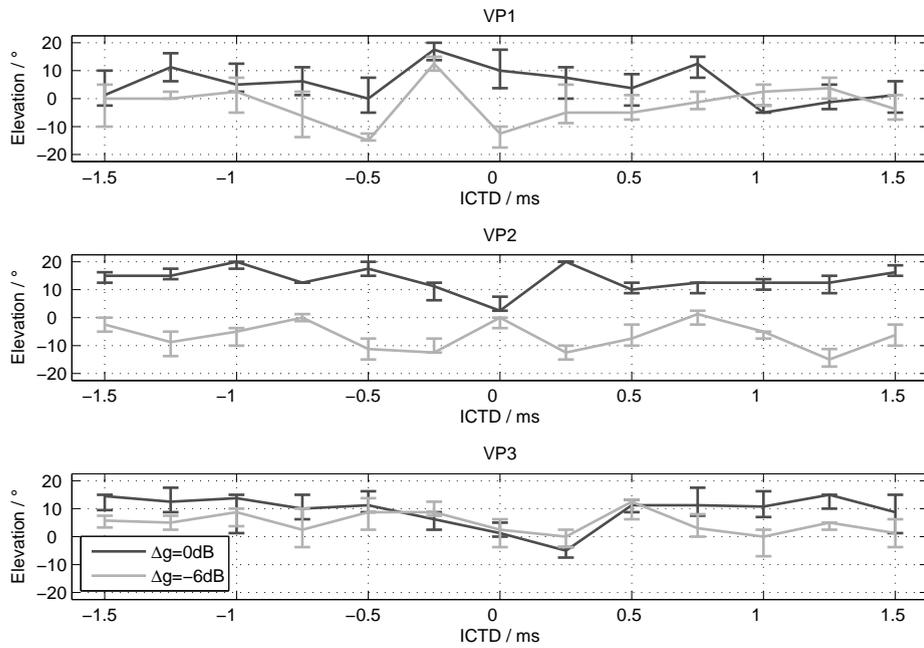
**Abbildung 3.3:** Amplitudenverlauf des Anregungssignals.

Insgesamt wurden 9 verschiedene ICTDs von  $-1.5\text{ms}$  bis  $1.5\text{ms}$  in  $0.25\text{ms}$ -Schritten für eine ICLD von  $0\text{dB}$  bzw.  $-6\text{dB}$  bzgl. des oberen Lautsprechers ( $\theta = 20^\circ$ ) eingestellt. Dies führt zu 18 Teststimuli, welche 4 mal in zufälliger Reihenfolge wiederholt wurden. Jede Versuchsperson hatte somit 72 Richtungen zu bestimmen. Die wahrgenommene Elevation wurde anhand einer Skala, welche zwischen den beiden Lautsprechern angebracht war, angegeben. Die Skala war in  $8 \times 5^\circ$ -Schritten unterteilt, wobei auch Zwischenschritte genannt werden konnten.

Die sich daraus ergebenden Lokalisationskurven für jede der 3 Versuchspersonen sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

Um Panoramisierung zu ermöglichen, muss die Lokalisationskurve monoton verlaufen. Betrachten wir die Abbildung 3.4, so sehen wir, dass die Lokalisationskurven bei Verwendung von ICTD für keine der Versuchspersonen monoton sind. Zusätzlich scheinen die Kurven keinem bestimmten Verlauf zu folgen.

Der Pegelunterschied hat hingegen sehr wohl einen Einfluss auf die Position der Phantomschallquelle. Seine Auswirkung ist unabhängig von der Laufzeitverzögerung der Lautsprechersignale und ist für jede Versuchsperson signifikant unter-



**Abbildung 3.4:** Median und 95%-Konfidenzintervalle des ersten Hörversuches unter Verwendung von ICTDs für Pegeluntersheide von 0dB und -6dB bezüglich des oberen Lautsprechers.

schiedlich ( $p \leq 0.0004$ ).

Zusätzlich kann beim Betrachten der Antworten ohne zeitlicher Verzögerung (ICTD  $\Delta t = 0\text{ms}$ ) in Abbildung 3.4 vermutet werden, dass aufgrund der großen Streuung zwischen den Versuchspersonen die Wahrnehmung individuell erfolgt.

Fassen wir alle Antworten der 3 Versuchspersonen mit gleichen Verstärkungsfaktoren zusammen, so erfährt die Phantomschallquelle durch einen Pegelunterschied von  $\Delta g = 6\text{dB}$  eine relative Winkeländerung von  $\Delta\tilde{\theta} = 10^\circ$  im Median.

Infolge dieses Vorversuches beschränkt sich der eigentliche Hörversuch auf die Verwendung von Pegelunterschieden zwischen den Lautsprechersignalen als Panoramisierungsverfahren.

Für horizontale Lautsprecherpaare gibt es empirisch gefundene Zusammenhänge zwischen ICLDs und Winkeländerungen der Phantomschallquelle. Die empirisch ermittelten ICLDs sowie deren erwartete Auslenkung nach Sengpiel [Sen] sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Vergleichen wir die Werte aus Tabelle 3.1 mit der relativen Winkeländerung des

Höreignisrichtung	$0^\circ$	$\frac{1}{4}\phi$	$\frac{1}{2}\phi$	$\frac{3}{4}\phi$	$\phi$
ICLD	0dB	3dB	6 – 7dB	11dB	18dB

**Tabelle 3.1:** Empirisch gefundene frequenzneutrale Werte der ICLD bei breitbandigen Signalen für die Höreignisrichtung nach Sengpiel [Sen] für Lautsprecher bei  $\pm\phi$ .

Vorversuches, so scheinen sich ICLDs in etwa doppelt so stark auf die Elevation der Phantomschallquelle auszuwirken.

Für horizontale Anordnungen wird nach Tabelle 3.1 ab einer Pegeldifferenz von  $\Delta g = 18\text{dB}$  die Position der Phantomschallquelle nur mehr vom lauterem Lautsprecher bestimmt.

Bremen et. al [BvWvO10] stellte in Maskierungsversuchen vertikaler Anordnungen jedoch fest, dass die maximale Auslenkung der Phantomschallquelle solcher Anordnungen bereits ab einem Pegelunterschied von  $\Delta g > 5\text{dB}$  erreicht wird.

Aufgrund dieser Feststellung sowie den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurden die Pegeldifferenzen zwischen den Lautsprechern für den Hörversuch auf  $\Delta g = [0\text{dB}, \pm 3\text{dB}, \pm 6\text{dB}, \pm \infty\text{dB}]$  beschränkt.

# Kapitel 4

## Versuchsaufbau

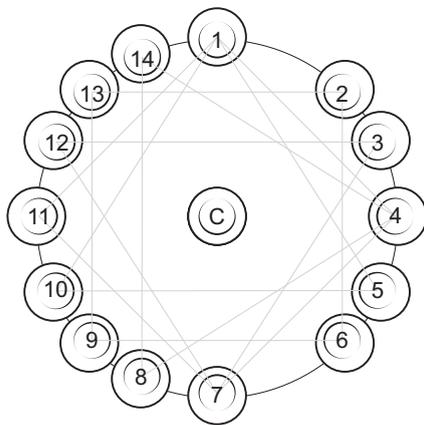
Basierend auf den Ergebnissen der Vorstudien wurde der eigentliche Hörversuch durchgeführt. 15 Versuchspersonen im Alter zwischen 22-35 Jahren nahmen in einem Zeitraum von 5 Tagen daran teil. Alle Probanden waren normalhörend. Vier Versuchspersonen sind speziell für solche Versuche geschulte Hörer, aber auch alle übrigen können aufgrund ihrer Ausbildung als erfahrene Hörer bezeichnet werden.

### 4.1 Lautsprecheranordnungen

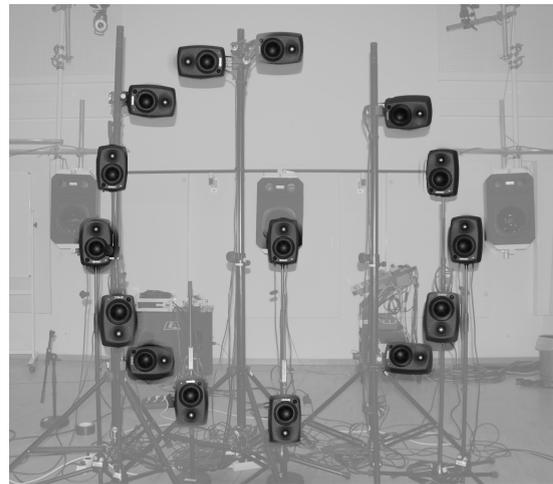
Im ersten Schritt wurde versucht eine geeignete Anordnung der Lautsprecher zu entwickeln, die es ermöglicht möglichst viele Lautsprecheranordnungen zu testen. Diese sind neben den elementarsten Anordnungen wie einem horizontalen und vertikalen Lautsprecherpaar auch Lautsprechertripel sowie Lautsprecherquadrupel. Aufgrund der Erkenntnisse aus [BvWvO10] wurde ein maximaler Öffnungswinkel von  $40^\circ$  festgelegt.

Es hat sich herausgestellt, dass eine kreisförmige Anordnung, bestehend aus 14 Lautsprechern sowie einem Lautsprecher in deren Zentrum direkt vor der Versuchsperson, eine günstige Variante zur Untersuchung verschiedener Lautsprecherkombinationen darstellt. Abbildung 4.1 zeigt eine Skizze des Aufbaus mit angedeuteten Lautsprecheranordnungen (a) sowie den tatsächlichen Aufbau (b).

Die kreisrunde Anordnung, sowie die Position der äußeren Lautsprecher, wurde so gewählt, dass symmetrische Lautsprecheranordnungen bezüglich der Mittelachse



(a) Skizzierter Versuchsaufbau mit angedeuteten Lautsprecherkombinationen.



(b) Tatsächlicher Versuchsaufbau.

**Abbildung 4.1:** Lautsprecherring in Aufrissebene mit Center-Lautsprecher in der Mitte.

der Hörposition möglich sind.

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die genaue Position der einzelnen Lautsprecher.

Der Abstand zur Kopfposition ist für alle Lautsprecher gleich und wurde durch den Radius  $r$  festgelegt.

## 4.2 Lautsprecheraufbau

Der Hörversuch wurde im CUBE am Institut für Elektronische Musik und Akustik durchgeführt. Dieser  $10.3\text{m} \times 12\text{m} \times 4.8\text{m}$  große Raum besitzt eine Nachhallzeit von  $RT_{60} = 470\text{ms}$ . Im Vergleich zur ITU-Empfehlung (ITU-R BS.1116-1, [ITU97]) ist dieser Raum zwar zu groß für Mehrkanal-Wiedergabe, seine Nachhallzeit liegt jedoch innerhalb der empfohlenen Grenzwerte der Nachhallzeit und die Sitzposition der Versuchsperson befand sich innerhalb des effektiven Hallradius der Lautsprecheranordnung.

Der bereitgestellte Stuhl für die Versuchsperson wurde so justiert, dass die Ohrhöhe bei  $1.2\text{m}$  und somit auf der Höhe des Mittelpunkts des Lautsprecherringes lag. Der Abstand aller Lautsprecher zur Versuchsperson betrug  $r = 2.5\text{m}$ . Der Durch-

Bezeichnung	$(\phi, \theta)$ in $^\circ$
LSC	(0.0 , 0.0)
LS1	(0.0 , 20.0)
LS2	(-14.1 , 14.1)
LS3	(-17.3 , 10.0)
LS4	(-20.0 , 0.0)
LS5	(-17.3 , -10.0)
LS6	(-14.1 , -14.1)
LS7	(0.0 , -20.0)
LS8	(10.0 , 17.3)
LS9	(14.1 , -14.1)
LS10	(17.3 , -10.0)
LS11	(20.0 , 0.0)
LS12	(17.3 , 10.0)
LS13	(14.1 , 14.1)
LS14	(10.0 , 17.3)

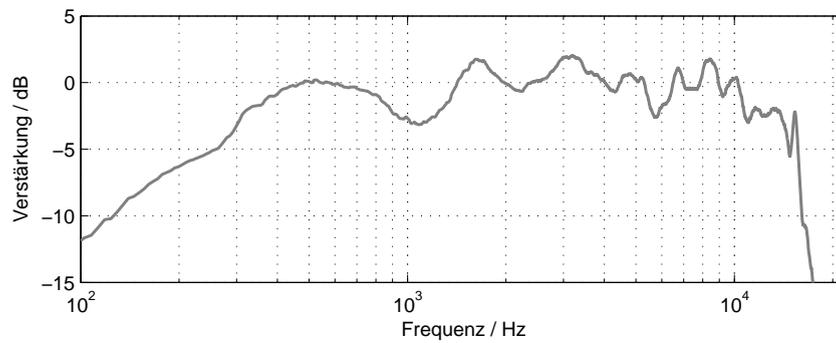
**Tabelle 4.1:** Azimut- und Elevationswinkel der einzelnen Lautsprecher zur Durchführung des Hörversuches.

messer der Ringes belief sich auf ungefähr 1.7m, wodurch der Öffnungswinkel  $40^\circ$  betrug. Um Bodenreflexionen zu minimieren und dem Entstehen von Kammfiltern entgegenzuwirken wurde der Boden mit Bühnenmolton bedeckt (siehe Abbildung 4.4).

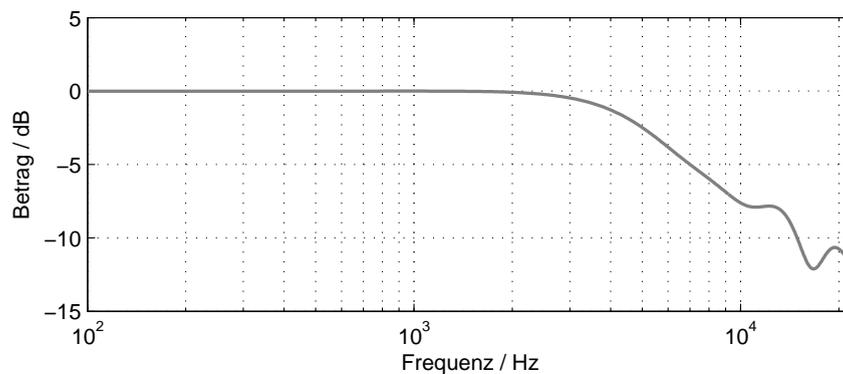
Als Lautsprecher wurden Nahfeldmonitore des Herstellers GENELEC vom Typ 8020A verwendet. Der Frequenzverlauf des Center-Lautsprechers (LSC) gemessen an der Abhörposition ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Vor der Lautsprecheranordnung wurde ein akustisch transparenter Sichtschutz aus perforierter Folie aufgestellt, dessen Frequenzverlauf in Abbildung 4.3 dargestellt ist.

Vor jedem Versuchsdurchlauf wurden die Pegel der Lautsprecher mittels Messmikrofon auf eine Lautstärke von 65dB(A) eingestellt und etwaige radiale Abweichungen der Lautsprecher durch Verzögerungen der Lautsprechersignale ausgeglichen. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert die  $0^\circ$ -Richtung zu fixieren und ihren Kopf während des Hörens nicht zu bewegen. Zusätzlich wurde die Position sowie



**Abbildung 4.2:** Betragsfrequenzgang des Center-Lautsprechers, gemessen an Abhörposition mittels Messmikrofon und normiert auf den Mittelwert des Betrags zwischen 1kHz – 10kHz.



**Abbildung 4.3:** Betragsfrequenzgang des akustisch transparenten Sichtschutzes für die 0°-Richtung, gemessen mittels Center-Lautsprecher und normiert auf den Betrag bei 1kHz.

Ausrichtung ihres Kopfes mittels Tracking-System erfasst, um eventuelle Abweichungen in der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigen zu können.

## 4.3 Die Lokalisation

### 4.3.1 Aufgabenstellung

Im ersten Teil des Hörversuches wurde die Lokalisation von Phantomschallquellen unterschiedlicher Lautsprecheranordnungen untersucht. Die Aufgabe der Versuchsperson lag darin, die Haupthörereignisrichtung eines dargebotenen Stimulus zu bestimmen. Dazu erhielt die Versuchsperson eine Spielzeugpistole, mit Hilfe

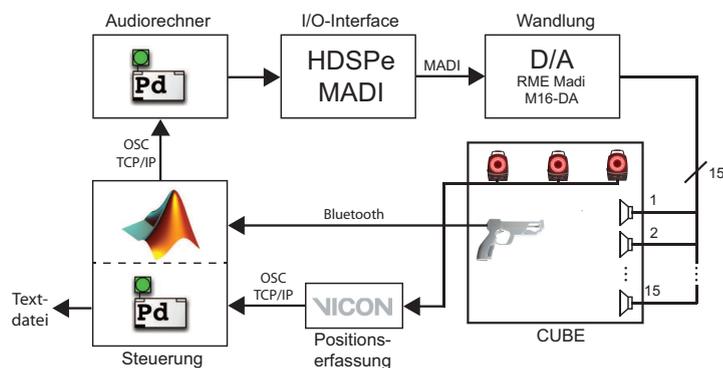
welcher die Position angezeigt werden konnte (siehe Abbildung 4.4). Die Position und Ausrichtung der Pistole wurde durch ein Tracking-System erfasst. Betätigt die Versuchsperson den Abzug der Pistole, so wurde ihr virtueller Durchstoßpunkt auf einer Kugel mit  $r = 2.5\text{m}$ , aufgespannt um den Hörer, berechnet. Dies ist eine bewährte Methode zur Bestimmung der Lokalisation für dreidimensionale Wiedergabeverfahren [FMSZ10].



**Abbildung 4.4:** Bestimmung der Haupthörereignisrichtung mittels Spielzeugpistole.

Die Steuerung der Wiedergabe erfolgte von der Versuchsperson selbst und jeder Stimulus konnte beliebig oft wiederholt werden. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, die Haupthörereignisrichtung erst nach Beendigung der Wiedergabe des Stimulus festzulegen. Als Stimulus wurden wie in den Vorstudien rosa Rauschen in Form von Rausch-Bursts verwendet (siehe Absatz 3.2).

Abbildung 4.5 zeigt das Blockschaltbild des Versuchsaufbaus.



**Abbildung 4.5:** Blockschaltbild des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Lokalisation.

### 4.3.2 Anordnungen

Die getesteten Lautsprecheranordnungen lassen sich in 3 Kategorien unterteilen. Zum einen linienförmige Anordnungen, welche aus 2 Lautsprechern bestehen und somit die einfachsten Anordnungen zur Erzeugung von Phantomschallquellen darstellen. Hierbei wurde die Lokalisation von vertikal, horizontal sowie schrägen Linienanordnungen untersucht.

Die zweite Kategorie beinhaltet die elementarste Form einer planaren Anordnung und besteht aus 3 Lautsprechern. Solche dreieckförmigen Anordnungen werden für VBAP verwendet. Die in diesem Zusammenhang untersuchten gleichseitigen Dreiecke wurden in Anlehnung an die untersuchten Anordnungen in [Pul01] gewählt, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Die letzte Kategorie beinhaltet quadratische Anordnungen, bestehend aus 4 Lautsprechern. Wiedergabeverfahren, welche unter anderem 4 Lautsprecher zur Erzeugung eines Hörereignisses verwenden, sind Ambisonics [ZF12] sowie MDAP [P+01].

Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die getesteten Anordnungen.

Geometrie	Bezeichnung	Lautsprecher
–	H	LS4, LS11
/	S	LS2, LS9
	V	LS1, LS7
△	D1	LS1, LS5, LS10
▽	D2	LS3, LS7, LS12
▷	D3	LS4, LS8, LS14
◇	Q1	LS2, LS6, LS9, LS13
□	Q2	LS1, LS4, LS7, LS11

**Tabelle 4.2:** Beschaffenheit der getesteten Lautsprecheranordnungen.

Zur Validierung der Performance der Versuchspersonen wurden zusätzlich noch einzelne Lautsprecher in den Versuch miteinbezogen.

### 4.3.3 Bedingungen

Die Lokalisation der Phantomschallquellen dieser Anordnungen wurden für unterschiedliche Bedingungen getestet. Für die Bedingung 1 wurden alle Lautsprecher

mit gleicher Lautstärke betrieben, Bedingung 2 beinhaltet ein Panoramisieren mittels ICLD, Bedingung 3 untersucht die Lokalisation bei dezentraler Hörposition und die 4. Bedingung für lateral erzeugte Phantomschallquellen. Für die Bedingung 3 wurden entsprechende Lautsprecher signale soweit zeitlich verzögert, dass eine Abweichung der Hörposition um 30cm nach links simuliert wurde. Zur Untersuchung der Lokalisation lateraler Phantomschallquellen wurde die Sitzposition der Versuchsperson um 90° gedreht.

Diese 4 Bedingungen in Kombination mit den untersuchten Lautsprecheranordnungen führen zu insgesamt 62 Stimuli, welche zusammen in einem Durchlauf in zufälliger Reihenfolge der Versuchsperson wiedergegeben wurden. Insgesamt wurden für jede Versuchsperson 2 Durchläufe angefertigt und diese hatte somit 124 Richtungen zu bestimmen.

Anordnungen, deren Symmetrieachse nicht der Medianebene entspricht, wurden sofern möglich im 2. Durchlauf horizontal gespiegelt. Die Antworten der Versuchspersonen bezüglich gespiegelter Anordnungen wurden durch Vorzeichenwechsel der azimuthalen Auslenkungen wieder gleichgerichtet.

Im Durchschnitt benötigten jede Versuchsperson für beide Durchläufe, die ohne Unterbrechung hintereinander gereiht waren, knapp 22 Minuten.

## 4.4 Die räumliche Ausdehnung des Hörereignisses

### 4.4.1 Aufgabenstellung

Nach einer kurzen Pause wurde der zweite Teil des Hörversuches durchgeführt. Bei der Erzeugung einer Phantomschallquelle gehört neben deren Richtung ihre wahrgenommene Ausdehnung zu den wichtigsten räumlichen Attributen des Hörereignisses. Es hat sich dabei die Bezeichnung der *wahrgenommenen Quellbreite* (engl.: apparent source width, ASW, [Gri97]) als Beschreibung dieses Attributes bewährt.

Im deutschen Sprachgebrauch bezieht sich der Terminus *Breite* auf die Ausdehnung in seitlicher Richtung. Nun ist für Phantomschallquellen, erzeugt durch horizontal angeordnete Lautsprecher, diese Bezeichnung durchaus ausreichend, für planare Anordnungen muss zur Beschreibung ihrer Ausdehnung jedoch zwischen Höhe

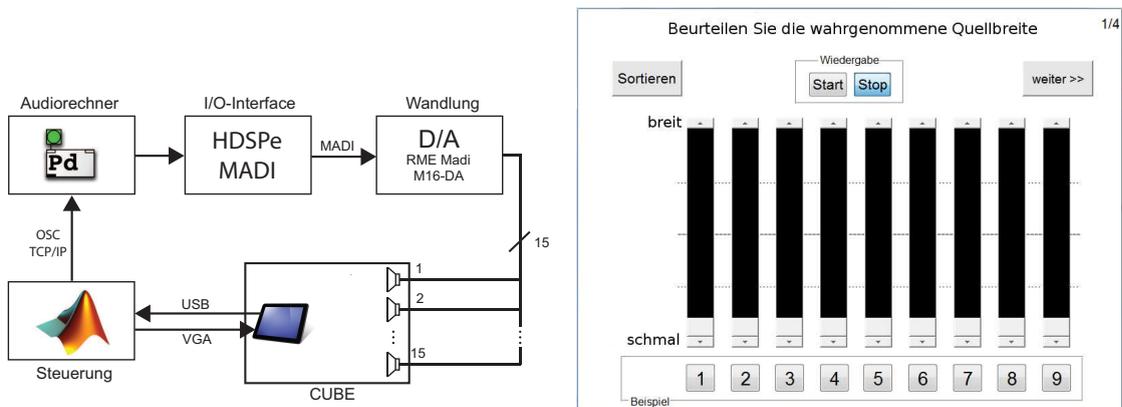
und Breite differenziert werden. Deshalb wird in diesem Zusammenhang zwischen wahrgenommener Quellbreite und Quellhöhe unterschieden.

Die Aufgabenstellung des zweiten Teils des Hörversuches bestand darin, eine Beurteilung unterschiedlicher Lautsprecheranordnungen bezüglich der wahrgenommenen Quellbreite bzw. Quellhöhe des Hörereignisses vorzunehmen.

Als Eingabegerät erhielt die Versuchsperson einen Bildschirm mit berührungsempfindlicher Oberfläche, auf dem jede Anordnung mit einem Schieberegler bewertet werden konnte. Der Umfang der Bewertungsskala wurde von 0 (*schmal* bzw. *flach*) bis 1 (*breit* bzw. *hoch*) festgelegt. Das Umschalten zwischen den dargebotenen Stimuli wurde durch die Versuchsperson selbst vorgenommen. Zusätzlich bestand die Möglichkeit, die Reihenfolge der Beispiele bzgl. ihrer Bewertung in aufsteigender Reihenfolge zu sortieren, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Das Anregungssignal war rosa Rauschen mit 65dB(A), diesmal allerdings kontinuierlich wiedergegeben.

Die Abbildung 4.6 (a) zeigt das Blockschaltbild des Versuchsaufbaus und (b) die Oberfläche des Eingabegerätes.



(a) Blockschaltbild des Versuchsaufbaus.

(b) Oberfläche des Eingabegerätes zur Bewertung der Quellbreite.

**Abbildung 4.6:** Blockschaltbild des Versuchsaufbaus und Oberfläche des Eingabegerätes zur Bewertung der wahrgenommenen Quellbreite bzw. Quellhöhe.

## 4.4.2 Anordnungen

Das Ziel dieses Versuches ist es, unterschiedliche Anordnungen bezüglich der Qualität der erzeugten Phantomschallquelle zu bewerten, sowie den Einfluss eines zusätzlichen Lautsprechers in der Mitte der jeweiligen Anordnung zu untersuchen.

Der Versuch kann somit in 2 Abschnitte unterteilt werden. Im ersten Abschnitt werden verschiedene Lautsprecheranordnungen untereinander verglichen, während beim zweiten der Einfluss des zusätzlichen Center-Lautsprechers auf die Ausdehnung der Phantomschallquelle untersucht wird.

Die Anordnungen des ersten Abschnittes sind ein horizontales und vertikales Lautsprecherpaar, 3 Lautsprechertripel sowie 2 quadratische Anordnungen, bestehend aus 4 Lautsprechern. Beim zweiten Durchlauf wurden das horizontale und vertikale Lautsprecherpaar sowie die beiden quadratischen Anordnungen jeweils mit und ohne Center-Lautsprecher getestet.

Um einen Vergleich mit einer Einzelschallquelle zu ermöglichen, wurde in beiden Abschnitten der Center-Lautsprecher als Referenz in den Versuch miteinbezogen. Somit hatte jede Versuchsperson pro Abschnitt insgesamt 9 Anordnungen einmal bzgl. Quellbreite und beim zweiten Durchlauf bzgl. Quellhöhe des wahrgenommenen Hörereignisses zu bewerten. Im Durchschnitt benötigte jede Versuchsperson 11 Minuten pro Abschnitt.

Zur Untersuchung der Ausdehnung der Phantomschallquelle wurden alle Lautsprecher gleich laut betrieben.

## 4.5 Klangfarbe

Neben der räumlichen Ausdehnung des Hörereignisses ist dessen Klangfarbe ein weiteres Merkmal, mit welcher die Qualität einer Phantomschallquelle und somit der Lautsprecheranordnung beurteilt werden kann. Die Klangfarbe ist nach [Ame60] jenes Attribut der auditiven Wahrnehmung, welches dem Hörer ermöglicht, 2 aus der gleichen Richtung wiedergegebene Töne gleicher Lautstärke und Tonlage zu unterscheiden.

Nach Kazuho Ono *et al.* [OPK02] gibt die Klangfarbe Auskunft darüber, wie die Lautheits-Frequenz-Charakteristik wahrgenommen wird. Die Klangfarbe wird somit vor allem vom Schallspektrum der erzeugten Quelle bestimmt. Das Ziel von

Wiedergabesystemen liegt stets in der Erzeugung eines Hörereignisses, welches dem Anregungssignal der Lautsprecher möglichst nahe kommt. Somit wird die Klangfarbe der Phantomschallquelle durch die Überlagerung der Lautsprechersignale bestimmt.

Basierend auf Hörversuchen wurde in [OPK02] mit dem CLL (Gesamtlautstärkepegel, engl: Composite Loudness Level) ein binaurales Modell zur Bestimmung der Klangfarbenveränderung der Phantomschallquelle entwickelt.

Zwar ist dieses Modell auf breitbandige Signale beschränkt, ermöglicht jedoch eine einfache Bewertung der Lautsprecheranordnungen, ohne einen Hörversuch durchführen zu müssen.

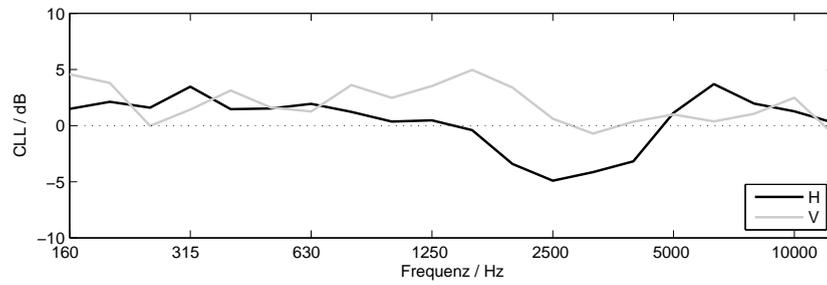
Das Modell wertet dabei die Eingangssignale der beiden Ohrkanäle aus, die in einer peripheren Verarbeitungsstufe vorverarbeitet werden. Die periphere Verarbeitungsstufe modelliert durch Verwendung einer Terzband-Filterbank die Physiologie des Ohrkanals, Mittelohrs und der Cochlea bezüglich der Verarbeitung spektraler Eigenschaften nach und berechnet den Lautstärkepegel (Phon) in den Terzbändern. Bevor die beiden Eingangsgrößen addiert werden können, bedarf es einer Umwandlung der Lautstärkepegel in Lautheit (Sone). Nach der Addition der beiden Lautheiten wird das Summensignal wieder in Phon rückgewandelt und wir erhalten den Gesamtlautstärkepegel pro Terzband.

Als Ausgangsgröße des Modells erhält man somit Lautstärkepegel für verschiedene Terzbandmittenfrequenzen, welche zu einem Spektrum zusammengefasst die wahrgenommene Klangfarbe repräsentieren.

Zur Generierung des rechten und linken Eingangssignals der Ohrkanäle und somit der Eingangsgrößen des Modells wurde ein Kunstkopf der Firma *Brüel & Kjær* vom Typ *HATS 4128-C* verwendet. Von jedem Lautsprecher wurde ein exponentieller Sinus-Sweep abgespielt, welcher mittels Kunstkopf an der untersuchten Hörposition aufgezeichnet wurde. Die Entfaltung dieser Sweeps ergibt die binaurale Impulsantwort der einzelnen Lautsprecher. Die beiden Eingangsgrößen des CLL-Modells berechnen sich anschließend durch eine entsprechende Überlagerung der Impulsantworten aller an der untersuchten Lautsprecherkonfiguration beteiligten Lautsprecher.

Die CLL-Spektren sind bedingt durch die periphere Vorverarbeitung nicht flach, weshalb sie zur besseren Vergleichbarkeit normiert werden. Abbildung 4.7 zeigt den berechneten CLL einer Phantomschallquelle erzeugt durch ein horizontales und ein

vertikales Lautsprecherpaar mit einem Öffnungswinkel von je  $\pm 20^\circ$  bezogen auf den CLL des Center-Lautsprechers LSC.



**Abbildung 4.7:** Vergleich des CLL eines horizontalen (H) bzw. vertikalen (V) Lautsprecherpaares mit einem Öffnungswinkel von je  $\pm 20^\circ$  bezogen auf den CLL des Center-Lautsprechers.

# Kapitel 5

## Versuchsergebnisse zur Lokalisation

Im diesem Kapitel werden die Ergebnisse des durchgeführten Hörversuches zur Untersuchung der Lokalisation angeführt und ausgewertet.

### 5.1 Validierung des Hörversuchs und der Versuchspersonen

Zur Validierung der Zuverlässigkeit der Versuchspersonen sowie des Hörversuches wird zunächst die Lokalisation der Einzelschallquellen untersucht. Hierzu werden die Lokalisationsfehler  $e_\phi$  bzw.  $e_\theta$  von Azimut und Elevation für bestimmte Lautsprecherpositionen berechnet:

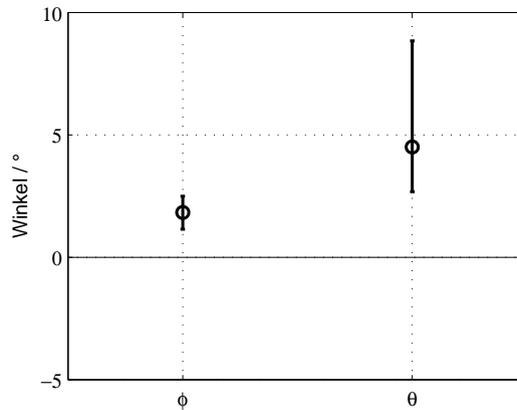
$$e_\phi = \phi_w - \phi_z \quad \text{und} \quad e_\theta = \theta_w - \theta_z. \quad (5.1)$$

Dabei sind  $\phi_w$  und  $\theta_w$  der wahrgenommene Azimut- und Elevationswinkel und  $\phi_z$  und  $\theta_z$  bestimmen die Position des Ziels der untersuchten Einzelschallquelle.

Abbildung 5.1 zeigt Mediane und 95%-Konfidenzintervalle des Lokalisationsfehlers beim Center-Lautsprecher für 15 Versuchspersonen mit 2 Wiederholungen.

Nach Blauert [Bla83] sollte der Lokalisationsfehler für eine Schallquellen direkt vor der Versuchsperson im Mittel zu Null werden.

Der Median des Lokalisationsfehlers beträgt jedoch  $1.8^\circ$  für die horizontale Auslenkung, sowie  $4.5^\circ$  für die vertikale Auslenkung. Hierbei handelt es sich um einen systematischen Fehler, welcher durch Betätigen des Abzuges der Spielzeugpistole



**Abbildung 5.1:** Mediane und 95%-Konfidenzintervalle der Lokalisationsfehler  $e_\phi$  bzw.  $e_\theta$  des einzelnen Center-Lautsprechers.

zustande kommt. Dadurch wird die Ausrichtung des Anzeigegerätes leicht verzerrt. Bestätigt wird dies in der Arbeit von Frank [FMSZ10], in welcher der systematische Fehler für den Azimut die selbe Größenordnung wie jener aus Abbildung 5.1 besitzt.

Die Untersuchung der individuellen systematischen Fehler ergibt, dass diese unabhängig von der Händigkeit der Versuchspersonen sind, aber jede Person eine eigene Vorzugsrichtung besitzt.

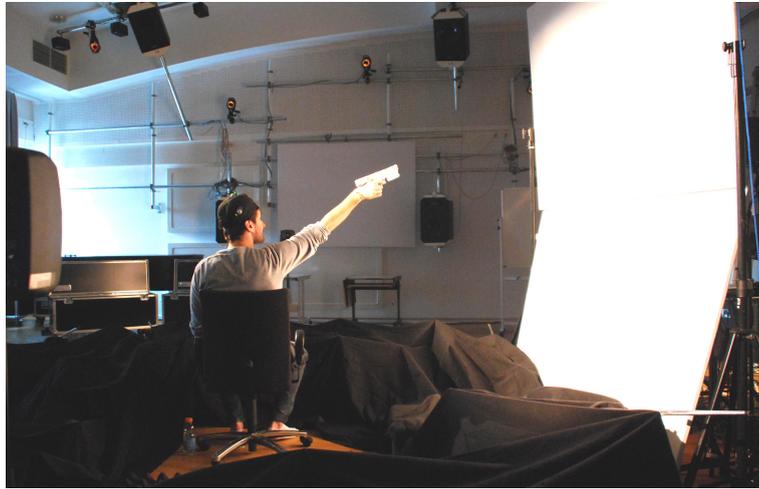
In weiterer Folge wird der systematischen Fehler bei einer zusammengefassten Darstellungsweise der Ergebnisse (Mediane, Mittelwerte, Konfidenzintervalle, Konfidenzbereiche) entfernt. Konkret bedeutet dies, dass alle Antworten der Versuchspersonen mit  $\Delta\phi_{sys} = -1.8^\circ$  bzw.  $\Delta\theta_{sys} = -4.5^\circ$  beaufschlagt werden.

Die Größe der 95%-Konfidenzintervalle aus Abbildung 5.1 gibt Auskunft über die Empfindlichkeit des Gehörs bezüglich der Lokalisationsreize.

Demnach erzeugt die Auswertung binauraler Reizunterschiede und somit die Bestimmung der horizontalen Auslenkung  $\phi$  eine geringere Streuung, als die Auswertung spektraler Unterschiede (Elevationswinkel  $\theta$ ). Diese Tatsache bestätigt die Ergebnisse der Hörversuche von Blauert [Bla83].

Neben der frontalen Abhörposition (Kopfposition  $0^\circ$  Azimut) wird im Hörversuch die Lokalisation lateraler Hörereignisse untersucht. Dazu wurde die Orientierung der Versuchsperson um  $90^\circ$  nach links gedreht. Die Bestimmung der Hörereignisrichtung erfolgte wie gehabt, wobei es der Versuchsperson nach dem Hören erlaubt

war sich zu drehen, um eine exakteres Zielen zu ermöglichen (siehe Abbildung 5.2).



**Abbildung 5.2:** Bestimmung der Lokalisation bei lateraler Orientierung der Versuchsperson.

Da die Antworten für Azimut und Elevation normalverteilt sind, können sie zur besseren Betrachtungsweise und Vergleichbarkeit der Ergebnisse mittels bivariater Normalverteilung in ellipsenförmige Konfidenzbereiche zusammengefasst werden. Die bivariate Normalverteilung der Größe  $\mathbf{r} = (x \ y)^T$  ist wie folgt definiert:

$$\mathcal{N}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\det(\mathbf{C})}} e^{\{-\frac{1}{2}(\mathbf{r}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{r}-\boldsymbol{\mu})\}}. \quad (5.2)$$

Der Vektor  $\boldsymbol{\mu} = (\mu_x \ \mu_y)^T$  beschreibt den Erwartungsvektor von  $\mathbf{r}$  und die Matrix  $\mathbf{C}$  entspricht der Kovarianzmatrix mit:

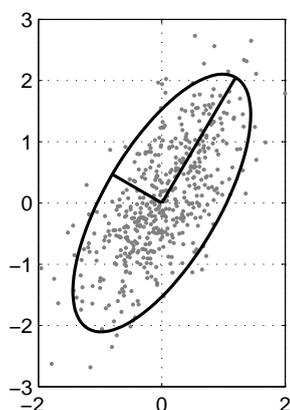
$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

wobei  $c_{11} = \text{cov}(x - \mu_x, x - \mu_x)$ ,  $c_{21} = c_{12} = \text{cov}(x - \mu_x, y - \mu_y)$  und  $c_{22} = \text{cov}(y - \mu_y, y - \mu_y)$  ist.

Die Eigenvektoren und Eigenwerte der Kovarianzmatrix beschreiben eine elliptische Fläche, welche den Streubereich ergibt.

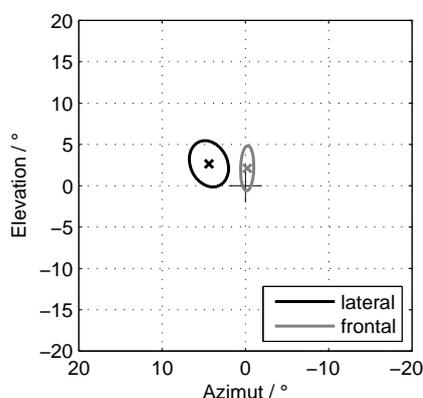
Abbildung 5.3 zeigt einen aus 500 Stichproben einer zweidimensionalen Normalverteilung errechneten Streubereich mit Standardabweichungen von  $\sigma_1 = 0.7$  und  $\sigma_2 = 1$  sowie einem Korrelationsfaktor von  $\rho = 0.7$ .

Unter Berücksichtigung der Anzahl an  $N$  Messpunkten (Skalierung mit  $1.96/\sqrt{N}$ ) ergibt sich schließlich der 95%-Konfidenzbereich, welcher in weiterer Folge zur Veranschaulichung der Ergebnisse verwendet wird.



**Abbildung 5.3:** Zweidimensionale Normalverteilung ( $N = 500, \sigma_1 = 0.7, \sigma_2 = 1, \rho = 0.7$ ) und der daraus resultierende Streubereich.

Vergleichen wir nun die Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Lokalisation des Center-Lautsprechers bei lateraler und frontaler Orientierung der Versuchsperson (Abbildung 5.4).



**Abbildung 5.4:** Vergleich der Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Lokalisation des Center-Lautsprechers bei lateraler und frontaler Orientierung der Versuchsperson.

Betrachten wir den 95%-Konfidenzbereich bei frontaler Wiedergabe, so sehen wir, dass die Halbachsen der Ellipse nahezu parallel zur Median- bzw. Horizontalebene sind ( $\rho = 0$ ).

Trotz Normierung aller Antworten der Lokalisation des Center-Lautsprechers bei zentraler Hörposition auf  $(0^\circ, 0^\circ)$  durch ihren Median, scheint ein leichter vertikaler Versatz des Konfidenzbereichs für den Mittelwert zu bestehen.

Einen ähnlichen vertikaler Versatz finden wir auch bei lateraler Lokalisation. Die vertikale Ausdehnung des Konfidenzbereichs ist gleich geblieben, wogegen das horizontale Ausmaß sich deutlich vergrößert hat. Zusätzlich wird die azimutale Auslenkung der Einzelschallquelle im Mittel um ca.  $4.4^\circ$  zu weit in Richtung der Medianebene angenommen und damit unterschätzt.

Zur Validierung der lateralen Bedingung vergleichen wir diese Ergebnisse mit jenen aus [Bla83], bei welchen die Lokalisation lateraler Schallquelle bei  $\phi_z = \pm 90^\circ, \theta_z = 0^\circ$  mittels 600 bis 900 Versuchspersonen untersucht wurde. Der Lokalisationsfehler dieser Studie beträgt im Mittel  $e_\phi = 9,7^\circ$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma_e = 9.2^\circ$  für  $\phi_z = 90^\circ, \theta_z = 0^\circ$  sowie  $e_\phi = 8,4^\circ$  mit  $\sigma_e = 10^\circ$  für  $\phi_z = -90^\circ, \theta_z = 0^\circ$ . Die Ergebnisse aus dem Hörversuch sind ähnlich (Mittelwert:  $e_\phi = 4.4^\circ$ , Standardabweichung:  $\sigma_e = 6.7^\circ$ ), wobei die Bestimmung der azimutalen Position der Schallquelle etwas exakter erfolgte. Der Elevationsfehler  $e_\theta$  wurde in [Bla83] nicht untersucht.

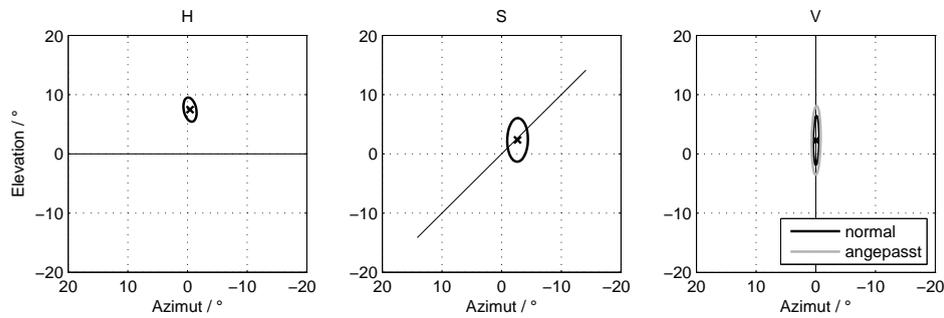
Zur Validierung der Versuchsperson selbst werden die individuellen Standardabweichungen für Azimut und Elevation verglichen, wobei diese für alle Teilnehmer in etwa im selben Bereich liegen. Dadurch kann die Zuverlässigkeit aller Versuchspersonen für die Lokalisation einzelner Schallquellen als gleichwertig eingestuft werden.

## 5.2 Linienförmige Lautsprecheranordnungen

Kommen wir nun zur Untersuchung der Lokalisation von Phantomschallquellen. Dazu analysieren wir zunächst die linienförmigen Anordnungen, bestehend aus Anordnung H, S und V (siehe Kapitel 4, Tabelle 4.2). Alle 3 Anordnungen besitzen einen Öffnungswinkel von  $40^\circ$ .

Abbildung 5.5 zeigt Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Antworten von Azimut und Elevation dieser 3 Anordnungen, wenn alle Lautsprecher gleich laut spielen.

Die horizontale Anordnung zeigt einen deutlichen Versatz der Phantomschallquelle nach oben. Diese Verschiebung ist vermutlich auf Kammfiltereffekte zurückzuführen, welche eine Überhöhung im Bereich der richtungsbestimmenden Bänder [Bla83] verursachen und somit die Elevation der Phantomschallquelle hervorrufen. Die beiden anderen Anordnungen besitzen dagegen lediglich einen geringen vertikalen



**Abbildung 5.5:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der linienförmigen Anordnungen sowie angepasster Konfidenzbereich der Anordnung V bei zentraler Hörposition und frontaler Wiedergabe.

len Versatz.

Die azimuthale Ausdehnung des Konfidenzbereichs der Anordnung V ist mit Abstand am kleinsten. Hier sei jedoch zu erwähnen, dass 4 anstatt der üblichen 2 Wiederholungen zur Bestimmung der Lokalisation durchgeführt wurden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Konfidenzbereich der Anordnung V deshalb angepasst und der Streubereich mit  $1/\sqrt{N/2}$  skaliert. Dadurch wird ein direkter Zusammenhang zwischen dem vertikalen Anteil der Anordnungen und der vertikalen Ausdehnung der Konfidenzbereiche ersichtlich.

Zur weiteren Auswertung werden die aus dem Lokalisationsversuch erhaltenen Daten der Versuchspersonen der Anordnungen H und V mittels Varianzanalyse (engl.: analysis of variance, ANOVA) hinsichtlich ihrer Signifikanz untersucht.

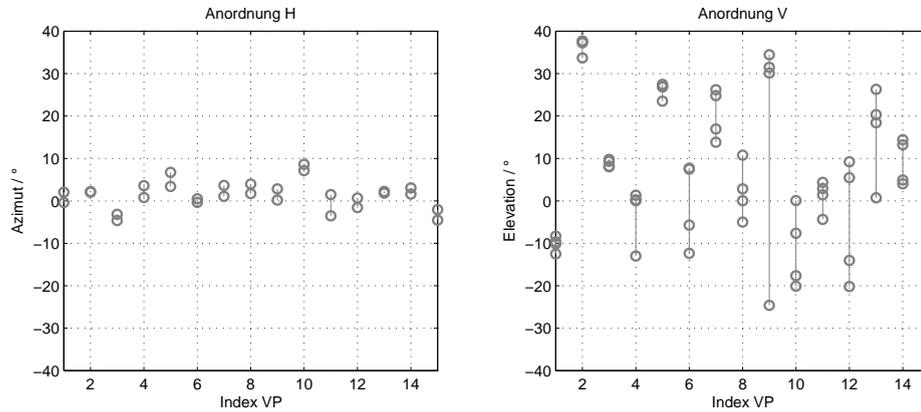
Die getesteten Variablen sind die *Versuchsperson* sowie die *Wiederholung*. Letztere sollte im Idealfall für beide Anordnungen signifikant gleich sein oder zumindest keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Diese Annahme wird jedoch nicht bestätigt und wir erhalten mit  $p = 0.114$  für die Anordnung H, sowie  $p = 0.015$  für die Anordnung V signifikant unterschiedliche Ergebnisse für die Variable *Wiederholung*.

Somit stellt sich die Frage, ob die Antworten der Versuchspersonen inkonsistent sind. Aufgrund der geringen Datenmenge (2 bzw. 4 Antworten pro Versuchsperson) ist die Variable *Wiederholung* allerdings nur bedingt aussagekräftig.

Eine bessere Betrachtungsweise finden wir in der Darstellung der individuellen Antworten der Versuchspersonen. Abbildung 5.6 zeigt die individuellen horizon-

talen bzw. vertikalen Auslenkungen der Antworten aus dem Hörversuch für die horizontale und vertikale Anordnung.



**Abbildung 5.6:** 2 bzw. 4 Antworten jeder Versuchsperson für die Anordnungen H und V zur Lokalisation der Phantomschallquelle.

Es zeigt sich dabei, dass die intrasubjektiven Antworten für das horizontale Lautsprecherpaar zwar unterschiedlich sind, die Unterschiede aber klein sind (vergleiche Abbildung 5.5). Somit beschreibt auch die Variable *Versuchsperson*, welche nach der ANOVA für beide Anordnungen signifikant unterschiedlich ist (Anordnung H:  $p < 0.001$ ; Anordnung V:  $p = 0$ ), die Lokalisation nur bedingt.

Beim vertikalen Lautsprecherpaar ist die Streuung zwar größer als beim horizontalen, für einige Versuchspersonen ist sie jedoch deutlich geringer als die vertikale Ausdehnung des Konfidenzbereichs aus Abbildung 5.5.

Zusätzlich scheint ein Lerneffekt für die Anordnung V zu existieren: Lassen wir nämlich die erste der vier Antworten aller Versuchspersonen außer Acht, so weist die Variable *Wiederholung* keine Signifikanz auf ( $p_{1...4} = 0.015 \rightarrow p_{2...4} = 0.473$ ).

Ein weiteres statistisches Maß zur Analyse der Antworten ist die Standardabweichung. Zur Überprüfung der individuellen Lokalisation der vertikal erzeugten Phantomschallquelle werden dazu die intrasubjektive sowie intersubjektive Standardabweichung berechnet. Erstere berechnet sich aus den 4 Wiederholungen pro Versuchsperson, letztere aus den 15 individuellen Medianen.

Der Median der intrasubjektiven Standardabweichungen beträgt weniger als die Hälfte der intersubjektiven Standardabweichung. Konkret bedeutet dies, dass die Unterschiede zwischen den Versuchspersonen deutlich größer sind als jene innerhalb der Antworten einer Versuchsperson.

Um diese Erkenntnis weiter zu untersuchen, werden noch zusätzliche vertikale Lautsprecherpaare betrachtet. Diese sind zum einen das obere Lautsprecherpaar, bestehend aus LS1 sowie LSC, sowie das untere Lautsprecherpaar, bestehend aus LSC und LS7. Beide besitzen einen Öffnungswinkel von  $20^\circ$  (oben:  $\theta = 20^\circ, 0^\circ$ ; unten:  $\theta = 0^\circ, -20^\circ$ ).

Beim Vergleich der Standardabweichungen analog zur vertikalen Referenzanordnung V konnten ähnliche Ergebnisse beobachtet werden: Der Median der intrasubjektiven Standardabweichungen beträgt bei beiden Anordnungen rund  $1/4$  der intersubjektiven Standardabweichung.

### 5.2.1 Lokalisation bei unterschiedlichen ICLDs

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse von Pulkki [Pul01], zumindest was die Lokalisation vertikaler Phantomschallquellen betrifft. Untersuchen wir nun die Ergebnisse für das Panoramisieren mittels ICLD.

Aus den Erkenntnissen der Vorstudien wurden ICLDs von  $\Delta g = [0\text{dB}, \pm 3\text{dB}, \pm 6\text{dB}]$  festgelegt, mit welchen es möglich sein sollte, eine Phantomschallquelle innerhalb des Lautsprecheröffnungswinkels zu positionieren. Konkret wurden die Anordnungen H und V hinsichtlich der Möglichkeit des Panoramisierens getestet und jeweils 2 Wiederholungen durchgeführt.

Zur Auswertung der erhaltenen Daten verwenden wir wiederum die Varianzanalyse. Die getesteten Variablen sind nun um die Pegeldifferenz (Variable *ICLD*) erweitert und umfassen die Variablen *Versuchsperson*, *ICLD* und *Wiederholung*. Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse der ANOVA für das horizontale sowie vertikale Lautsprecherpaar für unterschiedliche ICLDs.

Variable	$p_{hor}$	$p_{ver}$
Versuchsperson	0.3	0.0
Wiederholung	< 0.001	0.080
ICLD	0.0	0.0
VP*Wdhg	0.045	0.086
VP*ICLD	0.745	0.0
Wdhg*ICLD	0.003	0.841

**Tabelle 5.1:** Ergebnisse der ANOVA der Anordnungen H und V getestet unter Verwendung unterschiedlicher ICLDs.

Die Analyse zeigt, dass die Variable *ICLD* für beide Anordnungen signifikant unterschiedlich ist, wodurch ein Panoramisieren der Phantomschallquelle möglich sein sollte. Eine paarweise Varianzanalyse angrenzender ICLDs der Anordnung V bestätigt dies und zeigt, dass ausschließlich die benachbarten Werte für  $\Delta g = [\infty\text{dB}, 6\text{dB}]$  eine schwache Signifikanz aufweisen ( $p = 0.071$ ), alle übrigen sind signifikant unterschiedlich ( $p \leq 0.027$ ).

Die Variable *Versuchsperson* ist lediglich für das vertikale Paar signifikant. Dies ist ein weiterer Hinweis auf die individuelle Wahrnehmung vertikal erzeugter Phantomschallquellen. Der Variable *Wiederholung* ist wiederum signifikant bzw. schwach signifikant unterschiedlich. Ihr wird aufgrund der geringen Datenmengen in diesem Zusammenhang keine weitere Beachtung geschenkt.

Aus den Antworten der Versuchspersonen lassen sich nun Lokalisationskurven erstellen.

Untersuchen wir zunächst das horizontale Lautsprecherpaar H, welches einer Standard-Stereo-Aufstellung entspricht. Für solche Anordnungen gibt es eine Reihe von Lokalisationsmodellen, welche aufgrund der ICLD die Auslenkung der wahrgenommenen Phantomschallquelle berechnen und nun kurz vorgestellt werden.

Aus experimentell ermittelten Lokalisationskurven und deren Interpolation nach Lagrange hat Sengpiel [Sen] ein Polynom definiert, welches die prozentuale Auslenkung  $\phi_{\%}$  der Phantomschallquelle aus der Mitte der Anordnung berechnet:

$$\phi_{\%} = 1.729350 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta g^4 - 4.932668 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta g^3 - 0.148528 \cdot \Delta g^2 + 8,818633 \cdot \Delta g. \quad (5.4)$$

Durch die prozentuale Angabe der Auslenkung arbeitet das Modell unabhängig vom Lautsprecheröffnungswinkel und beinhaltet lediglich die ICLD  $\Delta g$  in dB.

Die Grundlage des zweiten Modells ist die Summierung der mit  $g_l$  gewichteten Lautsprecherrichtungen in Vektorform:

$$\mathbf{r}_V = \frac{\sum_{l=1}^L g_l \boldsymbol{\theta}_l}{\sum_{l=1}^L g_l}. \quad (5.5)$$

Dabei beinhaltet  $\boldsymbol{\theta}_l = [\cos(\phi_l), \sin(\phi_l)]^T$  die Position der  $L$  Lautsprecher und die Richtung des Schnellevektor  $\mathbf{r}_V$  prognostiziert die Position der Phantomschallquelle für tiefe Frequenzen ( $< 700\text{Hz}$ ) [Ger92].

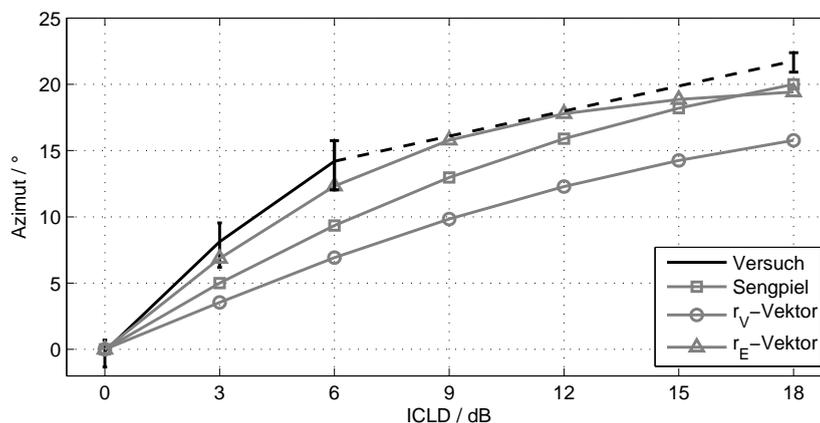
Aufbauend auf der Idee des Schnellevektors  $\mathbf{r}_V$  wurde in [Ger92] mit dem Energievektor  $\mathbf{r}_E$  ein weiteres Modell vorgestellt. Grundlage hierfür ist die energetische

Superposition der Lautsprechersignale und das Modell definiert sich wie folgt:

$$\mathbf{r}_E = \frac{\sum_{l=1}^L g_l^2 \boldsymbol{\theta}_l}{\sum_{l=1}^L g_l^2}, \quad (5.6)$$

wobei analog zu Gleichung 5.5 jedem der  $L$  Lautsprecher ein Richtungsvektor  $\boldsymbol{\theta}_l$  und ein lineares Amplitudengewicht  $g_l$  zugeordnet ist.

Vergleichen wir nun die aus dem Hörversuch erhaltenen Lokalisationskurve mit den vorgestellten Modellen in Abbildung 5.7.



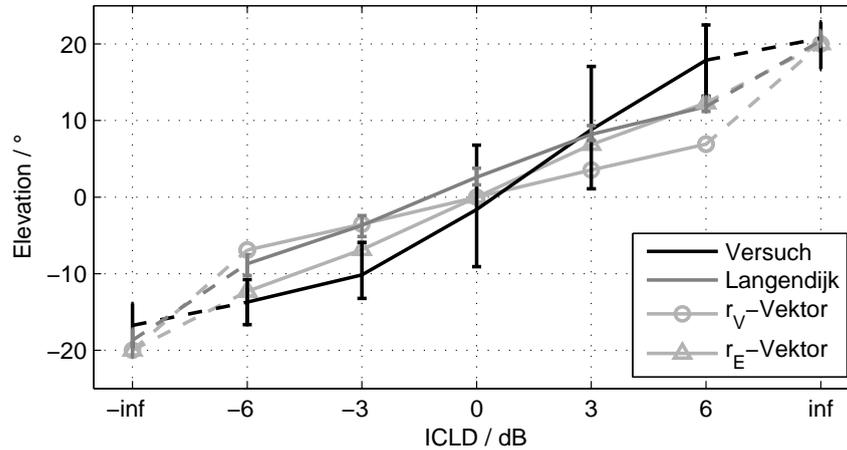
**Abbildung 5.7:** Vergleich der Lokalisationskurven erstellt aus den Lokalisationsmodellen nach Sengpiel, den Vektoren  $\mathbf{r}_V$  und  $\mathbf{r}_E$  sowie den Medianen und 95%-Konfidenzintervallen des Hörversuches.

Es zeigt sich, dass die aus dem Hörversuch erhaltene Lokalisationskurve durch den Energievektor  $\mathbf{r}_E$  am besten nachgebildet wird. Der Schnellevektor  $\mathbf{r}_V$  ist aufgrund der breitbandigen Anregungssignale für dieses Setup nicht geeignet.

Mit dem in Kapitel 2 eingeführten Weiterverarbeitung der Ergebnisse des Lokalisationsmodells nach Langendijk/Bronkhorst sollte es analog zum horizontalen Lautsprecherpaar möglich sein, die Lokalisationskurve der Anordnung V nachzubilden. Auch die beiden Vektormodelle  $\mathbf{r}_V$  und  $\mathbf{r}_E$  können auf eine vertikale Lautsprecheranordnung angewendet werden.

Die Abbildung 5.8 zeigt den Vergleich der 3 Modelle mit der Lokalisationskurve aus dem Hörversuch. Der Exponent des Modells nach Langendijk/Bronkhorst wurde wie in Abbildung 3.1 mit  $n = 8$  (siehe Gleichung 3.1) gewählt.

Alle Kurven zeigen einen über die ICLD monoton ansteigenden Verlauf. Während die Kurven aller Modelle fast linear über die ICLD verlaufen, zeigt die Lokalisationskurve aus dem Hörversuch eine Sättigung in beide Richtungen.



**Abbildung 5.8:** Vergleich der Lokalisationskurven erstellt aus den Medianen und 95%-Konfidenzintervallen des Hörversuches und des modifizierten Modells nach Langendijk/Bronkhorst ( $n = 8$ ) sowie aus den Richtungen des Schnellektors  $r_V$  und des Energievektors  $r_E$ .

Eine weitere Auffälligkeit ist die große Streuung der Kurve des Hörversuches für kleine ICLDs, welche beim Modell nach Langendijk/Bronkhorst zwar vorhanden sind, aber um einiges geringer ausfallen.

Zusätzlich besitzt dieses Modell einen leichten Versatz nach oben und ist fast deckungsgleich mit dem Energievektor  $r_E$ . Insgesamt aber prognostizieren diese beiden Modelle die Lokalisation am besten, wenngleich die Kurve aus dem Hörversuch nur grob approximiert wird.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Vorversuch (siehe Absatz 3.2), bei welchen Pegelunterschiede von  $-6\text{dB}$  und  $0\text{dB}$  bezüglich LS1 getestet wurden, wird ersichtlich, dass bei gleicher Pegeländerung eine ähnliche relative Auslenkung der Phantomschallquelle von ca.  $\Delta\tilde{\theta} = 10^\circ$  hervorgerufen wird.

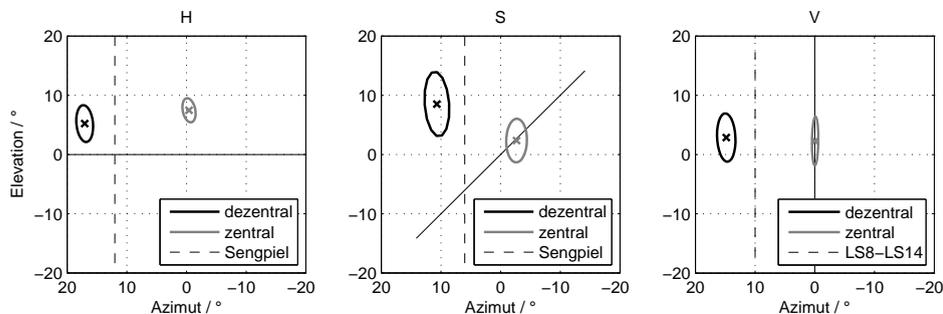
Vergleichen wir nun die Lokalisationskurve des Modells mit den Regressionsgeraden in Abbildung 1.3, so zeigen sich auch hier Ähnlichkeiten und beide Kurven sind für  $\Delta g = -3\text{dB}$  bis  $6\text{dB}$  linear und weisen einen leichten Versatz nach unten auf.

## 5.2.2 Lokalisation bei dezentraler Hörposition

Untersuchen wir nun die Lokalisation für eine Hörposition abseits des Zentrums. Für horizontale Anordnungen kann dies durch gezielte Verzögerung der Lautsprecher-signale simuliert werden, wogegen für rein vertikale Lautsprecheranordnungen eine solche Vorgehensweise nicht möglich ist. Deshalb wurde als vertikale Lautsprecheranordnung abseits des Zentrums die Lokalisation des Lautsprecherpaares bestehend aus LS8 und LS14 untersucht. Diese beiden Lautsprecher besitzen eine azimuthale Auslenkung von  $10^\circ$  und befinden sich damit knapp 40cm links von der Medianebene.

Vergleichen wir nun diese Lautsprecheranordnung mit den Anordnungen H und S, bei welchen durch Laufzeitverzögerungen ( $\Delta t_h = 0.59\text{ms}$  und  $\Delta t_s = 0.41\text{ms}$ ) eine Abweichung der Hörposition um 30cm nach links simuliert wurde, mit den Ergebnissen bei zentraler Hörposition.

Abbildung 5.9 zeigt den Vergleich der Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche für die Lokalisation der untersuchten linienförmigen Lautsprecherpaare bei zentraler und dezentraler Hörposition mit 2 Wiederholungen.



**Abbildung 5.9:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der linienförmigen Anordnungen für die Lokalisation bei zentraler und dezentraler Hörposition bei frontaler Wiedergabe.

**Anordnung H.** Analog zur Intensitätsstereofonie gibt es mehrere empirisch gefundene Zusammenhänge zwischen Laufzeitdifferenz der Lautsprechersignale und wahrgenommener Auslenkung. Nach einem Modell nach Sengpiel [Sen], welches wie bei der Intensitätsstereofonie ein Polynom aus Lagrange-interpolierter empirischer Lokalisationskurven ist, erzeugt eine Laufzeitverzögerung von  $\Delta t = 0.59\text{ms}$

für ein horizontalen Lautsprecherpaar eine Wahrnehmung der Phantomschallquelle bei etwa 60% des Öffnungswinkels zwischen Mittelachse der Lautsprecher und dem nicht verzögerten Lautsprecher. Dies würde in unserem Fall einer Auslenkung von  $\phi = 12^\circ$  entsprechen.

Die Abbildung zeigt eine größere Auslenkung von  $\phi = 17^\circ$  im Mittel. Eine ähnliche Unterschätzung durch das Modell nach Sengpiel ist bereits bei der Intensitätsstereofonie (siehe Abbildung 5.7) zu sehen.

**Anordnung S.** Bei der schrägen Anordnung beträgt die Laufzeitdifferenz  $\Delta t_s = 0.41\text{ms}$ . Das Modell nach Sengpiel stammt aus Versuchen mit rein horizontalen Lautsprecherpaaren. Wenden wir sie jedoch auf den horizontalen Anteil der schrägen Anordnung an ( $\Delta\phi = 28^\circ$ ), so liegt die erwartete horizontale Auslenkung der Phantomschallquelle bei ca.  $\phi = 6^\circ$ . Auch hier ist analog zur Anordnung H die tatsächlich wahrgenommene azimutale Auslenkung mit  $10.5^\circ$  vergrößert.

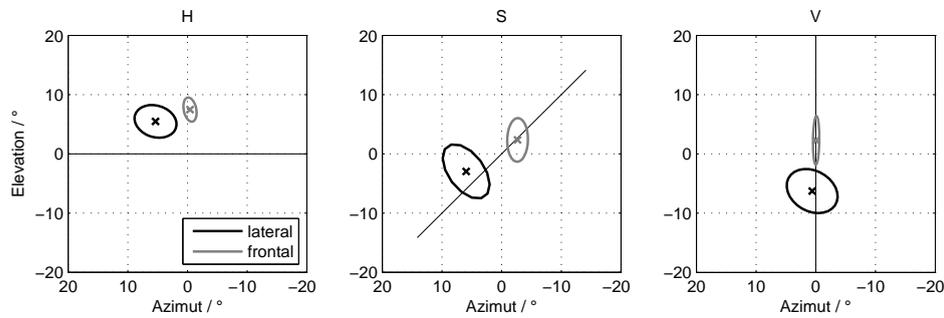
**Anordnung V.** Beim vertikalen Lautsprecherpaar bestehend aus LS8 und LS14, sollte aus geometrischen Gründen die azimutale Auslenkung bei  $10^\circ$  liegen. Tatsächlich liegt der Mittelwert der lateralen Auslenkung bei ca.  $14.5^\circ$ . Dadurch werden bei allen Anordnungen die azimutalen Auslenkungen im Vergleich zum Modell bzw. der tatsächlichen Lautsprecherpositionen im Mittel um ca.  $\Delta\phi = 5^\circ$  überschätzt.

Das vertikale Ausmaß der Konfidenzbereiche aller Anordnungen ist im Vergleich zur Lokalisation bei zentraler Hörposition in etwa gleich geblieben, wogegen die Breite des Konfidenzbereichs vor allem für die Anordnung V zugenommen hat.

### 5.2.3 Die laterale Lokalisation

Die letzte untersuchte Bedingung ist die Lokalisation bei lateraler Orientierung der Versuchsperson. Vergleichen wir wieder die Ergebnisse der 3 elementaren Lautsprecheranordnungen mit jenen bei frontaler Wiedergabe (Abbildung 5.10).

Es zeigt sich, dass sich der Azimutwinkel der Phantomschallquellen der Anordnungen H und S im Vergleich zu frontaler Wiedergabe deutlich verringert hat. Ähnliche Ergebnisse für horizontale Lautsprecherpaare finden wir auch in der Ar-



**Abbildung 5.10:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der linienförmigen Anordnungen für die Lokalisation bei frontaler und lateraler Orientierung der Versuchsperson.

beit von Simon *et al.* [SMR09].

Zusätzlich nimmt die wahrgenommene Elevation für alle Anordnungen leicht ab.

## 5.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend scheinen alle 3 linienförmigen Lautsprecheranordnungen zur Erzeugung von Phantomschallquellen geeignet zu sein.

Bei frontaler Wiedergabe ist die bewährte horizontale Anordnung zu bevorzugen, da die Lokalisation der Phantomschallquelle intersubjektiv und somit für jeden gleich erfolgt. Zusätzlich bietet diese Anordnung die Möglichkeit, durch Pegel- und Zeitunterschiede der Lautsprecher signale die Phantomschallquelle gezielt zu positionieren.

Doch auch bei der vertikalen Anordnung scheint trotz individueller Lokalisation zumindest Panoramisierung mittels ICLDs möglich zu sein.

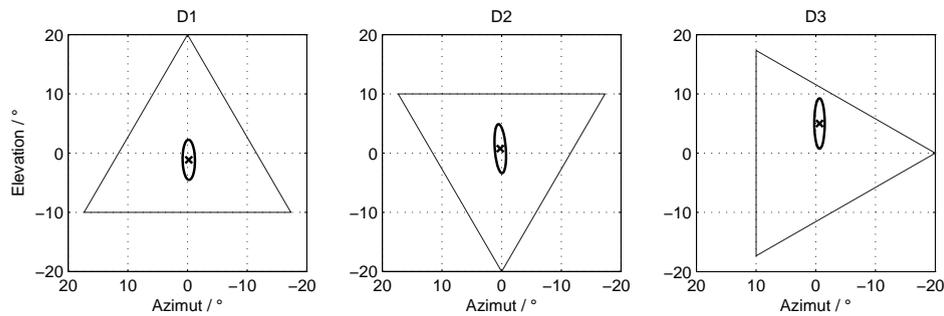
Bei dezentraler bzw. lateraler Wiedergabe konnte keine der Anordnungen überzeugen, wodurch sie als gleichwertig einzustufen sind.

## 5.3 Lautsprechertripel

Die nächste Kategorie der Lautsprecheranordnungen sind die dreieckförmigen Lautsprechertripel. Insgesamt wurden 3 verschiedene Lautsprechertripel hinsichtlich Lokalisation untersucht. Diese sind die Anordnungen D1, D2 und D3 (siehe Tabel-

le 4.2). Alle Dreiecke sind gleichseitig mit einer Seitenlänge von knapp 1.5m und ihrem Höhenschnittpunkt an der Position des Center-Lautsprechers ( $0^\circ, 0^\circ$ ).

Untersuchen wir zunächst die Lokalisation bei frontaler Wiedergabe, dargestellt in Abbildung 5.11.



**Abbildung 5.11:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Anordnungen D1, D2 und D3 bei zentraler Hörposition und frontaler Wiedergabe.

Die Mittelwerte der Anordnungen D1 und D2 liegen in etwa im Höhenschnittpunkt. Lediglich bei Anordnung D3 besitzt einen vertikale Versatz von  $5^\circ$  im Mittel. Die Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Abbildung für die azimuthale Auslenkung aller Dreiecke sind vergleichbar groß, wobei beim Vergleich der vertikalen Ausdehnungen der Konfidenzbereiche die Anordnung D1 am besten abschneidet.

### 5.3.1 Panoramisierung unter Verwendung von VBAP

Für Lautsprecheranordnungen bestehend aus 3 Lautsprechern hat Pulkki ein Panoramisierungsverfahren entwickelt, mit dessen Hilfe unter Verwendung der ICLD Phantomschallquellen innerhalb der beteiligten Lautsprecher positioniert werden können.

Pulkki verallgemeinerte dazu in [Pul01] das bewährte *Tangens-Gesetz* nach Leakey [Lea59] für Stereofonie und führte es in Vektorschreibweise über.

Durch die vektorielle Form ist es nun auch möglich dieses Modell auf planare Lautsprecheranordnungen, wie z.B. Lautsprechertripel anzuwenden.

Ein Lautsprechertripel wird durch die Richtungsvektoren  $\mathbf{l}_m$ ,  $\mathbf{l}_n$  und  $\mathbf{l}_k$  bestimmt. Die Richtung der erzeugten Phantomschallquelle berechnet damit aus dem Vektor-

tripel  $\mathbf{L} = [\mathbf{l}_m \ \mathbf{l}_n \ \mathbf{l}_k]$  sowie der Gewichtung der 3 Lautsprecher mit  $\mathbf{g} = [g_m \ g_n \ g_k]^T$  wie folgt:

$$\mathbf{p}_z = \mathbf{L}\mathbf{g} = g_m\mathbf{l}_m + g_n\mathbf{l}_n + g_k\mathbf{l}_k, \quad (5.7)$$

wobei der Einheitsvektor  $\mathbf{p}_z$  die Richtung der Phantomschallquelle bestimmt. Durch Umformung der Gleichung 5.7 können die Gewichte der einzelnen Lautsprecher bestimmt werden:

$$\mathbf{g} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{p}_z. \quad (5.8)$$

Die Verstärkungsfaktoren der Lautsprecher ergeben sich schließlich durch die Normierung der so gefundenen Gewichte mit  $\mathbf{g}/\|\mathbf{g}\|$ .

Diese lineare Summierung der gewichteten Richtungen der Lautsprecher ist auch die Grundlage des Schnellektors  $\mathbf{r}_V$  (siehe Absatz 5.2.1, Gleichung 5.5) und beide Verfahren zeigen in die selbe Richtung. Deshalb werden sie in weiterer Folge zusammengefasst und als ein einziges Modell behandelt.

Ausgehend vom Schnellektor  $\mathbf{r}_V$  bzw. dem VBAP-Verfahren wurde versucht, die Phantomschallquelle in Richtung des Center-Lautsprechers zu positionieren. Aufgrund der Symmetrie der dreieckförmigen Anordnungen müssen dazu alle Lautsprecher gleich gewichtet sein.

Zusätzlich wurde versucht, die Phantomschallquelle um  $\pm 10^\circ$  entlang der vertikalen (D1, D2) bzw. horizontalen (D3) Symmetrieachse der Anordnungen zu panoramisieren. Dazu wird (unabhängig von der Orientierung des Dreiecks) nach Gleichung 5.8 ein Pegelunterschied zwischen Spitzenlautsprecher und den beiden Basislautsprechern von rund 11.5dB benötigt.

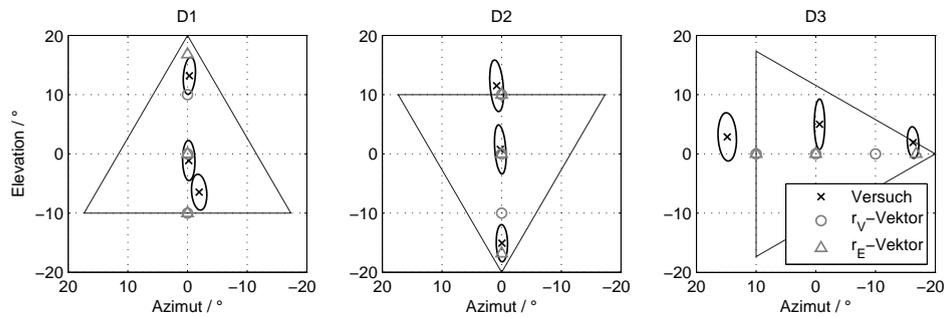
Beim Panoramisieren in die entgegengesetzte Richtung und somit in Richtung der Basis sind nur 2 der 3 Lautsprecher aktiv.

Die Abbildung 5.12 zeigt die Lokalisation der 3 untersuchten Positionen für die Lautsprechertripel D1, D2 und D3 im Vergleich zu den Lokalisationsmodellen nach VBAP (bzw. Schnellektor  $\mathbf{r}_V$ ) und dem Energievektor  $\mathbf{r}_E$ .

Die Konfidenzbereiche der beeinflussten Richtungen aller Konfigurationen sind in etwa gleich groß. Somit scheint die Verwendung von mehr als 2 Lautsprechern keinen negativen Einfluss auf die Lokalisation der Versuchspersonen zu haben.

Interessanterweise scheint zumindest für die Anordnungen D2 und D3 der Energievektor die Antworten besser nachzubilden als das Modell nach Pulkki.

Untersuchen wir die erhaltenen Auslenkungen des Azimut für horizontales bzw. der



**Abbildung 5.12:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Lokalisation für Anordnungen D1, D2 und D3 unter Verwendung von VBAP.

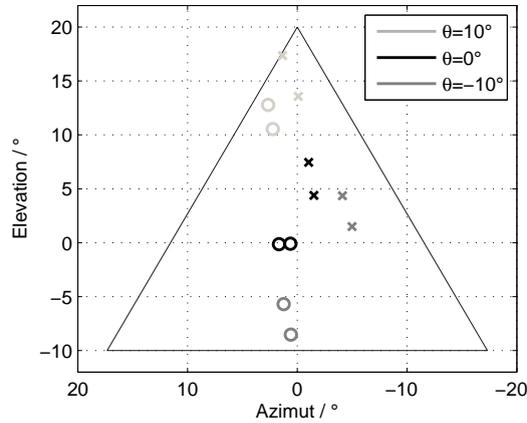
Elevation für vertikales Panoramisieren hinsichtlich ihrer Signifikanz (siehe Tabelle 5.2), so stellen wir fest, dass die 3 Auslenkungen (Variable *ICLD*) aller Anordnungen signifikant unterschiedlich sind. Auch bei der Analyse der benachbarten Werte bleibt diese Signifikanz erhalten ( $p < 0.003$ ).

Variable	D1	D2	D3
	$p_{ver}$	$p_{ver}$	$p_{hor}$
VP	0	0	0.008
Wdhg	< 0.001	0.06	0.651
ICLD	0	0	0
VP*Wdhg	< 0.001	0.145	0.641
VP*ICLD	0.003	0.545	0.005
Wdhg*ICLD	0.142	0.661	0.871

**Tabelle 5.2:** Ergebnisse der Varianzanalyse der dreieckförmigen Anordnungen unter Verwendung von VBAP.

Ähnlich wie beim vertikalen Lautsprecherpaar ist die Variable *Wiederholung* nicht signifikant gleich, bei den Anordnungen D1 und D2 sogar signifikant unterschiedlich. Trotzdem kann eine intersubjektive Variation der wahrgenommenen Elevation der Phantomschallquelle angenommen werden. Vergleichen wir dazu die Ergebnisse der beiden Durchläufe der Versuchspersonen VP1 und VP3 in Abbildung 5.13 für die Anordnung D1.

Die Abbildung zeigt, dass trotz der relativ großen Streuung der einzelnen Auslenkungen (Variable *ICLD*) die Antworten der Versuchsperson doch konsistent sind.



**Abbildung 5.13:** Individuelle Lokalisation der VP1 (x) und VP3 (o) der 3 VBAP-Bedingungen für Anordnung D1.

Zur Bestimmung des besten Lautsprecher-Dreiecks bzgl. Panoramisierung nach VBAP wird an dieser Stelle der Winkelfehler  $e_{dir}$  eingeführt. Dieser Wert beinhaltet die Lokalisationsfehler  $e_\theta$  und  $e_\phi$  aus Gleichung 5.1, welche die Abweichungen der Zielrichtung  $\mathbf{p}_z$  (Gleichung 5.7) von der wahrgenommenen Richtung  $\mathbf{p}_w$  beinhaltet. Die Berechnung dieses Fehlers erfolgt wie folgt:

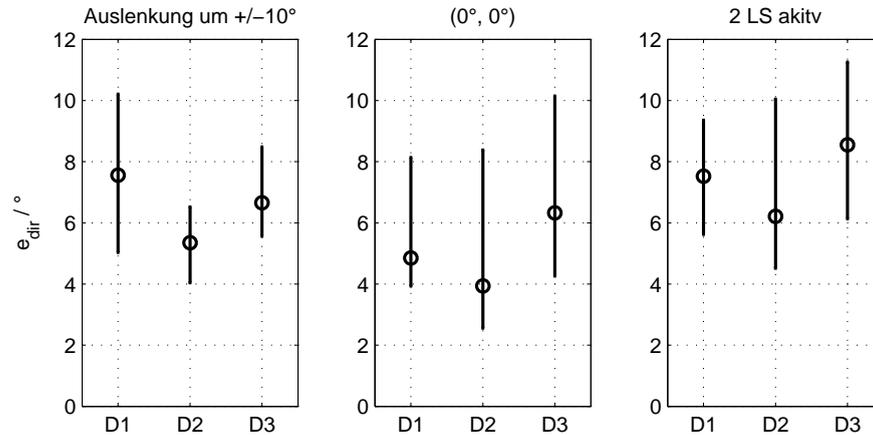
$$e_{dir} = \arccos(\langle \mathbf{p}_z, \mathbf{p}_w \rangle). \quad (5.9)$$

Berechnen wir nun für jede Versuchsperson den Winkelfehler  $e_{dir}$  für die 3 untersuchten Lautsprecheranordnungen. Die Abbildung 5.14 vergleicht die Mediane und 95%-Konfidenzintervalle für die unterschiedlichen Anordnungen, sowie für die 3 untersuchten Bedingungen pro Dreieck.

Insgesamt zeigt sich ein ähnliches Verhalten aller Anordnungen, wobei die Anordnung D2 über alle Bedingungen im Mittel den kleinsten Richtungsfehler verursacht.

Zusätzlich wurde versucht, mit dem modifizierten Lokalisationsmodell nach Langendijk/Bronkorst die erhaltenen Lokalisationskurven aus Abbildung 5.12 zu simulieren. Verschiedene Grenzfrequenzen und Parameter wurden getestet, jedoch ohne Erfolg.

Die Basis dieses Modells ist die Verwendung des Datensatzes des tatsächlichen Mehrdeutigkeitskegels, auf welchem sich die Phantomschallquelle befindet, um einen Vergleich mit dem einfallenden Schallfeld zu ermöglichen. Da die Phantomschallquelle entlang der Medianebene panoramisiert wurde, liegt es nahe, eben



**Abbildung 5.14:** Mediane und 95%-Konfidenzintervalle des Winkelfehlers  $e_{dir}$  der untersuchten Dreiecke.

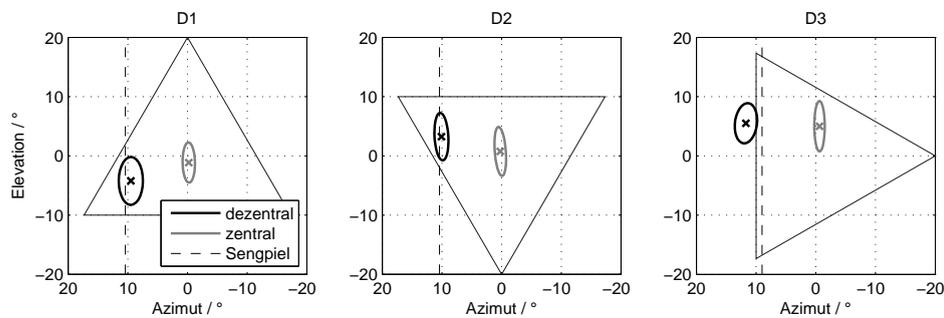
diesen Datensatz als Datenbank des Modells zu verwenden. Nun liegen bei planaren Lautsprecheranordnungen die Lautsprecher nicht nur auf *einem* Kegel, weshalb die Verwendung der HTRFs der Medianebene anscheinend nicht ausreichend ist. Diesbezüglich bedarf es zur Prädiktion der Position von Phantomschallquellen planarer Lautsprecheranordnungen einer Erweiterung des Lokalisationsmodells nach Langendijk/Bronkhorst, bei welchem die Möglichkeit besteht mehrere Datensätze (und somit Richtungskegel gleicher ITD/ILD) in die Vergleichsstufe miteinzubeziehen.

### 5.3.2 Die Lokalisation bei dezentraler Hörposition

Analog zu den linienförmigen Anordnungen werden die 3 Lautsprechertripel für eine Hörpositionen abseits des Zentrums untersucht. Entsprechende Laufzeitverzögerungen der Lautsprechersignale simulieren eine Abweichung der Hörposition um 30cm nach links.

Abbildung 5.15 zeigt einen Vergleich der Konfidenzbereiche der Lokalisation für die 3 untersuchten Anordnungen bei zentraler und dezentraler Hörposition.

Im Vergleich zur Lokalisation bei idealer Hörposition in Abbildung 5.11 hat wie zu erwarten die azimuthale Streuung aller Lautsprecheranordnungen zugenommen. Analog zu den linienförmigen Lautsprecheranordnungen, ist bei einem azimuthalen Öffnungswinkel von ca.  $35^\circ$  (D1 und D2) bzw.  $30^\circ$  (D3) nach Sengpiel mit einer



**Abbildung 5.15:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der dreieckförmigen Lautsprecheranordnungen für dezentrale und zentrale Hörposition bei frontaler Wiedergabe.

Verschiebung der azimuthalen Auslenkung von ca.  $10.5^\circ$  bzw.  $9^\circ$  zu rechnen. Tatsächlich erreichen alle Anordnungen den vorgegebenen Wert, wenn auch bei D3 der Azimutwinkel etwas größer ist.

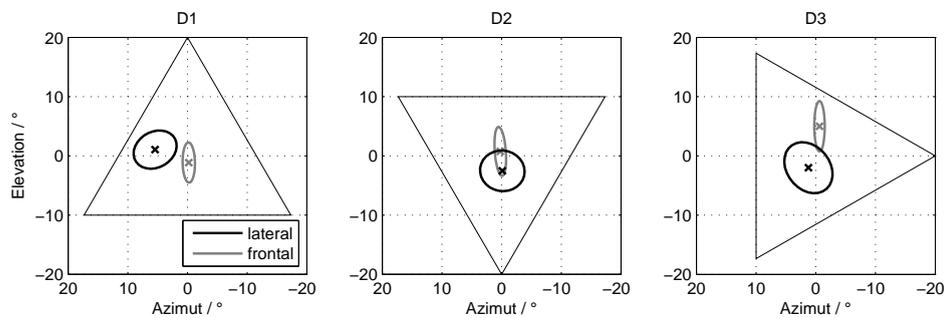
Die Elevation der Phantomschallquelle wird hingegen hin zum nicht verzögerten Lautsprecher verändert. Für die Anordnung D1 ist es LS10 und für D2 LS12, welche in beiden Fällen eine Änderung der Elevation von ca.  $\Delta\theta = 3^\circ$  verursachen. Bei Anordnung D3 ist keine merkliche vertikale Verschiebung zu erkennen, dafür aber eine leichte Verkleinerung der vertikalen Streuung.

### 5.3.3 Die laterale Lokalisation

Ein Vergleich der Lokalisation für frontale und laterale Orientierung der Versuchsperson bei dreieckförmigen Anordnungen ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

Ähnlich wie bei den linienförmigen Anordnungen sind die Streuungen in vertikaler und horizontaler Richtung ungefähr gleich groß und vergleichbar mit der vertikalen Streuung bei zentraler Hörposition.

Auch der Versatz der azimuthalen Auslenkung nach links ist in etwa gleich groß wie jener der Lautsprecherpaare. Lediglich bei Anordnung D2 ändert sich die azimuthale Auslenkung des Mittelwertes im Vergleich zur zentralen Hörposition kaum.



**Abbildung 5.16:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der dreieckförmigen Lautsprecheranordnungen für frontale und laterale Orientierung der Versuchsperson.

### 5.3.4 Zusammenfassung

Betrachten wir die Ergebnisse aller Bedingungen, so schneidet die Anordnung D2 hinsichtlich Lokalisation am Besten ab, dicht gefolgt von der Anordnung D1. Die Anordnung D3 ist durch den vertikalen Versatz bei frontaler Wiedergabe sowie lateraler Orientierung der Versuchsperson am schlechtesten. Für Panoramisierung mittels ICLDs sind alle 3 Anordnungen geeignet.

Bezüglich vertikaler Panormisierung der Phantomschallquelle schneiden die Anordnungen D1 und D2 besser ab als die linienförmige Anordnung V.

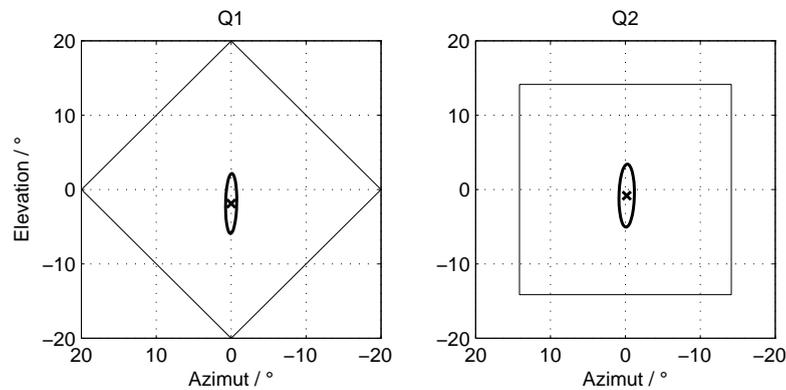
## 5.4 Lautsprecherquadrupel

Die nächste und letzte Kategorie der untersuchten Lautsprecheranordnungen sind die flächenförmigen Lautsprecherquadrupel. Diese Quadrate beinhalten die Anordnungen Q1 und Q2 (siehe Tabelle 4.2) mit einer Seitenlängen von je 1.2m.

Die Anordnung Q1 kann als Kombination von vertikalen und horizontalen Lautsprecherpaar betrachtet werden, während bei Q2 zwei schräge Anordnungen kombiniert wurden.

Betrachten wir die Konfidenzbereiche der Lokalisation beider Anordnungen in Abbildung 5.17 bei zentraler Hörposition.

Der Mittelwert der Antworten beider Anordnungen liegt ziemlich genau im Zen-



**Abbildung 5.17:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Anordnungen Q1 und Q2 bei zentraler Hörposition und frontaler Wiedergabe.

trum  $(0^\circ, 0^\circ)$ , mit einem leichten Versatz nach unten.

Während die vertikale Ausdehnung des Konfidenzbereichs bei beiden Anordnungen ungefähr gleich ist, scheint sich bei Anordnung Q1 das Lautsprecherpaar in der Horizontalebene positiv auf die horizontale Ausdehnung des Streubereichs auszuwirken.

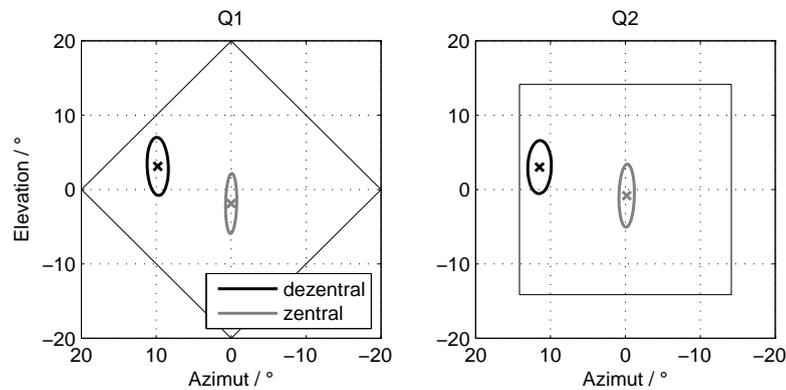
### 5.4.1 Die Lokalisation bei dezentraler Hörposition

Für eine Hörposition 30cm links von der zentralen Hörposition ergibt sich nach Abbildung 5.18 für beide Anordnungen im Mittel der gleiche horizontale Versatz wie bei den Lautsprechertripeln. Und auch der vertikale Versatz hat sich mit ca.  $3^\circ$  bei beiden Anordnungen leicht vergrößert.

Zusätzlich nimmt die horizontale Ausdehnung der Streuung erwartungsgemäß leicht zu, während die vertikale nahezu unverändert bleibt.

### 5.4.2 Die laterale Lokalisation

Betrachten wir Abbildung 5.19, so wird ersichtlich, dass die azimuthale Auslenkung der Mittelwerte der Antworten annähernd mit den Mittelpunkt der Quadrate übereinstimmt.



**Abbildung 5.18:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Anordnungen Q1 und Q2 für dezentrale und zentrale Hörposition bei frontaler Wiedergabe.

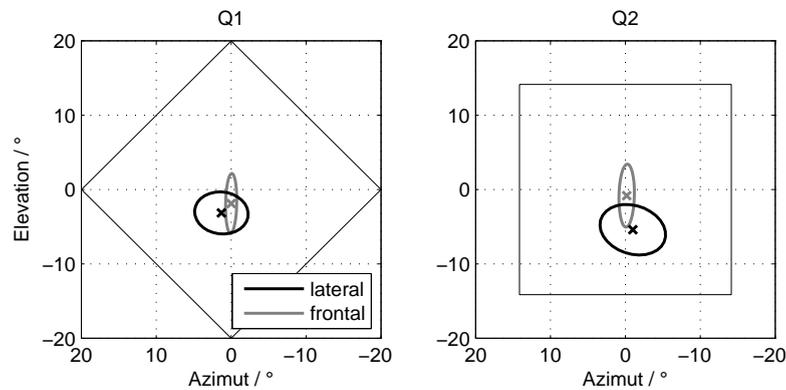
Die vertikale Auslenkung weist im Vergleich zur frontalen Orientierung der Versuchsperson eine leichte Verschiebung in negativer Richtung auf. Dieser Versatz konnte bei den meisten Anordnungen (H, V, S, D2, D3) mit lateraler Orientierung beobachtet werden.

Ähnlich wie bei allen Anordnungen ist die vertikale und horizontale Ausdehnung der Konfidenzbereiche gleich groß. Zusätzlich sei zu erwähnen, dass die horizontale Ausdehnung der Konfidenzbereiche zwar deutlich zugenommen, die vertikale jedoch leicht abgenommen hat.

### 5.4.3 Panoramisierung unter Verwendung von Pegelunterschieden

Aus den Erkenntnissen der Lautsprechertripel wird nun versucht, auch für die quadratischen Lautsprecheranordnungen ein Positionieren der Phantomschallquelle zu ermöglichen und die Ergebnisse mit den uns bekannten Lokalisationsmodellen, welche auf 4 Kanäle adaptiert werden können, nachzubilden. Diese Modelle sind der Schnellevektor  $\mathbf{r}_V$  sowie der Energievektor  $\mathbf{r}_E$  (siehe Absatz 5.2.1).

Für vertikales Panoramisieren der Anordnung Q1 wurden je nach Panoramisierungsrichtung die Lautsprecher ober- bzw. unterhalb der horizontalen Achse (LS1 bzw. LS7) mit doppeltem Verstärkungsfaktor gegenüber den restlichen 3 Lautsprechern betrieben.



**Abbildung 5.19:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Anordnungen Q1 und Q2 für frontale und laterale Orientierung der Versuchsperson.

Eine ähnliche Vorgehensweise wurde auf die Anordnung Q2 angewendet, wobei aufgrund der Anordnung der Lautsprecher jeweils 2 Lautsprecher (LS2 und LS13 bzw. LS6 und LS9) mit doppeltem Amplitudengewicht betrieben wurden.

Das horizontale Panoramisieren erfolgte für beide Anordnungen analog dazu.

Untersuchen wir zunächst die Ergebnisse der Anordnung Q1.

Die Abbildung 5.20 zeigt die Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche im Vergleich zur den Ergebnissen der Lokalisationsmodelle für horizontales und vertikales Panoramisieren.

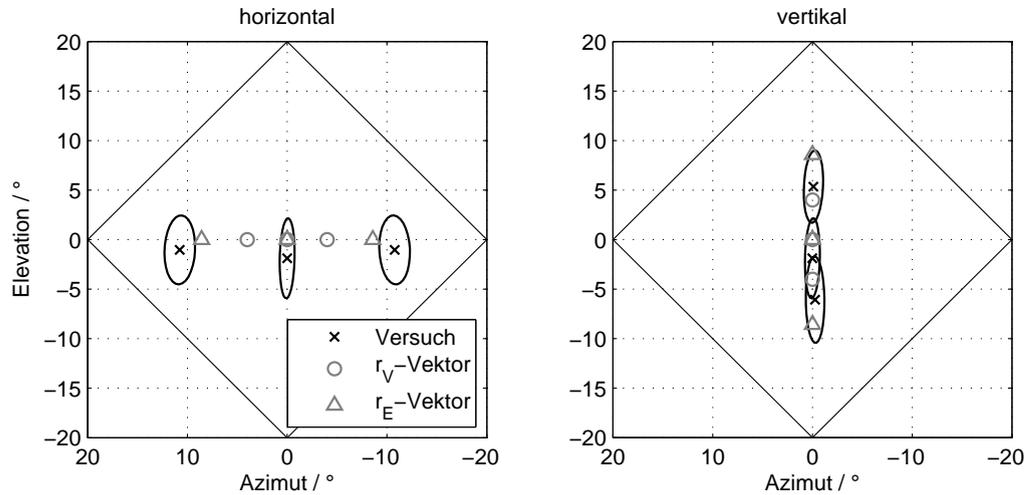
Vergleichen wir die Ergebnisse der beiden Panormisierungsrichtungen, so wird ersichtlich, dass gleiche Amplitudenverhältnisse in horizontaler Richtung eine deutlich größere Auslenkung hervorrufen.

Die Lokalisationskurven der Anordnung Q2 sind in Abbildung 5.21 dargestellt.

Im Vergleich zur Anordnung Q1 bewirken ähnliche Intensitätsunterschiede für beide Richtungen kleinere Auslenkungen.

Zusätzlich dazu sind bei Q2 die Konfidenzbereiche größer als bei Anordnung Q1. Hier scheint sich das Lautsprecherpaar in der Horizontalebene (LS4 und LS11) der Anordnung Q1 positiv auszuwirken.

Vergleichen wir nun die Auslenkungen der Antworten in beiden Abbildungen mit den Lokalisationsmodellen  $\mathbf{r}_V$  und  $\mathbf{r}_E$ , so prognostizieren der Schnellevektor  $\mathbf{r}_V$  alle Auslenkungen bis auf horizontales Panoramisieren der Anordnung Q1.



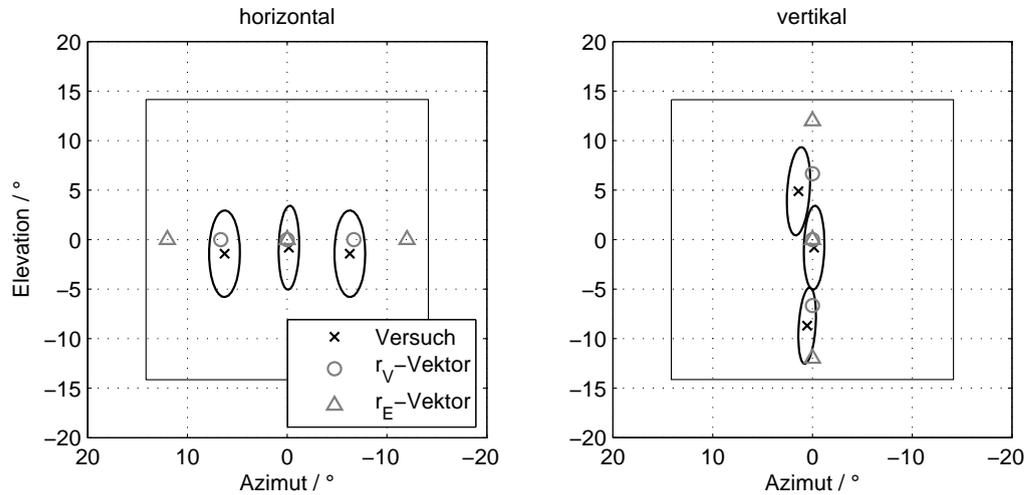
**Abbildung 5.20:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche für Intensitätspannung der Anordnung Q1.

Die Auslenkung in dieser Richtung wird mit den Lautsprechern LS4 und LS11 gesteuert. Aus den Ergebnissen der Linienanordnungen wissen wir bereits, dass sich für dieses Lautsprecherpaar der Energievektor am besten eignet (siehe Abbildung 5.8), was durch die Abbildung 5.20 bestätigt wird.

Zusätzlich zum doppelten Amplitudengewicht zur Steuerung der Auslenkung der Anordnung Q2 wurden je 2 Lautsprecher mit  $\sqrt{2}$ -fachem Verstärkungsfaktor beaufschlagt. Die Versuchsergebnisse werden nun mittels ANOVA analysiert (siehe Tabelle 5.3).

Variable	Q1		Q2	
	$P_{hor}$	$P_{ver}$	$P_{hor}$	$P_{ver}$
Versuchsperson	0.013	0.0	0.647	0.0
Wiederholung	0.0	0.245	0.100	0.748
ICLD	0.0	0.0	0.0	0.0
VP*Wdhg.	0.003	0.072	0.667	0.262
VP*ICLD	0.083	0.381	0.348	0.202
Wdhg.*ICLD	0.0	0.093	0.161	0.286

**Tabelle 5.3:** Ergebnisse der Varianzanalyse der quadratischen Anordnungen unter Verwendung unterschiedlicher ICLDs.



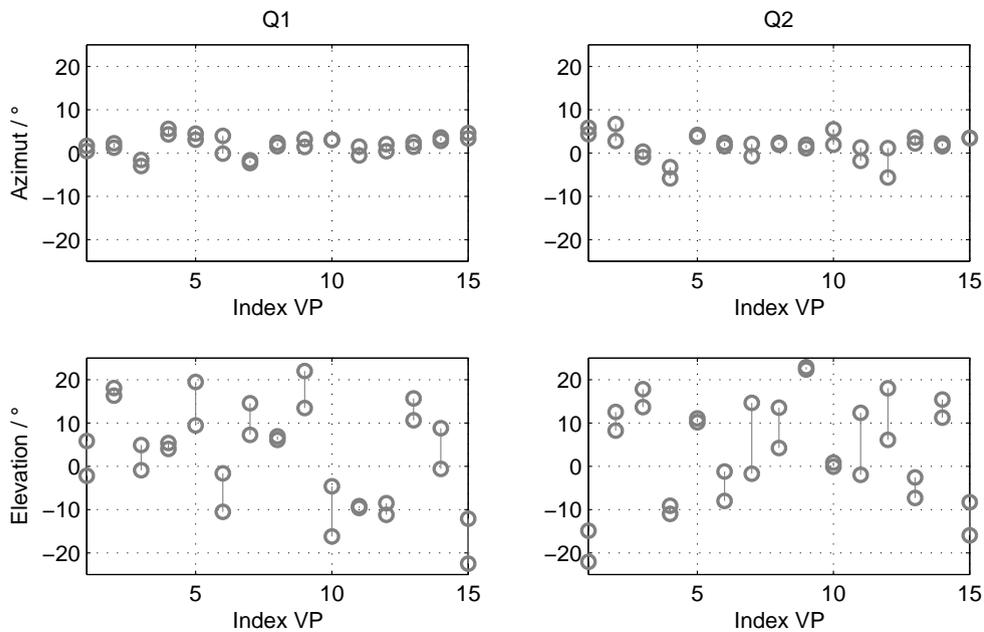
**Abbildung 5.21:** Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche für Intensitätspannung der Anordnung Q2 im Vergleich zu den Lokalisationsmodellen  $r_V$  und  $r_E$ .

Die Analyse der benachbarten Werte der ICLD ergibt, dass bei vertikalem Panoramisieren der Anordnung Q2 beim Übergang von  $\sqrt{2}$ -fachem zu doppelten Amplitudengewicht des unteren Lautsprecherpaares sowie bei Auslenkung der Phantom-schallquelle aus der Mitte (alle Lautsprecher gleich laut) nach oben durch einen Verstärkungsfaktor von  $\sqrt{2}$  der oberen Lautsprecher, die Variable *ICLD* nicht signifikant ist. Somit ist für vertikales Panoramisieren bei Anordnung Q2 eine Zunahme der Gewichtung beider Lautsprecher von mehr als  $\sqrt{2}$  nötig.

Betrachten wir alle Daten zusammen, so sind die Variablen *Versuchsperson* und *ICLD* für beide Richtungen signifikant unterschiedlich.

Die Variable *Wiederholung* weist beim vertikalen Panoramisieren keine Signifikanz auf, während beim horizontalen Panoramisieren diese Variable signifikant unterschiedlich ist. Ähnliche Ergebnisse der ANOVA sind uns bereits aus den anderen Anordnungen bekannt. Betrachten wir nämlich die Darstellung der horizontalen und vertikalen Auslenkung der Antworten der Versuchspersonen in Abbildung 5.22, so können auch hier die Antworten als konsistent angenommen werden.

Somit sollte auch mit den quadratischen Anordnungen ein Positionieren von Phantomschallquellen möglich sein, auch wenn die erreichten Auslenkungen je nach Anordnung und Richtung variieren.



**Abbildung 5.22:** Horizontale und vertikale Auslenkung der 2 Antworten jeder Versuchsperson für die Anordnungen Q1 und Q2 zur Lokalisation der Phantomschallquelle bei zentraler Hörposition.

Über alle untersuchten Bedingungen gesehen schneidet die Anordnung Q1 etwas besser ab. Zwar ist bei zentraler und dezentraler Wiedergabe kein merklicher Unterschied zwischen beiden Anordnungen auszumachen, die Kombination aus vertikalem und horizontalem Lautsprecherpaar der Anordnung Q1 wirkt sich jedoch positiv bei lateraler Abhörorientierung sowie der Steuerbarkeit der Phantomschallquellenposition durch ICLDs aus.

## 5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit dem Vergleich aller Anordnungen für jede getestete Bedingung wird nun versucht, einen Überblick zu verschaffen.

**Zentrale Hörposition.** Den Erwartungen entsprechend ist für eine zentrale Hörposition das horizontale Lautsprecherpaar H den übrigen Anordnungen vorzuziehen. Ein Blick auf die Größe der Konfidenzintervalle verrät, dass damit konsistente Ergebnisse bzgl. der Lokalisation erzielt werden können. Lediglich der vertikale

Versatz nach oben aufgrund von Kammfiltereffekten ist vorhanden.

Eine Alternative zu dieser Anordnung bieten die Lautsprechertripel D1 und D2, deren 95%-Konfidenzbereiche in vertikaler Richtung zwar leicht größer sind als jenes der Anordnung H, jedoch so gut wie keinen vertikalen Versatz aufweisen.

**Dezentrale Hörposition.** Betrachten wir wiederum die Größe der 95%-Konfidenzbereiche, so scheint sich bei dezentraler Hörposition bis auf Anordnung H keine der Anordnungen besonders hervorzuheben. Das horizontale Lautsprecherpaar liefert den kleinsten Konfidenzbereich, jedoch verschiebt sich das wahrgenommene Hörereignis an den Rand der Anordnung.

**Laterale Orientierung.** Ausgehend von den Ausmaßen der 95%-Konfidenzbereiche sind bei der lateralen Abhörsituation die linien- sowie dreieckförmigen Anordnungen zu bevorzugen. Zwar nimmt bei allen Anordnungen im Vergleich zur frontalen Orientierung der Versuchsperson die laterale Auslenkung des Hörereignisses ab, die Lautsprechertripel D1 und D2 erzeugen im Gegensatz zu den linienförmigen Anordnungen jedoch einen deutlich weniger ausgeprägten vertikalen Versatz. Alles in allem erzeugt die Anordnung D2 das stabilste Hörereignis.

**Horizontales Panoramisieren.** Die Anordnungen H, D3, Q1 und Q2 wurden hinsichtlich der Möglichkeit des horizontalen Positionierens der Phantomschallquelle untersucht.

Wie zu erwarten liefert die Anordnung H diesbezüglich die kleinsten Konfidenzintervalle mit einer nahezu linearen Lokalisationskurve. Doch auch die planaren Anordnungen D3 und Q1 konnten überzeugen. Insbesondere die dreieckförmige Anordnung D3, welche trotz fehlender Symmetrie bzgl. der Medianebene eine nahezu lineare horizontale Lokalisationskurve besitzt.

**Vertikales Panoramisieren.** Die untersuchten Anordnungen für vertikales Panoramisieren sind Anordnung V, D1, D2, Q1 und Q2.

Die Lautsprechertripel D1 und D2 werden unter anderen für das Wiedergabeverfahren VBAP eingesetzt. Die Auswertung der Ergebnisse rechtfertigt ihre Anwendung und beide Anordnungen sind für vertikale Panoramisierung geeignet, wobei

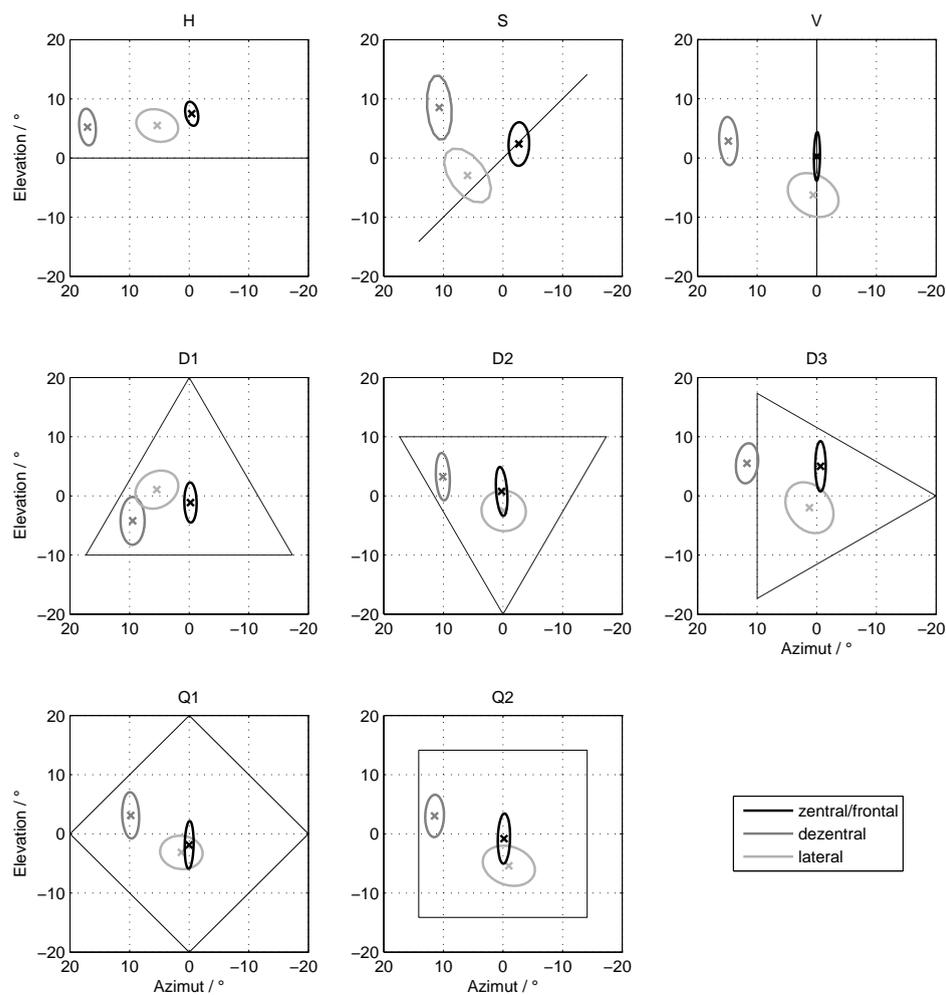
die Anordnung D2 aufgrund ihrer nahezu linearen Lokalisationskurve zu bevorzugen ist. Auch mit den Anordnungen Q1 und Q2 ist es möglich die Position von Phantomschallquellen vertikal zu steuern, ihre 95%-Konfidenzbereiche fallen allerdings größer aus.

Die vertikale linienförmige Anordnung V, mit welcher auf einfachste Weise vertikale Phantomschallquellen erzeugt werden können, kann auch für Panoramisieren verwendet werden. Die Konfidenzbereiche sind aber deutlich größer als jene der Lautsprechertripel D1 und D2, vor allem die vertikale Ausdehnung, welche bei geringen Pegelunterschieden stark zunimmt (siehe Absatz 5.6, Abbildung 5.24).

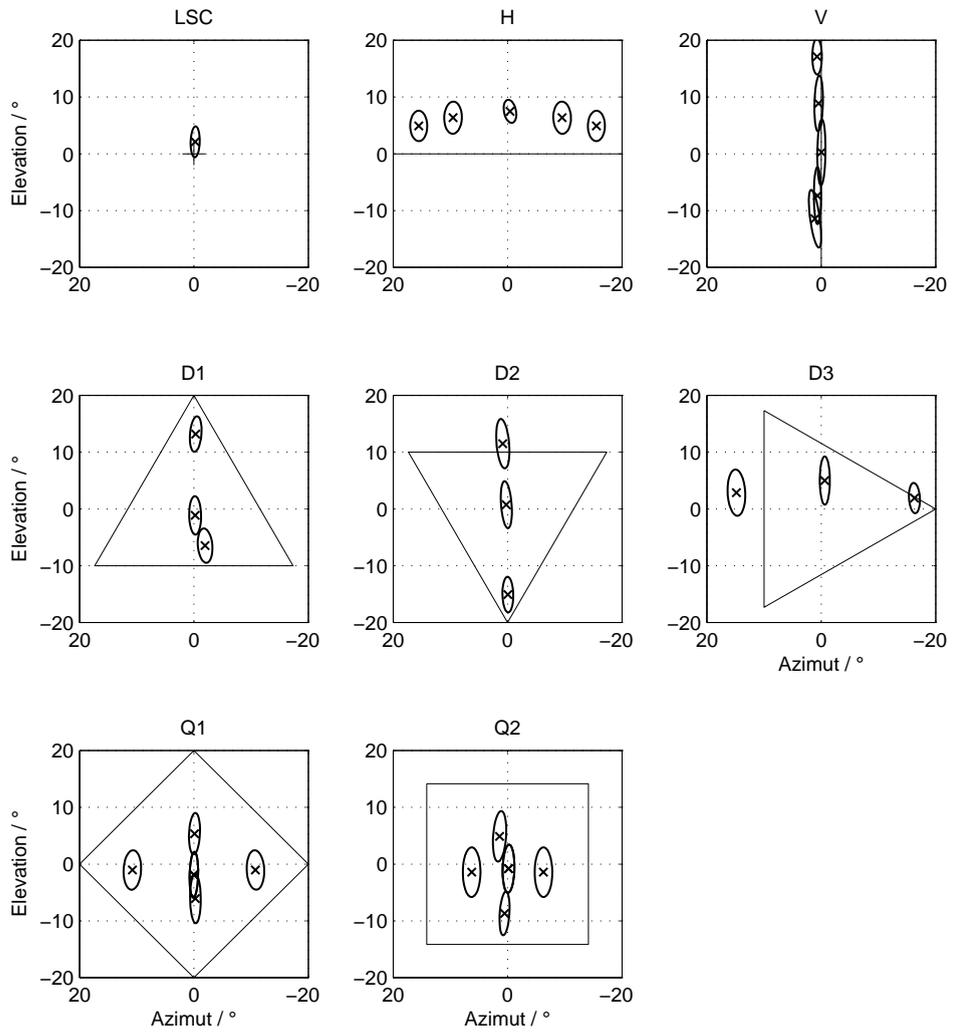
## 5.6 Übersicht

In den folgenden Abbildungen werden nochmals die Lokalisationsergebnisse aller untersuchten Lautsprecheranordnungen angeführt.

Abbildung 5.23 zeigt die Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche für unterschiedliche Hörpositionen sowie Orientierungen der Versuchsperson und Abbildung 5.24 die Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche für Intensitätspannung sowie der Lokalisation der Einzelschallquelle LSC.



**Abbildung 5.23:** Übersicht Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Lokalisation für zentrale und dezentrale Hörposition sowie bei lateraler Orientierung der Versuchsperson.



**Abbildung 5.24:** Übersicht der Mittelwerte und 95%-Konfidenzbereiche der Lokalisation bei Intensitätsstärkung sowie der Lokalisation der Einzelschallquelle LSC.

# Kapitel 6

## Qualitative Attribute

Wird eine Phantomschallquelle innerhalb einer Lautsprecheranordnung durch Panoramisierung positioniert, so ändern sich neben ihrer Richtung auch andere Parameter. Vor allem die Zunahme der Ausdehnung sowie eine Veränderung der Klangfarbe der Phantomschallquelle machen sich dem Hörer bemerkbar.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung und Analyse des in Kapitel 4 beschriebenen und durchgeführten Hörversuches zur Untersuchung der Ausdehnung sowie Klangfarbe von Phantomschallquellen.

### 6.1 Räumliche Ausdehnung der Phantomschallquelle

Der Hörversuch zur Bewertung der Ausdehnung der Phantomschallquelle kann in 2 Abschnitte unterteilt werden. Der erste Abschnitt vergleicht unterschiedliche Anordnungen bzgl. der Ausdehnung der erzeugten Phantomschallquelle, während der zweite Abschnitt den Einfluss eines zusätzlichen Lautsprechers im Zentrum der Anordnung untersucht.

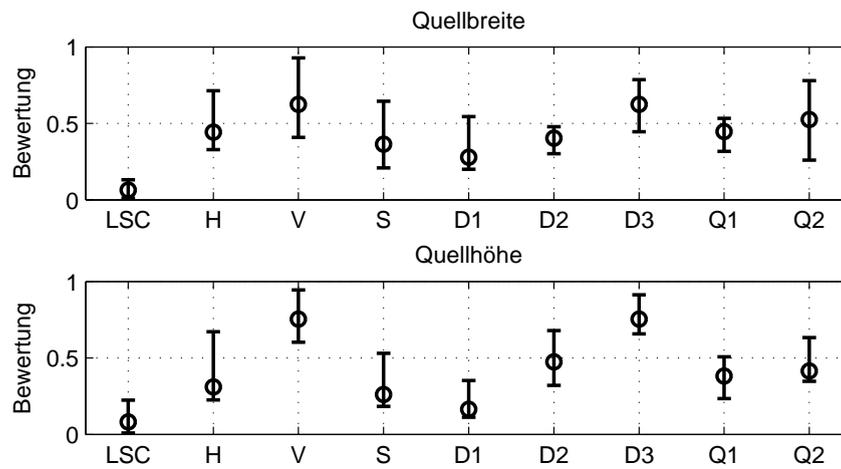
#### 6.1.1 Vergleich der Lautsprecheranordnungen

Im ersten Abschnitt des Hörversuches zur Bewertung von Quellbreite und -höhe werden die untersuchten Lautsprecheranordnungen untereinander verglichen. Diese sind die linienförmigen Anordnungen H, V und S, die Lautsprechertripel D1, D2 und D3 sowie die Lautsprecherquadrupel Q1 und Q2.

Um einen Vergleich mit einer Einzelschallquelle zu ermöglichen, wird als Referenz der Center-Lautsprecher in den Versuch miteinbezogen. Sein Hörereignis sollte die kleinste vertikale und horizontale Ausdehnung besitzen.

Betrachten wir die Ergebnisse der Bewertungen in Abbildung 6.1, so wird diese Annahme bestätigt.

Zusätzlich wird ersichtlich, dass bei Bewertung von Phantomschallquellen die Anzahl aktiver Lautsprecher keinen direkten Einfluss auf die Ausdehnung des Hörereignisses hat.



**Abbildung 6.1:** Mediane und 95%-Konfidenzintervalle von Quellbreite und Quellhöhe der untersuchten Lautsprecheranordnungen.

Vergleichen wir die linienförmigen Lautsprecheranordnungen, so scheint die schräge Anordnung in Bezug auf horizontale sowie vertikale Ausdehnung die kleinste Phantomschallquelle zu erzeugen, dicht gefolgt vom horizontalen Lautsprecherpaar. Das vertikale Paar hingegen erzeugt die größte Ausdehnung der gesamten Versuchsreihe.

Im Vergleich zu den linienförmigen Anordnungen nehmen bei der Bewertung der planaren Anordnungen die Ausmaße der 95%-Konfidenzintervalle leicht ab und die Anordnungen D1 bzw. Q1 erzeugen die kleinsten Hörereignisse.

Betrachten wir die Lautsprechergruppen (linienförmig, Tripel, Quadrupel) für sich, so besteht ein indirekter Zusammenhang zwischen der Ausdehnung der Phantomschallquelle und dem azimuthalen Öffnungswinkel der Anordnung.

Insgesamt scheinen die Antworten der Versuchspersonen zur Evaluierung von Quellbreite und -höhe Ähnlichkeiten aufzuweisen.

Eine mögliche Erklärung dafür ist die Interdependenz der Attribute. Zur Überprüfung dieser Abhängigkeit werden deshalb die Mediane der beiden Beurteilung aller Anordnungen korreliert. Die Auswertung ergibt, dass der Korrelationsgrad der beiden Attribute mit  $\rho = 0.90$  sehr hoch ist.

Eine weitere Ursache für die Ähnlichkeit der Daten könnte auch die mangelnde Differenzierbarkeit der Merkmale durch die Versuchspersonen sein. Zur Analyse der Unterscheidbarkeit wird deshalb der individuelle Korrelationsgrad von Breite und Höhe berechnet. Der Median des individuellen Korrelationsgrades aller Versuchspersonen liegt bei  $\tilde{\rho}_{VP} = 0.48$ , mit einem Maximum von  $\rho_{VP}^{max} = 0.82$ . Es kann deshalb angenommen werden, dass die Versuchspersonen die Merkmale differenzieren konnten.

### 6.1.2 Einfluss des Center-Lautsprechers

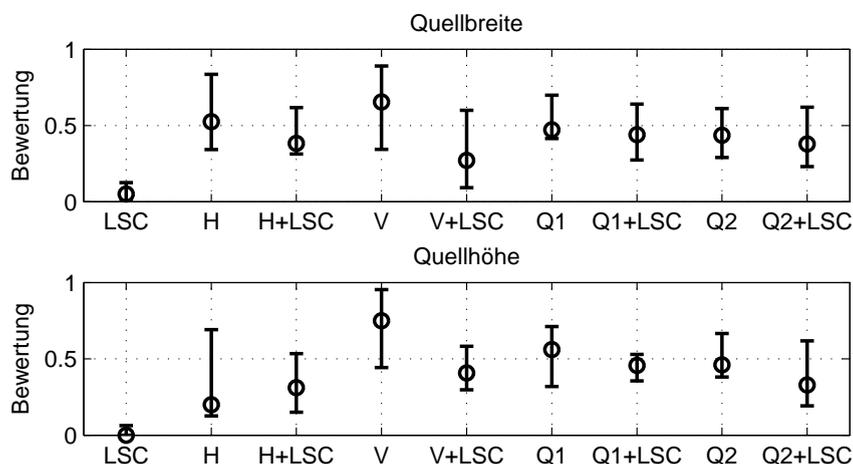
Frank beschäftigte sich in [Fra13b] mit horizontalen Lautsprecherpaaren und den Einfluss eines zusätzlichen Lautsprechers an der (vermeintlichen) Position der Phantomschallquelle. Demnach wird durch das Miteinbeziehen dieses dritten Lautsprechers die Ausdehnung der Phantomschallquellen beeinflusst und die Phantomschallquelle wird schmaler.

Der zweite Abschnitt des Hörversuchs zur Bewertung der Ausdehnung von Phantomschallquellen untersucht die Anwendung dieser Gesetzmäßigkeiten unter anderem auf vertikale Lautsprecheranordnungen.

Dazu wurden das vertikale und horizontale Lautsprecherpaar sowie die beiden Lautsprecherquadrupel Q1 und Q2 jeweils mit und ohne Center-Lautsprecher getestet. Um einen Vergleich mit einer Einzelschallquelle zu ermöglichen wurde auch hier als Referenzanordnung der Center-Lautsprecher LSC in den Versuch miteinbezogen.

Die Ergebnisse des zweiten Teiles sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Vergleichen wir zunächst die Daten der Anordnungen, welche in beiden Teilversuchen vorkommen (Abbildungen 6.1 und 6.2: LSC, H, V, Q1 und Q2) um die Konsistenz der Versuchspersonen zu evaluieren. Dazu berechnen wir für jede Versuchsperson den Korrelationskoeffizienten der Anordnungen, welche doppelt bewertet wurden. Die Analyse ergibt, dass die Bewertung der Quellhöhe deutlich konsistenter erfolgte als die Quellbreite. Der Median der Koeffizienten aller Ver-



**Abbildung 6.2:** Mediane und 95%-Konfidenzintervalle von Quellbreite und Quellhöhe zur Untersuchung des Einflusses des Center-Lautsprechers.

suchspersonen der Bewertung der Quellhöhe beträgt immerhin 0.89 im Vergleich zu 0.58 bei Bewertung der Quellbreite. Interessanterweise scheinen die Antworten einzelner Versuchspersonen nicht grundsätzlich inkonsistent zu sein, sondern jeweils nur bei der Bewertung eines der beiden Attribute.

Wie bereits erwähnt, wurden zur Bewertung der Ausdehnung der Phantomschallquelle alle Lautsprecher mit gleicher Lautstärke betrieben. Aus den Ergebnissen der Lokalisationsversuche (siehe Kapitel 5) wissen wir jedoch, dass die daraus resultierenden Phantomschallquellen nicht für alle untersuchten Lautsprecheranordnungen an der Position des Center-Lautsprechers wahrgenommen werden. Dadurch kann die Hinzugabe des Center-Lautsprecher unter Umständen die Lokalisation der Hörereignisses beeinflussen.

Trotz dieser Beeinflussung können beim Vergleich der einzelnen Anordnungen mit und ohne LSC die Erkenntnisse aus [Fra13b] weitestgehend bestätigt werden. So hat für alle Anordnungen bis auf eine Ausnahme, die Zugabe des Center-Lautsprechers eine Verkleinerung des Hörereignisses in beide Richtungen zur Folge. Lediglich die vertikale Ausdehnung der Phantomschallquelle des horizontalen Lautsprecherpaares weist eine schwach signifikante Gleichheit ( $p = 0.915$ ) auf. Vor allem beim vertikalen Lautsprecherpaar wirkt sich die Miteinbeziehung des zusätzlichen Lautsprechers auf die Ausdehnung der Phantomschallquelle aus und die Bewertungen sind signifikant unterschiedlich zu jenen ohne dem LSC (Breite:  $p = 0.015$ , Höhe:  $p = 0.055$ ).

### 6.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Beurteilung der Lautsprecheranordnungen bzgl. der Größe der erzeugten Phantomschallquellen ergab, dass Breite und Höhe der Phantomschallquelle in etwa gleich sind. Dies gilt für alle Anordnungen.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass für Anordnungen mit gleicher Lautsprecheranzahl ein indirekter Zusammenhang zwischen der Ausdehnung der Phantomschallquelle und dem azimutalen Öffnungswinkel der Anordnung besteht. Die Lautsprecheranzahl als solche hat hingegen keinen Einfluss.

Ein Vergleich der Anordnungen mit und ohne Center-Lautsprecher bestätigte die Ergebnisse aus [Fra13b] und erweitert diese z.T. auf die vertikale Ausdehnung.

## 6.2 Klangfarbe

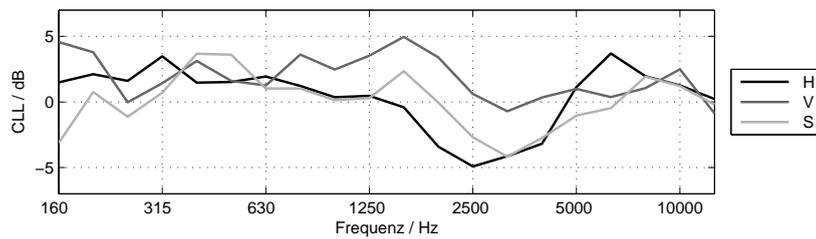
Die Klangfarbe der erzeugten Phantomschallquellen wird mittels CLL modelliert. Als Ausgangsgröße dieses Modells erhalten wir dabei ein Spektrum, welches die wahrgenommene Klangfarbe repräsentiert.

Wie bereits in in Kapitel 4 erwähnt, sind die CLL-Spektren auf jenen des Center-Lautsprechers normiert, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

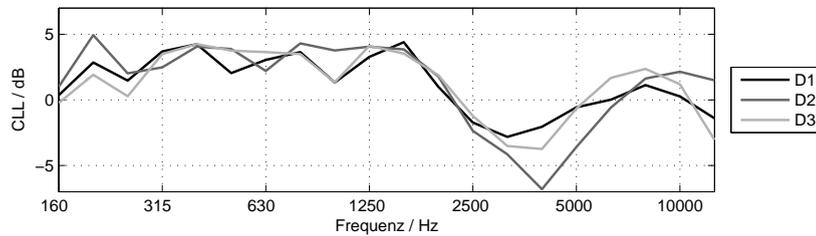
Betrachten wir nun die berechneten CLL-Spektren verschiedener Lautsprecheranordnungen bei zentraler Hörposition, wobei alle Lautsprecher mit gleichem Amplitudengewicht beaufschlagt wurden.

Abbildung 6.3 zeigt einen ähnlichen Verlauf aller CLL-Spektren, wobei alle Anordnungen bis auf die vertikale Anordnung V ein lokales Minimum mit einer Mittenfrequenz zwischen 3 – 5kHz besitzen.

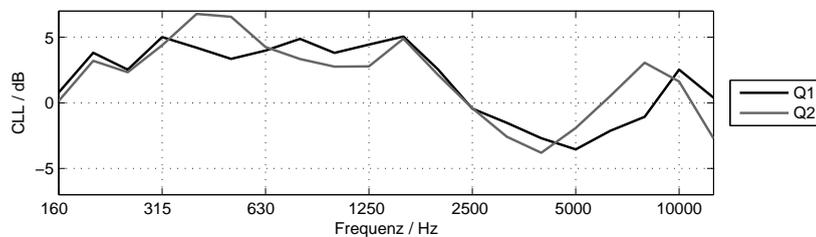
Dieser Einbruch des Spektrums ist auf die Überlagerung der Lautsprechersignale am Ohr zurückzuführen. Nach [Fra13a] sinkt die Mittenfrequenz des Einbruchs mit Zunahme des azimutalen Öffnungswinkels der Lautsprecheranordnung. Beim Maximum des azimutalen Öffnungswinkels der Lautsprecheranordnungen von 40° (Anordnung V) liegt die berechnete erste Kerbe des Kammfilters bei  $f_1 = 3150\text{Hz}$ , [Fra13a].



(a) Lautsprecherpaare



(b) Lautsprechertripel



(c) Lautsprecherquadrupel

**Abbildung 6.3:** CLL-Spektren der untersuchten Lautsprecheranordnungen normiert auf jenes des Center-Lautsprechers.

### 6.2.1 Klangfarbenänderung durch Panoramisieren

Das Originalspektrum einer Schallquelle ist dem Hörer meist nicht bekannt und so sind Klangfarbenabweichungen der Phantomschallquelle vom Originalsignal aufgrund der fehlenden Referenz nicht weiter störend. Wird diese Phantomschallquelle aber innerhalb der Lautsprecheranordnung panoramisiert, so kann sich ihr Spektrum ändern. Diese Änderung der Klangfarbe wird sehr wohl vom Hörer wahrgenommen.

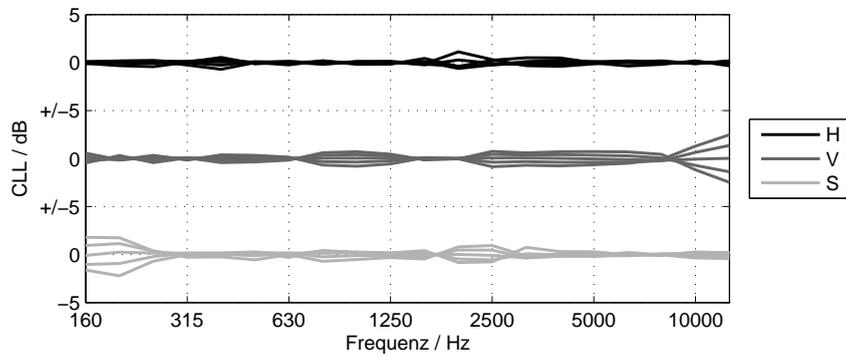
Deshalb wird nun die Änderung der CLL-Spektren der Lautsprecheranordnungen für Intensitätspanoramisieren analysiert.

Zusätzlich zur bereits untersuchten Bedingung (gleiche Amplitudengewichtung aller Lautsprecher) wurden Pegeldifferenzen von  $\pm 3\text{dB}$  und  $\pm 6\text{dB}$  je nach Anordnung

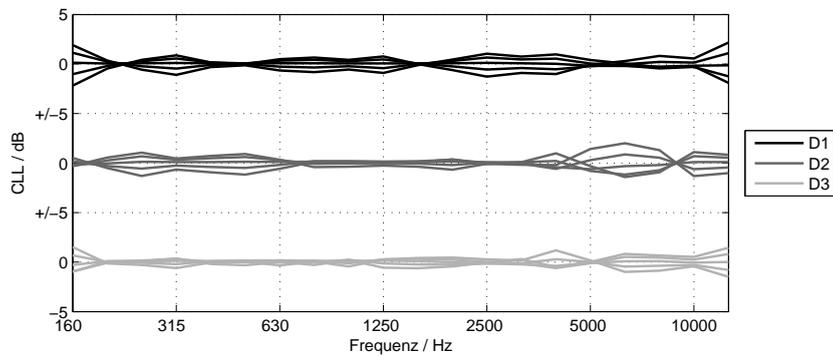
bzgl. der Median- und/oder der Horizontalebene festgesetzt. Dadurch erhalten wir für jede Anordnung und Panoramisierungsrichtung (horizontal und/oder vertikal) eine Gruppe von 5 CLL-Spektren, welche auf ihr Mittel normiert wurde.

Die Abbildung 6.4 zeigt die aufgrund von Panoramisieren entstehenden CLL-Spektren für die untersuchten Anordnungen.

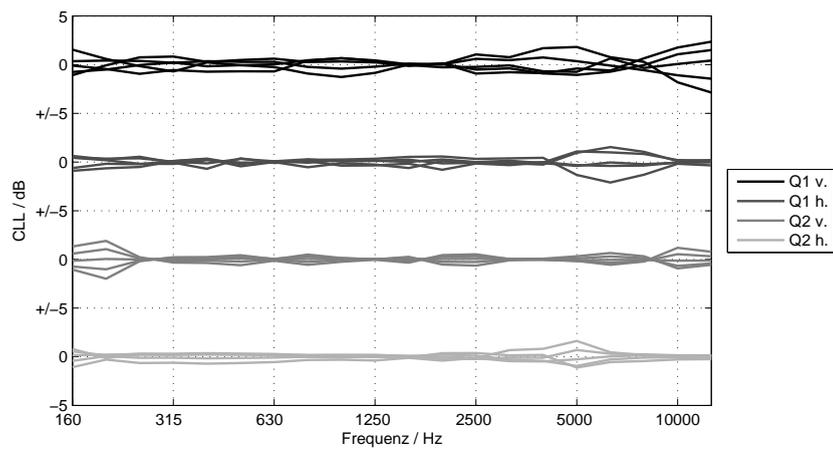
Die Analyse der Spektren deutet darauf hin, dass vertikales Panoramisieren einen größeren Einfluss auf die Veränderung der Klangfarbe hat, als Panoramisieren entlang der Horizontalebene. Hier scheint wie bei der vertikalen Lokalisation einzelner Schallquellen die Feinstruktur der Pinna der entscheidende Faktor zu sein, wodurch die HRTFs entlang vertikaler Richtung mehr beeinflusst werden als in horizontaler.



(a) Lautsprecherpaare; Panoramisieren entlang jeweiliger Anordnung



(b) Lautsprechertripel; vertikales Panoramisieren für D1 und D2, horizontales Panoramisieren für D3.



(c) Lautsprecherquadrupel; jeweils horizontales und vertikales Panoramisieren

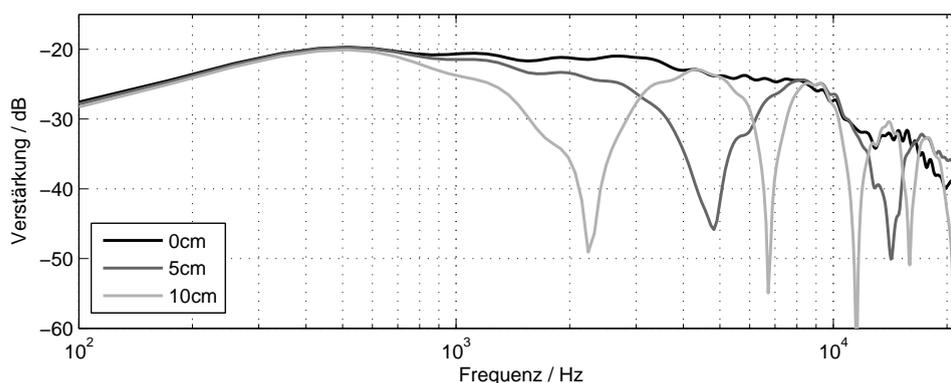
**Abbildung 6.4:** CLL-Spektren unterschiedlicher Pegeldifferenzen des Summenpegels, normiert auf deren Mittelwert.

## 6.2.2 Klangfarbenänderung durch Kopfbewegung

Eine Abweichung der Hörposition von der zentralen Hörposition kann sich neben der Lokalisation auch auf die Klangfarbe der Phantomschallquelle auswirken.

Je nach Anordnung können Kopfbewegungen Abweichungen der Laufzeiten der Lautsprechersignale verursachen. Durch Überlagerung der verschiedenen verzögerten Signale am Ohr entstehen Kammfilter.

Zur Veranschaulichung solcher Kammfilter sind in Abbildung 6.5 die Frequenzverläufe der durch das Messmikrofon erhaltenen überlagerten Impulsantworten der LS4 und LS11 (Anordnung H) für unterschiedliche Laufzeitverzögerungen dargestellt. Diese Verzögerungen wurden so gewählt, dass neben der zentralen Hörposition (gleiche Laufzeiten der Lautsprechersignale) Abweichungen des Messmikrofons um 5cm und 10cm nach rechts simuliert wurden.

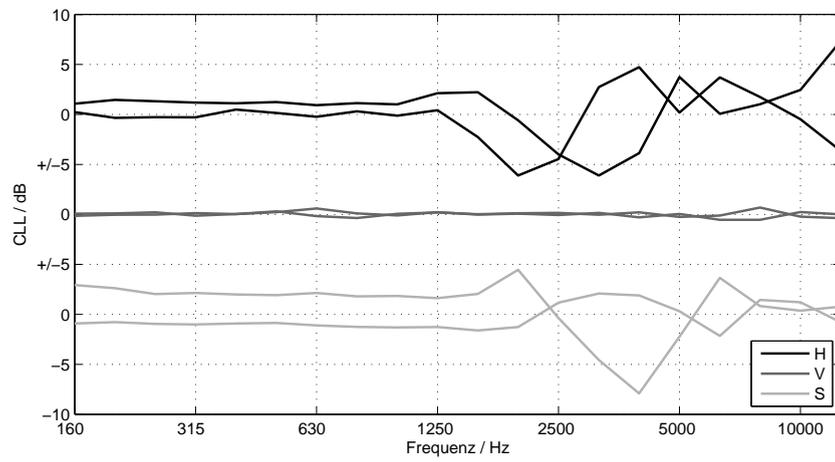


**Abbildung 6.5:** Frequenzverläufe der überlagerten Impulsantworten der LS4 und LS11 für unterschiedliche Offsets der Positionen des Messmikrofons.

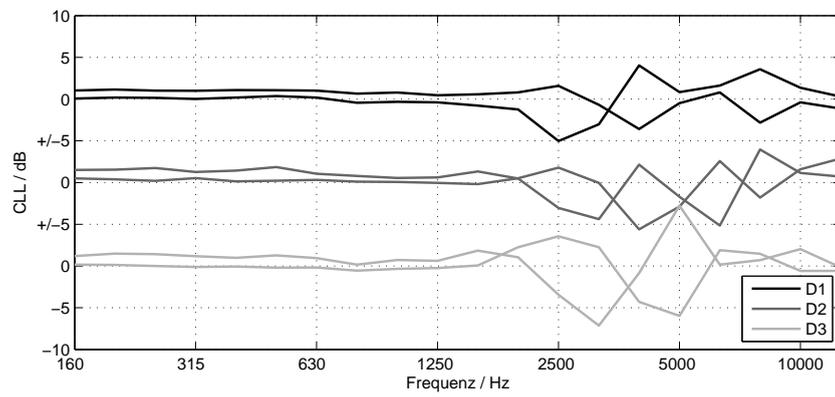
Die Eingangsgrößen des CLL-Modells für die bisherigen Berechnungen stammen aus Kunstkopfaufnahmen an der zentralen Hörposition. Zur Simulation von Kopfbewegungen in seitlicher Richtung wurden zusätzlich Kunstkopfaufnahmen mit einem seitlichen Versatz von 5cm und 10cm nach rechts angefertigt. Dadurch können drei CLL-Spektren unterschiedlicher Kopfpositionen generiert werden.

Die Darstellung der Klangfarbenänderung errechnet sich aus der Differenz der CLL-Spektren für die benachbarten Kopfpositionen. Somit reduziert sich die Darstellungen von 3 gemessenen Spektren auf 2 Differenzspektren und es werden lediglich die aufgrund der Kopfbewegung erfahrene Änderung der Klangfarbe betrachtet.

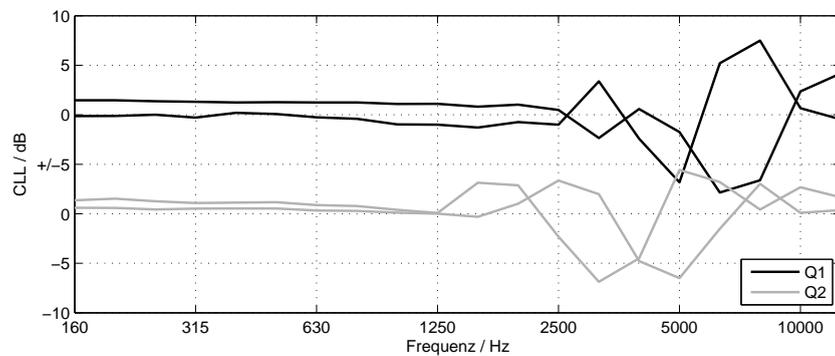
Die Abbildung 6.6 zeigt die berechneten Differenzspektren.



(a) Lautsprecherpaare



(b) Lautsprechertripel



(c) Lautsprecherquadrupel

**Abbildung 6.6:** Differenz der CLL-Spektren bei inkrementeller Veränderung der Kopfposition.

Es ist wiederum zu erkennen, dass alle Anordnungen in etwa die selben CLL-

Differenzspektren hervorrufen und die Verläufe ähneln den CLL-Spektren bei zentraler Hörposition.

Eine Ausnahme stellt dabei die Anordnung V dar. Durch die vertikale Anordnung der Lautsprecher werden bei seitliche Kopfbewegungen die Laufzeiten der Lautsprechersignale im gleichen Ausmaß beeinflusst, weshalb keine Kammfilter auftreten. Die Änderungen der CLL-Spektren stammen somit lediglich von der unterschiedlichen richtungsabhängigen Filterung der Pinna. Im Vergleich zu den Kammfiltern ist ihr Einfluss gering.

### **6.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Allgemein wird die Klangfarbe der Lautsprecheranordnungen von Kammfiltern vor allem im Bereich zwischen 3 – 5kHz beeinflusst. Diese entstehen durch die Superposition der Signale am Ohr und betreffen aus geometrischen Gründen lediglich Anordnungen mit horizontalem Anteil.

Auch bei Kopfbewegungen tragen Kammfilter den größten Anteil zur Beeinflussung der Klangfarbe bei, treten jedoch, je nach Richtung der Kopfbewegung, nur für Anordnungen mit Ausdehnungen in selbiger Richtung auf.

Die Analyse der Klangfarbenänderung bei Panoramisieren ergab, dass vertikales Panoramisieren aufgrund der Feinstruktur der Pinna größeren Einfluss auf die Klangfarbe hat als vergleichbares horizontales Panoramisieren. Im Vergleich zu den beschriebenen Kammfiltereffekten ist der Einfluss der HRTFs jedoch gering.

# Kapitel 7

## Conclusio

Die Lokalisation von Phantomschallquellen vertikaler Lautsprecheranordnungen kann durch die bisherigen Modelle des Richtungshörens (interaurale Reizunterschiede sowie spektrale Verfärbungen) nicht erklärt werden. Dennoch zeigt diese Arbeit, dass es durchaus möglich ist, mit einem rein vertikalen Lautsprecherpaar eine Phantomschallquelle zu erzeugen.

Die Ergebnisse aus dem durchgeführten Hörversuch deuten darauf hin, dass die Lokalisation vertikal erzeugter Phantomschallquellen subjektiv erfolgt, wodurch die Erkenntnisse aus [Pul01] bestätigt werden. Die individuelle Streuung der Wahrnehmung der Richtung des Hörereignisses ist zwar um einiges größer als bei horizontal erzeugten Phantomschallquellen, bei welchen Intensitäts- und Laufzeitunterschiede deren Position frequenzabhängig eindeutig bestimmen. Dennoch wurde gezeigt, dass es möglich ist durch Pegeldifferenzen der Lautsprechersignale die Phantomschallquelle innerhalb der Lautsprecheranordnung vertikal zu positionieren.

Mit der Einführung einer Erweiterung des Lokalisationsmodells nach Langendijk/Bronkhorst [LB02] wurde ein Ansatz gefunden, der die Lokalisation solcher vertikal erzeugter Phantomschallquellen prognostizieren kann.

Neben der rein vertikalen Anordnung wurden andere linienförmige sowie planare Anordnungen bezüglich Lokalisation sowie der Möglichkeit des Panoramisierens einer Phantomschallquelle durch Intensitätsunterschiede in vertikaler und horizontaler Richtung getestet.

Um eine Beurteilung der Anordnungen zu ermöglichen, wurde neben der zentralen Hörposition mit frontaler Wiedergabe die Lokalisation bei dezentraler sowie lateraler Orientierung des Hörers untersucht. Wie zu erwarten, konnte vor allem

das horizontale Lautsprecherpaar (Standard-Stereo-Anordnung) durch lineare Lokalisationskurven und geringe Streuungen der Antworten der Versuchspersonen überzeugen. Doch auch planare Anordnungen, insbesondere die mediansymmetrischen Lautsprechertripel besitzen gute Lokalisationseigenschaften und konnten sich für die untersuchten Abhörsituationen empfehlen.

Analog zur vertikalen Lautsprecheranordnung wurde das Lokalisationsmodell nach Langendijk/Bronkhorst auf die planaren Anordnungen angewendet und versucht die Lokalisation elevierter Phantomschallquellen zu prognostizieren. Dies führte jedoch zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen, da das Modell durch den eindimensionalen HRTF-Datensatz der Vergleichsstufe limitiert ist. Eine Erweiterung dieser Vergleichsstufe und somit des Modells wäre erforderlich, um eine Anwendbarkeit für planare Anordnungen zu ermöglichen. Zusätzlich kann diese Vervollständigung wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf die Erklärung psychoakustischer Phänomene zur Lokalisation vertikal erzeugter Phantomschallquellen liefern.

Zur Erweiterung der Beurteilung der Lautsprecheranordnungen wurden qualitativen Merkmale der Phantomschallquellen analysiert.

Eines der untersuchten Attribute ist die wahrgenommene Ausdehnung des erzeugten Hörereignisses in vertikaler sowie horizontaler Richtung. Die Beurteilung durch die Versuchspersonen ergab, dass aufgrund des hohen Korrelationsgrades zwischen der Bewertung beider Dimensionen ( $\rho = 0.90$ ), das Ausmaß der erzeugten Phantomschallquellen aller Anordnungen in vertikaler sowie horizontaler Richtung in etwa gleich ist.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass ist die Ausdehnung der Phantomschallquelle unabhängig von der Lautsprecheranzahl ist.

Vergleichen wir die Ausdehnung der Phantomschallquelle von Anordnungen mit gleicher Lautsprecheranzahl untereinander, so besteht ein indirekter Zusammenhang zwischen der Ausdehnung der Phantomschallquelle und dem azimuthalen Öffnungswinkel der Anordnung.

Neben der Beurteilung der Anordnungen wurde der Einfluss eines weiteren Lautsprechers im Zentrum überprüft. Die Analyse ergab, dass für alle vertikalen Anordnungen ein zusätzlicher Lautsprecher eine Verkleinerung des Hörereignisses sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zur Folge hat.

Das zweite Merkmal, welches eine Beurteilung der Lautsprecheranordnungen ermöglicht ist die wahrgenommene Klangfarbe der Phantomschallquelle. Diese wurde

mittels CLL (engl. Composite Loudness Level) modelliert und mit dem CLL einer Einzelschallquelle verglichen.

Die Analyse der erhaltenen CLL-Spektren ergab, dass vor allem Kammfilter, welche bei horizontalen Anordnungen auftreten, die Klangfarbe der Phantomschallquelle beeinflussen. Beim Vergleich der unterschiedlichen CLL-Spektren sind jedoch keine merklichen Unterschiede zwischen den Anordnungen erkennbar und sie können somit als gleichwertig angenommen werden.

Zusätzlich zum Vergleich mit einer Einzelschallquelle erweitern die Untersuchungen des Einflusses von Intensitätsspannung sowie Kopfbewegungen auf die Klangfarbe der Phantomschallquelle die Beurteilung der Lautsprecheranordnungen.

Kopfbewegungen führen ihrerseits durch Änderung der Laufzeiten der Lautsprechersignale wiederum zu Kammfiltern, treten jedoch je nach Richtung der Kopfbewegung nur für Anordnungen mit Ausdehnungen in selbiger Richtung auf. Hinzu kommt, unabhängig von der Geometrie der Anordnung, eine Veränderung der Klangfarbe durch die unterschiedliche richtungsabhängige Filterung des Schalls durch die Pinna. Ihr Einfluss auf die CLL ist im Vergleich zu Kammfiltern jedoch gering.

Bei Intensitätsspannung führen wiederum Änderungen der HRTFs zu Klangverfärbungen. Hier hat sich gezeigt, dass aufgrund der Feinstruktur der Pinna vertikales Panoramisieren die HRTFs in größerem Ausmaß beeinflusst als Panoramisieren in horizontaler Richtung.

# Literaturverzeichnis

- [AAD01] V. R. Algazi, C. Avendano, and R. O. Duda, “Elevation localization and head-related transfer function analysis at low frequencies,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, no. 3, pp. 1110–1122, 2001.
- [Ame60] American Standards Association, “Acoustical terminology si, 1–1960,” *American Standards Association, New York*, 1960.
- [Aur] Auro Technologies, “Auro 3D.” [Online]. Available: <http://www.auro-technologies.com/system/concept/>
- [Bau12] R. Baumgartner, “Modeling sagittal-plane sound localization with the application to subband-encoded head-related transfer functions,” Master’s thesis, Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, 2012.
- [BF11] S. Braun and M. Frank, “Localization of 3D Ambisonics Recordings and Ambisonics Virtual Sources,” *International Conference on Spatial Audio, Detmold*, 2011.
- [Bla83] J. Blauert, *Spatial hearing - The psychophysics of human sound localization*. The MIT Press, 1983.
- [BM<sup>+</sup>11] E. Blanco-Martin *et al.*, “Objective measurement of sound event localization in horizontal and median planes,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 59, no. 3, pp. 124–136, 2011.
- [BML13] R. Baumgartner, P. Majdak, and B. Laback, “Assessment of sagittal-plane sound localization performance in spatial-audio applications,” in *The Technology of Binaural Listening*, ser. Modern Acoustics and

Signal Processing, J. Blauert, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 93–119.

- [BvWvO10] P. Bremen, M. M. van Wanrooij, and A. J. van Opstal, “Pinna cues determine orienting response modes to synchronous sounds in elevation,” *The Journal of Neuroscience*, vol. 30, no. 1, pp. 194–204, 2010.
- [CT03] D. Cabrera and S. Tilley, “Parameters for auditory display of height and size,” in *Proc. ICAD, Boston*, 2003.
- [Dol] Dolby Laboratories, “Dolby Atmos.” [Online]. Available: <http://www.dolby.com/us/en/professional/technology/cinema/dolby-atmos.html>
- [Fle40] H. Fletcher, “Auditory patterns,” *Reviews of modern physics*, vol. 12, no. 1, pp. 47–73, 1940.
- [FMSZ10] M. Frank, L. Mohr, A. Sontacchi, and F. Zotter, “Flexible and intuitive pointing method for 3-d auditory localization experiments,” in *Audio Engineering Society Conference: 38th International Conference: Sound Quality Evaluation*, Jun 2010.
- [Fra13a] M. Frank, “Phantom sources using multiple loudspeakers in the horizontal plane,” Ph.D. dissertation, Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, 2013.
- [Fra13b] —, “Source Width of Frontal Phantom Sources: Perception, Measurement, and Modeling,” *Archives of Acoustics*, vol. 38, no. 3, 2013.
- [Ger92] M. A. Gerzon, “General metatheory of auditory localisation,” in *Audio Engineering Society Convention 92*, vol. 3, 1992.
- [Gri97] D. Griesinger, “The psychoacoustics of apparent source width, spaciousness and envelopment in performance spaces,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 83, no. 4, pp. 721–731, 1997.
- [HHO05] K. Hamasaki, K. Hiyama, and R. Okumura, “The 22.2 multichannel sound system and its application,” in *Audio Engineering Society Convention 118*, May 2005.
- [HO98] P. M. Hofman and A. J. V. Opstal, “Spectro-temporal factors in two-

- dimensional human sound localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, no. 5, pp. 2634–2648, 1998.
- [HVRVO98] P. M. Hofman, J. G. Van Riswick, and A. J. Van Opstal, “Relearning sound localization with new ears,” *Nature neuroscience*, vol. 1, no. 5, pp. 417–421, 1998.
- [Iid08] K. Iida, “Estimation of sound source elevation by extracting the vertical localization cues from binaural signals,” *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 4, no. 1, 2008.
- [ITU97] ITU, “ITU-R BS.1116-1 methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems,” ITU, Tech. Rep., 1994-1997.
- [JSC00] C. Jin, M. Schenkel, and S. Carlile, “Neural system identification model of human sound localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 108, no. 3, pp. 1215–1235, 2000.
- [KA12] T. Kimura and H. Ando, “Listening test for three-dimensional audio system based on multiple vertical panning,” in *Acoustics Hong Kong*, 2012.
- [LB02] E. H. A. Langendijk and A. W. Bronkhorst, “Contribution of spectral cues to human sound localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, no. 4, pp. 1583–1596, 2002.
- [Lea59] D. Leakey, “Some measurements on the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 31, p. 977, 1959.
- [Lin86] W. Lindemann, “Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. I. Simulation of lateralization for stationary signals,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6, pp. 1608–1622, 1986.
- [MM02] E. A. Macpherson and J. C. Middlebrooks, “Listener weighting of cues for lateral angle: the duplex theory of sound localization revisited,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 5, pp. 2219–2236, 2002.

- [OPK02] K. Ono, V. Pulkki, and M. Karjalainen, “Binaural modeling of multiple sound source perception: Coloration of wideband sound,” in *Audio Engineering Society Convention 112*, 4 2002.
- [P+01] V. Pulkki *et al.*, *Spatial sound generation and perception by amplitude panning techniques*. Helsinki University of Technology, 2001.
- [PK01] V. Pulkki and M. Karjalainen, “Localization of Amplitude-Panned Virtual Sources I: Stereophonic Panning,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, no. 9, pp. 739–752, 2001.
- [PNSHR87] R. Patterson, I. Nimmo-Smith, J. Holdsworth, and P. Rice, “An efficient auditory filterbank based on the gammatone function,” in *a meeting of the IOC Speech Group on Auditory Modelling at RSRE*, vol. 2, no. 7, 1987.
- [Pul01] V. Pulkki, “Localization of Amplitude-Panned Virtual Sources II: Two- and Three-Dimensional Panning,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, no. 9, pp. 753–767, 2001.
- [Ray07] L. Rayleigh, “On our perception of sound direction,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 13, no. 74, pp. 214–232, 1907.
- [Sen] E. Sengpiel, “Gleichungen für die Pegeldifferenz- und Laufzeitdifferenz-Lokalisationskurve.” [Online]. Available: <http://www.sengpielaudio.com/>
- [SMR09] L. S. R. Simon, R. Mason, and F. Rumsey, “Localization curves for a regularly-spaced octagon loudspeaker array,” in *Audio Engineering Society Convention 127*, Oct 2009.
- [Søn] P. L. Søndergaard, “Auditory Modeling Toolbox.” [Online]. Available: <http://amtoolbox.sourceforge.net/>
- [VWVO05] M. M. Van Wanrooij and A. J. Van Opstal, “Relearning sound localization with a new ear,” *The Journal of neuroscience*, vol. 25, no. 22, pp. 5413–5424, 2005.
- [Wen63] K. Wendt, “Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schall-

felder bei Intensitäts- und Laufzeitstereofonie,” Ph.D. dissertation, RWTH Aachen, 1963.

- [WK92] F. L. Wightman and D. J. Kistler, “The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, no. 3, pp. 1648–1661, 1992.
- [ZC93] P. Zakarauskas and M. S. Cynader, “A computational theory of spectral cue localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, no. 3, pp. 1323–1331, 1993.
- [ZF12] F. Zotter and M. Frank, “All-round ambisonic panning and decoding,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 60, no. 10, pp. 807–820, 2012.