

Frequenzabhängigkeit von Amplituden-Panning-Kurven bei frontaler 2-Kanalstereophonie

Seminararbeit aus Algorithmen in Akustik und Computermusik 2

Jonas Helm
Eric Kurz

Betreuung: Dr. Franz Zotter, Dr. Matthias Frank

Graz, 29. April 2016



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

In dieser Seminararbeit wird die Frequenzabhängigkeit von Amplituden-Panning-Kurven bei frontaler Intensitätsstereophonie untersucht. In den 1960er Jahren wurden Versuche durchgeführt, die zeigten, dass bei Intensitätsstereophonie (der Ausnutzung des Effekts interauraler Pegeldifferenzen für die Ortung von Schallquellen), die laterale Verschiebung der Phantomschallquelle innerhalb des Lautsprecherpaares nicht alleine durch die Pegelunterschiede bestimmbar ist, sondern mitunter stark vom Spektrum des Klangs beeinflusst wird. Mit heutigen, genaueren Messmethoden und kontrollierter, gut dokumentierter Messumgebung wird diese Abhängigkeit mit Hilfe eines Hörversuchs erneut untersucht. Die Ergebnisse bestätigen für höhere Frequenzen eine signifikant größere Auslenkung bei gleichem Pegelunterschied. Anhand der Ergebnisse wird ein Vorschlag für die Verallgemeinerung dieser Beziehung unterbreitet, sodass den Amplituden-Panning-Kurven eine Frequenzabhängigkeit hinzugefügt werden kann.

Abstract

In this term paper we investigate the frequency-dependency of amplitude panning curves for intensity stereophony. This dependency had already been tested in the 1960s, where the results stated the amount of lateralisation of a sound through interaural level differences was affected by its spectrum. With today's accurate measurement methods and a controlled and well documented measurement environment, we investigate this dependency again in greater detail. The results prove the significantly larger displacement of the phantom sound source for the same amount of level difference at higher frequencies. By the use of these results, a generalisation of this frequency-dependency is made, so that it could be used in amplitude panning curves.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Vorangegangene Untersuchungen	6
2.1	D. M. Leakey (1959)	6
2.2	K. Wendt (1960/63)	8
2.3	H. Mertens (1965)	10
3	Versuchsaufbau	12
3.1	Wahl und Eigenschaften der Stimuli	12
3.2	Datenflussdiagramm	13
3.3	Pd-Patch	14
3.3.1	Pd: Generierung der Stimuli	15
3.3.2	Pd: Winkelberechnung	16
3.3.3	Pd: Ablauf und Datengenerierung	18
3.4	geometrischer Aufbau und Hardware	19
4	Versuchsdurchführung	21
4.1	Versuchsablauf	21
5	Auswertung	22
6	Ergebnisse	24
6.1	Panning-Kurven	24
6.2	Anstieg γ	27
6.3	Funktion für den Anstieg $\gamma(f)$	29
7	Zusammenfassung	31
A	Pd-Patch	33

1 Einleitung

Die frontale 2-Kanalstereophonie ist heutzutage das Standardwiedergabeverfahren für Tonmaterial jeglicher Art und findet vor allem Anwendung in der Musikproduktion. Für die Positionierung einer Monoschallquelle im Stereopanorama gibt es grundsätzlich zwei Verfahren. Beide Verfahren gehen davon aus, dass der Zuhörer sich genau auf der Mittelachse der Stereo-Lautsprecherbasis befindet.

Bei der Laufzeitstereophonie wird das gleiche Monosignal beiden Kanälen der Stereo-Lautsprecherbasis zugespielt. Dabei wird ein Laufzeitunterschied Δt zwischen den Kanälen erzeugt. Dieser Laufzeitunterschied Δt führt bei der Wiedergabe des Signals über die Lautsprecher zu einer Laufzeitdifferenz des eintreffenden Schalls an den Ohren des Zuhörers. Aufgrund der Summenlokalisierung des menschlichen Gehörs wird die Monoschallquelle bei einem Laufzeitunterschied $\Delta t \leq \pm 1,5$ ms an einer bestimmten Position im Stereopanorama wahrgenommen. Es ergibt sich die sogenannte Phantomschallquelle. Die Intensitätsstereophonie beruht auf dem Pegelunterschied zwischen beiden Kanälen der Stereo-Lautsprecherbasis bei der Wiedergabe eines Monosignals. Das gleiche Monosignal wird über die beiden Lautsprecher der Stereobasis wiedergegeben, wobei einer der beiden Lautsprecher dem Signal einen höheren Pegel aufprägt. Die Pegeldifferenz ΔL ist also verantwortlich für die Positionierung der Monoschallquelle, welche nun zur Phantomschallquelle wird. Versuche ergaben, dass eine Pegeldifferenz von $\Delta L \approx 18$ dB die Phantomschallquelle perzeptiv in einen der beiden Lautsprecher kippt. Die Intensitätsstereophonie bietet eine höhere Lokalisationsschärfe als die Laufzeitstereophonie und ist mit ihrer Implementierung in der Form des Panning-Reglers in der Aufnahme- und Wiedergabetechnik am weitesten verbreitet.

Die Kombination von Laufzeit- und Intensitätsstereophonie wird Äquivalenzstereophonie genannt.

Diese Seminararbeit setzt sich im Rahmen der Intensitätsstereophonie mit den Amplituden-Panning-Kurven auseinander. Diese beschreiben die Lateralisation der Phantomschallquelle in Abhängigkeit der Pegeldifferenz ΔL , welche zwischen den Lautsprechern der Stereoanordnung vorhanden ist. Ausgehend von dem Tangensgesetz von H. Clark und G. Dutton [CDV58] formulierten M. Frank und F. Zotter eine Verallgemeinerung dieses Gesetzes zur Vorhersage der Amplituden-Panning-Kurven [ZF15] (Gl. 1).

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} = \tanh \left(\frac{\ln 10}{40} \gamma (\Delta L - W) \right) \quad (1)$$

Wobei die Variablen wie folgt definiert sind:

- φ ... wahrgenommene Lateralisation der Phantomschallquelle
im Stereopanorama in $^\circ$
- α ... Auslenkung des linken bzw. rechten Lautsprechers von der Mittelachse
... des Stereopanoramas in $^\circ$
- γ ... Anstieg der Amplituden-Panning-Kurve
- ΔL ... Pegeldifferenz zwischen dem linken und dem rechten Lautsprecher in dB
- W ... horizontaler Versatz der Amplituden-Panning-Kurve in dB

Wie in Gleichung 1 zu erkennen ist, enthält das Tangensgesetz keinerlei Information zur spektralen Verteilung des, an den Lautsprechern anliegenden, Signals. Erste Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit der Intensitätsstereophonie wurden in den frühen 60er Jahren des 20. Jahrhunderts u.a. von D. M. Leakey, K. Wendt und H. Mertens durchgeführt [Lea59, Wen60, Wen63, Mer65]. Jedoch sind die Ergebnisse dieser Untersuchung, welche hauptsächlich durch Hörversuche bewerkstelligt wurden, schwer zu vergleichen. So variierten Versuchsparameter wie u.a. Stimulissignale, Stimulireihenfolge, Lautsprecheranordnung, Hörposition, Kopforientierung, Versuchslautstärke und Anzeige- bzw. Eingabemethode. Allen Untersuchungen gemeinsam ist allerdings, dass die Lateralisation der Phantomschallquelle bei höherfrequenten Signalen zunimmt. Das heißt, dass für die gleiche Pegeldifferenz ΔL ein hochfrequentes Signal stärker zu einem Lautsprecher der Stereoanordnung hingezogen wird als ein niederfrequentes Signal. Einige Untersuchungen stellen diese Beobachtung in einen Zusammenhang mit der größeren Bedeutung interauraler Pegeldifferenzen bei der Lokalisation höherfrequenter Schallereignisse.

Motivation dieser Seminararbeit soll es sein festzustellen, ob die damaligen Ergebnisse mittels heutiger Techniken zu reproduzieren und zu optimieren sind. Weiterhin soll eine mögliche Vereinheitlichung der Frequenzabhängigkeit diskutiert werden. Diese könnte in Form einer Funktion des Anstiegs der Amplituden-Panning-Kurve $\gamma(f)$ realisiert werden. Für diese Untersuchungen werden zunächst die Forschungen von Leakey, Wendt und Mertens analysiert. Mittels dieser Grundlagen wird ein Hörversuch entwickelt und durchgeführt. Die erhobenen Daten werden anschließend ausgewertet um Panning-Kurven für Signale verschiedener Frequenzen zu erzeugen und eine mögliche Funktion für $\gamma(f)$ vorzuschlagen.

2 Vorangegangene Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden die in den frühen 1960er Jahren durchgeführten Hörversuche zur Frequenzabhängigkeit der Intensitätsstereophonie kurz vorgestellt. Dabei werden die Parameter der Hörversuche und deren wichtigste Ergebnisse beschrieben.

2.1 D. M. Leakey (1959)

Im Jahr 1959 veröffentlichte D. M. Leakey im „Journal of the Acoustical Society of America“ in Ausgabe 31, Nummer 7 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, überprüfte [Lea59].

Die Messungen wurden hierbei im Freifeld durchgeführt. Die Lautsprecher hatten einen Abstand von 10 ft, also ca. 3 m und zwischen ihnen befanden sich 7 Referenzpositionen. An jeweils einer dieser Positionen wurde ein dritter Lautsprecher aufgestellt, um eine natürliche Schallquelle zu imitieren. Es wurde ein Signal abgespielt und dann langsam abgeschwächt, während die Signale der beiden äußeren Lautsprecher (mit entsprechender Pegel- oder Laufzeitdifferenz) angehoben wurden. Dann sollte die Versuchsperson (VP) angeben, ob die nun erschienene Phantomschallquelle rechts oder links von der vorherigen Schallquellenposition lag. Dies wurde für die links- und die gegenüberliegende rechtsseitige Referenzposition durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden gemittelt. Die für uns interessante Testreihe innerhalb dieser Tests ist die Betrachtung der Auswirkung von Pegeldifferenzen auf die laterale Verschiebung der Phantomschallquelle bei gleichem Abstand der sich in der Mitte befindlichen VP zu den Lautsprechern. Für diesen Test wurde bei tiefen Frequenzen Oktavbandrauschen zwischen 250 Hz und 500 Hz, ein 350 Hz Sinuston, ein bandbegrenzttes Sprachsignal und ein Klang, bestehend aus einem 300 Hz und einem 400 Hz Sinuston, verwendet. Bei einem weiteren Test mit höheren Frequenzen wurde Oktavbandrauschen zwischen 250 Hz und 500 Hz, Oktavbandrauschen und Pulse zwischen 2 kHz und 4 kHz, ein diesmal höheres, bandbegrenzttes Sprachsignal und ein Klang, bestehend aus 5 (nicht genannten) Frequenzkomponenten, verwendet. Die VP befand sich ca. 2.4 m von der Lautsprecherachse entfernt (kein gleichseitiges Dreieck) und es wurden jeweils 8 Personen getestet.

Die Ergebnisse dieses Tests sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt.

Während bei Abb. 2 keine Aussage über die Frequenzabhängigkeit getroffen werden kann, ist in Abb. 1 ersichtlich, dass bei höherfrequenten Signalen ein kleinerer Pegelunterschied zwischen den Lautsprechern für die Verschiebung zu den jeweiligen Positionen nötig ist. Jedoch ist beim Vergleich des Oktavbandrauschens die Standardabweichung für das höherfrequente Signal größer.

Die durch diese Veröffentlichung gewonnenen Erkenntnisse lassen es zu, eine Frequenzabhängigkeit bei der Verschiebung der Phantomschallquelle durch Pegelunterschiede zu vermuten, welche die Wahrnehmung der Schallquellenpositionen erheblich beeinflusst.

SOUND IMAGE POSITION α°	INTERCHANNEL INTENSITY DIFF.							
	250-500 CPS NOISE		350 CPS TONE		250-500 CPS SPEECH		300+400 CPS TONES	
	M db	S db	M db	S db	M db	S db	M db	S db
R ₃ OR R ₅ 8.9	4.5	0.7	4.8	1.1				
R ₂ OR R ₆ 17.4	10.1	0.5	10.6	1.6	10.5	0.4	11.1	1.5
R ₁ OR R ₇ 25.1	17.1	1.1	18.0	2.0				

SOUND IMAGE POSITION α°	INTERCHANNEL INTENSITY DIFF.									
	2-4 KCPS NOISE		2-4 KCPS PULSES		2-4 KCPS SPEECH		5 COMPONENT TONE		250- 500 EQ. IO	
	M db	S db	M db	S db	M db	S db	M db	S db	M db	S db
R ₃ OR R ₅ 8.9	3.4	0.9	4.1	1.0					4.5	3.6
R ₂ OR R ₆ 17.4	7.1	1.2	7.6	1.7	7.6	1.1	8.2	1.7	10.1	6.9
R ₁ OR R ₇ 25.1	12.4	1.3	12.9	2.0					17.1	12.1

(a)
(b)

Abbildung 1 – Von D. M. Leakey ermittelter Einfluss des Pegelunterschiedes auf die Phantomschallquellenposition bei Intensitätsstereophonie für niederfrequente (a) und höherfrequente (b) Signale. [Lea59]

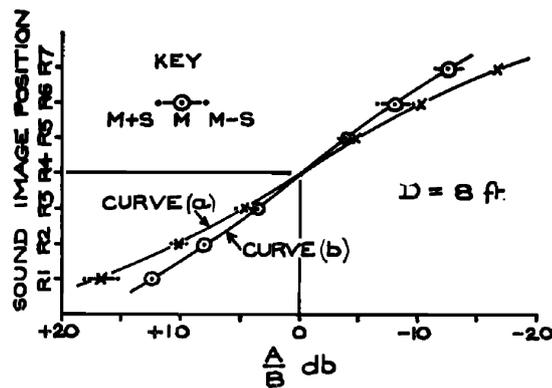


Abbildung 2 – Von D. M. Leakey ermittelter Einfluss des Pegelunterschiedes auf die Phantomschallquellenposition bei Intensitätsstereophonie bei breitbandigem Sprachsignal. Curve(a): ohne Kopfbewegungen, Curve(b): mit Kopfbewegungen. [Lea59]

Diese Frequenzabhängigkeit soll im Zuge dieser Arbeit genauer untersucht werden.

2.2 K. Wendt (1960/63)

Es lagen uns die Veröffentlichung „Versuche zur Ortung von Intensitäts-Stereophonie“ [Wen60] von Klaus Wendt sowie dessen Dissertation „Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie“ [Wen63] vor.

In der Veröffentlichung von 1960 verwendet Wendt für seine Untersuchungen zur Intensitätsstereophonie als Versuchsaufstellung ein gleichseitiges Dreieck zwischen Lautsprechern und Versuchsperson. Dieses besitzt eine Kantenlänge von 3.4 m und befindet sich in einem reflexionsarmen Raum. Als Stimuli wurde weißes Terzbandrauschen bei den Mittenfrequenzen 100 Hz, 325 Hz, 1 kHz, 3.25 kHz und 10 kHz mit einer Dauer von 10 s verwendet. Diese Stimuli wurden bei einer Versuchslautstärke von 50 phon präsentiert. Zwischen zwei Stimuli war eine Ruhepause von 5 s vorgesehen. Insgesamt wurden 80 Stimuli je Terzbandrauschen mit verschiedenen Pegeldifferenzen ΔL präsentiert. Die Versuchspersonen führten vor jeder Messreihe des jeweiligen Terzbandrauschens händisch einen Offset-Abgleich der Mittenposition des Stereobildes durch. Die Reihenfolge der Darbietung der Stimuli war pseudo-zufällig aber für jede Versuchsperson gleich auf Tonband festgehalten. Es nahmen 10 Versuchspersonen an dem Hörversuch teil. Diese mussten die Phantomschallquelle vorgegebenen Positionsnummern zuordnen. Zur Auswertung wurden halbseitige Amplituden-Panning-Kurven erzeugt (siehe Abb. 3 (a)). Wendt kam zu der Erkenntnis, dass die Steilheit der Panning-Kurven aber auch die Ungenauigkeit der Schallquellenlokalisierung mit der Frequenz f steigt. Des weiteren äußert er die Vermutung, dass die Lokalisation der Phantomschallquelle für tiefe Frequenzen $f < 1000$ Hz vornehmlich durch interaurale Laufzeitdifferenzen stattfinden muss. Tabelle 1 zeigt die Anstiege γ welche durch das Fitting der Kurven von Abbildung 3 (a) in das Tangensgesetz (Gl. 1) ermittelt wurden.

f in Hz	100	300	1000	3000	10000
γ	1.7	1.4	1.6	2.5	2.5

Tabelle 1 – Steigung γ in Abhängigkeit der Frequenz f .

In dem Hörversuch der Dissertation vom Jahr 1963 wurde auch ein Stereo-Dreieck mit einer Kantenlänge von 3.4 m im reflexionsarmen Raum verwendet. Drei verschiedene Stimuli-Typen wurden bei einem Versuchsschallpegel von 80 dB präsentiert. Zum einen wurden breitbandige und bandbegrenzte Knackser mit dazwischen liegenden Ruhepausen von einer halben Sekunde abgespielt. Die Bandbegrenzung wurde in Terzen bei den Mittenfrequenzen 103 Hz, 327 Hz, 1030 Hz, 3270 Hz und 10300 Hz durchgeführt. Zum anderen wurden Sinustöne mit trapezförmiger Hüllkurve und einer Dauer von 2 bis 5 s präsentiert. Jeder Stimulus wurde mit 13 bis 20 verschiedenen Pegeldifferenzen ΔL und je 3 Wiederholungen dargeboten. Der Stimulus wurde wiederholt bis eine Angabe der Versuchsperson erfolgte. Die Phantomschallquelle musste einem Laterali-

sationswinkel auf einer Grad-Skala zwischen den Lautsprechern zugeordnet werden und dem Versuchsleiter angesagt werden. Alle Versuchsperson wurden vor dem Hörversuch auf ihr Lokalisationsvermögen getestet. Die Versuchsdauer betrug 20 bis 45 min. Wurden Ermüdungserscheinungen durch den Versuchsleiter festgestellt, erfolgte ein Abbruch des Hörversuchs. Der Offset-Abgleich wurde mit einem Kontrolllautsprecher an der Mit-tenposition der Stereo-Lautsprecherbasis durchgeführt. Es wurden Amplituden-Panning-Kurven für die bandbegrenzten Knackser erstellt (siehe Abb. 3 (b)). Die wesentlichsten

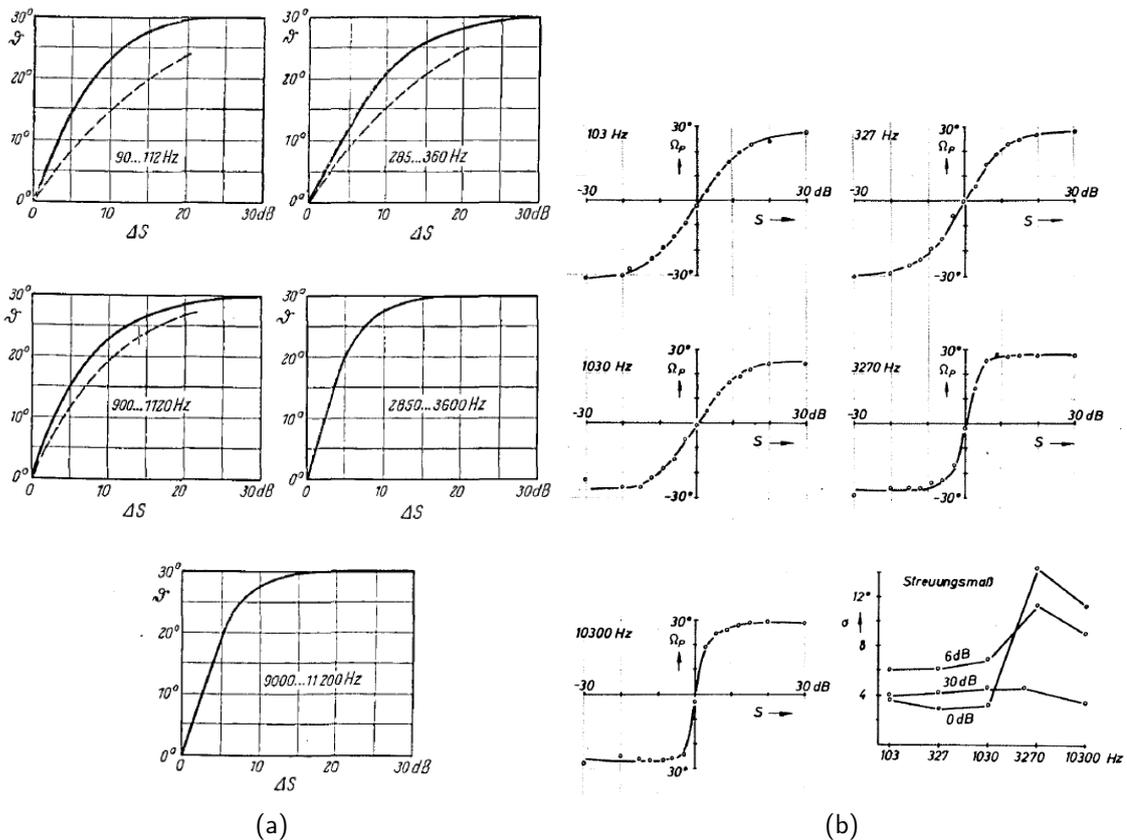


Abbildung 3 – Von K. Wendt ermittelte Panning-Kurven 1960 (a) und 1963 (b).

Erkenntnisse der Dissertation von Wendt beziehen sich auf die Bedeutsamkeit der Intensitätsstereophonie. Er belegte, dass die Intensitätsstereophonie bedeutend robuster gegenüber verschiedener Kopfhaltungen und Frequenzen ist als die Laufzeitstereophonie. Gerade bei hohen Frequenzen ist die Fehllokalisierung geringer. Des weiteren stellte er eine Zunahme der Steilheit der Amplituden-Panning-Kurven bei hohen Frequenzen fest. Tabelle 2 zeigt die Anstiege γ welche durch das Fitting der Kurven von Abbildung 3 (b) in das Tangensgesetz (Gl. 1) ermittelt wurden. Er kam zu der Erkenntnis, dass die Schallimpulse geringer Bandbreite wie die Sinus-Dauertöne lokalisiert werden.

f in Hz	103	327	1030	3270	10300
γ	1.1	1.4	1.2	2.9	3.3

Tabelle 2 – Steigung γ in Abhängigkeit der Frequenz f .

2.3 H. Mertens (1965)

Nach den Veröffentlichungen von Wendt 1960 und 1963, folgte im Jahre 1965 eine Veröffentlichung von H. Mertens in der E.B.U. Review (European Broadcasting Union) in Ausgabe 92 [Mer65]. Dabei handelte es sich um eine theoretische Betrachtung der Mechanismen des Richtungshörens anhand zeitlicher und spektraler Energieverteilung von Signalen. Dazu wurden einerseits Tests zum genauen Messen der Diffraktionskoeffizienten bzw. der richtungs- und frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen, andererseits solche, zum Verifizieren der numerischen Ergebnisse der aufgestellten Formeln, durchgeführt. Letztere handelten sich um Tests zur Ermittlung der frequenzabhängigen Lokalisation von Phantomschallquellen bei Intensitätsstereophonie.

Die Tests wurden an der Universität von Liège, an der technischen Hochschule Aachen und am O.R.T.F. in Paris jeweils in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt. An jedem Ort waren 15 Versuchspersonen beteiligt, welche vorher auf die Sensitivität ihrer Ohren geprüft wurden. Die meisten der Teilnehmer waren nicht geübt im Stereo-Hören, was auf die damals noch nicht verbreitete Stereotechnik zurückzuführen ist. Die Lautsprecher waren im 30°-Winkel links und rechts von der VP aufgestellt, wobei das gleichseitige Dreieck zwischen Lautsprechern und VP eine Seitenlänge von 3 m aufwies. Die Pegelunterschiede zwischen rechtem und linkem Kanal betragen -30 dB bis $+30$ dB, wobei bei der Auswertung die rechte und linke Seite nicht unterschieden wurden. Es wurden bandbegrenzte Signale (Gauss-Pulse und Terzbandrauschen) verwendet. Die Gauss-Pulse wurden in Liège mit Hilfe eines speziell angefertigten Generators erzeugt und für die anderen Versuchsorte auf Band aufgenommen. In Aachen wurde nur mit Gauss-Pulsen getestet, da für die Tests mit Terzbandrauschen die Ergebnisse von Wendt in die Statistik mit aufgenommen wurden. Für jede Person und Frequenz wurde ein Offset-Abgleich durchgeführt, um den Einfluss von leichten Sensitivitätsunterschieden der Ohren, ungenauen Sitzpositionen und Ungleichheit der Lautsprecher zu minimieren. Die Frequenzen 140 Hz und 7800 Hz wurden weniger oft getestet als die übrigen. Jedoch gibt es keine Auskünfte über die Reihenfolge bzw. eine Zufallsanordnung der Signale, über die Anzahl an Wiederholungen, die Dauer und die Lautstärke der Signale, sowie über den genauen Ablauf, beispielsweise betreffend der Art der Beantwortung bzw. der Anzeige der Richtung.

In Abbildung 4 (a) bis (d) ist ein Teil der von H. Mertens ermittelten Kurven für frequenzabhängige Lokalisation bei Intensitätsstereophonie zu sehen. Aus den Ergebnissen kann abgelesen werden, dass für höhere Frequenzen die Position der Phantomschallquelle bereits für niedrigere Pegelunterschiede näher am lauterem Lautsprecher wahrgenommen wird. Dies kann man an der Steilheit der Kurven ablesen. In der folgenden Tabelle sind die Steigungen der Kurven im Nullpunkt aufgelistet, womit das angesprochene Verhalten auf einen Blick sichtbar ist. Hierbei passen die Werte für 140 Hz, sowie 7800 Hz nicht ins Bild. Dies kann daran liegen, dass, wie oben beschrieben, für diese Frequenzen we-

niger Tests durchgeführt wurden und somit weniger Daten vorlagen, was diese weniger repräsentativ bzw. ungenauer macht.

f in Hz	140	310	500	1100	2200	4200	7800
γ	1.7	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.6

Tabelle 3 – Steigung γ in Abhängigkeit der Frequenz f .

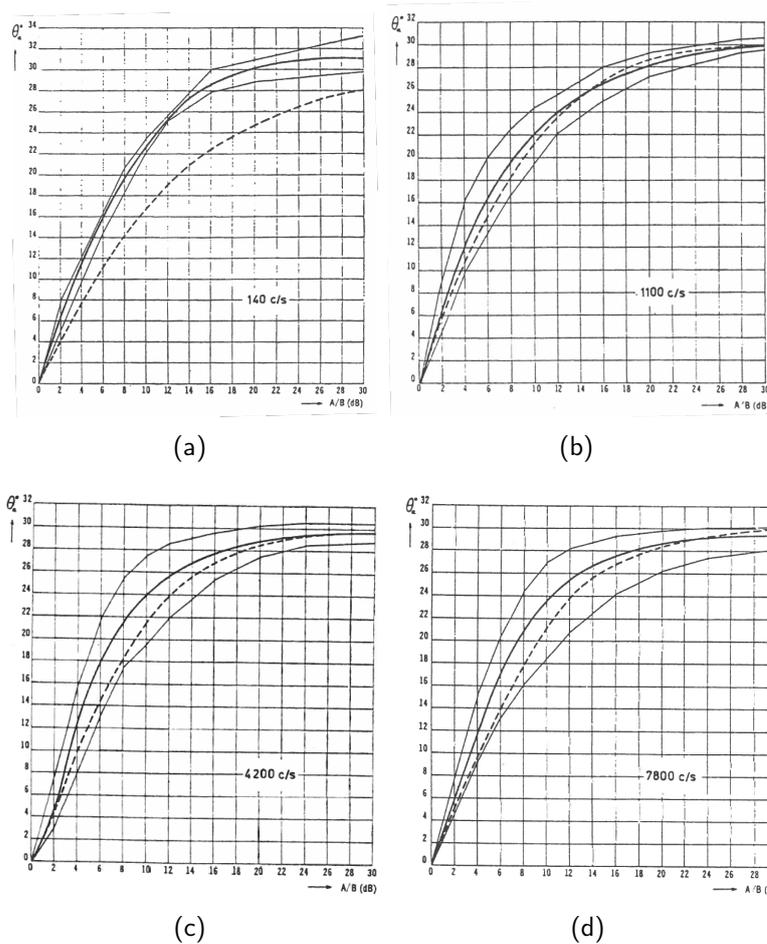


Abbildung 4 – Von H. Mertens et. al ermittelte Panning-Kurven für 140 Hz (a), 1100 Hz (b), 4200 Hz (c) und 7800 Hz (d). Durchgezogene Kurven: Gesamtmittel über alle Tests. Durchgezogene linear interpolierte Kurven: Maxima und Minima individueller Mittelwerte. Gepunktete Kurven: theoretische, berechnete Kurven.

3 Versuchsaufbau

3.1 Wahl und Eigenschaften der Stimuli

Für den Versuch wurden 10 verschiedene Arten von Stimuli zur Untersuchung der frequenzabhängigen Ortung der Phantomschallquellen bei Intensitätsstereophonie verwendet. Diese sind in Tabelle 4 mit ihren Eigenschaften aufgelistet.

Nr.	Grundlage	Filter	Filterfrequenz /Hz	Pegel
1	rosa Rauschen	Terzbandfilter	$f_M = 125$	60 dB(A)
2			$f_M = 250$	
3			$f_M = 500$	
4			$f_M = 1000$	
5			$f_M = 2000$	
6			$f_M = 4000$	
7			$f_M = 8000$	
8		- (breitbandig)	-	
9		Tiefpassfilter	$f_G = 1000$	
10		Hochpassfilter	$f_G = 1000$	

Tabelle 4 – Stimuli (f_M ...Mittenfrequenz, f_G ...Grenzfrequenz).

Jedes dieser Signale wurde den Versuchspersonen anhand von 3 „Bursts“ mit einer Dauer von 102 ms und einer Pause von 300 ms vorgespielt. Die einzelnen Bursts wurden mit einem linearen *Attack-Sustain-Release Envelope* mit 1 ms Attack-Time, 100 ms Sustain-Time, 1 ms Release-Time und einem Sustain-Level von 1 multipliziert (siehe Abb. 5).

Die verwendeten Pegelunterschiede waren:

Nr.	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
ΔL in dB	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12

Tabelle 5 – Pegelunterschiede zur Erzeugung von Phantomschallquellen.

Jeder der 10 in Tabelle 4 aufgelisteten Stimuli wurde zweimal pro Pegelunterschied abgespielt. Da jedoch die positiven und negativen Pegelunterschiede bei der Auswertung nicht unterschieden wurden und somit 4 Testsignale pro Stimulus und (Betrags-)Pegelunterschied resultierten, wurde die Mittenposition ebenfalls 4 mal pro Stimulus dargeboten. Insgesamt kamen wir damit auf $10 \cdot 4 \cdot 5 = 200$ Testsignale bzw. Bursts pro Versuchsperson.

Alle oben genannten Kombinationen von Stimuli-Nummern (s. Tabelle 4) und Nummern für die Pegelunterschiede (s. Tabelle 5) wurden per Matlab in einer Textdatei gespeichert, wobei jede Zeile einem Stimulus mit zugehörigem Pegelunterschied entsprach. Die Zeilen wurden für jede Versuchsperson zufällig permutiert, sodass für jede Person eine

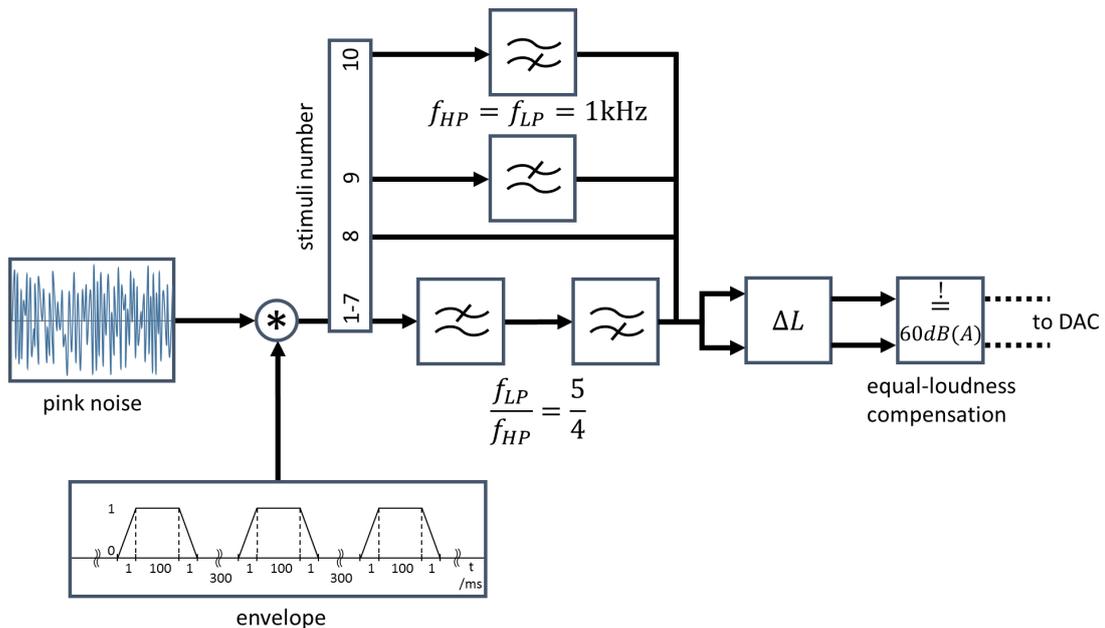


Abbildung 5 – Blockdiagramm der Generierung der Stimuli. Tiefpassfilter und Hochpassfilter sind 4. Ordnung und bestehen aus jeweils 2 kaskadierten Filtern 2. Ordnung mit Güte 0.707 und Interpolationszeit 200 ms. (Pd Objekte: $lp2\sim$ und $hp2\sim$, (c) Thomas Musil).

unterschiedliche, randomisierte Abspielreihenfolge als Textdatei vorlag. Die Identifikationsnummern in der Textdatei werden im Pd-Patch interpretiert und in die zugehörigen Arten von Stimuli bzw. Pegelunterschiede umgesetzt. Das Auslesen der Textdatei, die Generierung der Signale, die Detektion des Winkels und das Speichern der Antworten der Versuchspersonen wird in den folgenden Kapiteln 3.2 und 3.3 beschrieben.

3.2 Datenflussdiagramm

In Abbildung 6 kann der Datenfluss vom Auslesen der Textdatei mit den zufälligen Sequenzen der Stimuli bis zum Speichern der Antworten bzw. wahrgenommenen Schallquellenpositionen der Versuchspersonen (ebenfalls in eine Textdatei) nachvollzogen werden. Der erste und letzte Schritt geschah jeweils durch ein Lesen bzw. Schreiben der Textdatei in einem Pd-Patch (s. Abb. 20).

Der Ablauf wird im Folgenden grob skizziert:

Schritt 1:

Eine Zeile der Textdatei mit den zufälligen Sequenzen der Stimuli und Pegelunterschiede wird in Pure Data ausgelesen.

Schritt 2:

Der aktuell ausgelesene Stimulus wird generiert, mit dem Pegelunterschied belegt und an den Digital-Analog-Converter geschickt. Dieser ist mit den Boxen im reflexionsarmen

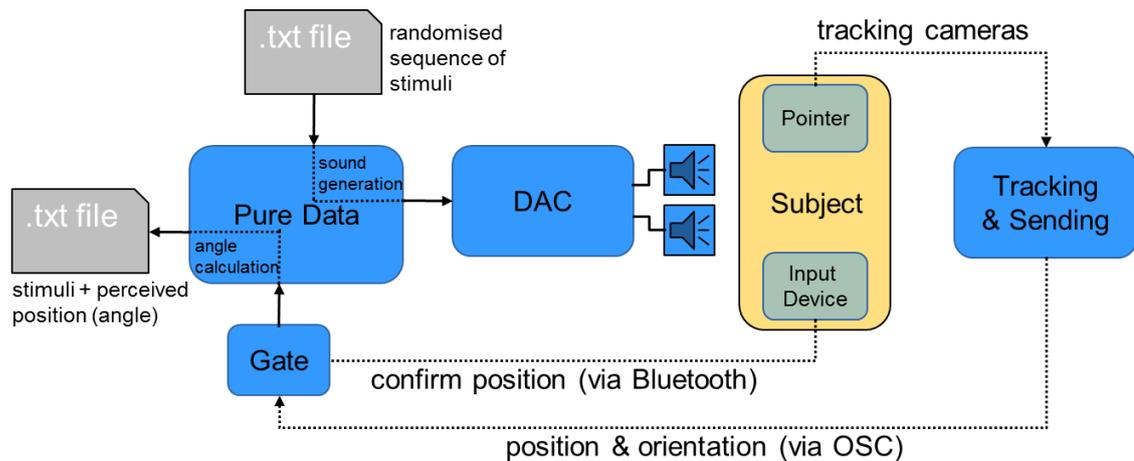


Abbildung 6 – Datenflussdiagramm.

Raum verbunden, welche in einer Stereoaufstellung, wie in Abb. 8 gezeigt, aufgestellt sind.

Schritt 3:

Die Versuchsperson kann mit Hilfe eines „Presenters“, eines Bluetooth-Controllers mit mehreren Knöpfen (siehe Abb. 10 (b)), den nächsten Stimulus auslösen (rechter Knopf) und anschließend, während des Anzeigens der wahrgenommenen Phantomschallquellenposition, diese bestätigen bzw. speichern (oberer Knopf). Zum Anzeigen der Position wird die ebenfalls in Abb. 10 (b) dargestellte Plastikpistole verwendet. Diese ist mit reflektierenden Kugeln bestückt, sodass vom Tracking-System ihre Position und Orientierung festgestellt werden kann. Außerdem ist ein Laser-Pointer in der Pistole eingebettet, dessen Verwendung die Anzeige der Position am Brett zwischen den Lautsprecherboxen visuell unterstützt. Das Tracking-System läuft auf einem zweiten PC. Die Position und Orientierung der Pistole wird erfasst und mit Hilfe eines Pd-Patches per OSC-Messages (Open Sound Control) an den PC gesendet, auf dem das zuerst beschriebene Pd-Patch läuft.

Schritt 4:

Das Pd-Patch (Abb. 20) empfängt die Position und Orientierung und rechnet diese in einen Durchstoßpunkt der Verlängerung der Anzeige-Pistole durch einen gedachten Kreis mit dem Radius 2 m (siehe geometrische Abbildung 8) um. Der danach errechnete Winkel von der Mittenposition nach rechts (positiv) und links (negativ) wird bei Bestätigung durch die VP mithilfe des Presenters gespeichert.

3.3 Pd-Patch

In diesem Abschnitt wird auf die verschiedenen Aufgaben des Pd-Patches im Rahmen des Hörversuchs eingegangen. Dabei werden die Generierung der verschiedenartigen Stimuli, die Berechnung der angezeigten Phantomschallquellenposition als Winkel zwischen den

Lautsprechern und die Speicherung der Daten beschrieben.

3.3.1 Pd: Generierung der Stimuli

In Abbildung 5 ist ein Blockdiagramm zur Erklärung der Generierung der verwendeten Stimuli abgebildet. Mit Hilfe dieser Abbildung kann die im Folgenden beschriebene Klangsynthese nachvollzogen werden.

Für alle in unserem Hörversuch verwendeten Signale diente rosa Rauschen als Grundlage. Rosa Rauschen hat den Vorteil, dass die Leistung bei konstanter relativer Bandbreite konstant ist, d.h. der Schalldruckpegel zu höheren Frequenzen mit ca. 3 dB pro Oktave abnimmt. Dies führt dazu, dass die Versuchspersonen die in unserem Hörtest verwendeten, unterschiedlichen Frequenzbänder etwa gleich laut wahrnehmen. Zusätzlich wurde von uns im reflexionsarmen Raum, in dem der Versuch statt fand, eine Messung des Abwerteten Schalldruckpegels (etwa an der Position des Kopfes der Versuchspersonen) durchgeführt. Dabei wurden alle 10 unterschiedlichen Stimuli auf 60 dB(A) eingepegelt, um die frequenzabhängige Lautstärkewahrnehmung zu relativieren. Im Zuge dessen wurden vom Signal abhängige Faktoren ermittelt, die mit diesen beim Abspielen multipliziert wurden, um eine konstante Lautstärke zu gewährleisten (siehe Abb. 20 Block „Berechnungen“).

Um die Signale herzustellen, wurde in Pure Data das Objekt `pink~` verwendet, das rosa Rauschen über das gesamte hörbare Frequenzspektrum generiert. Um nun die verschiedenen Stimuli zu erstellen, gab es zwei Blöcke mit unterschiedlichen Funktionen (siehe Abb. 20).

Der Block „Terz-/Oktavband-Rauschgenerator“ beinhaltet das Terzbandfilter für das Terzbandrauschen. Das rosa Rauschen wird mit einem Tiefpassfilter und einem Hochpassfilter 4. Ordnung gefiltert, die aus jeweils 2 kaskadierten Filtern 2. Ordnung mit Güte 0.707 und Interpolationszeit 200 ms bestehen (`lp2~` und `hp2~`, (c) Thomas Musil 2000 - 2005). Um die obere und untere Grenzfrequenz zu erhalten wird, abhängig vom gerade ausgelesenen Stimulus, die Mittenfrequenz berechnet und daraus die obere und untere Grenzfrequenz für das Terzband bestimmt (siehe Block „Berechnungen“). Beim Abspielen wird das Signal mit der in Kapitel 3.1 beschriebenen Einhüllenden multipliziert. (Die Möglichkeit ein Oktavbandrauschen zu generieren wurde hier mit implementiert, später jedoch nicht verwendet.)

Der Block „Pink-Noise/LP/HP-Rauschgenerator“ beinhaltet die Generierung des reinen rosa Rauschens und der Rauschsignale mit Tiefpass- und Hochpassfilter. Die Filter sind die gleichen wie oben beschrieben, haben jedoch eine festgelegte Grenzfrequenz bei 1 kHz. Werden diese Stimuli aus der Textdatei ausgelesen, wird durch einen Vergleich mit der Identifikationsnummer (siehe Tabelle 4) das passende Signal durchgeschaltet und vor der Filterung mit der Einhüllenden multipliziert.

Um den Pegelunterschied zwischen rechtem und linkem Kanal zu erreichen, wird dieser aus der Textdatei ausgelesen und auf den rechten und linken Kanal aufgeteilt, um den gemeinsamen Pegel konstant zu halten (Bsp. Differenz von 3dB: $L_{p,r} = 81,5$ dB,

$L_{p,l} = 78,5$ dB, siehe Block „Berechnungen“).

Im linken unteren Block „Add→Weight→Output“ werden die Signale gesammelt, mit dem Pegel für den linken und rechten Kanal und dem Ausgleichsfaktor für den dB(A) bewerteten Pegel multipliziert und an den Digital-Analog-Umsetzer weitergeleitet.

3.3.2 Pd: Winkelberechnung

Das Tracking-System, mit 9 an der Decke des Raumes angebrachten Kameras (siehe Abb. 9), ist so kalibriert, dass die Sitzposition der Versuchsperson bzw. die Mitte des Kreises mit Radius 2 m (siehe Abb. 8) den Ursprung eines zweidimensionalen Koordinatensystems darstellte. Für die Startposition des Zeigergerätes (Plastikpistole mit Reflektorkugeln) gilt ebenfalls dieser Koordinatenursprung und eine Orientierung in Richtung Mittenposition der Stereo-Aufstellung. Diese Orientierung entspricht einem 0° Winkel in unserem Experiment. Das Tracking-System stellt uns die Position des Zeigergerätes in allen drei Raumrichtungen und eine Orientierung (Elevation, Azimuth und Roll) zu Verfügung.

Die Höhe über dem Boden ist irrelevant, während eine x- und eine y-Koordinate für die Position des Zeigergerätes ausschlaggebend ist und für weitere Berechnungen in unserem Pd-Patch „Winkelberechnung“ verwendet wird. Außerdem ist die seitliche Orientierung (Azimuth) von Bedeutung für die Berechnung der angezeigten Phantomschallquellenposition. Dafür muss der Durchstoßpunkt der gedachten Verlängerung des Zeigergerätes mit dem Kreis, auf dessen Radius sich die Lautsprecher befinden, berechnet werden, um die angezeigten Winkel (theoretisch zwischen -30° und $+30^\circ$) zwischen den Lautsprechern zu erhalten.

Zuerst wird eine Umrechnung der Position und der Orientierung in die Form einer Geraden mit Achsenabschnitt und Steigung innerhalb des Koordinatensystems durchgeführt (Formel (2)). Um die Schnittpunkte der Geraden mit dem Kreis zu erhalten, wird die Geradengleichung und die Kreisgleichung (Formel (3)) gleichgesetzt, was zwei quadratische Gleichungen für die Berechnung des y-Wertes ergibt, in welche die Steigung, der Achsenabschnitt und der Radius eingesetzt werden können (Formel (4)). Anschließend werden nur die positiven y-Werte weiter verarbeitet, da der für uns interessante Bereich in der oberen (hier die „vordere“) Halbebene liegt. Der zugehörige x-Wert wird bestimmt und anhand des Wertepaares (x,y) der Winkel (negativ: Auslenkung nach links, positiv: Auslenkung nach rechts) für die Auslenkung relativ zur Mitte (0°) berechnet (Formel (5)). Dieser Wert zeigt die für uns interessante Verschiebung der Phantomschallquelle bei Vorhandensein eines Pegelunterschiedes an. Im Folgenden sind die Formeln für diese Berechnungen und eine geometrische Veranschaulichung (Abb. 7) mit Angabe aller nötigen Variablen abgebildet.

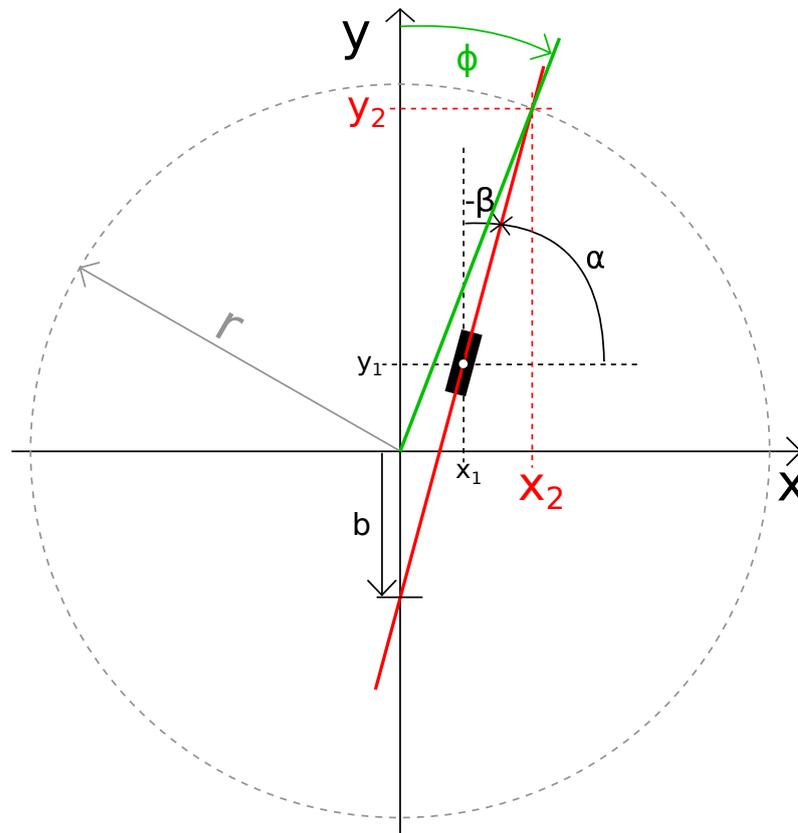


Abbildung 7 – Koordinatensystem mit Zeigegerät (rechteckige Box) und allen für die Berechnung des Winkels Φ nötigen Variablen. Der Radius r entspricht dem Abstand der VP von den Lautsprechern und dem Abstand der Lautsprecher untereinander. Die Lautsprecher befinden sich bei $\Phi = +30^\circ$ und $\Phi = -30^\circ$.

Geradengleichung:

$$y = a \cdot x + b, \quad (2)$$

mit:

$$\text{Für } \beta < 0, \alpha = 90 + \beta,$$

$$\text{Für } \beta \geq 0, \alpha = -90 + \beta,$$

$$a = \tan(\alpha),$$

$$b = y_1 - a \cdot x_1.$$

Kreisgleichung:

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (3)$$

Formel (2) in (3):

$$y_2 = \left(\frac{\frac{b}{a^2}}{\frac{1}{a^2} + 1} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{b}{a^2}}{\frac{1}{a^2} + 1} \right)^2 - \left(\frac{b^2}{a^2} - r^2 \right) \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{a^2} + 1} \right)}, \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{y - b}{a}.$$

Auslenkung d. Phantomschallquelle:

$$\Phi = \arctan\left(\frac{x_2}{y_2}\right). \quad (5)$$

3.3.3 Pd: Ablauf und Datengenerierung

Der Ablauf des Hörversuchs mit Hilfe von Pd und dem Tracking-System ist in Kapitel 3.2 grob beschrieben. Hier wird noch einmal kurz auf die Bedienung des Pd-Patches bei der Durchführung des Tests und die Speicherung der Daten eingegangen.

Zu Beginn des Tests wurde die Nummer für die Versuchsperson im Pd-Patch im Block „Einlesen“ in eine *Message* eingetragen und diese gesendet (siehe Abb. 20), sodass die passende, vorher generierte Textdatei (daten1.txt bis daten21.txt) mit Zufallsanordnung der Stimuli und Pegelunterschiede ausgelesen werden konnte. Nun konnte der START TEST Knopf gedrückt werden um den Test zu starten. Zu Beginn war nur der „Next“ Knopf verwendbar, womit die erste Zeile der Textdatei ausgelesen und der erste Stimulus abgespielt wurde. Wurde der „Next“ Knopf gedrückt, konnte anschließend nur der Bestätigungsknopf verwendet werden, womit die momentane, mit dem Zeigegerät angezeigte Phantomschallquellenposition gespeichert wurde. Bei der Bestätigung wurde der aktuell ausgelesene Stimulus, der Pegelunterschied und die angezeigte Position (Winkel) einer Textdatei hinzugefügt. Diese wurde nach der letzten Antwort gespeichert, sodass wir für jede VP eine Textdatei mit den oben erwähnten Daten erhalten (answers1.txt bis answers21.txt).

Um kleinere, ungewollte Bewegungen der Hände der VP und mögliche Ungenauigkeiten der Positionsanzeige durch das Drücken des Bestätigungsknopfes möglichst wenig ins Gewicht fallen zu lassen, wird der Datenstrom des Winkels zuerst tiefpassgefiltert und anschließend ein Wert als Antwort gespeichert, der 100 ms vor dem Bestätigen der Position angezeigt wird. Einen Buffer erledigt die benötigte Zwischenspeicherung.

3.4 geometrischer Aufbau und Hardware

Der Hörversuch wurde am Akustikmessplatz am Institut für Elektronische Musik und Akustik in der Petersgasse 116 in Graz durchgeführt. Es handelte sich um einen reflexionsarmen Raum mit einer Holzkonstruktion als Halterung für poröse Absorber an den Wänden (siehe Abb. 10 (a)). Die Decke und der Boden (mit Gitter ausgelegt) waren ebenfalls mit porösen Absorbern bestückt. In Abbildung 8 ist der geometrische Aufbau inklusive der Abstände zwischen den Lautsprechern und der VP, welche mit einem Lasermessgerät (*Leica Disto D3 laser distance meter*) ausgemessen wurden, dargestellt. Wie bei Stereo üblich, bildete die VP mit beiden Lautsprechern ein gleichseitiges Dreieck (hier mit 2 m Seitenlänge).

Die Sicht der VP in Richtung Lautsprecher ist in Abb. 8 (a) zu sehen. Zwischen den Lautsprechern wurde ein schwarzes Brett mit einer Markierung der Mitte (orangefarbener Streifen) aufgestellt, um nicht von der dahinter liegenden Musterung der Wand beeinflusst zu werden. Außerdem konnte man so leichter die mittige Position des Kopfes beibehalten. Zusätzlich konnte der Laserpointer, welcher im Zeigegerät vorhanden war, zur genaueren Anzeige der von der VP wahrgenommenen Position zwischen den Lautsprechern verwendet werden.

Die Kameras für das Tracking-System wurden wie in Abb. 9 ersichtlich angebracht. Hierbei waren alle Kameras ca. in Deckenhöhe installiert, wobei 4 in den Ecken des Raumes, 4 mittig zwischen den Ecken und eine in der Mitte der Decke über der VP angebracht waren.

Folgende Geräte wurden bei der Durchführung der Tests verwendet:

- M-AUDIO conectiv Interface (D/A Wandler)
- 2 x Genelec 8020 CPM
- Kensington Wireless Presenter
- Plastikpistole mit Reflektorkugeln
- Stehhocker (durchschnittliche Ohrhöhe bei VP ca. 1.45 m)
- OptiTrack Motive:Body Tracking-Software
- 9 x OptiTrack Flex 13 Kamera

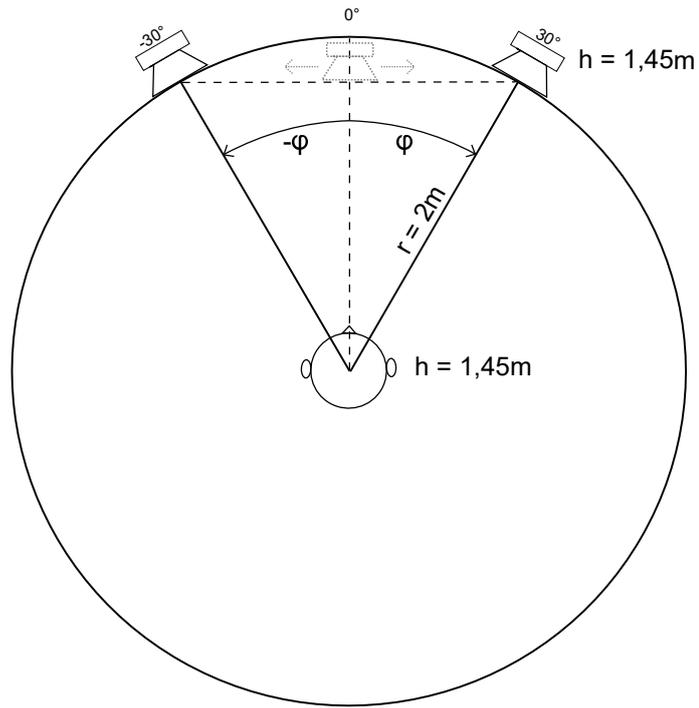


Abbildung 8 – Geometrischer Aufbau (schematisch, Draufsicht) des Hörversuchs.

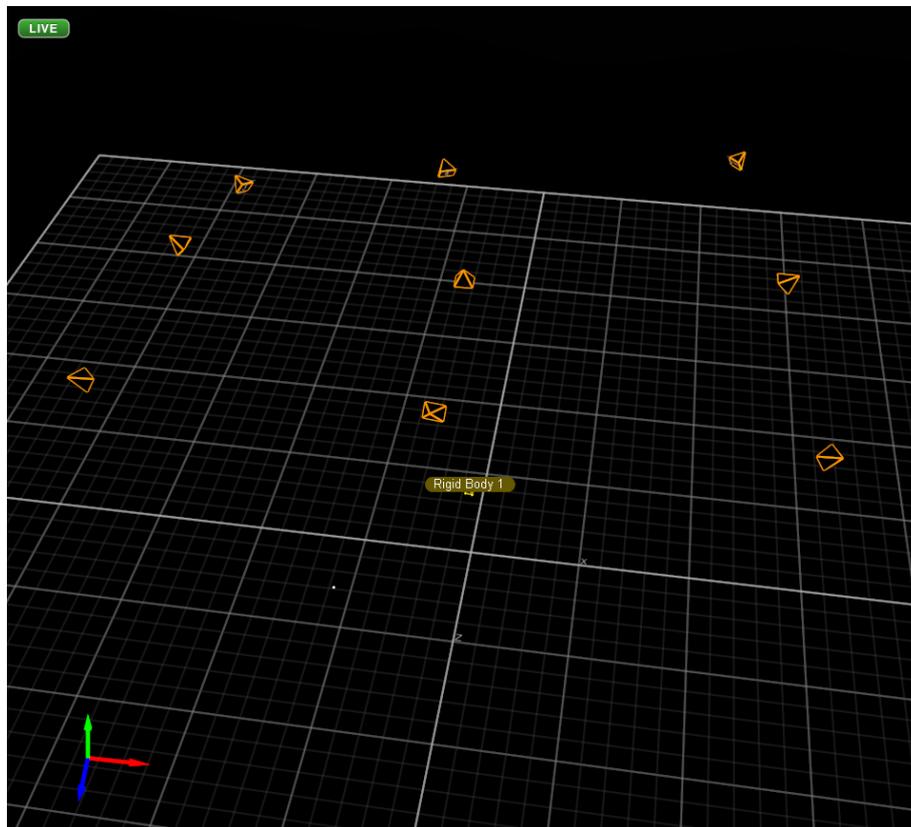


Abbildung 9 – Positionen der Kameras (orange) in MotiveBody.

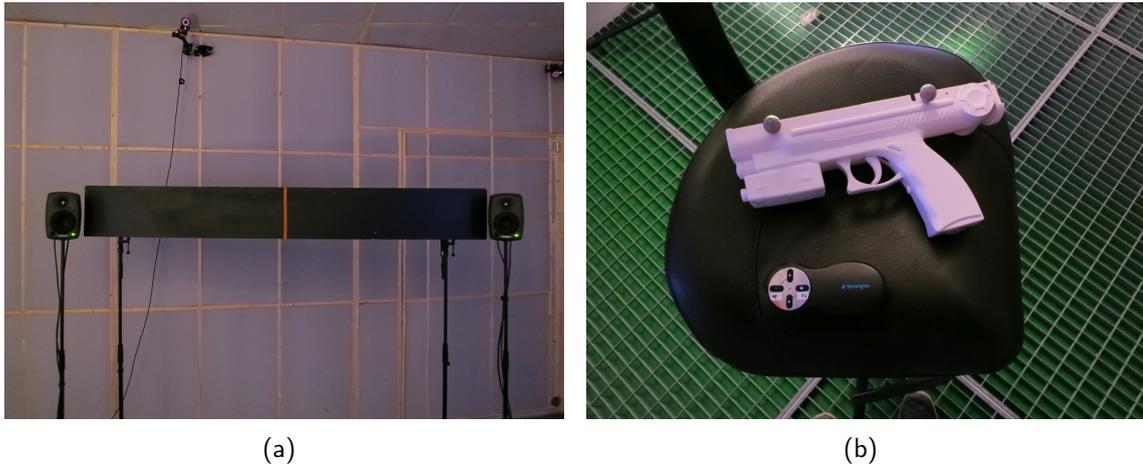


Abbildung 10 – Blickwinkel des Probanden auf die Versuchsanordnung (a) sowie Eingabegeräte für die Versuchsdurchführung (b).

4 Versuchsdurchführung

4.1 Versuchsablauf

An dem Hörversuch nahmen 21 Versuchspersonen (VP) teil (8 weibliche und 13 männliche). Das Durchschnittsalter der VP betrug ca. 25 Jahre. Wir ordneten die VP in zwei Gruppen ein. Erfahrene VP besaßen einen tieferen aufnahmetechnischen und/oder musikpraktischen Hintergrund und bildeten $\frac{2}{3}$ der VP. Unerfahrene VP besaßen keine solche Erfahrungen ($\frac{1}{3}$ der VP). Die Personen setzten sich auf den Hocker und bekamen eine kurze Einführung in die Aufgabe. Die Aufgabenstellung lautete, sich gerade hinzusetzen, den Blick in Richtung der Mitte zwischen den Lautsprechern. Nachdem sie einen kurzen Sinuston hörten, der den Beginn des Versuchs signalisierte, sollten sie mit dem rechten Knopf des Presenters den Stimulus auslösen. Nach dem Anhören sollten sie nun die wahrgenommene Schallquellenposition mit Hilfe des Zeigegerätes anzeigen (dabei konnten sie zur Hilfe die Position am schwarzen Brett mit dem eingebauten Laserpointer anpeilen). Während sie die von ihnen wahrgenommene Richtung der Phantomschallquelle anzeigten, sollten sie dann mit Hilfe des oberen Knopfes des Presenters diese bestätigen, sodass sie gespeichert werden konnte. Dabei konnte abwechselnd entweder der nächste Stimulus ausgewählt oder die Position bestätigt werden, sodass keine doppelten Eingaben, aber auch keine Wiederholungen des Stimuli möglich waren. Die Versuchspersonen wurden darauf hingewiesen, dass sie den ersten Eindruck der Richtung anzeigen sollten, da keine Wiederholung möglich war. Zu Beginn jedes Versuchs wurde diese Prozedur erklärt und es wurden ein paar Versuchsdurchgänge mit ca. 5-10 Stimuli für das Verständnis durchgeführt. Die Dauer des Versuchs war aufgrund der oben beschriebenen Kontrolle der VP durch den Presenter bei jeder Person unterschiedlich und lag etwa zwischen 20 und 30 min. Der Versuch fand im Zeitraum vom 15. bis 18. Dezember 2015 statt.

5 Auswertung

Die Auswertung der im Hörversuch erhobenen Daten erfolgt in MATLAB. Abbildung 11 zeigt den Aufbau des MATLAB-Scripts schematisch.

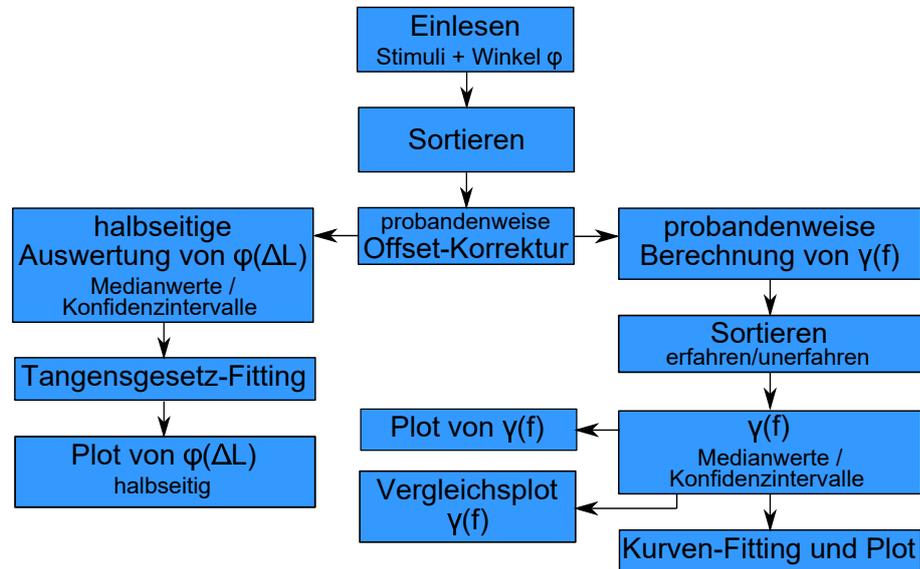


Abbildung 11 – MATLAB-Script schematisch.

Zunächst werden die 21 Textdateien, welche die zufällige Stimulireihenfolge und die dazugehörigen Winkelangaben der VP enthalten, eingelesen. Es ergeben sich somit insgesamt $21 \cdot 200 = 4200$ Datenpunkte. Im nächsten Schritt werden die Daten aufsteigend nach den Pegelunterschieden, -12 dB bis $+12$ dB, sowie nach den Signaltypen sortiert. Um eventuelle Empfindlichkeitsunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr der VP auszugleichen wird eine probandenweise Offset-Korrektur durchgeführt. Die Auswertung der Daten konzentriert sich nun auf die Darstellung der angegebenen Winkel der Phantomschallquelle φ in Abhängigkeit der Pegelunterschiede ΔL und die Berechnung der Steigung γ (vgl. Gleichung 1) in Abhängigkeit der Frequenz f .

Bei der Darstellung von $\varphi(\Delta L)$ wird zunächst die Symmetrie der Stereoanordnung des Hörversuchs ausgenutzt. Die Winkelangaben von betragsmäßig gleichen Pegelunterschieden werden für die Berechnung zusammengefasst. Es ergeben sich somit 4 Winkelangaben je Pegelunterschied (0 dB bis 12 dB), Person (21) und Signaltyp (10). Die Medianwerte $\tilde{\varphi}(\Delta L)$ und deren zugehörige 95% Konfidenzintervalle werden je Signaltyp berechnet. Anschließend werden die Parameter γ und W der Gleichung 1 mittels einer gewichteten Fehlerquadratminimierung der Medianwerte $\tilde{\varphi}(\Delta L)$ je Signaltyp ermittelt. Abbildung 12 zeigt den verwendeten MATLAB-Code. Dieser stellt sicher, dass die Medianwerte $\tilde{\varphi}(\Delta L)$ für größere Pegelunterschiede ΔL bei der Fehlerquadratminimierung weniger stark gewichtet werden. Der Parameter γ beschreibt den Anstieg der Panning-Kurve in der Nähe der Mittenposition des Stereobildes und wird vornehmlich durch die $\tilde{\varphi}(\Delta L)$ bei kleinen ΔL beeinflusst. Die halbseitigen Panning-Kurven und deren Parameter γ und W sowie die Medianwerte $\tilde{\varphi}(\Delta L)$ und deren Konfidenzintervalle werden je

Signaltyp gezeichnet (Abb. 13, 14 und 15).

Der rechte Pfad der Abbildung 11 zeigt, dass γ zunächst pro Person für die Terzbandrauschen von 125 Hz bis 8 kHz berechnet wird. Um Aussagen über die Qualität der Angaben der VP treffen zu können, werden die Daten dieser gemäß ihrer Hörerfahrung sortiert. Die Berechnung von $\tilde{\gamma}(f)$ und deren zugehörige 95% Konfidenzintervalle werden für die Gruppe der erfahrenen und unerfahrenen VP sowie für alle VP durchgeführt und geplottet (siehe Abb. 17 und 18). Des Weiteren werden die ermittelten $\tilde{\gamma}(f)$ aller VP mit den Ergebnissen von K. Wendt (Tab. 1 und 2) und H. Mertens (Tab. 3) verglichen (siehe Abb. 16). Zuletzt werden die Parameter p_1 , p_2 , p_3 und p_4 der Gleichung 6 mittels des Ansatzes des kleinsten quadratischen Fehlers aus den Medianwerten $\tilde{\gamma}(f)$ bestimmt und gezeichnet (siehe Abb. 19).

```
function [gamma,W]=get_panning_curve_params2(alpha,phi,L)

idx=(abs(phi(:))<90*pi/180);
phi=phi(idx);
L=L(idx);

R=tan(phi(:))/tan(alpha);
idx=(abs(R)<.96);
L=L(idx);
R=R(idx);
AR=atanh(R)*40/log(10);
M=[L(:) ones(length(L(:)),1)];
w=1./(1+abs(AR));
gammad=(M'*diag(w)*M)^-1 * M'*diag(w)*AR;
gamma=gammad(1);
W=-gammad(2)/gamma(1);
```

Abbildung 12 – MATLAB-Code zur Ermittlung der Parameter γ und W aus Gleichung 1.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel der Seminararbeit werden die ermittelten Panning-Kurven vorgestellt und diskutiert. Weiterhin wird der durch die Hörversuche ermittelte Anstieg γ aus dem Tangensgesetz (siehe Gleichung 1) in Abhängigkeit der Frequenz f dargestellt und mit den ermittelten Anstiegen von K. Wendt und H. Mertens (Abschnitt 2) verglichen. Außerdem wird eine Parametrierung für eine mögliche Funktion von $\gamma(f)$ vorgeschlagen.

6.1 Panning-Kurven

Abbildung 13 und 14 zeigen die halbseitigen Panning-Kurven für die Terzbandrauschen mit den Mittenfrequenzen f_m von 125 Hz bis 8 kHz. Es ist festzustellen, dass im Bereich von 125 Hz bis 1 kHz die ermittelten Panning-Kurven einen nahezu gleichbleibenden Anstieg besitzen.

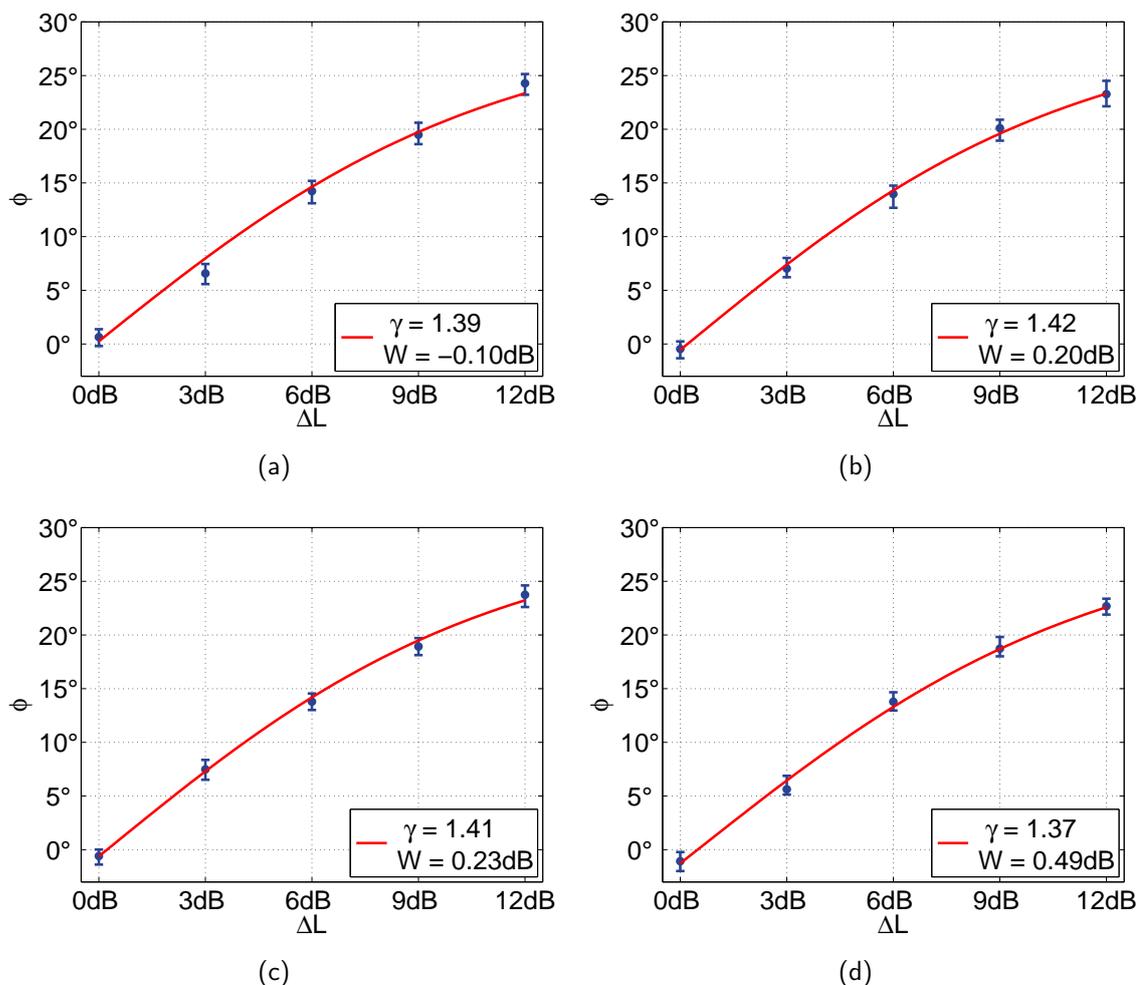


Abbildung 13 – Halbseitige Amplituden-Panning-Kurven für Terzbandrauschen bei 125 Hz (a), 250 Hz (b), 500 Hz (c) und 1 kHz (d).

Ein Minimum des Anstiegs, $\gamma = 1.37$, wird bei $f_M = 1$ kHz erreicht. Bei dem Terzbandrauschen um 2 kHz ist ein zunächst eine leichte Zunahme des Anstiegs und ab 4 kHz eine ausgeprägte Zunahme des Anstiegs feststellbar. Die maximale Steilheit der Panning-Kurve wird mit $\gamma = 2.10$ bei dem Terzbandrauschen um 8 kHz erreicht. Für alle ermittelten Panning-Kurven ergibt sich ein leichter Versatz W des Stereobildes. Dieser ist betragsmäßig bei dem Terzbandrauschen mit $f_m = 1$ kHz am größten ($|W_{max}| = 0.49$ dB).

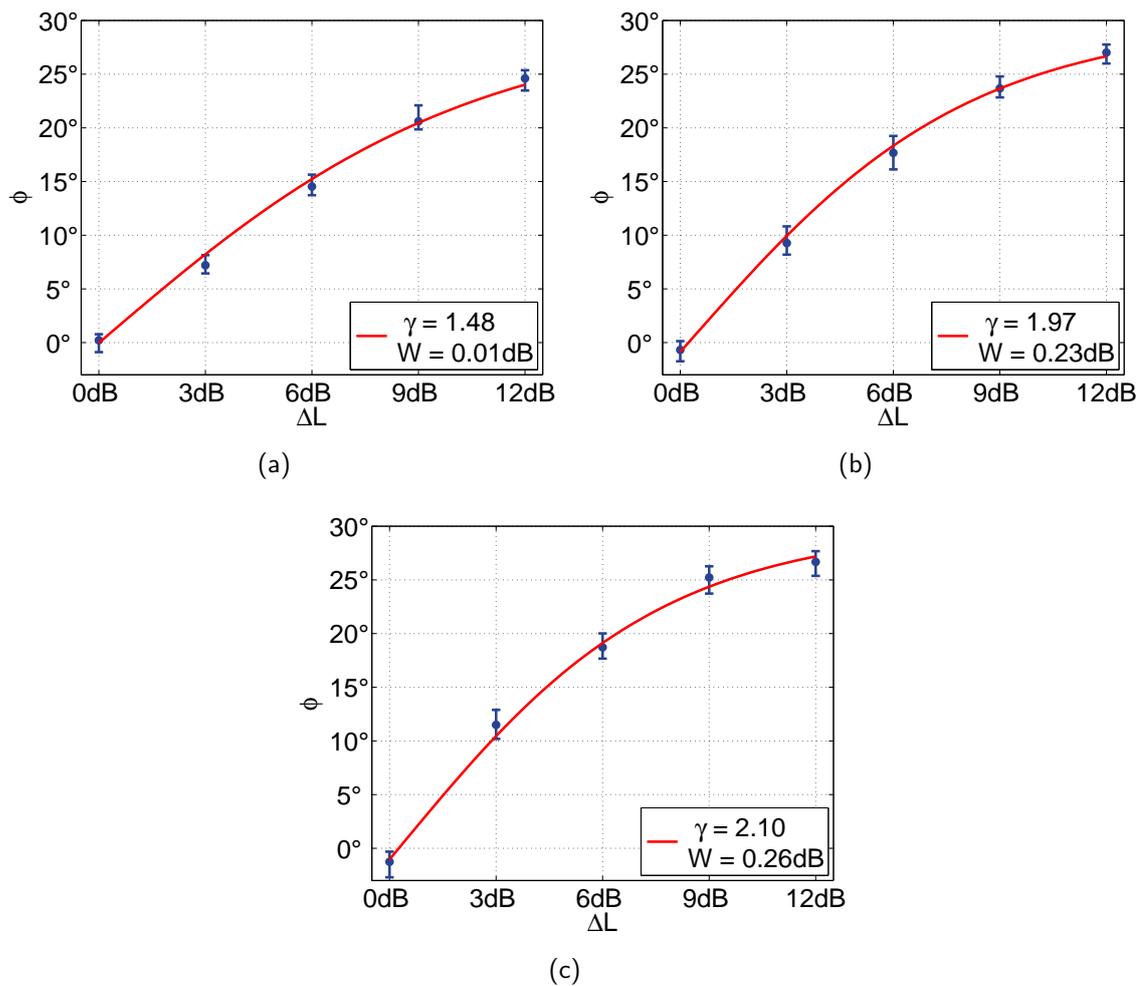
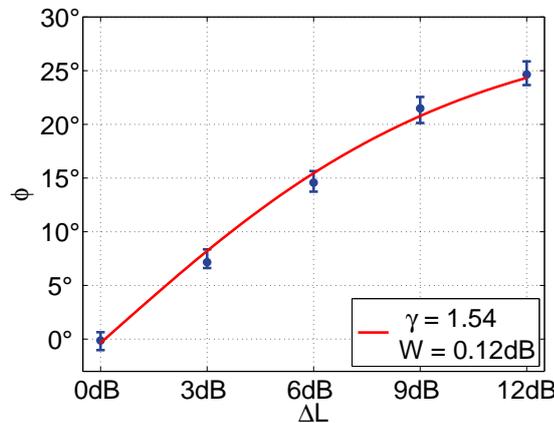


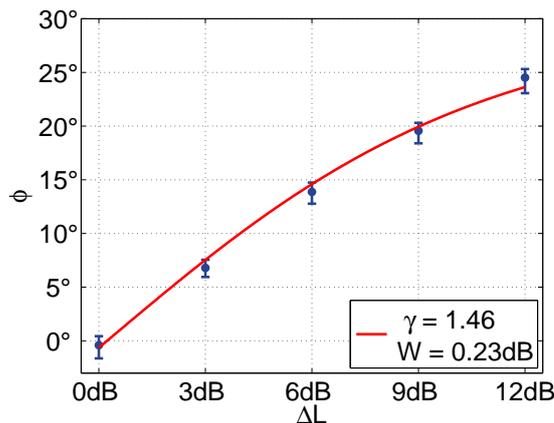
Abbildung 14 – Halbseitige Amplituden-Panning-Kurven für Terzbandrauschen bei 2 kHz (a), 4 kHz (b) und 8 kHz (c).

Abbildung 15 zeigt die Panning-Kurven für das breitbandige rosa Rauschen sowie für das bei tiefpass- und hochpassgefilterte rosa Rauschen. Die Anstiege der Panning-Kurven verhalten sich wie ähnlich zu den Anstiegen der Kurven des Terzbandrauschen. Das rosa Rauschen, welches den Tiefpass durchläuft und somit hauptsächlich Frequenzen unterhalb 1 kHz enthält, besitzt den geringsten Anstieg ($\gamma = 1.46$). Allerdings ist dieser leicht höher als die Anstiege für die Terzbandrauschen mit f_M von 125 Hz bis 1 kHz. Das hochpassgefilterte rosa Rauschen erzeugt den stärksten Anstieg dieser drei Signale ($\gamma = 1.77$), erreicht jedoch nicht die Steilheit der Anstiege der Terzbandrauschen mit

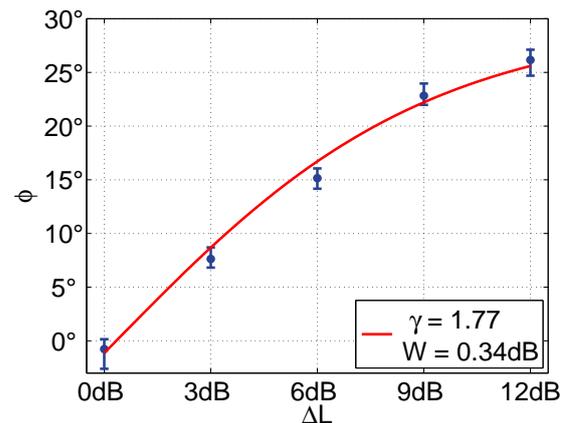
$f_M = 4$ kHz bzw. 8 kHz. Die Panningkurve des breitbandigen rosa Rauschens ordnet sich in ihrem Anstieg genau zwischen tiefpass- und hochpassgefilterten rosa Rauschen ein ($\gamma = 1.54$). Ihr Anstieg entspricht ungefähr dem Anstieg des Terzbandrauschens um $f_M = 2$ kHz. Wieder ergibt sich ein geringer Versatz W der Panning-Kurven.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 15 – Halbseitige Amplituden-Panning-Kurven für rosa Rauschen (a), tiefpassgefiltertes rosa Rauschen (b) und hochpassgefiltertes rosa Rauschen (c).

Die Ergebnisse für die ermittelten Panning-Kurven bestätigen somit die Untersuchungen von D. M. Leakey, K. Wendt und H. Mertens [Lea59, Wen63, Wen60, Mer65]. Die Steigung γ der Amplituden-Panning-Kurven nimmt mit steigender Frequenz f zu. Das bedeutet, dass bei gleichem Pegelunterschied ΔL zwischen den Lautsprechern der Stereoanordnung höherfrequente Terzbandrauschen von den Versuchspersonen stärker lateralisiert wahrgenommen werden. Die Qualität des Anstiegs von γ soll im nächsten Abschnitt näher untersucht werden.

6.2 Anstieg γ

Abbildung 16 zeigt den Verlauf des Anstiegs γ in Abhängigkeit der Frequenz f (dunkelblau). Dieser wurde durch die Auswertung der Winkelangaben aller VP zu den präsentierten Terzbandrauschen von 125 Hz bis 8 kHz ermittelt. Bei näherer Betrachtung des Verlaufs ist festzustellen, dass dieser sich in drei Bereiche gliedert. Im Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 kHz verhält sich der Anstieg relativ konstant ($\gamma \approx 1.4$). Es folgt ein Übergangsbereich, 1 kHz bis 4 kHz, in dem der Anstieg zunimmt um dann im Bereich von 4 kHz bis 8 kHz wieder einen konstanten Wert anzunehmen ($\gamma \approx 2.1$). Weiterhin sind zum Vergleich die γ -Verläufe der von K. Wendt und H. Mertens erstellten Amplituden-Panning-Kurven aufgetragen (magenta, rot, cyan, vgl. Tabelle 1, 2 und 3). Die beiden Verläufe von K. Wendt (magenta, rot) verhalten sich ähnlich zu unseren Ergebnissen. Es ergeben sich drei Frequenzbereiche für den Anstieg γ ($f \leq 1$ kHz, 1 kHz $\leq f \leq 3$ kHz und $f \geq 3$ kHz). Betrachtet man die Ergebnisse von H. Mertens (cyan), sind diese ausgezeichneten Frequenzbereiche nicht ersichtlich. Alle drei γ -Verläufe bewegen sich im Frequenzbereich unterhalb von 1 kHz in einem ähnlichen Bereich wie der von uns ermittelte γ -Verlauf. Jedoch ist in allen drei Kurven kein konstanter Verlauf von γ ersichtlich. Interessant ist, dass alle γ -Verläufe bei einer Frequenz von $f = 300$ Hz ein $\gamma \approx 1.4$ erreichen. Im Bereich von 1 kHz $\leq f \leq 3$ kHz nimmt der Anstieg der Panning-Kurven von Wendt stärker zu als der unserer ermittelten Kurven. So erreicht der Verlauf „Wendt 1960“ ein $\gamma = 2.5$ und „Wendt 1963“ sogar ein $\gamma \approx 2.9$ bei $f \approx 3$ kHz. Danach steigt der „Wendt 1963“-Verlauf weiter an während der „Wendt 1960“-Verlauf, ähnlich zu unseren Daten, konstant bleibt.

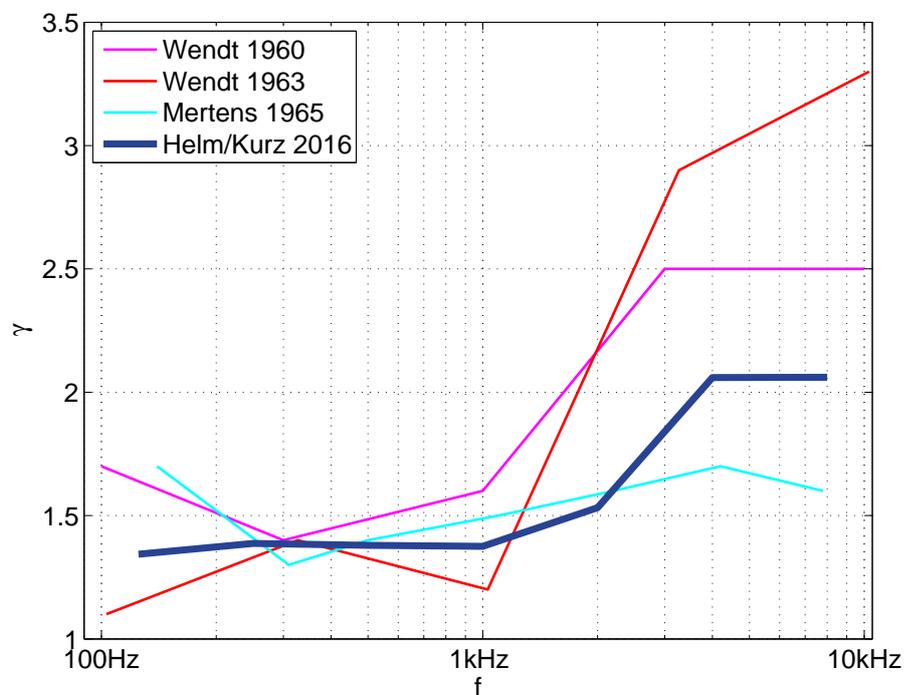


Abbildung 16 – Vergleich der Anstiege γ .

Bei den γ -Werten der von Mertens ermittelten Panning-Kurven erfolgt eine wesentlich geringere Zunahme von γ im Frequenzbereich von $300 \text{ Hz} \leq f \leq 3 \text{ kHz}$. Es wird nur ein Maximum von $\gamma = 1.7$ erreicht. Oberhalb von 3 kHz nimmt γ geringfügig ab.

Um eine Aussage über die Qualität der gewonnenen Daten des Anstiegs γ in Abhängigkeit der Frequenz treffen zu können, werden zu den Medianwerten $\tilde{\gamma}$ die Konfidenzintervalle bestimmt (Abb. 17, rot). Es ist leicht ersichtlich, dass sich die ermittelten Anstiege γ für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz und 1 kHz signifikant von den Anstiegen γ für die Frequenzen 4 kHz und 8 kHz unterscheiden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Konfidenzintervalle von γ für 4 kHz und 8 kHz größer sind als jene für tiefere Mittenfrequenzen. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Phantomschallquellposition nimmt mit der Frequenz zu.

Weiterhin werden die Daten der unerfahrenen und erfahrenen VP getrennt ausgewertet (Abb. 18 (a) und (b)). Der ermittelte Verlauf für den Anstieg γ aus den Daten der 14 erfahrenen VP ähnelt sehr stark dem aus den Daten aller VP. Die ermittelten Konfidenzintervalle sind leicht größer, da weniger Datenpunkte vorhanden sind. Der Anstieg γ für 8 kHz unterscheidet sich, wie in Abb. 17, signifikant von den Anstiegen für Mittenfrequenzen $f_M \leq 1 \text{ kHz}$. Der Anstieg für 4 kHz hingegen ist nur signifikant größer als die Anstiege für 500 Hz und 1 kHz. Aus den Daten der 7 unerfahrenen VP sich ein γ -Verlauf der dem Verlauf aus Abb. 17 nur mäßig ähnelt. Ab einer Frequenz von 1 kHz ist zwar ein leichte Zunahme von γ zu erkennen, allerdings wird maximal nur ein $\gamma \approx 1.7$ erreicht. Die Konfidenzintervalle sind mäßig vergrößert und im Mittel eher zu größeren γ -Werten hin ausgedehnt. Es lässt sich vermuten, dass die unerfahrenen VP die Phantomschallquelle in oberen Frequenzbereich weniger stark lateralisierten.

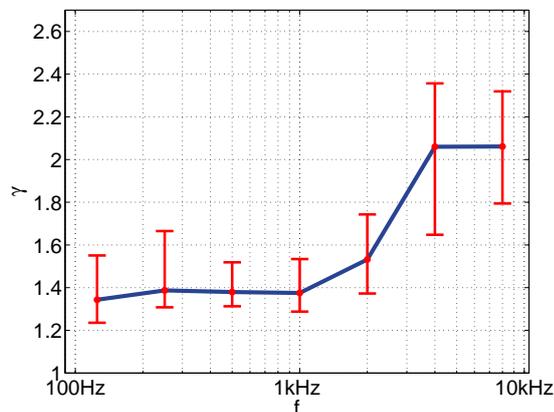


Abbildung 17 – Anstieg γ und zugehörige 95%-Konfidenzintervalle (rot) in Abhängigkeit der Frequenz f für alle VP.

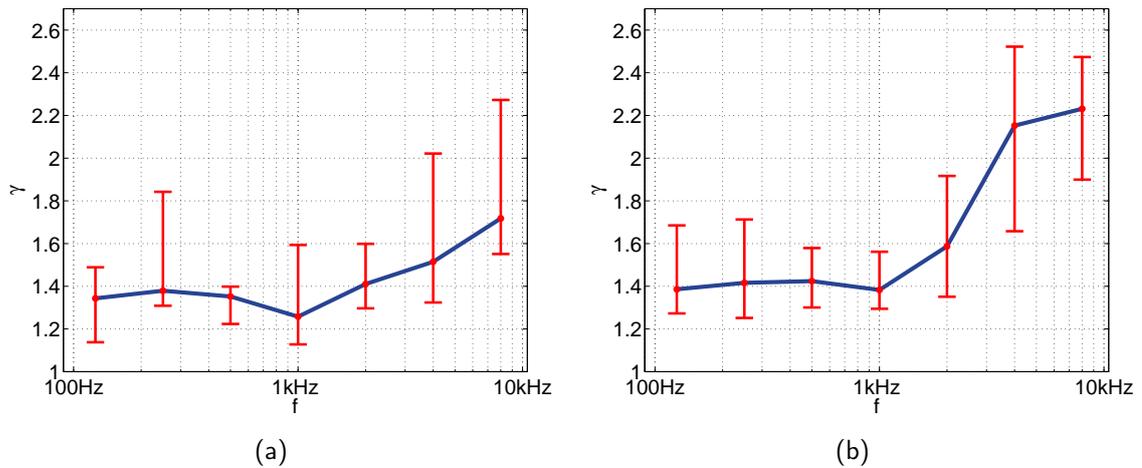


Abbildung 18 – Anstieg γ und zugehörige 95%-Konfidenzintervalle (rot) in Abhängigkeit der Frequenz f für unerfahrene (a) und erfahrene (b) VP.

6.3 Funktion für den Anstieg $\gamma(f)$

Es ergaben sich für unseren bestimmten γ -Verlauf 3 Frequenzbereiche: $\gamma \approx 1.4$ für $f \leq 1$ kHz, ansteigendes γ für $1 \text{ kHz} \leq f \leq 4$ kHz und $\gamma \approx 2.1$ für $f \geq 4$ kHz. Anhand dieses γ -Verlaufs erwies es sich als vorteilhaft einen tanh-Ansatz für eine mögliche Funktion von $\gamma(f)$ zu verwenden (siehe Gl. 6).

$$\gamma(f) = p_1 \cdot \tanh\left(\frac{f}{p_2} - p_3\right) + p_4 \tag{6}$$

Die zu bestimmenden Parameter haben folgenden Einfluss auf die tanh-Funktion:

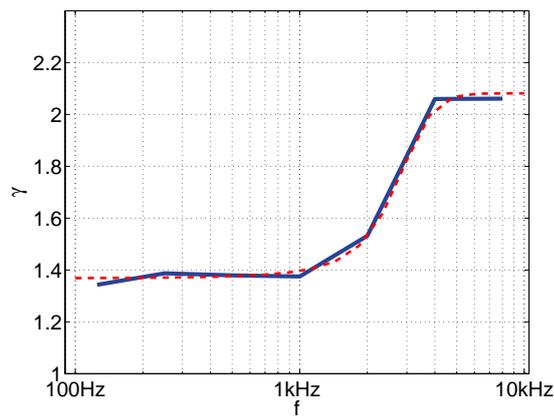
- p_1 ... vertikale Stauchung ($p_1 < 1$) bzw. Streckung ($p_1 > 1$) der tanh-Funktion
- p_2 ... Frequenz für den Beginn des Anstiegs der tanh-Funktion in Hz
- p_3 ... Steilheit des Anstiegs der tanh-Funktion
- p_4 ... vertikaler Offset der tanh-Funktion

Beim Einpassen der möglichen $\gamma(f)$ -Funktion auf die Daten aller, der un- und erfahrenen VP (Abb. 17 und 18) ergab sich folgende Parametrierung (Tab. 6).

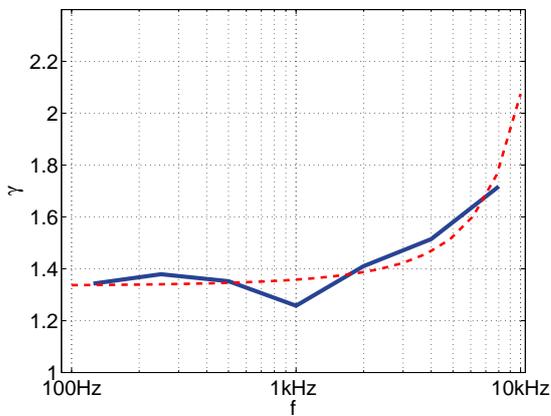
Versuchspersonen	p_1	p_2 in Hz	p_3	p_4
alle	0.355	1112	2.463	1.722
unerfahren	52.929	9318	3.478	54.165
erfahren	0.396	1203	2.222	1.780

Tabelle 6 – Parameter der eingepassten tanh-Funktionen

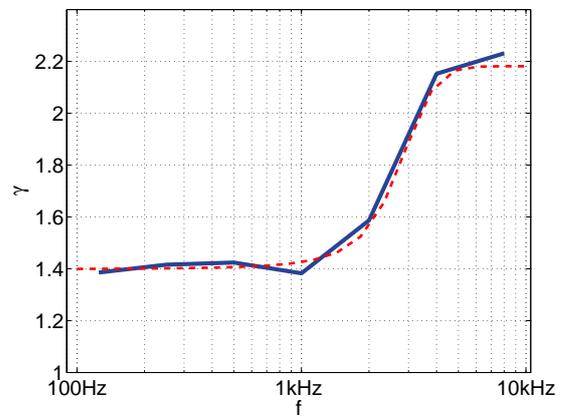
Abbildung 19 zeigt die eingepassten $\gamma(f)$ -Funktionen (rot gestrichelt) für die γ -Verläufe aller, der un- und erfahrenen VP (blau). Diese wurden mittels Gl. 6 und den jeweilig zugehörigen Parametern aus Tab. 6 geplottet. Es ist zu erkennen, dass die gewählte \tanh -Funktion die γ -Verläufe der erfahrenen und aller VP sehr gut beschreiben kann. Der γ -Verlauf der unerfahrenen VP kann mit dieser Funktion allerdings nur sehr schlecht beschrieben werden. Das ist auch an den stark abweichenden Parametern (Tab. 6) zu erkennen.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 19 – γ -Verläufe (blau) und mögliche Funktionen für $\gamma(f)$ (rot gestrichelt). Alle (a), unerfahrene (b) und erfahrene (c) VP.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Frequenzabhängigkeit der Panning-Kurven bei Intensitätsstereophonie analysiert. Es sollte herausgefunden werden ob die Ergebnisse früherer Forschungen bestätigt werden können.

Hierfür wurden zunächst die bestehenden Arbeiten von D.M. Leakey, K. Wendt und H. Mertens beschrieben und deren wichtigste Ergebnisse zusammengefasst (siehe Kap. 2). Bei diesen Untersuchungen wurden uneinheitliche Hörversuche durchgeführt, die uneinheitliche Ergebnisse lieferten. Es variierten verschiedenste Versuchsparameter, wie z.B. Art der Stimuli, geometrischer Aufbau oder Art der Phantomschallquellpositionsangabe. Alle Untersuchungen konnten eine Zunahme des Anstiegs der Amplituden-Panning-Kurven mit steigender Frequenz feststellen, wenn auch in verschiedener Qualität. Weiterhin konnte in einigen Untersuchungen [Wen60, Wen63] bei hohen Frequenzen eine größere Unsicherheit bei der Bestimmung der Position der Phantomschallquelle im Stereopanorama festgestellt werden.

Zur Überprüfung bestehender Forschungsergebnisse mittels moderner Versuchsapparatur, entwickelten wir einen eigenen Hörversuch. Hierfür bauten wir ein Stereodreieck mit einer Kantenlänge von 2 m als Abhöre im reflexionsarmen Raum des IEM auf. Als Stimuli wurden rosa Terzbandrauschen mit Mittenfrequenzen in Oktavabständen von 125 Hz bis 8 kHz, breitbandiges rosa Rauschen sowie hoch- und tiefpassgefiltertes rosa Rauschen verwendet. Ein Stimulus bestand aus drei kurzen Wiederholung des jeweiligen Rauschens. Jeder Stimulus wurde den Probanden in 9 verschiedenen Pegeldifferenzen (-12 dB bis $+12$ dB in 3 db-Schritten) mit je zwei Wiederholungen präsentiert. Die Pegeldifferenz $\Delta L = 0$ dB wurde aus Gründen der Datenauswertung vier mal wiederholt. Es ergab sich so eine Abfolge von 200 Stimuli, die bei einer Versuchslautstärke von 60 dB(A) in individuell generierter Zufallsreihenfolge präsentiert wurden. Es nahmen 21 Probanden an dem Hörversuch teil. Nach jedem Stimulus musste die gehörte Phantomschallquellposition mit Hilfe eines Zeigeegerätes angezeigt werden. Mittels eines Infrarot-Tracking-Systems und entsprechender Signalverarbeitung wurde der angezeigte Winkel der Phantomschallquelle abgespeichert.

Durch die anschließende statistische Auswertung (siehe Kap. 5) der 4200 Datenpunkte konnten die halbseitigen Amplituden-Panning-Kurven ermittelt werden. Weiterhin wurden die Daten zur Bestimmung des Anstiegs γ aus dem Tangensgesetz (Gl. 1) verwendet. Wir konnten eine Zunahme von γ mit der Frequenz feststellen. Der ermittelte γ -Verlauf ähnelte eher den Ergebnissen von K. Wendt (siehe Abb. 16), wenn auch die Zunahme von γ nicht so stark war. Es konnte eine Vergrößerung der 95%-Konfidenzintervalle für γ bei hohen Frequenzen beobachtet werden. Somit kann die größere Unsicherheit bei der Bestimmung der Position der Phantomschallquelle bei hohen Frequenzen bestätigt werden. Es stellte sich ein signifikanter Unterschied von γ für die Terzbandrauschen bei 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz und 1 kHz gegenüber der Terzbandrauschen bei 4 kHz und 8 kHz heraus. Diese zwei ausgezeichneten Frequenzbereiche für γ zusammen mit dem dazwischen liegenden Übergangsbereich des Anstiegs lassen auf einen \tanh -Zusammenhang

für die Funktion $\gamma(f)$ schließen. Gleichung 7 zeigt eine mögliche Funktion für $\gamma(f)$

$$\gamma(f) = 0.355 \cdot \tanh\left(\frac{f}{1112\text{Hz}} - 2.463\right) + 1.722. \quad (7)$$

A Pd-Patch

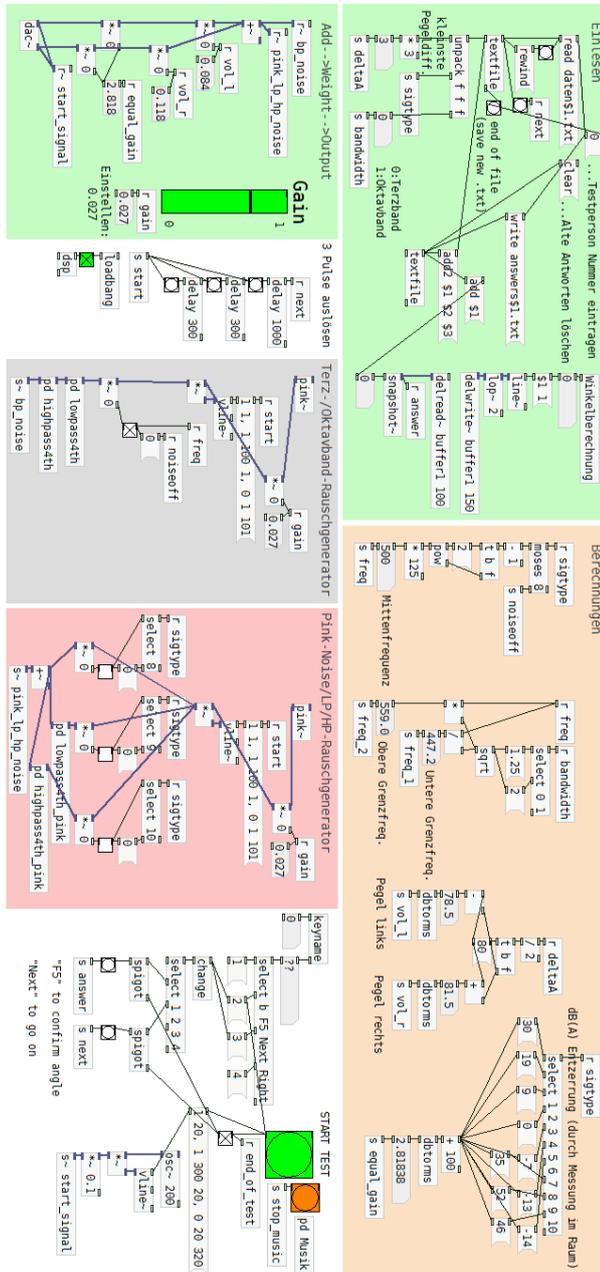


Abbildung 20 – Pd-Patch

Literatur

- [CDV58] H. Clark, G. Dutton, and P. Vanderlyn, "The 'stereosonic' recording and reproduction system," Journal of the Audio Engineering Society, vol. 6, no. 2, pp. 102 – 117, 1958.
- [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. [Online]. Available: <http://link.aip.org/link/?JAS/31/977/1>
- [Mer65] H. Mertens, "Directional hearing in stereophony," E.B.U. Review - Part A Technical, no. 92, pp. 147 – 158, 1965.
- [Wen60] K. Wendt, "Versuche zur Ortung von Intensitäts-Stereophonie," FREQUENZ, no. 01, pp. 11 – 14, 1960.
- [Wen63] —, "Das Richtungshören bei der 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 ICSA, 2015.