

# Versuchsdesigns im 2-Kanal Stereo Panning

Seminararbeit aus Algorithmen in Akustik und Computermusik 02

Martin Lindenbeck  
Daniel Scheran

Betreuung: Dr. Franz Zotter, Dr. Matthias Frank

Graz, 30. April 2017



institut für elektronische musik und akustik



## **Zusammenfassung**

In der nachfolgenden Seminararbeit werden Unterschiede in der Richtungswahrnehmung von Phantomschallquellen in Abhängigkeit des Versuchsdesigns behandelt.

Es wird zuerst auf die Motivation basierend auf theoretischen Überlegungen sowie auf vorangegangene Untersuchungen eingegangen. Anschließend wird die eigens durchgeführte Versuchsreihe vorgestellt. Diese untersucht ob und inwiefern sich die Richtungslokalisierung unterscheidet, je nachdem ob die Versuchsperson die Pegelunterschiede oder die Referenzrichtung zum Richtungsabgleich im Versuch einstellt. Die Versuchsdaten werden ausgewertet und auf Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen geprüft. Zudem werden sie in ein verallgemeinertes Modell der Richtungslokalisierung eingepasst. Auch diese Modelldaten werden bezüglich der gleichen Fragestellung ausgewertet.

Weder Roh- noch Modelldaten zeigen durchgehend deutliche Unterschiede zwischen beiden Versuchen. Für seitliche Quellen ist die zudem Aussagekraft der erhobenen Daten aufgrund von großen Streuungen fragwürdig. Daher werden weitere Versuche empfohlen.

## **Abstract**

In this paper, the authors discuss the differences in directional perception depending on the experimental design.

Firstly, the motivation based on theoretical considerations as well as previous research are outlined. Afterwards, a specially implemented test series is introduced. Its goal is to investigate whether and to what extent directional perception varies, either if the test person adjusts the level difference or the reference direction. Further, the accordance with the theoretical models is discussed. Moreover, test data are fitted into a generalized model for directional perception and analyzed in the same way as the raw data.

Neither raw data nor model data show notable differences throughout the evaluation. Additionally, the data for lateral sources are questionable. Thus, the authors recommend further testing.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2. Theoretischer Überblick</b>	<b>5</b>
2.1. Sinus-Gesetz und Tangens-Gesetz . . . . .	5
2.1.1. Sinus-Gesetz . . . . .	5
2.1.2. Tangens-Gesetz . . . . .	5
2.1.3. Verallgemeinertes Tangens-Gesetz . . . . .	6
2.2. Ansatz: IPD-dIPD-Merkmalraum . . . . .	6
2.3. Sinus- und Tangens-Gesetz im Experiment . . . . .	8
2.4. Vector Base Amplitude Panning . . . . .	9
2.5. Weiterführende Literatur . . . . .	10
<b>3. Versuchsaufbau und Ziel</b>	<b>11</b>
3.1. Ziel des Hörversuches . . . . .	11
3.2. Geometrischer Versuchsaufbau, Referenzpunkte . . . . .	11
3.3. Controller . . . . .	13
3.4. Testsignale, Panning . . . . .	13
3.5. Testumgebung . . . . .	14
<b>4. Durchführung und Auswertung</b>	<b>16</b>
4.1. Verlässlichkeit der Versuchspersonen . . . . .	16
4.2. Auswertung der Testergebnisse . . . . .	16
4.2.1. Abweichung der Rohdaten vom Modell . . . . .	19
4.3. Untersuchung des Offsets der Messwerte bei Stereo-Paar Nr. 2 . . . . .	20
4.4. Verallgemeinertes Tangens-Gesetz . . . . .	20
4.4.1. Einpassung der Testdaten . . . . .	21
4.4.2. Auswertung der eingepassten Daten . . . . .	25
<b>5. Diskussion und Ausblick</b>	<b>27</b>
<b>6. Literatur</b>	<b>29</b>
<b>A. Behringer BCR2000 Konfiguration</b>	<b>30</b>
<b>B. pd-Patch: VBAP-Panning</b>	<b>31</b>

# 1. Einleitung

In der Vergangenheit wurde bereits mehrmals versucht, die menschliche auditive Wahrnehmung bezüglich der Richtungslokalisierung in die Form eines mathematischen Gesetzes zu gießen. Dazu wird im Folgenden kurz eingegangen. Hervorzuheben sind hier vor allem das *Tangens-Gesetz* und das *Sinus-Gesetz*.

Diese Gesetze sind jedoch nur eingeschränkt gültig und variieren in ihrer Relevanz stark, je nachdem in welchem Winkel zur Versuchsperson das Schallereignis stattfindet.

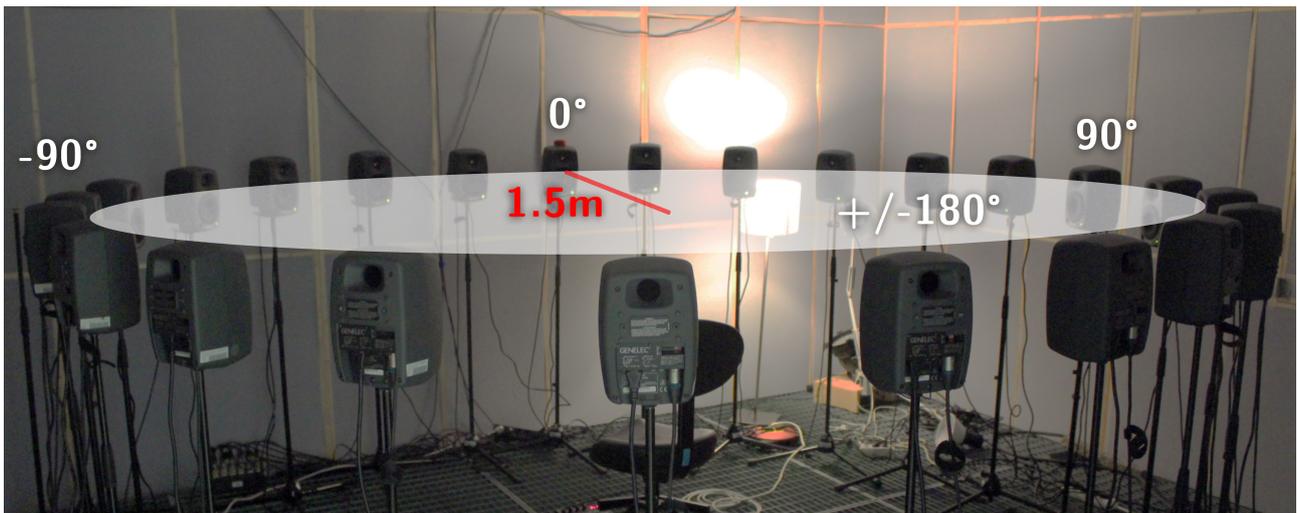


Abbildung 1.1 – Versuchsaufbau am Akustikmessplatz des IEM, Kunstuniversität Graz

Um diese Relevanz zu überprüfen, wurden zwei Hörversuche durchgeführt. Hier sollte im besonderen Maße überprüft werden, inwiefern sich die Ergebnisse unterscheiden, je nachdem ob die Referenzquelle als Phantomschallquelle oder direkte Schallquelle erzeugt wurde. Aufgabe der Versuchspersonen war es im ersten Versuch, die Phantomschallquelle, die durch ein Stereopaar erzeugt wurde, an dieselbe Position zu bewegen wie die direkte Referenzquelle. Im zweiten Versuch geschah dies vice versa: die Referenzschallquelle wurde von einem Stereopaar erzeugt und die Versuchspersonen mussten die direkte Schallquelle auf die Position der Referenzquelle bewegen.

Nun gilt es zu überprüfen, inwieweit die Ergebnisse der beiden Versuche tatsächlich übereinstimmen, wie sich die Wahrnehmung mit wachsendem Winkel verändert und wie groß die Streuungen sind. Abschließend wird versucht, Erklärungen für die vorliegenden Ergebnisse zu liefern.

## 2. Theoretischer Überblick

Im folgenden Abschnitt wird kurz auf die theoretischen Grundlagen und die Motivation, die dem Hörversuch zugrunde liegen, eingegangen.

### 2.1. Sinus-Gesetz und Tangens-Gesetz

Die Wahrnehmung der Richtung einer Schallquelle wird im Wesentlichen von ILD (interauraler Pegelunterschied) und ITD (interauraler Laufzeitunterschied) definiert. Diese frequenzabhängigen Unterschiede treten auf, wenn das Schallfeld auf die beiden Ohren nach unterschiedlicher Laufzeit auftrifft (ITD) bzw. unterschiedlich vom Kopf des Hörers abgeschattet wird (ILD) [Pul97].

Als weitere Definition gibt es noch IPD (interauraler Phasenunterschied), welcher die unterschiedliche Phasenlagen des eintreffenden Schallfeldes an den beiden Ohren beschreibt. Dieser ist proportional zu ITD.

#### 2.1.1. Direkte Referenzquelle, einstellbare Phantomschallquelle: Sinus-Gesetz

Wir nehmen nun ein Lautsprecherpaar an den Positionen  $\alpha = \pm 30^\circ$  an. Jeder Lautsprecher erzeugt ein Schallfeld mit dem Schalldruckpegel  $g_1$  bzw.  $g_2$ . Es ist nun eine mathematische Formulierung gesucht, die den wahrgenommenen Winkel der dadurch erzeugten Phantomschallquelle beschreibt.

In [ZF15] wird hierzu das Sinus-Gesetz behandelt.

Für die IPD gilt:

$$\text{IPD}_\varphi = 2kd \sin \varphi.$$

Nach Umformung und Linearisierung erhält man das allgemeine Sinus-Gesetz:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (1)$$

mit  $\alpha$  ... Lautsprecherposition,  $\varphi$  ... wahrgenommener Winkel der Phantomschallquelle,  $g_1, g_2$  ... Gain der beiden Lautsprecher. Weiters muss gelten:  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  und  $g_1, g_2 \in [0, 1]$ .

#### 2.1.2. Referenz-Phantomschallquelle, einstellbare direkte Quelle: Tangens-Gesetz

Experimentell wurde gezeigt, dass Versuche mit „eingespanntem“ Kopf (Beißbrett) andere Ergebnisse liefern als Versuche mit freiem Kopf, wo die Phantomschallquelle weiter auslateralisiert. Zudem ist bei beweglichem Kopf die vorne-hinten-Verwechslungsgefahr geringer (beim Sinus-Gesetz gilt: vorne = hinten). Bei beweglichem Kopf wird daher eher das Tangens-Gesetz verwendet, da es gleichberechtigt IPD und dIPD zur Auffindung eines passenden Einfallswinkels

einer Einzelquelle berücksichtigt, bei „eingespanntem“ Kopf hingegen eher das Sinus-Gesetz.

Es folgt aus der Ableitung der IPD nach der Kopfdrotation  $\beta$ :  $\frac{\partial}{\partial \beta} \text{IPD} = \text{dIPD}$ .

Das allgemeine Tangens-Gesetz für stereofonische Lokalisation wurde von Clark und Dutton 1957 formuliert [ZF15].

Laut folgender Vorschrift ergibt sich der wahrgenommene Winkel  $\varphi$ :

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2}. \quad (2)$$

### 2.1.3. Seitliche Lautsprecherpaare: Verallgemeinertes Tangens-Gesetz

Diese Form des Tangens-Gesetzes gilt allerdings nur für jene Winkel relativ zuverlässig, die frontal auf den Kopf des Hörers auftreffen (frontales Lautsprecherpaar). Daher ist es nötig, eine allgemeinere Form des Gesetzes einzuführen.

Hierbei bietet es sich an, den Pegelunterschied  $L$  zwischen den beiden Lautsprechern als  $g_{12} = 10^{\pm \frac{L}{40}}$  in dB anzugeben.

Nach erfolgter Substitution von  $10^{\pm \frac{L}{40}} = e^{\pm \frac{\ln 10}{40} L} = e^{\pm \sigma}$  erhalten wir  $\frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} = \frac{e^{\sigma} - e^{-\sigma}}{e^{\sigma} + e^{-\sigma}} = \tanh \sigma$  und wir können den Term folgendermaßen umformen:

$$\tan \varphi = \tanh \sigma \tan \alpha. \quad (3)$$

Für ein allgemein gültiges Tangens-Gesetz kann man nun eine Erweiterung nach der Form  $\tanh[\gamma(\sigma - \beta)]$  einführen, um eine Verschiebung um  $W$  dB sowie eine Skalierung  $\gamma$  zu ermöglichen.

Somit erhält man das verallgemeinerte Tangens-Gesetz:

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} = \tanh \left[ \frac{\ln 10}{40} \gamma (L - W) \right]. \quad (4)$$

## 2.2. Ansatz: IPD-dIPD-Merkmalraum

Abbildung 2.1 zeigt die Konturen von interauralen Phasendifferenzen (IPD,  $\propto \sin(\varphi)$ ) und nach der Kopfdrehung abgeleiteten interauralen Phasendifferenzen (dIPD,  $\propto \cos(\varphi)$ ).

Dieser Darstellungsraum ist für Frequenzen bis zu 1,5 kHz etabliert und bildet die Basis für das bekannte Tangens-Gesetz (siehe auch Abschnitt 2.1.2). Es wird hierzu angenommen, dass die Richtungslokalisierung des Gehörs neben der IPD an sich auch die Veränderung der IPD bei Kopfdrotation ermitteln könnte und damit vorne/hinten-Verwechslungen entschlüsselt.

Eine **direkte Quelle** bildet sich in diesem Merkmalsraum stets auf ein Wertepaar auf dem Kreis ab, wobei IPD und dIPD in Abhängigkeit der Einfallsrichtung variieren. Bei einer **Phantomschallquelle** hingegen führen alle Pegelunterschiede stets zu konstanter dIPD, nur die IPD variiert (**blaue** Linie in Grafik 2.1). Ein Abgleich der Wahrnehmung, sofern diese tatsächlich auf obiger Annahmen basiert, würde den Abstand zum Kreis minimieren.

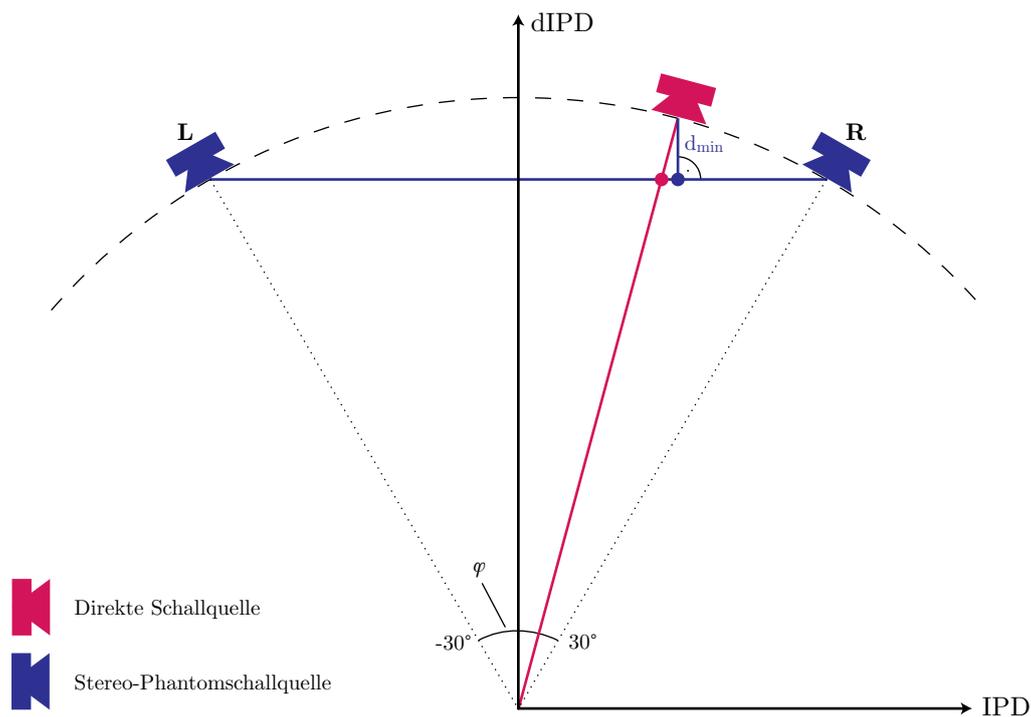


Abbildung 2.1 – IPD-dIPD-Merkmalraum

Das Tangens-Gesetz (roter Punkt) findet somit offenbar jene *Einzelquellrichtung* zur vorgegeben Pegeldifferenz der Phantomschallquelle mit dem geringsten Abstand im  $(IPD, dIPD)$ -Merkmalsraum, wohingegen das Sinus-Gesetz (siehe auch Abschnitt 2.1.1) die zur vorgegebenen Einzelquellrichtung passende *Pegeldifferenz* mit dem geringsten Abstand im  $(IPD, dIPD)$ -Merkmalsraum findet.

Es stellt sich somit die Frage, ob Versuchspersonen diese Theorie bei einer entsprechend gestellten Aufgabe stützen. Prinzipiell ergeben sich hieraus zwei unterschiedliche Erwartungen bezüglich der Versuchsergebnisse:

- Möglichkeit (i): Die Entscheidung, welche Quellenart als Referenz gewählt wird, hat keinen Einfluss auf die von den Versuchspersonen eingestellten Richtungen. Die Ergebnisse beider Versuche unterscheiden sich nicht.
- Möglichkeit (ii): Die Art der Referenz hat einen Einfluss auf die eingestellten Richtungen, die Ergebnisse unterscheiden sich signifikant.

## 2.3. Sinus- und Tangens-Gesetz im Experiment

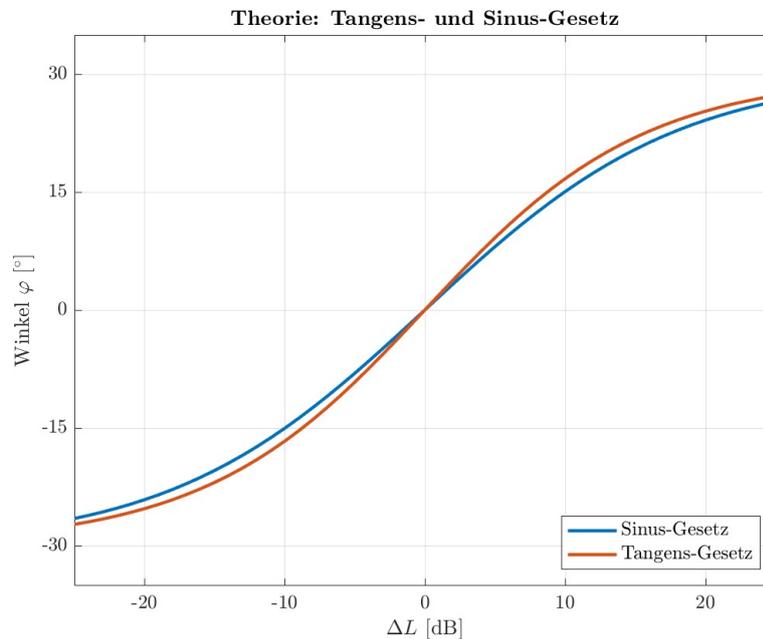


Abbildung 2.2 – Sinus- und Tangens-Gesetz im Vergleich

In einem Versuchsaufbau, in dem die Richtungslokalisierung gemäß folgender Tabelle abgefragt wird, lassen sich Tangens- und Sinus-Gesetz einem spezifischen Experiment zuordnen:

vorgegeben	einstellbar	Lokalisation gemäß ...
direkte Quelle	Phantom-Quelle	Sinus-Gesetz
Phantom-Quelle	direkte Quelle	Tangens-Gesetz

Sofern die Theorie der Praxis entspricht, sollten die Ergebnisse der beiden Versuche gemäß Grafik 2.2 voneinander verschieden sein.

Ob diese Unterschiede eintreten ist Gegenstand dieser Arbeit.

### Hinweis:

Sowohl das Sinus- als auch das Tangens-Gesetz basiert auf der Annahme, dass die alleinige Betrachtung von IPD und dIPD nur bei tiefen Frequenzen gültig ist, wo der Kopf noch keine Abschattung und damit verbundene Pegelreduktion (ILD dominant) verursacht. Die obere Grenze hierfür liegt bei etwa 1,5 kHz.

## 2.4. Steuerung von Phantomschallquellen: Vector Base Amplitude Panning

Für die Erzeugung von Phantomschallquellen kann das Verfahren namens „Vector Base Amplitude Panning“ (VBAP) verwendet werden. Es ermöglicht die Verwendung einer unbeschränkten Anzahl von Lautsprechern in einer zwei- oder dreidimensionalen Anordnung rund um den Hörer. Die Lautsprecher müssen hierfür annähernd äquidistant zur Hörposition in einem nicht zu halligen Raum eingebracht werden.

Beim einfachsten Modell des zweidimensionalen VBAP strahlen zwei Lautsprecher kohärente Signale mit unterschiedlichen Amplituden aus. Der Hörer nimmt dabei die Illusion eines einzelnen Schallereignisses wahr, das sich zwischen den beiden Lautsprechern befindet, die sogenannte Phantomschallquelle. Die Amplituden der Signale werden hierbei mit den Gain-Faktoren  $g_1$  und  $g_2$  beschrieben. Die wahrgenommene Richtung der Phantomschallquelle hängt dabei vom Verhältnis der Pegel  $g_1$  und  $g_2$  ab. Damit der Pegel dieser Quelle immer als gleich groß wahrgenommen wird, müssen die Gains normalisiert werden. Es gilt:  $g_1^2 + g_2^2 = C = const.$  [Pul97].

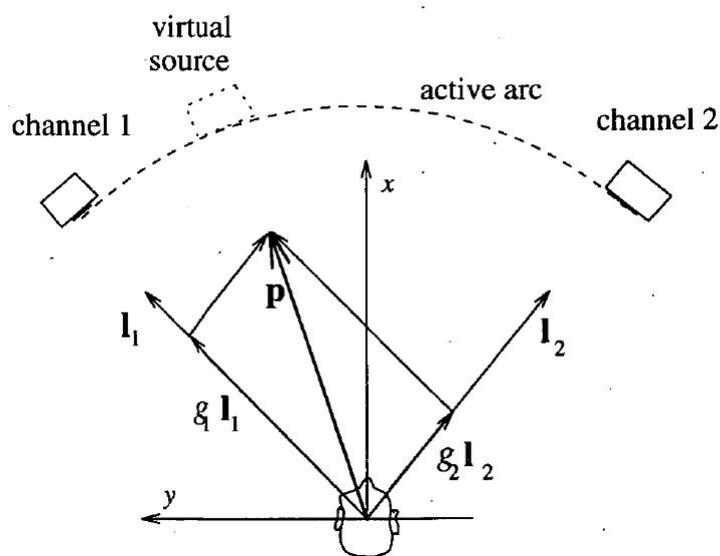


Abbildung 2.3 – VBAP Stereoanordnung [Pul97]

Um einem Gain-Unterschied einen entsprechenden Winkel zuzuordnen zu können, findet wieder das obige Tangens-Gesetz (3) Anwendung.

Für die Umsetzung der Amplitudenberechnungen gibt es zwei Modelle: einerseits kann mit linearen  $r_V$ -Intensitätsvektoren, andererseits mit quadratischen  $r_E$ -Energievektoren gerechnet werden. Das  $r_V$ -Modell findet für tiefe, das  $r_E$ -Modell für höhere Frequenzen über ca. 1.5 kHz Gültigkeit.

Beim Hörversuch im weiteren Verlauf dieser Seminararbeit wurde mit dem  $r_V$ -Modell gerechnet, welches dem Tangens-Gesetz folgt.

## 2.5. Weiterführende Literatur

Als weiterführende Literatur sowie für Abhandlungen zum Thema Richtungslokalisierung werden folgende Quellen empfohlen:

- Im Jahr 1959 wurden von D. M. Leakey die Ergebnisse eines sehr umfangreichen Tests, welcher die Auswirkungen von Laufzeit- und Pegeldifferenzen auf die Wahrnehmung der Phantomschallquelle bei Stereophonie mit Variation vieler Parameter wie Hörabstand, Kopfbewegungen, seitlicher Verschiebung der Hörposition und unterschiedlichen Signalen, überprüft, veröffentlicht [Lea59] (Zusammenfassung aus [HK16]).
- Klaus Wendt hat für seine Dissertation im Jahre 1963 verschiedene Untersuchungen bezüglich der Intensitätsstereophonie mit verschiedenen Stimuli durchgeführt. Die Ergebnisse sind in [Wen63] nachzulesen.
- H. Mertens veröffentlichte 1965 in der E.B.U. Review der European Broadcasting Union eine theoretische Darstellung der Mechanismen des Richtungshörens anhand zeitlicher und spektraler Energieverteilung von Signalen [Mer65].
- Eine detaillierte Beschreibung der Methoden des Vector Based Amplitude Panning veröffentlichte Ville Pulkki im Jahre 1997 [Pul97].
- Ein Hörversuch zur Herleitung des generalisierten Tangens-Gesetzes wurde im Jahre 2015 von F. Zotter und M. Frank am Institut für Elektronische Musik und Akustik (IEM) der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz durchgeführt [ZF15].
- Theoretische Betrachtungen des Schallfeldes im Allgemeinen sowie eine Weiterführung zu den Methoden von Spatial Audio, im Speziellen Ambisonics, sind im Skript zur Vorlesung "Akustische Holographie und Holophonie" von F. Zotter nachzulesen [ZF17].
- J. Helm und E. Kurz haben 2016 am IEM einen Hörversuch bezüglich der Frequenzabhängigkeit von Amplituden-Panning-Kurven bei frontaler Intensitätsstereophonie durchgeführt [HK16].

## 3. Versuchsaufbau und Ziel

### 3.1. Ziel des Hörversuches

Wie im vorigen Kapitel bereits erwähnt, war das Ziel des Hörversuchs, Unterschiede in der Richtungslokalisierung von Schallquellen je nach Versuchsdesign zu ermitteln. Dafür wurden zwei Hörversuche durchgeführt:

- **Versuch 1:** Die Referenzschallquelle ist eine entlang des Lautsprecherkreises fein einstellbare Einzelschallquelle (VBAP mit  $15^\circ$  zwischen den Lautsprechern) an einem fixierten Punkt. Die Versuchspersonen wurden gebeten, eine Phantomschallquelle, die durch ein Stereolautsprecherpaar erzeugt wird, mithilfe eines Controllers an die subjektiv gleiche Stelle wie die Referenzquelle zu bewegen, sodass diese sich überlagern. Dies geschah durch Variation des Pegelunterschiedes zwischen den beiden Lautsprechern des Stereopaars.
- **Versuch 2:** Das Setup wurde nun umgedreht: die Phantomschallquelle ist nun fixiert und die Referenzquelle kann von der Versuchsperson am Lautsprecherkreis mittels des Controllers bewegt werden. Die beiden Schallquellen sollen wiederum an der subjektiv gleichen Position am Lautsprecherkreis zu liegen kommen.

Ausgehend von den Ergebnissen der beiden Hörversuche sollte anschließend ermittelt werden, inwieweit die Ergebnisse der Versuche übereinstimmen und ob Unterschiede abhängig vom Versuchsdesign auftreten. Weiters soll untersucht werden, ob die Ergebnisse mit den theoretischen Erkenntnissen von Sinus- und Tangens-Gesetz übereinstimmen.

### 3.2. Geometrischer Versuchsaufbau, Referenzpunkte

Der Hörversuch wurde am Akustikmessplatz des Instituts für Elektronische Musik und Akustik der Universität für Musik und Darstellende Kunst in Graz durchgeführt. In diesem reflexionsarmen Raum wurde eine kreisförmige Anordnung aus 24 Lautsprechern mit einem Radius von 1,5 Metern aufgebaut. Der Abstand zwischen den einzelnen Lautsprechern betrug somit jeweils  $15^\circ$ . Die Versuchspersonen nahmen im Mittelpunkt dieses Kreises Platz.

Der Kreis aus Lautsprechern wurde in 5 Stereopaare unterteilt; die Mittenwinkel befanden sich dabei an den Positionen  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  und  $\pm 90^\circ$ . Bei der späteren Auswertung wurden positive und negative Winkel jeweils zusammengefasst.

Stereopaar	linker LS Nr.	Winkel [ $^\circ$ ]	rechter LS Nr.	Winkel [ $^\circ$ ]
1	4	-120	8	-60
2	7	-75	11	-15
3	10	-30	14	30
4	13	15	17	75
5	16	60	20	120

Tabelle 3.1 – Test Setup: Einteilung der Stereopaare

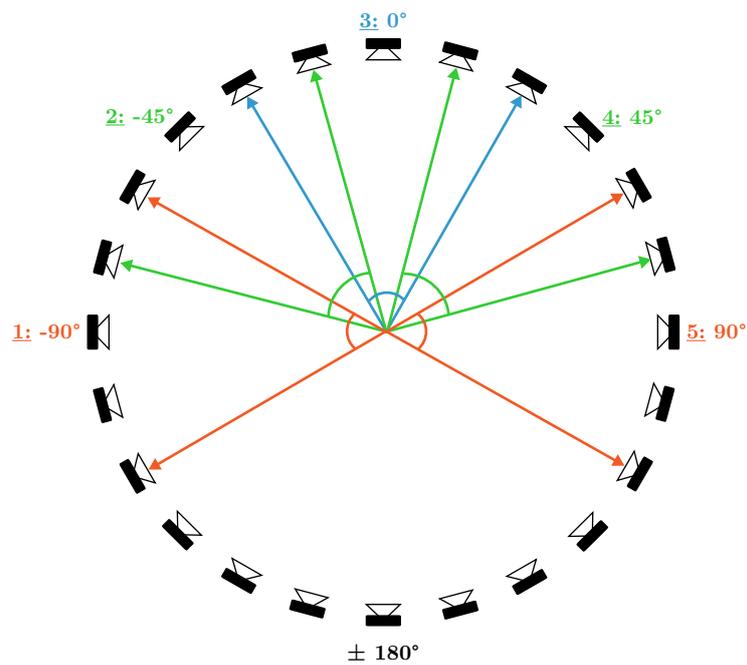


Abbildung 3.1 – Test Setup: Einteilung der Stereopaare

Bei der Durchführung des Experimentes nahmen 17 Personen teil. Jede Versuchsperson absolvierte beide Tests. Es gab 13 verschiedene Positionen der Referenzschallquelle, die sich in beiden Versuchen (bei Versuch 1 mittels VBAP berechnet) an gleichen Positionen befanden. Jedes dieser 13 Trials wurde zwei Mal dargeboten, wodurch jeder Versuch 26 Trials beinhaltet.

Folgende Referenzpunkte wurden verwendet:

Trial Nr.	Winkel [°]	Stereopaar
1	-113	1
2	-90	1
3	-67	1
4	-45	2
5	-34	2
6	-23	3
7	0	3
8	11	3
9	22	4
10	56	4
11	68	4
12	79	5
13	101	5

### 3.3. Controller

Für die Durchführung des Experiments wurde der BCR2000 Controller der Firma Behringer verwendet. Dieser wurde via USB mit dem Versuchscomputer verbunden. Er wurde folgendermaßen benutzt:

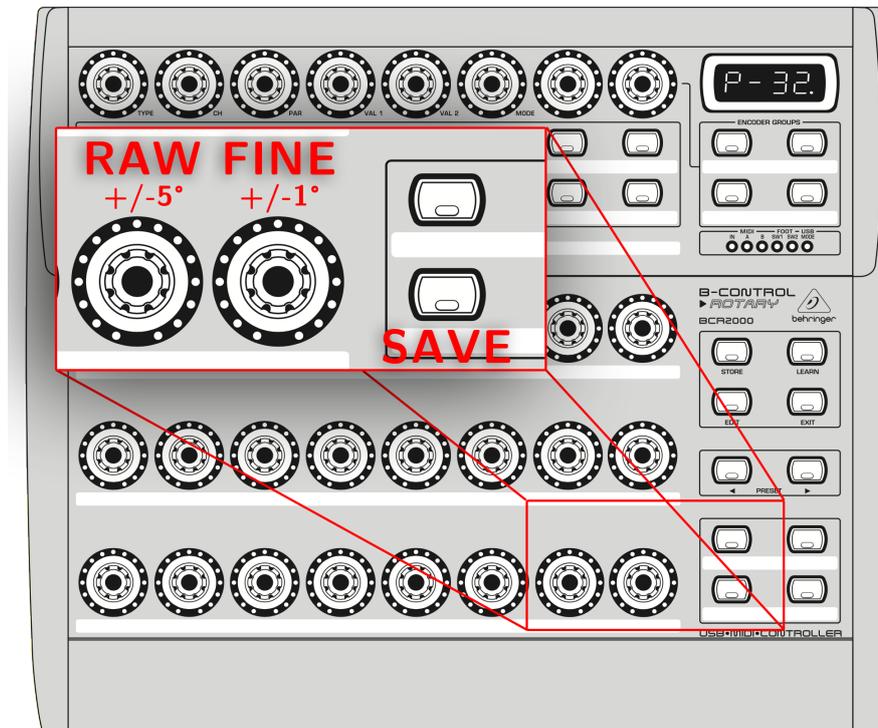


Abbildung 3.2 – Behringer BCR2000 Controller

Mittels zweier Drehregler konnte die Quellposition entweder „raw“ (5°-Schritte) oder „fine“ (1°-Schritte) verändert werden. Hatte man die Richtung so eingestellt, dass sich beide Quellen überlagern, so konnte man die Einstellung mittels „save“ speichern.

Eine Anleitung, wie der Controller für den Versuch konfiguriert wird, findet sich in Anhang A.

### 3.4. Testsignale, Panning

Da die Richtungslokalisierung breitbandig stabiler funktioniert, wird Rauschen als Testsignal verwendet.

In beiden Versuchen wurde für die einstellbare Quelle rosa Rauschen, für die Referenzquelle ein komplexer Ton verwendet. Dieser Ton bestand ebenfalls aus rosa Rauschen, welches von Sinustönen mit randomisierter Phase überlagert war.

Zeitlich wurden die Signale immer nach demselben Schema, dargestellt in Abbildung 3.3, abgespielt. Die Rampen hatten dabei eine Länge von je 2 ms, der Pegel des Signals blieb für 150

ms konstant. Jede Sekunde wurden alle Signale wiederholt. Die Konstellation entspricht somit einem 4/4-Takt mit 240 bpm, wobei die Referenz auf Schlag eins gespielt wird, das Signal der einstellbaren Quelle auf den Schlägen zwei und drei. Auf dem vierten Schlag befindet sich immer eine Pause.

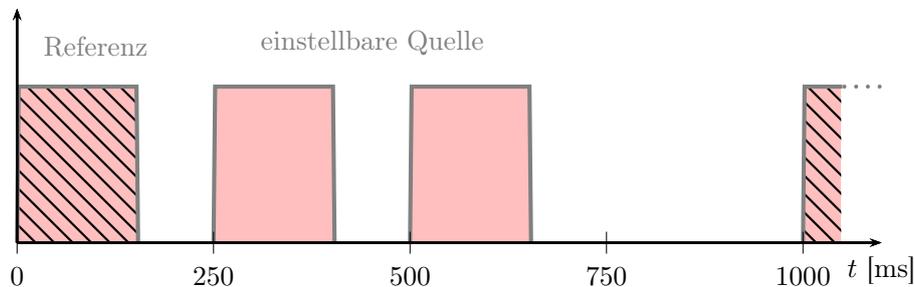


Abbildung 3.3 – Zeitlicher Ablauf der Testsignale

Die *Phantomschallquellen* wurden mittels VBAP gesteuert. Um eine möglichst konstante Lautheit zu erzielen, wurden die Gains der beiden Lautsprecher normalisiert. Der pd-Patch zur Berechnung der Gains während des Versuchs ist in Anhang B angefügt.

Um beliebige Positionierungen der *direkten Quellen* zu ermöglichen, wurde VBAP auch verwendet, um direkte Quellen zwischen zwei benachbarten Lautsprechern zu platzieren. Aufgrund des geringen Abstands von  $15^\circ$  sind keine großen Abweichungen von idealen direkten Quellen zu erwarten.

### 3.5. Testumgebung

Für die Durchführung des Versuchs wurde eigens eine Testumgebung programmiert. Es fanden die Programme *MATLAB* und *Pure Data* Verwendung.

In *MATLAB* wurde eine GUI zur übersichtlichen Steuerung und Überwachung des Versuchs implementiert (vgl. Abb. 3.4).

Darüber hinaus wurden die Funktionen wie folgt auf die Programme verteilt:

#### **MATLAB** u.a.

- Speicherung der Daten
- Steuerung und Überwachung des Versuchs von außerhalb des Akustikmessplatzes
- Reset des Versuchs
- Randomisierung der Reihenfolge der Trials
- Senden der neuen Trial-Daten, nachdem der Befehl zum Speichern der letzten Einstellungen empfangen wurde.

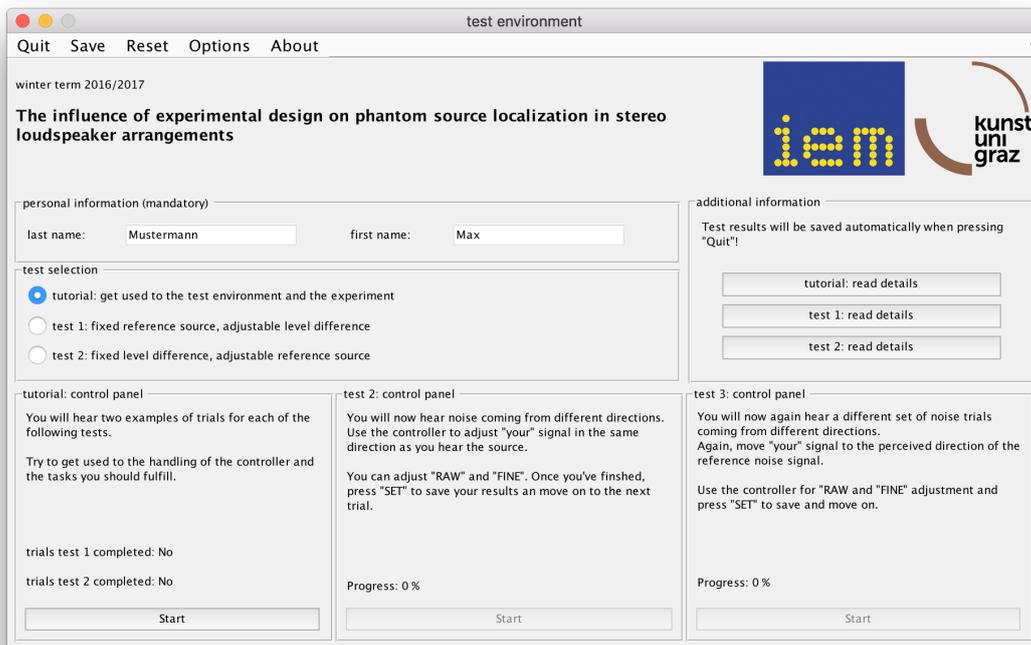


Abbildung 3.4 – MATLAB GUI der Testumgebung

### Pure Data u.a.

- 24-Kanal Audio-Schnittstelle
- Gain-Steuerung
- Steuerung des zeitlichen Ablaufs
- Panning der einstellbaren Quelle: Gain-Berechnung
- Controller-Steuerung: Für den Versuch mit einstellbarer direkter Quelle wurde ein Endlos-Panning realisiert.
- Befehl zum Speichern

Zur Vereinfachung des Patches wurden möglichst viele Berechnungen vorab durchgeführt und in pd-kompatiblen Tabellen gespeichert. Die Verarbeitung in pd wurde mit der `iemmatrix`-Library realisiert.

Die Programme kommunizieren mittels TCP/IP via Localhost. In MATLAB wurde hierfür die `jtcp`-Erweiterung verwendet [Bar16], eine Anleitung für die Kommunikation mit PD findet sich in [Ahr16].

## 4. Durchführung und Auswertung

Die Auswertung des Hörversuches wurde in *MATLAB* durchgeführt.

Es nahmen insgesamt 17 Personen am Experiment teil. Davon waren 11 Personen männlich und 6 Personen weiblich.

### 4.1. Verlässlichkeit der Versuchspersonen

Zunächst wurde die Verlässlichkeit der Versuchspersonen ermittelt. Hierbei wurde das Antwortverhalten der einzelnen Versuchsperson mit dem gemittelten Ergebnis aller Versuchspersonen verglichen. Betrug die mittlere Abweichung beider Versuche mehr als  $4^\circ$  wurde sie nicht in die Auswertung mit einbezogen. Dies war bei den Versuchspersonen 3 und 15 der Fall.

Versuchsperson	Gesamtabweichung vom Mittelwert [ $^\circ$ ]
VP1	2.29
VP2	1.78
<del>VP3</del>	<del>4.74</del>
VP4	2.36
VP5	2.33
VP6	0.80
VP7	1.89
VP8	1.08
VP9	3.00
VP10	1.53
VP11	3.46
VP12	2.46
VP13	0.69
VP14	2.04
<del>VP15</del>	<del>5.05</del>
VP16	2.87
VP17	2.18

Tabelle 4.1 – Verlässlichkeit der Versuchspersonen

### 4.2. Auswertung der Testergebnisse

Die Auswertung der Testergebnisse geschah in den folgenden Schritten:

- Einlesen und Sortierung der Testdaten
- Berechnen des Mittelwertes und der Standardabweichung für jeden Testreiz
- Berechnung des 95%-Konfidenzintervalls

- Darstellung der Fehlerbalken in jeweils einer Grafik für die Mittenwinkel  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  und  $\varphi = 90^\circ$ .

Die Ergebnisse von Versuch 1 führen zu vertikalen Fehlerbereichen (Pegeldifferenz), jene von Versuch 2 zu horizontalen Fehlerbereichen (Einzelquellrichtung). Die Fehlerbalken zeigen hierbei die Ergebnisse für die Mittelwerte der einzelnen Testreize sowie die dazugehörigen Konfidenzintervalle, in denen der wahre Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt.

**Hinweis:**

$\Delta L_P = 50\%$  auf der y-Achse bedeutet, dass das Schallereignis gänzlich aus dem rechten Lautsprecher des Stereopaars kommt.

Die gestrichelte Linie bezeichnet die Lage der Referenzpunkte laut Tangens-Gesetz.

In den Grafiken 4.1, 4.2 und 4.3 ist zu erkennen, dass die Wahrnehmung bei frontalen Winkeln (zwischen  $0^\circ$  und  $\pm 30^\circ$ ) noch relativ genau mit den berechneten Werten übereinstimmt. Je größer jedoch der Winkel im Bezug auf die Blickrichtung wird, desto größer werden die Abweichungen. Interpretationen dazu finden sich in Abschnitt 5.

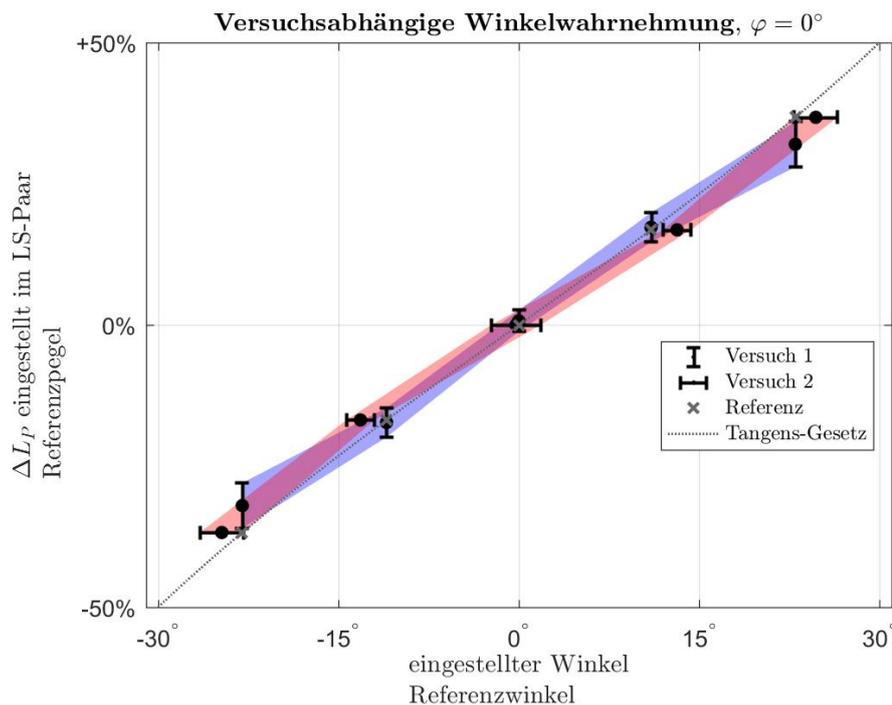


Abbildung 4.1 – Versuchsergebnis für  $\varphi = 0^\circ$

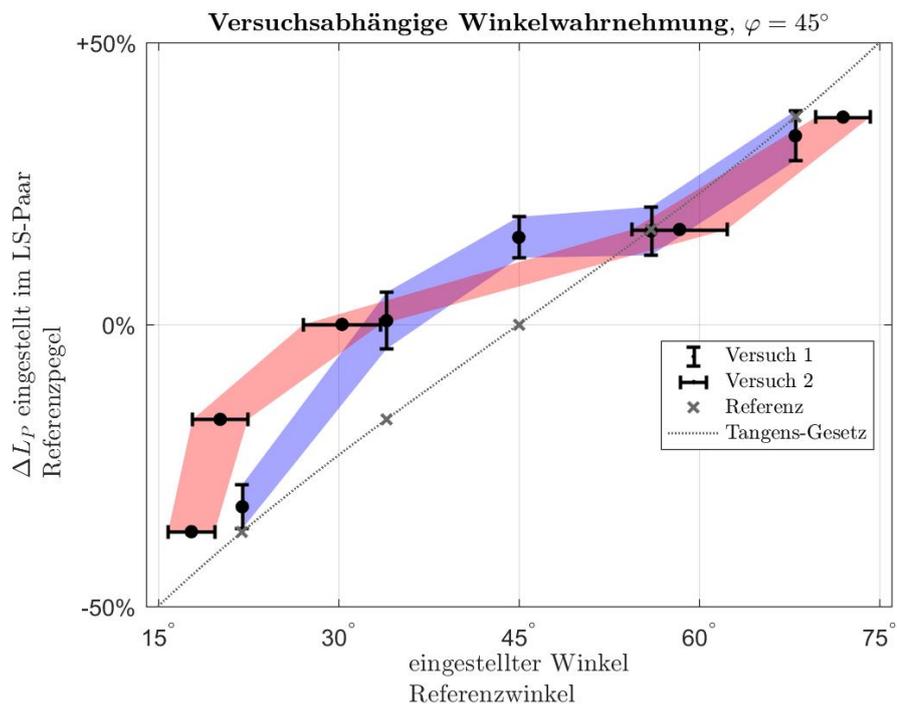


Abbildung 4.2 – Versuchsergebnis für  $\varphi = 45^\circ$

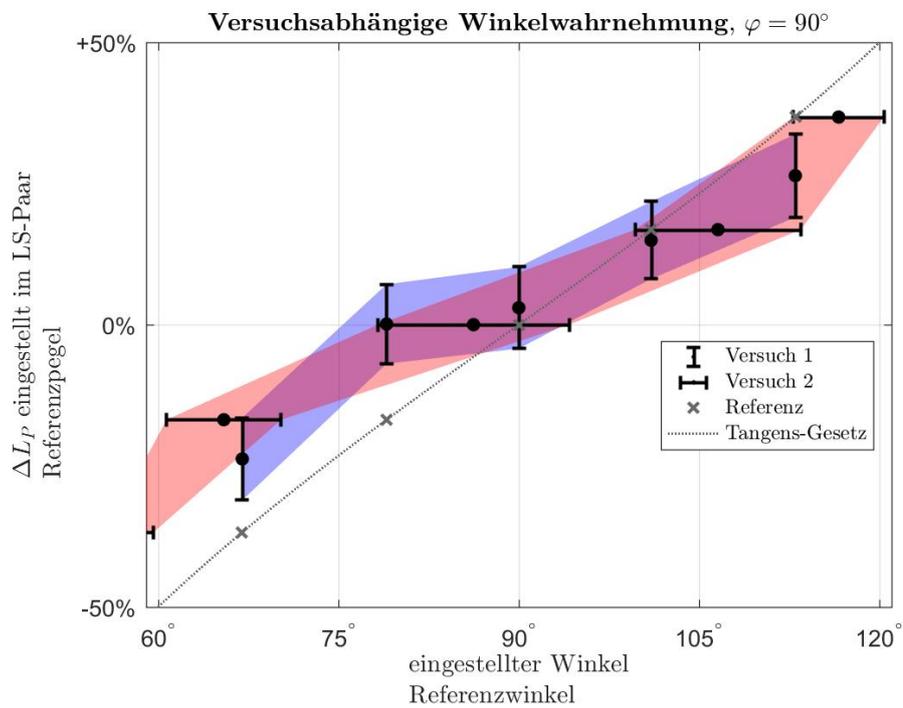


Abbildung 4.3 – Versuchsergebnis für  $\varphi = 90^\circ$

#### 4.2.1. Abweichung der Rohdaten vom Modell

Die folgenden Grafiken zeigen die Abweichungen zwischen den tatsächlichen Positionen der (Phantom-) Schallquellen und der wahrgenommenen Richtung.

Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen bei  $\varphi = 0^\circ$  (blaue Balken) relativ gering sind, während sie bei  $\varphi = 45^\circ$  (rote Balken) und  $\varphi = 90^\circ$  (gelbe Balken) verhältnismäßig groß sind. Besonders auffällig ist hierbei die große Abweichung bei  $\varphi = 45^\circ$ .

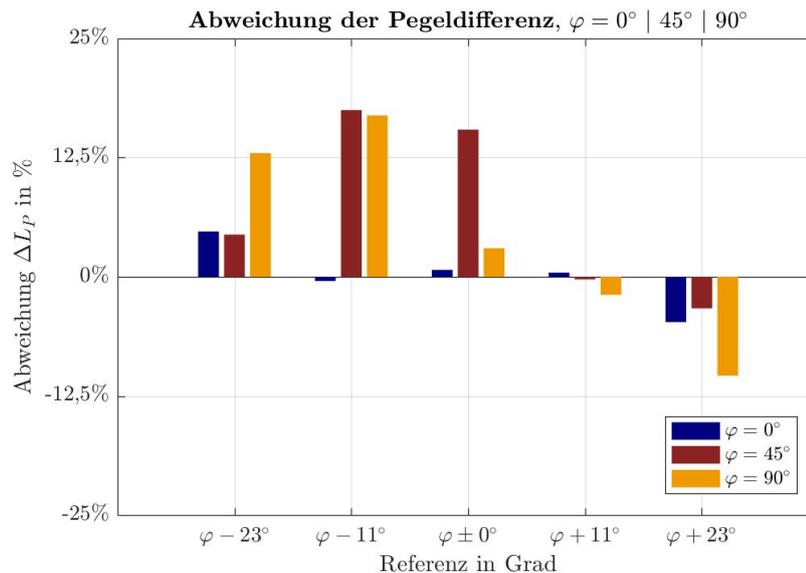


Abbildung 4.4 – Pegelabweichungen vom Referenzwert, Versuch 1

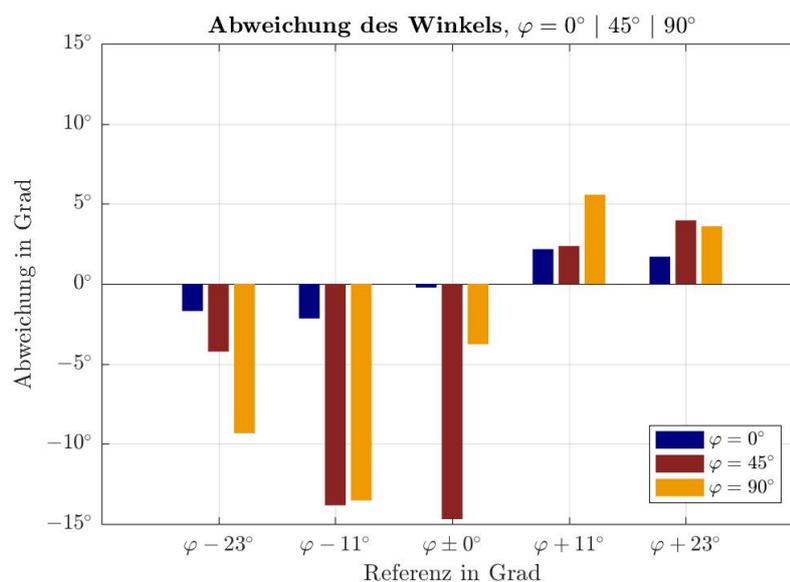


Abbildung 4.5 – Winkelabweichungen vom Referenzwert, Versuch 2

### 4.3. Untersuchung des Offsets der Messwerte bei Stereo-Paar Nr. 2

Insbesondere die Ergebnisse für Winkel zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  scheinen fraglich. Die Unterschiede sind derart groß das ein Messfehler während der Versuchsdurchführung anzunehmen ist.

Die Phantomschallquellen wurden durch die Lautsprecherpaare 2 und 4 (vgl. Tabelle 3.1) erzeugt und aufgrund der Annahme von links/rechts-Symmetrie zusammen ausgewertet. Zwei Testreize aus dem Versuch wurden bei beiden LS-Paaren erneut von vier Personen durchgeführt:

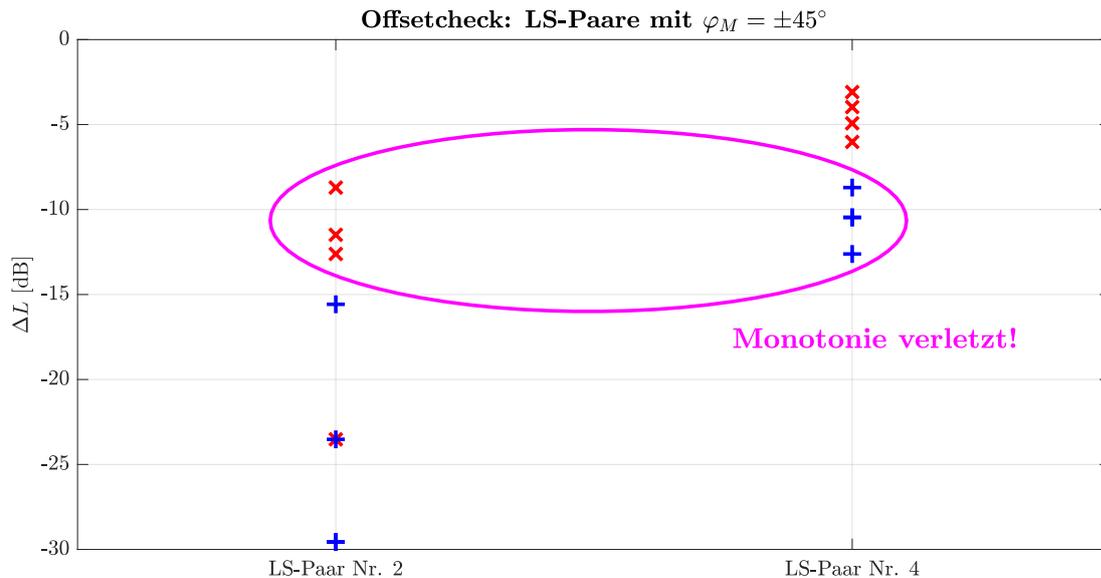


Abbildung 4.6 – Nachuntersuchung der auffälligen Messpunkte: **x** ...  $\pm 45^\circ$ , **+** ...  $\pm 56^\circ$

Die Ergebnisse unterscheiden sich deutlich je nach Lautsprecherpaar. Dies ist sogar so stark der Fall, dass die zwingend angenommene Monotonie der Richtungswahrnehmung beim Vergleich zwischen beiden Stereopaaren verletzt wird. Bei Paar Nr. 4 wurde für einen Winkel von  $\pm 56^\circ$  der gleiche Pegelunterschied eingestellt wie für einen Winkel von  $\pm 45^\circ$  bei Paar Nr. 2.

Der Grund für diese Diskrepanz konnte im Nachhinein nicht mehr vollständig ermittelt werden. Wir vermuten, dass ein fehlerhafter Lautstärkeabgleich (Einpassung) an den beteiligten Lautsprechern die Ursache war. Der Fehler ist daher auch nicht vollständig kompensierbar.

### 4.4. Verallgemeinertes Tangens-Gesetz

Als zweite Stufe der Auswertung wurden die Rohdaten in das verallgemeinerte Tangens-Gesetz nach Formel (4) eingepasst [ZF15]. Hierzu wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

- *Einpassung*: Die Parameter  $\gamma$  und  $W$  des verallgemeinerten Tangens-Gesetzes wurden für jede Versuchsperson und jeden Mittenwinkel  $\varphi_M$  ermittelt.

- Die „Qualität“ der Einpassung wurde für jede Versuchsperson und jeden Mittenwinkel  $\varphi_M$  gesondert bewertet. Schlechte Einpassungen wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.
- Die Modelldaten wurden auf die gleiche Art und Weise wie zuvor die Rohdaten ausgewertet.

Das verallgemeinerte Tangens-Gesetz bietet die folgenden **Vorteile**:

- (i) Aus diskreten Messdaten erhält man kontinuierliche, mathematische Funktionen.
- (ii) Diese Kurven können an beliebigen Stellen, insbesondere Stellen, die nicht im eigentlichen Versuch abgefragt wurden, ausgewertet werden.
- (iii) Die Dimension der Auswertung ist veränderbar. Beispielsweise können Messdaten, die beim Versuch mit direkter Referenzquelle erhoben wurden, nachträglich so ausgewertet werden, als wäre die Referenz eine Phantomschallquelle gewesen.

Dennoch gibt es auch **Nachteile**:

- (i) Der verwendete Tangens Hyperbolicus gibt bereits gewisse Eigenschaften der Richtungslokalisation vor.
- (ii) Man erhält für jedes Set von Messdaten eine Einpassung. Ohne Begutachtung der Qualität der Einpassungen können keine zuverlässigen Evaluationen der Modelldaten durchgeführt werden; die beteiligten mathematischen Umkehrfunktionen können bei Pegelverschiebungen am Rande ihres Wertebereiches sehr leicht instabil werden.

#### 4.4.1. Einpassung der Testdaten

Grafik 4.7 zeigt exemplarisch eine gute und eine schlechte Einpassung. Wie bereits erwähnt können schlechte Einpassungen die Gültigkeit der Auswertung bedeutend einschränken.

Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen die Kurvenscharen für beide Versuche basierend auf den Daten für die Einpassung *aller* 15 Versuchspersonen, deren Rohdaten ebenfalls ausgewertet wurden.

Folgendes fällt bei der Begutachtung der Kurvenscharen auf:

- Für den Mittenwinkel  $\varphi_M = 0^\circ$  hat die Einpassung gut funktioniert, die Scharen sind weitestgehend kompakt.
- Für den Mittenwinkel  $\varphi_M = 45^\circ$  hat die Einpassung nur noch für Versuch 1 gut funktioniert.
- Für den Mittenwinkel  $\varphi_M = 90^\circ$  war die Einpassung nur noch für die Minderheit der Versuchspersonen erfolgreich. Vereinzelt finden sich Kurven, die eine diametrale Richtungslokalisation suggerieren.

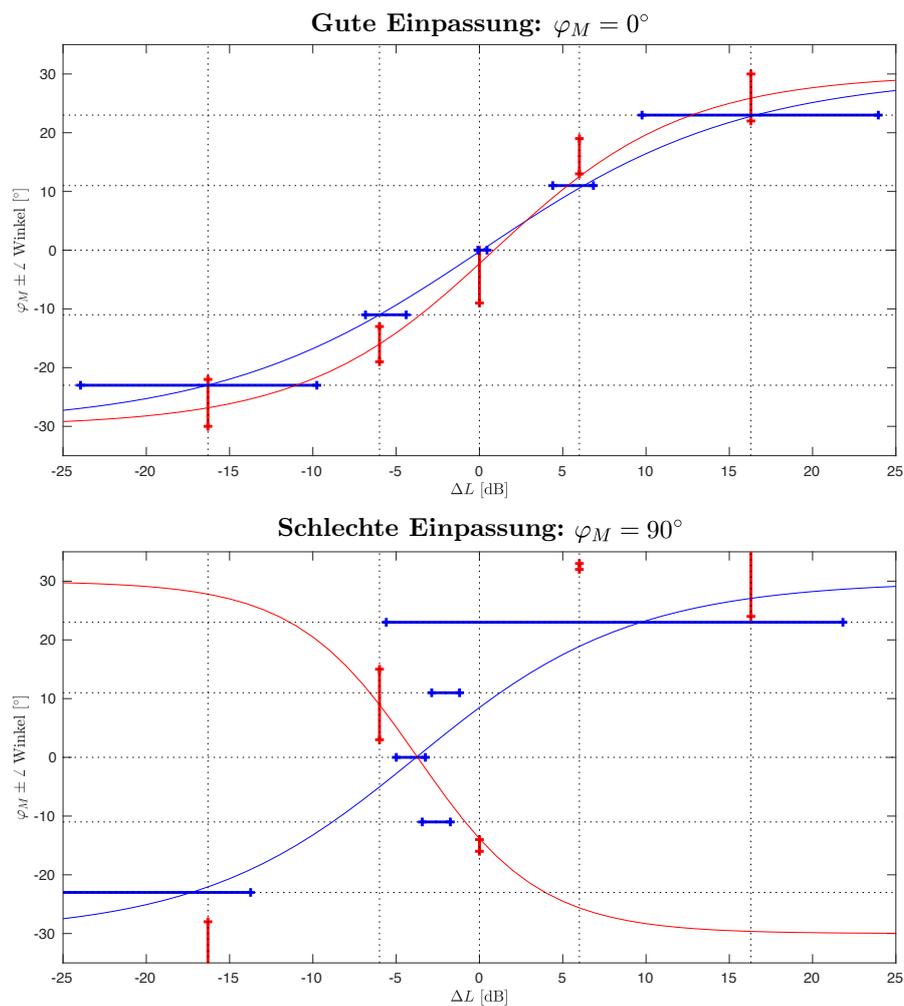


Abbildung 4.7 – Beispiele für gute und schlechte Einpassung: Daten für Test 1 in blau, für Test 2 in rot

Nach der Evaluierung verblieben folgende Modelldaten (Datenset  $\hat{=}$  Rohdaten einer VP je Versuch und Mittenwinkel  $\varphi_M$ ):

Mittenwinkel $\varphi_M$ [°]	Anzahl Datensets
0	15
45	10
90	5

Tabelle 4.2 – Evaluation der Einpassung für das verallgemeinerte Tangens-Gesetz

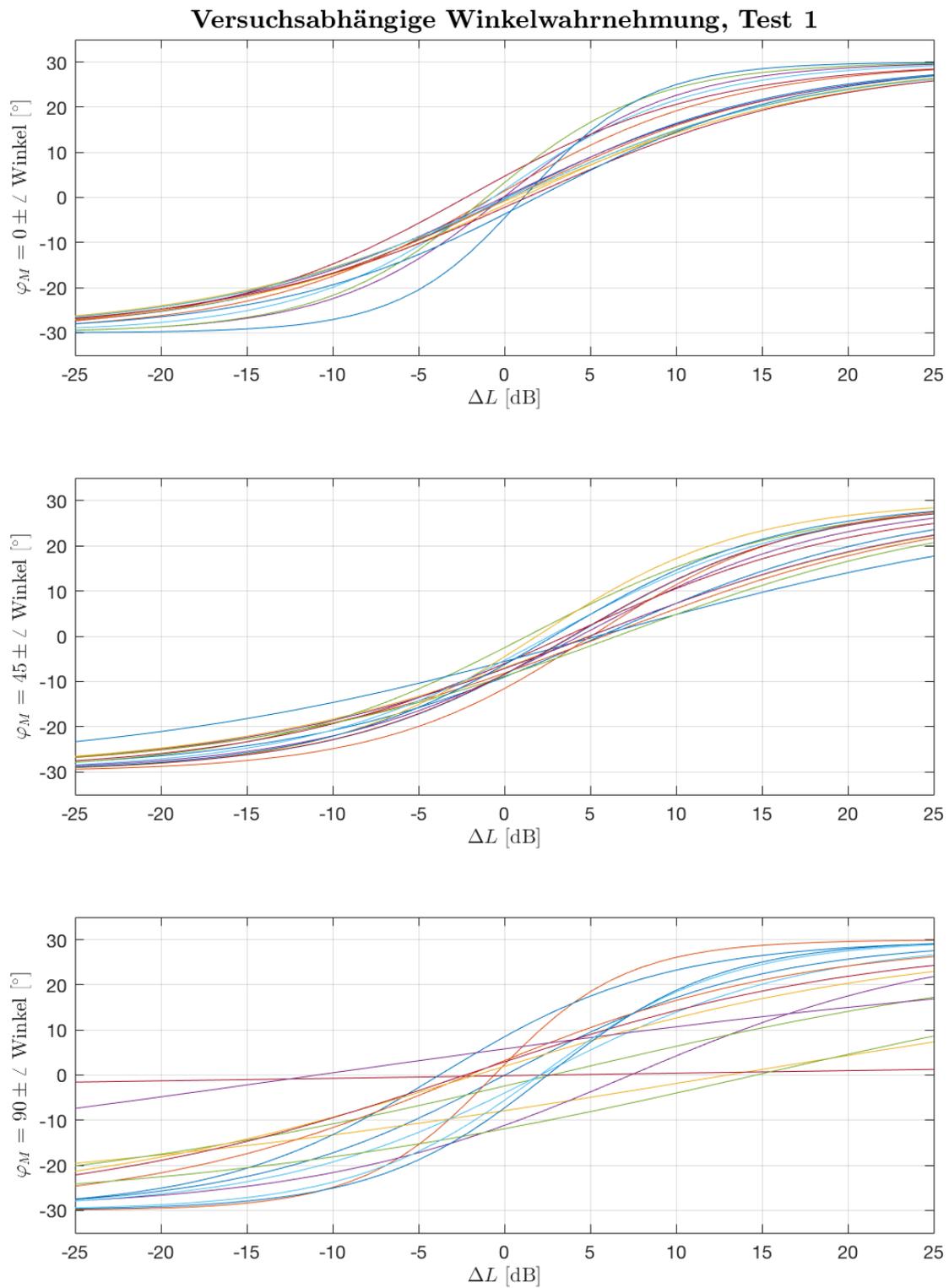


Abbildung 4.8 – Rohdaten: Kurvenschar der Daten für Test 1

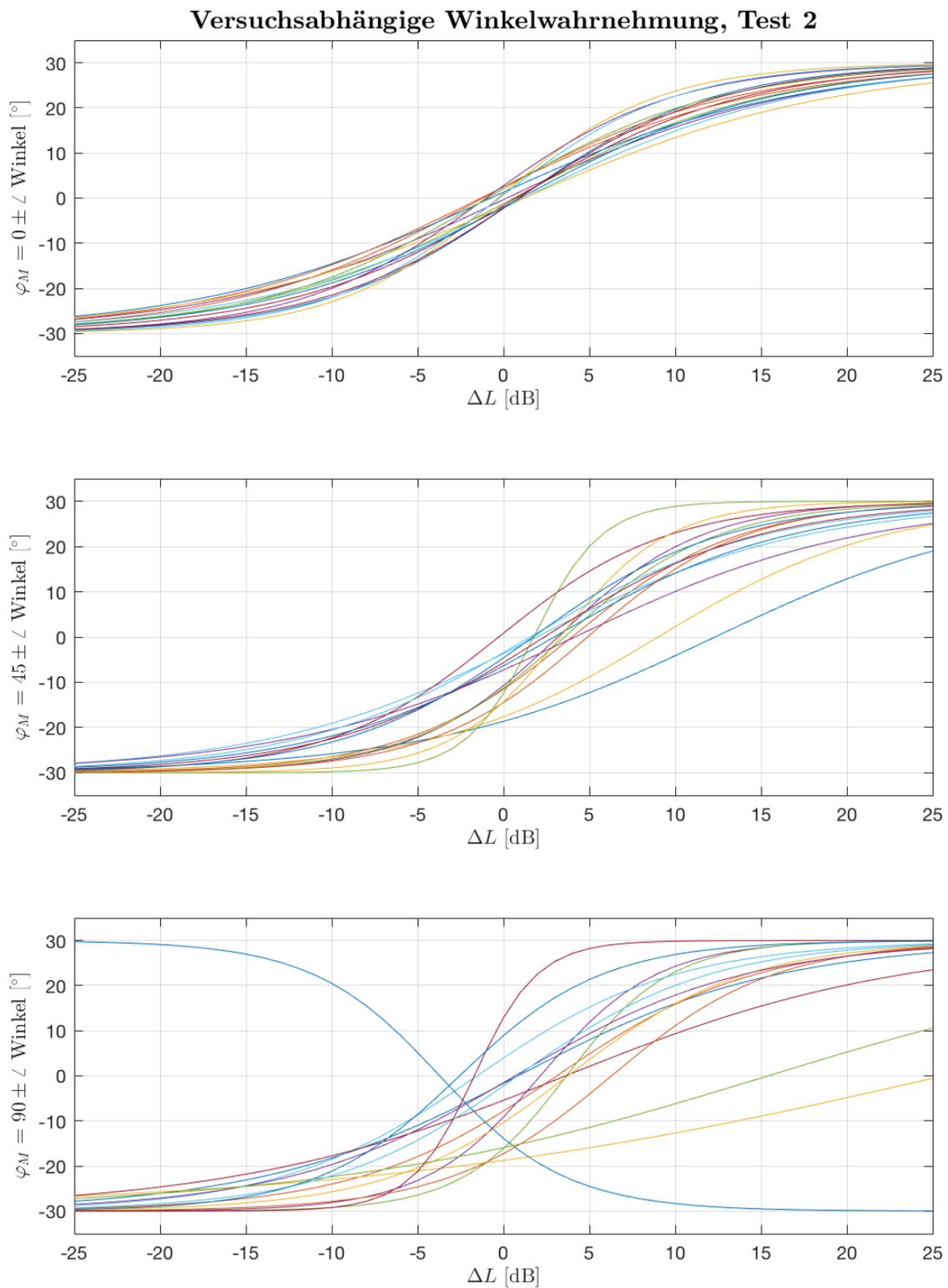


Abbildung 4.9 – Rohdaten: Kurvenschar der Daten für Test 2

#### 4.4.2. Auswertung der eingepassten Daten

Aufgrund des zuvor erläuterten Offsets der Ergebnisse bei zwei Messpunkten in den Stereopaaren mit Mittenwinkel  $\varphi_M \pm 45^\circ$  sowie der geringen Anzahl an verbliebenen Datensets für die Mittenwinkel  $45^\circ$  und  $90^\circ$ , wurden nur die Modelldaten für das frontale Lautsprecherpaar ausgewertet.

Abbildung 4.10 zeigt die Auswertung der Modelldaten nach dem gleichen Modus wie bei den Rohdaten.

Wie zuvor erwähnt können die Modelldaten auch für Messgrößen ausgewertet werden, die beim eigentlichen Experiment als Referenz dargeboten waren. Abbildung 4.11 wertet die Daten beider Versuche aus, als wäre in jedem Versuch eine Phantomschallquelle als Referenz verwendet worden, Grafik 4.12 zeigt die Auswertung für eine direkte Referenz bei beiden Versuchen.

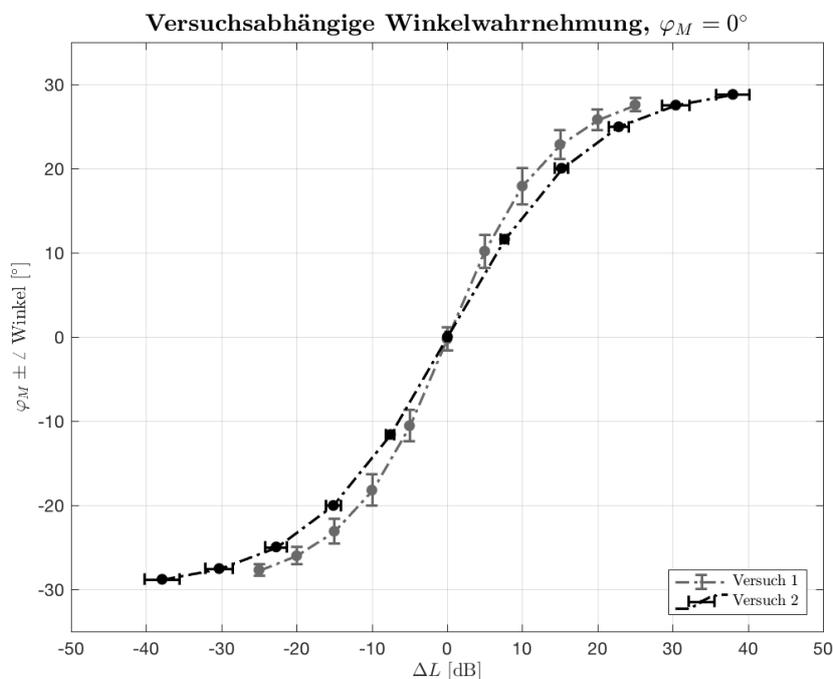


Abbildung 4.10 – Auswertung des ursprünglichen Versuchsaufbaus mit den eingepassten Testdaten

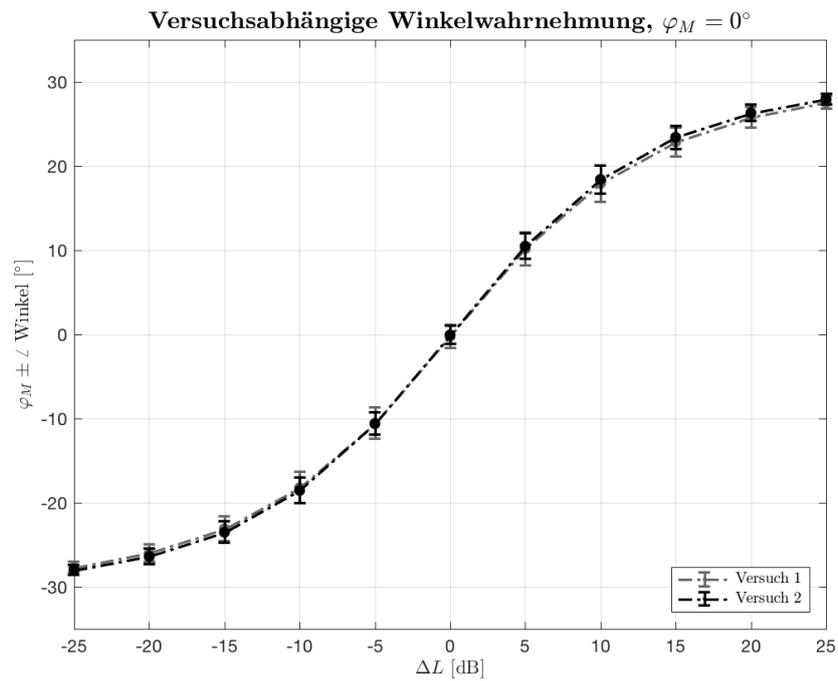


Abbildung 4.11 – Auswertung der Daten *beider* Versuche für das Setup von Test 1

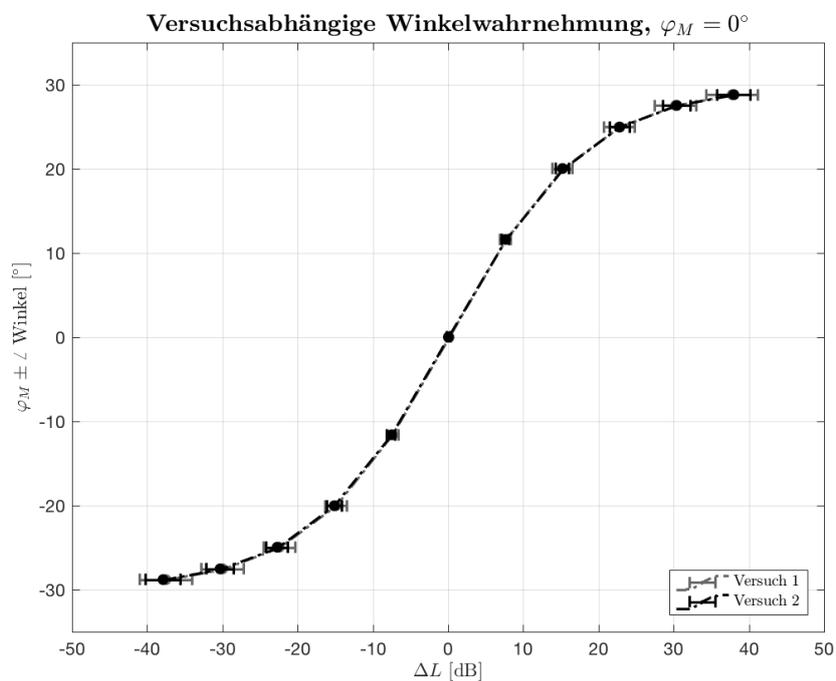


Abbildung 4.12 – Auswertung der Daten *beider* Versuche für das Setup von Test 2

## 5. Diskussion und Ausblick

### Rohdaten

Basierend auf der Auswertung der Rohdaten (Grafiken 4.1 bis 4.5) können folgende Beobachtungen gemacht werden:

- (i) Die Genauigkeit der Lokalisation nimmt mit zunehmender Lateralisation der Quellen ab. Dies zeigt sich in der Zunahme der Konfidenzintervalle. Daher können für die Mittenwinkel  $\varphi_M = \{45, 90\}^\circ$  bereits deshalb keine Unterschiede zwischen den Versuchssetups ausgemacht werden.
- (ii) Für das frontale Stereo-Paar zeigen sich bei der Auswertung der Rohdaten keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Versuchen. Die zur Verdeutlichung eingezeichneten „Konfidenz-Schläuche“ überlappen sich großteils. Ebenso sind hier die Modellannahmen gut bestätigt.
- (iii) Die lateralen Lautsprecher-Paare zeigen für beide Versuche große Abweichungen vom Tangens-Modell. Dennoch ist die Tendenz für die Lautsprecher-Paare konsistent, d.h. die Abweichungen geschehen in die gleiche Richtung bei allen Stereo-Paaren.

### Eingepasste Modelldaten

Die Verwendung der Rohdaten für das verallgemeinerte Tangens-Gesetz nach [ZF15] führt zu folgenden Feststellungen (Abbildungen 4.10 bis 4.12):

- (i) Die Einpassung ist im Allgemeinen ein fragiler Vorgang. Für die vorhandenen Testdaten war es nur für das frontale Lautsprecher-Paar, d.h. für Messpositionen im Bereich  $(-30, 30)^\circ$ , zufriedenstellend.
- (ii) Es bedarf einer genauen Evaluierung der Kurven basierend auf den Daten für die Einpassung. Eine objektive Größe zur Bestimmung der Qualität der eingepassten Daten gibt es nicht, daher ist die Aussortierung schlechter Einpassungen ein subjektiver, nicht exakt reproduzierbarer Vorgang.
- (iii) Die Auswertung der eingepassten Modelldaten für das frontale Lautsprecher-Paar entsprechend der Rohdaten zeigt einen Unterschied zwischen den Versuchen, bis auf die Mittenposition überlappen sich die Konfidenzintervalle der Messpunkte nicht. Die Unterschiede entsprechen hier der Modellannahme von Sinus- bzw. Tangens-Gesetz gemäß Abbildung 2.2.
- (iv) Wertet man die eingepassten Modelldaten beider Versuche hinsichtlich einer Messgröße (Winkel oder Pegeldifferenz) aus, so erhält man keine Unterschiede zwischen den Versuchen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf der Auswertung von Roh- und Modelldaten zeigt sich kein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden durchgeführten Versuchen. Dies gilt insbesondere für die lateralen Lautsprecherpaare.

Aufgrund des nicht restlos identifizierten Offsets im Lautsprecherpaar Nr. 2 sowie der teils fraglichen Testdaten, empfiehlt sich eine erneute Datenerhebung.

Folgende Verbesserungen des Versuchssetups sowie der Auswertung erscheinen sinnvoll:

- Im aktuellen Versuch wurde jeder Testreiz nur zweimal dargeboten. Mehr Wiederholungen würden die Streuung der Messwerte reduzieren.
- Die Lautsprecher sollten vor dem Versuch ganz genau eingeregelt werden.
- Das Vorliegen eines Unterschieds könnte mittels statistischer Verfahren untersucht werden, um die Validität der Schlussfolgerungen zu erhöhen.
- Die Performance der Versuchspersonen könnte mittels umfangreicherer Untersuchungen genauer ermittelt werden.
- *Modell*: Der Tangens Hyperbolicus ist eine punktsymmetrische Funktion. Das von [ZF15] präsentierte Modell hat lediglich zwei Freiheitsgrade für die Einpassung der Testdaten. In unserer Arbeit hat sich die Einpassung als relativ instabil erwiesen. Andere Versuchsentwürfe könnten die Einpassung umgehen, ansonsten empfiehlt sich eventuell die Einführung mehrerer Freiheitsgrade und anderer Algorithmen zum Abgleich (z.B. geometrische Einpassung).

## 6. Literatur

- [Ahr16] J. Ahrens, “Connecting Matlab and Pure Data via TCP/IP,” 2016. [Online]. Available: <http://www.soundfieldsynthesis.org/connecting-matlab-and-pd>
- [Bar16] K. Bartlett, “jtcp(actionStr,varargin) - File Exchange - MATLAB Central,” 2016. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24524-jtcp-actionstr-varargin->
- [HK16] J. Helm and E. Kurz, “Frequenzabhängigkeit von Amplituden-Panning-Kurven bei frontaler 2-Kanalstereophonie,” internet archiv für elektronische musik (iaem), Institut für elektronische Musik und Akustik, Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz, April 2016.
- [Lea59] D. M. 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, no. 7, pp. 977–986, 1959.
- [Mer65] H. Mertens, “Directional hearing in stereophony,” E.B.U. Review, no. 92, pp. 147–158, 1965.
- [Pul97] V. Pulkki, “Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning,” in J. Audio Eng. Soc., vol. 45, no. 6, June 1997, pp. 456–466.
- [Wen63] K. Wendt, “Das Richtungshören bei Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie,” Ph.D. dissertation, RWTH Aachen, 1963.
- [ZF15] F. Zotter and M. Frank, “Generalized tangent law for horizontal pairwise amplitude panning,” in Proceedings of ICOSA 2015 (International Conference on Spatial Audio 2015), A. Sontacchi, F. Zotter, N. Frank, H. Pomberger, and G. Theile, Eds., 1700 Institut 17 Elektronische Musik und Akustik, 10 2015, procedure: without peer reviewing.
- [ZF17] —, Ambisonics (Acoustic Holography and Holophony). Institute of Electronic Music and Acoustics, Universit of Music and Performing Arts, Graz, January 2017.

# A. Behringer BCR2000 Konfiguration

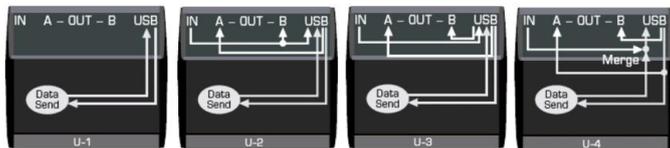


1. Keep the EDIT key pressed and press the STORE key at the same time. The B-CONTROL is now in the global setup menu.
2. Turn the first push encoder (TYPE) to select an operating mode.
3. Press the EXIT key to store this setting and leave the global setup menu.

**Note:** A more detailed description of operating modes can be found in the B-CONTROL operating manual.

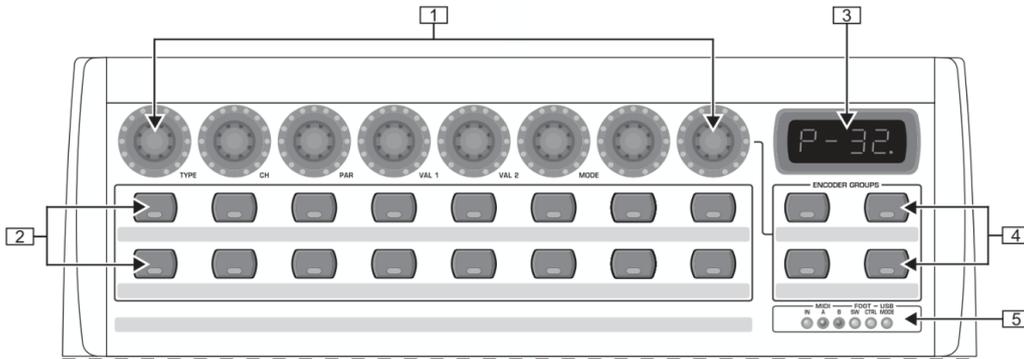
## 1. Mode selection with USB connection

If you connected your computer to the B-CONTROL via USB, select the modes U1 through U4.



### Save your own preset:

You need 2 illuminated rotary encoders and 1 push button (key). For the following settings use the first six rotary encoders at 1 that are named:



To select the Controller to edit, press and hold „edit“ and turn/press the Controller Type to configure.

The needed configurations are summed up in the following table:

Controller Type	TYPE	CH	PAR	VAL1	VAL2	MODE
Rotary 1	CC	Ch 1	0	0	127	AbS
Rotary 2	CC	Ch 2	0	0	127	AbS
Push Button	CC	Ch 3	0	127	Off	T on

Finally, configure the BCR2000 in the Pure Data MIDI settings as input and output device.

## B. pd-Patch: VBAP-Panning

