

Wie nützlich sind Laufzeiten bei der Klangverräumlichung mit dem Ikosaeder-Lautsprecher?

Seminararbeit aus Algorithmen für Akustik und Computermusik 2, SE

Linke Julian
Zagala Franck

Betreuung: Dr. Frank Matthias, Dr. Zotter Franz

Graz, 27. August 2016



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Mit einem Ikosaederlautsprecher ist es möglich, durch Schallbündelung hin zu reflektierenden Flächen Phantomschallquellen in Richtung diskreter Reflexionspfade zu erzeugen. Um sich von diesen diskreten Positionen zu lösen, wird hier eine Superposition von zwei Quellen mit Keulencharakteristik umgesetzt. Dabei wird der Einfluss von Laufzeitunterschieden untersucht. Um festzustellen, ob die Lokalisation dadurch beeinflusst werden kann, wird ein Hörversuch entworfen und vorgestellt. Dabei wird in einem reflexionsarmen Raum durch eine Lautsprecheranordnung mit Reflexionen bis zur 2. Ordnung ein virtueller Raum simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass es mit geeigneten Laufzeitunterschieden möglich ist, Phantomschallquellen stabiler in der Richtung zu verschieben. Dieser Effekt könnte in zukünftigen Kompositionen genutzt werden, um Phantomschallquellen kontrollierter durch den Ikosaederlautsprecher erzeugen zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Ikosaederlautsprecher	5
2.1	Lautsprecheranordnung	5
2.2	Richtcharakteristik	5
3	Experiment	7
3.1	Der simulierte Raum	7
3.2	Stimulus	7
3.3	Trackingsystem	8
3.4	Vorbereitung und Kalibrierung	9
3.5	Beschreibung des Hörversuchs und der der abgefragten Bedingungen . .	10
4	Ergebnisse des psychoakustischen Versuchs	12
4.1	Zuverlässigkeit der einzelnen Versuchspersonen	12
4.2	Bündelungsrichtung: 90°	12
4.3	Bündelungsrichtung: -117°	13
5	Schlussfolgerung	15

1 Einleitung

Bei der Betrachtung der Geometrie von Räumen lassen sich Aussagen über die Schallausbreitung treffen. Hierbei spielen der Direktschall und die Reflexionen, die alle ihre eigenen Parameter aufweisen (Lautstärke, Abstrahlwinkel, Einfallswinkel, Verzögerung und spektrale Eigenschaften), eine entscheidende Rolle. Die Parameter werden durch Raumeigenschaften wie zum Beispiel die Raumgeometrie, die Beschaffenheit bestimmter Materialien sowie die Position des Zuhörers, die Position der Schallquelle und die hervorgerufene Richtwirkung beeinflusst. Eine kompakte Kugel-Lautsprecheranordnung kann beispielsweise durch die Erzeugung stark fokussierter Schallstrahlen die räumliche Verteilung eines auditorischen Objektes verändern [ZFFR14]. Bei einfach direktionalen Quellen ist diese Steuerung nur in bestimmten Konstellationen stark ausgeprägt [ZF15]. In solchen räumlichen Situationen können gewisse wahrgenommene Einfallswinkel treffsicher erzeugt werden (siehe Abbildung 1 S.4).

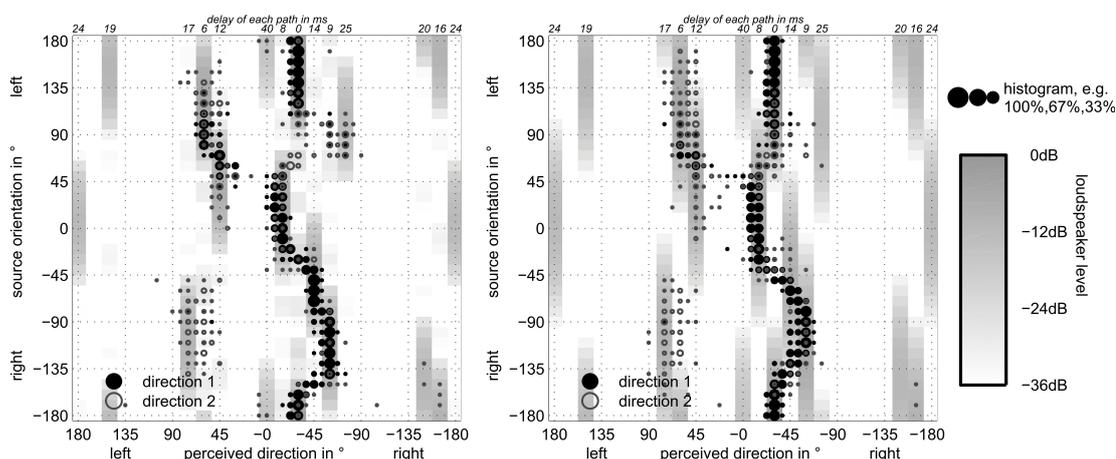


Abbildung 1 – diskret wahrgenommene Einfallswinkel im [ZF15]

Die Motivation dieser Arbeit liegt darin, herauszufinden, ob die Phantomschallquellen zwischen den "diskreten" Richtungen verbessert werden können. Hierzu wird eine Superposition von zwei Paaren solcher Richtstrahlen mit variiertem Verzögerung und Verstärkung vorgenommen. Mit Q_1 bezeichnen wir den Richtstrahl auf die linke bzw. rechte Seitenwand, während die Quelle Q_2 immer direkt auf den Zuhörer gerichtet war.

Bei der Durchführung dieser Seminararbeit wurde ein psychoakustischer Hörversuch organisiert, in welchem den Probanden lediglich die Aufgabe zugeteilt wurde, die wahrgenommene Lokalisation einer Schallquelle über ein Tracking-System anzugeben. Mit der Auswertung der Resultate versuchen wir, eine Aussage über die Beeinflussung der Lokalisation treffen zu können.

2 Ikosaederlautsprecher

2.1 Lautsprecheranordnung

Der Ikosaederlautsprecher (siehe Abb. 2 S.5) ist eine kompakte Kugel-Lautsprecheranordnung dritter Ordnung ($N = 3$) mit zwanzig unabhängigen Wandlern. Diese ermöglicht es, bestimmte Richtcharakteristiken zu erzeugen. Dadurch lassen sich beispielsweise Musikinstrumente simulieren. Außerdem kann bei raumakustischen Messungen die steuerbare Richtwirkung dazu genutzt werden, die RIR¹ von gerichteten Quellen zu erhalten.



Abbildung 2 – Ikosaederlautsprecher des Instituts für elektronische Musik und Akustik Graz (IEM), © Martin Rumori

2.2 Richtcharakteristik

Jede rotationssymmetrische Richtcharakteristik lässt sich als Linearkombination mehrerer gewichteter Legendre-Polynome beschreiben,

$$g_S(\phi) = \sum_{n=0}^N (2N + 1) a_n P_n(\cos(\phi)).$$

Die für uns interessante Richtcharakteristik besitzt einen maximalen Schwerpunkt, welcher den größten Teil der Energie nach vorne strahlt. Um die benötigten Koeffizienten zu berechnen, lässt sich der Schwerpunkt des quadrierten Richtmusters maximieren [Zot15]:

1. Room Impuls Response

$$\max_{a_n} \frac{\int_{-1}^1 \mu \cdot g(\mu)^2 d\mu}{\int_{-1}^1 g(\mu)^2 d\mu} \quad \left| \mu = \cos(\theta) \right.$$

Nach der Maximierung von r_E lässt sich eine Approximation der einzelnen Gewichte \hat{a}_n angeben:

$$\hat{a}_n^{\max r_E} \approx P_n \left[\cos \left(\frac{137,9^\circ}{N+1,51} \right) \right].$$

Diese Koeffizienten werden normalisiert:

$$a_n = \frac{\hat{a}_n}{\sum_{n=0}^N (2N+1)\hat{a}_n},$$

und die daraus resultierenden Richtcharakteristiken lassen sich in Abb.3 S.6 für die Ordnungen $n = \{0, 1, 2, 3\}$ ablesen.

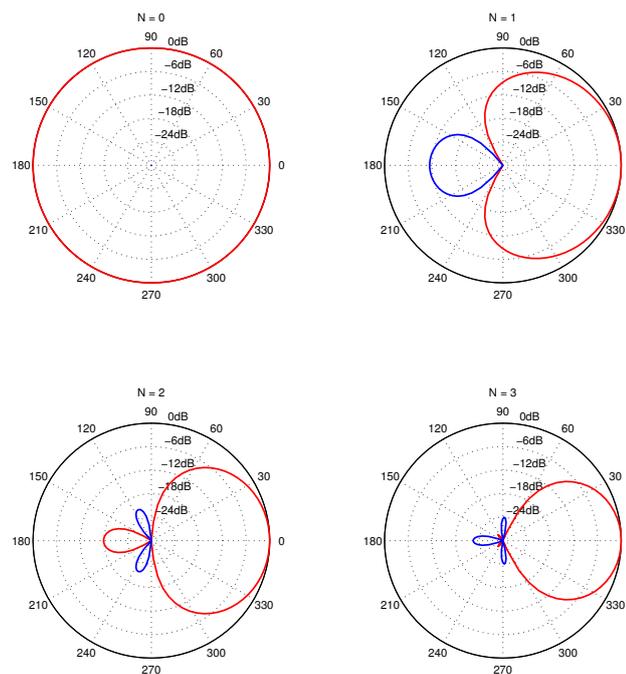


Abbildung 3 – Richtcharakteristik für den maximalen Schwerpunkt $\max r_E$ von 0 bis -30dB

3 Experiment

Zur besseren Reproduzierbarkeit des Experiments wurde der Raum "virtuell" mittels einer kreisförmigen Lautsprecheranordnung im reflexionsarmen Raum des IEM Graz erzeugt.

3.1 Der simulierte Raum

Die Positionen für die Schallquelle und den Zuhörer sowie die Geometrie des Raumes wurden von der Studie [ZF15] übernommen, siehe Tab. 1

Objekt	x in Meter	y in Meter
Zuhörer: L	-0.7	0.95
Schallquelle: S	2.1	-0.4
Raumecken:	3.5	2.5
	-3.5	2.5
	-3.5	-2.5
	3.5	-2.5

Tabelle 1 – Positionen für Zuhörer und Schallquelle, Geometrie des Raumes

Der simulierte Raum besitzt an den Seiten schallharte Wände und ist an Decke und Boden reflexionsfrei. Es wurden alle Reflexionen bis zur 2. Ordnung berücksichtigt, nämlich ein direkter Pfad, vier Reflexionen 1. Ordnung und acht Reflexionen 2. Ordnung. Daraus folgen insgesamt 13 Pfade, die jeweils von einem einzelnen Lautsprecher im Versuch nachgestellt werden (LS_0 bis LS_{12}). Die Abtastrate betrug 48kHz. Der Schalldruck nimmt mit $1/r$ ab. In Abbildung 4 S.8 ist das Reflexionsmuster des Raumes mit der Position des Zuhörers und der Schallquelle, sowie die Referenzwinkel dargestellt. In Tabelle 2 S. 8 sind die Parameter (Distanz, Verzögerung, Bündelungsrichtung, Einfallswinkel) für die einzelnen Pfade angegeben.

3.2 Stimulus

Wie schon wie im Hörversuch des Artikels [ZF15] wurde als Stimulus breitbandiges rosa Rauschen verwendet. Die Einhüllende ist in Abbildung 5 S. 9 dargestellt. Es wurden drei Schallstöße mit dazwischenliegenden Pausen von 200ms abgestrahlt. Die Einhüllende hat eine Einschwingzeit von 10ms, ein Sustain von 500ms und eine Abklingzeit von 10ms.

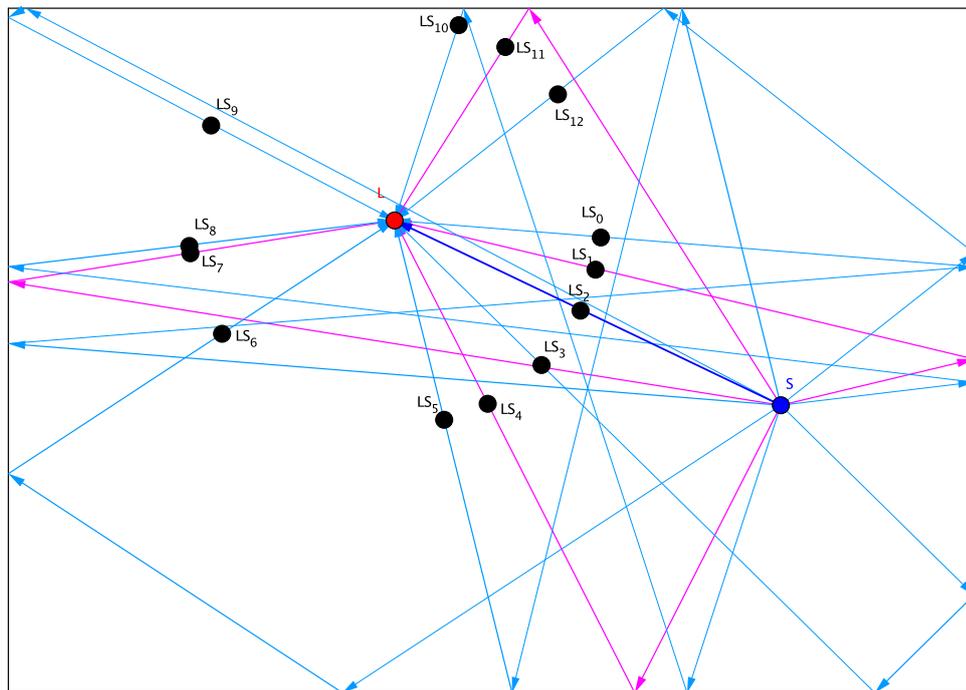


Abbildung 4 – Reflexionsmuster im Raum - blau: Direkt Pfad, rosa: Reflexionen 1. Ordnung, cyan: Reflexionen 2. Ordnung

	Distanz in m	Verzögerung in ms	Abstrahlwinkel φ_S in $^\circ$	Einfallswinkel φ_L in $^\circ$
LS_0	16.85	40.1	175.4	-4.6
LS_1	5.76	7.7	13.6	-13.6
LS_2	3.11	0	154.3	-25.7
LS_3	7.88	13.9	-44.7	-44.7
LS_4	6.22	9.1	-116.8	-63.2
LS_5	11.69	25.0	103.9	-76.1
LS_6	10.07	20.3	-146.6	-146.6
LS_7	8.51	15.7	170.9	-170.9
LS_8	11.28	23.8	6.9	-173.1
LS_9	9.51	18.7	152.1	152.1
LS_{10}	9.09	17.4	-107.9	72.1
LS_{11}	5.26	6.3	122.2	57.8
LS_{12}	7.15	11.8	38.5	38.5

Tabelle 2 – Parameter der einzelnen Reflexionen

3.3 Trackingsystem

Am Akustik-Messplatz des IEM steht ein vorinstalliertes Trackingsystem mit Kameras zur Verfügung, welches die Position von bestimmten Objekten, die mit *Motion Capture*

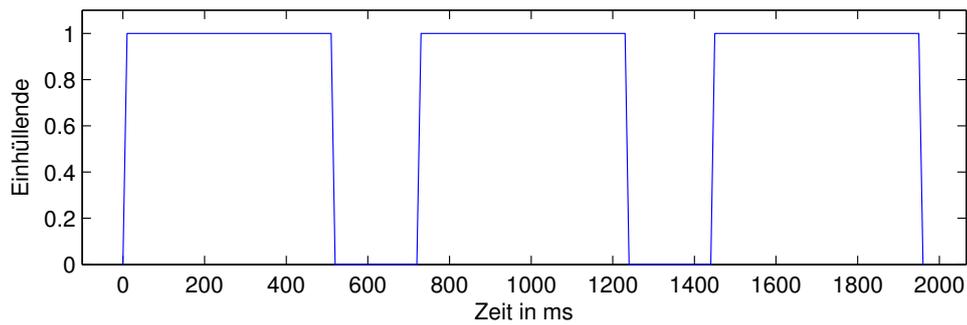


Abbildung 5 – Einhüllende des Stimulus

Markers versehen sind, erfasst. In unserem Fall diente eine modifizierte Spielzeugpistole als Schnittstelle zwischen Versuchsperson und Rechner. Damit erhält man über das Netzwerk am Rechner die Positionsdaten x, y und den Winkel β , welcher den Richtungswinkel der Pistole angibt. In Pure-data wurden die Daten für das Experiment weiterverarbeitet. Daraufhin wurde der wahrgenommene Einfallswinkel α jedes Klangbeispiels berechnet und als Antwort gespeichert (siehe Abbildung 6 S. 9).

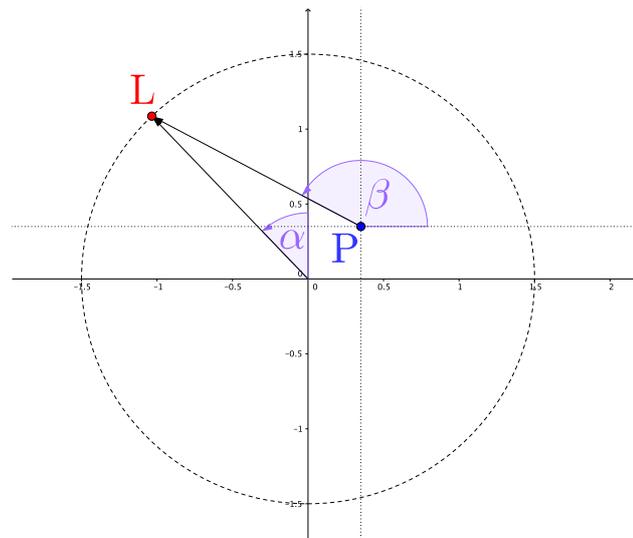


Abbildung 6 – Tracking-Data Verarbeitung: Zur Berechnung des subjektiven Einfallswinkels wird ein Durchstoßpunkt mit der Zielrichtung der Spielzeugpistole am Punkt P mit ihrer Zielrichtung und einem umgebenden Kreis berechnet.

3.4 Vorbereitung und Kalibrierung

Die Lautsprecherpositionen wurden mit einem Laser-Winkelmessers und einem Metermaß ausgemessen. Die Lautsprecher LS_7 bzw. LS_8 konnten aufgrund ihrer Größe und ihres kleinen Abstands leider nicht an die richtige Position gestellt werden. Deswegen

wurden sie in diesem Fall so nah wie möglich aneinander gestellt.
Zur Ausgleich von Laufzeiten- und Pegelfehlern, wurde eine Kalibrierungsmessung durchgeführt: Die Impulsantwort jedes einzelnen Lautsprechers wurde mit einem exponentiellen *Sweep* gemessen. Die Verzögerung jeder Impulsantwort wurde auf den Lautsprecher mit der größten Verspätung LS_v bezogen:

$$\text{Delay}_i = -\tau \Big|_{\max \sum p_v(t) \cdot p_i(t+\tau)}$$

Jeder Lautsprecher LS_i wurde dann mit dem entsprechenden Delay_i verzögert.
Der Korrektur-Verstärkungsfaktor eines Lautsprechers im Bezug auf den Lautsprecher mit der größten Verstärkung lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$\text{Gain}_i = 10 \cdot \log \frac{\sum p_{\max}^2(t)}{\sum p_i^2(t)}$$

3.5 Beschreibung des Hörversuchs und der abgefragten Bedingungen

Die der Studie entnommene Abbildung 1 lässt erkennen, welche Bündelungsrichtungen für die gerichtete Quelle im Hörversuch untersucht werden sollten. Bei der Durchführung des Experiments wurden jeweils zwei unterschiedliche Richtungswinkel für die Quelle Q_1 eingestellt, nämlich $+90^\circ$ und -117° (Abbildung 7). Diese Winkel wurden gewählt, da sie eine deutliche wahrgenommene Richtung aufweisen und gleichzeitig unterschiedliche Entfernungen von dem Direktklang haben (Abbildung 1). Die Quelle Q_2 zeigte wie zuvor schon erwähnt immer in die gleiche Richtung, und zwar in die des Zuhörers ($+154.26^\circ$).

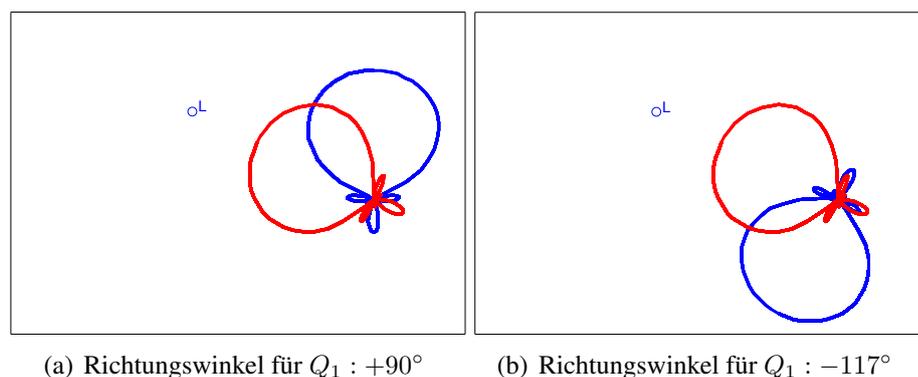


Abbildung 7 – Richtungswinkel (Q_1 blau, Q_2 rot)

Zudem wurden drei verschiedene Verzögerungen gewählt:

keine Verzögerung: beide Signale werden zeitgleich wiedergegeben

Verzögerung 1: Die Quelle Q_2 wird so verzögert, dass ihre Wellenfront gleichzeitig mit der *Hauptwellenfront* von Q_1 ankommt²

2. Der Begriff *Hauptwellenfront* meint hier die lauteste Reflexion, also nicht unbedingt die Erste (aufgrund des Einflusses der Nebeneulen)

Verzögerung 2: In diesem Fall wurde die *Verzögerung 1* noch einmal um 5ms verlängert

Außerdem wurden 9 verschieden starke Verstärkungen zwischen den beiden Quellen, zwischen den Grenzen -12dB und 12dB , verwendet.

Aufgrund einer Wiederholung bekommt jede Versuchsperson somit 108 Hörbeispiele ($2 \text{ Abstrahlwinkeln} \times 3 \text{ Verzögerungen} \times 9 \text{ Verstärkungen} \times 2 \text{ Wiederholungen} = 108$).

Am Versuch nahmen 16 Personen teil (1 wissenschaftlicher Mitarbeiter des IEM, 2 Musikstudierende, 12 ToningenieurstudentInnen und eine unerfahrene Person) und die Versuchsdauer betrug ungefähr 15 Minuten. Die Versuchsperson sollte sich in den Mittelpunkt der Lautsprecher-Anordnung setzen und mit der Spielzeugpistole so genau wie möglich in die Richtung zeigen, aus welcher der Schall gehört wird. Falls die VP eine Entscheidung getroffen hat, sollte sie ihre Wahl mit einer Fernbedienung bestätigen. Gleichzeitig konnte sie mit dieser Fernbedienung das gerade aktive Hörbeispiel so oft wie gewünscht wiederholen. Zuerst wurden die ersten 58 Hörbeispiele in einer zufälligen Reihenfolge abgespielt, dann wurden sie alle in einer anderen, wieder zufälligen Reihenfolge wiederholt.

4 Ergebnisse des psychoakustischen Versuchs

4.1 Zuverlässigkeit der einzelnen Versuchspersonen

Die Wiederholung jedes Hörbeispiels ermöglichte es, die Intra-Klassen-Korrelation für jede Versuchsperson zu berechnen (siehe Tabelle 3 S.12). Für ein klares Ergebnis wurden Antworten unzuverlässiger VPn mit einer Intra-Klassen-Korrelation kleiner als 0.85 entfernt. Aus diesem Grund wurden die Antworten von VP5 und VP15 nicht verworfen.

VP	ICC
0	0.9279
1	0.9556
2	0.9549
3	0.8623
4	0.9586
5	0.9289
6	0.7516
7	0.9218
8	0.9647
9	0.9502
10	0.8575
11	0.9172
12	0.9793
13	0.9491
14	0.9414
15	0.7162

Tabelle 3 – Zuverlässigkeit der einzelnen Versuchspersonen

4.2 Bündelungsrichtung: 90°

Die Ergebnisse für das Experiment mit der Bündelungsrichtung von 90° sind in Abbildung 8 S. 13 ersichtlich. Für kleine Verstärkungsfaktoren bis -3dB wurde der Schall bei allen Verzögerungen größtenteils aus der -20°-Richtung wahrgenommen. Das entspricht der tatsächlichen Position der Quelle. Bei einem Verstärkungsfaktor von 0dB ist ersichtlich, dass zum ersten Mal bei den Verzögerungen 1 und 2 der Schall auch aus der -60°-Richtung wahrgenommen wurden. Diese wahrgenommene Richtung entspricht der ersten Reflexion der linken Wandseite. Von jetzt an beginnt für diese beiden Verzögerungen eine Verlagerung der wahrgenommenen Richtung. Sowohl bei 3dB als auch bei 6dB sind die Werte über den Winkelbereich [-20°, 60°] fast gleichverteilt. Ab 9dB übernimmt die linke Wandreflexion die wahrgenommene Richtung, wobei nur noch vereinzelt

Werte innerhalb des oben genannten Winkelbereichs ausgewählt wurden. Für die Ergebnisse ohne Verzögerung bestimmt die Quelle Q_2 bis 6dB die Lokalisation. Hier stellt sich nämlich erst ab 9dB eine Verlagerung ein, wobei das Phänomen der angenäherten Gleichverteilung, welches bei der Verzögerung 1 und 2 schon ab 3dB eintrat, jetzt erst bei 12dB eintritt. Nach der Versuchsdurchführung haben einzelne VPn angemerkt, dass sie sich oft nicht entscheiden konnten, in welche Richtung sie zielen sollen, da sie zwei Schallquellen separat wahrgenommen haben. Aus diesem Grund zielten manche in diesem Fall in die Mitte und andere trafen eine unsichere und daher nicht aussagekräftige Entscheidung. Interessant ist hierbei, dass die wahrgenommene Richtung erst durch die Verzögerungen 1 und 2 und selbst dann erst beim vollen Verstärkungsunterschied 12dB einen eindeutigen Häufungspunkt aufweist. Offenbar ist diese Anordnung ungünstig für die Erzeugung stabiler Phantomschallquellen innerhalb des Winkelbereichs.

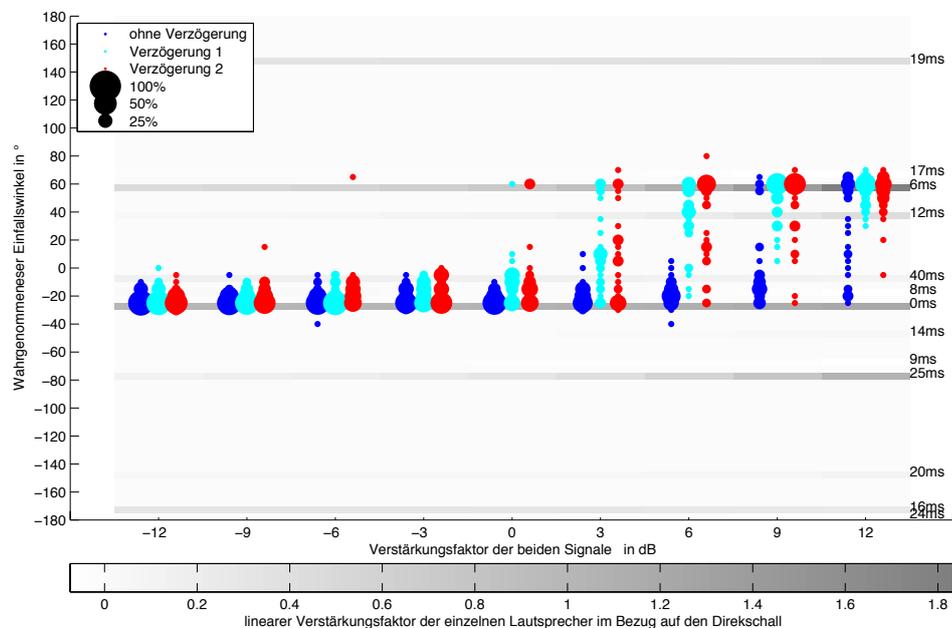


Abbildung 8 – Wahrgenommener Einfallswinkel für verschiedene Verzögerungen in Abhängigkeit von dem Verstärkungsfaktor - Bündelungsrichtung: 90° - Die Amplituden der einzelnen Schallausbreitungspfade sind in den dargestellten Histogrammen in Graustufen hinterlegt.

4.3 Bündelungsrichtung: -117°

Bei einem Richtungswinkel von -117° kommt der größte Teil der Energie von Q_1 diesmal aus der Richtung der rechten Seitenwand. In diesem Fall liegen die von Q_1 und Q_2

aufgespannten wahrgenommenen Richtungen enger beisammen und spannen einen Öffnungswinkel von 37.5° , während sich der Winkelbereich zuvor über 83.6° erstreckt hat. In diesem Fall verhalten sich alle drei Verzögerungen für alle Pegelunterschiede zwischen Q_1 und Q_2 annähernd gleich. Jedoch ist zu erkennen, dass sich die Kurve ohne Verzögerung erst bei einem größeren Verstärkungsunterschied verändert, ab 6dB fast sprunghaft ist, und im Vergleich zu den anderen beiden Verzögerungen die größte Unschärfe aufweist (siehe Abbildung 10).

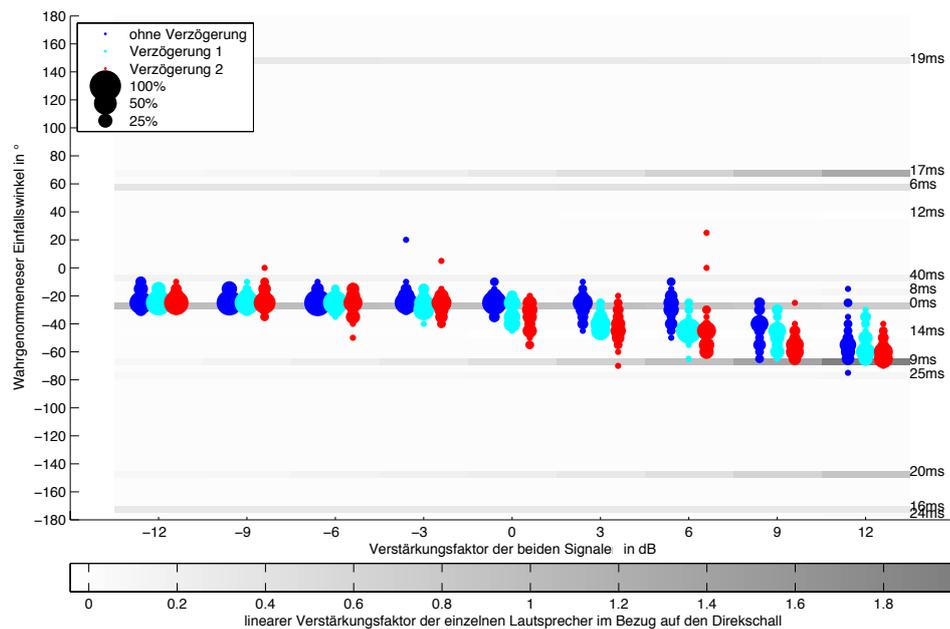


Abbildung 9 – Wahrgenommener Einfallswinkel für verschiedene Verzögerungen in Abhängigkeit vom Verstärkungsfaktor - Bündelungsrichtung: -117° - Die Amplituden der einzelnen Schallausbreitungspfade sind in den dargestellten Histogrammen in Graustufen hinterlegt.

Die Verzögerungen 1 und 2 weisen ein ähnliches Verhalten auf (Abbildung 9 und 10), bilden sich auf einen glatteren Übergang ab und streuen weniger. Hierbei fällt ins Auge, dass die Verzögerung 1 im Bereich von 0dB bis 6dB die geringste Streuung aufweist. Bei 6dB hat der Wert mit einem wahrgenommenen Einfallswinkel von -45.4° eine besonders kleine Streuung. Im zuvor erwähnten Winkelbereich ergeben sich hiermit offenbar stabile Phantomschallquellen der klassischen Zweikanalstereophonie, die allem Anschein nach durch Panning gesteuert werden können.

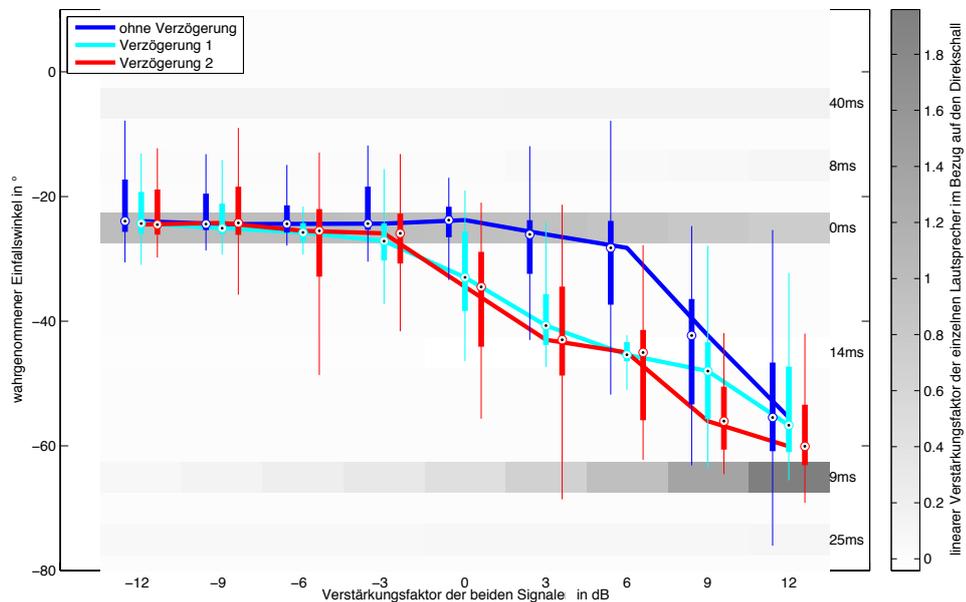


Abbildung 10 – Wahrnehmener Einfallswinkel für verschiedene Verzögerungen in Abhängigkeit von dem Verstärkungsfaktor, detailliertere Darstellung - Bündelungsrichtung: -117° - Die Amplituden der einzelnen Schallausbreitungspfade sind in den dargestellten Histogrammen in Graustufen hinterlegt.

5 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit haben wir die idealisierte Richtwirkung des Ikosaederlautsprechers mit zwei getrennt addierten Schallstrahlen ($\max -r_E$) in einem virtuellem Raum simuliert. Durch das Hinzufügen von drei unterschiedlichen Verzögerungen konnten in bestimmten Situationen Phantomschallquellen in einem Winkelbereich zwischen Direktpfad und Hauptreflexionspfad erzeugt werden.

In einem Hörversuch sollten die Versuchspersonen angeben, aus welcher Richtung sie die simulierte Schallquelle wahrgenommen haben. Hierbei gab es zusätzlich zum direkt pfad (Q_2) zwei Richtungen für die Hauptreflexionen (Q_1), wobei im ersten Fall die linke Wand und im zweiten Fall die rechte Wand den größten Teil der reflektieren Energie ausmachte. Durch diese Verzögerungen konnte eine bessere Loslösung der Lokalisation vom Präzedenzeffekt und damit vom Direktschall Q_2 erreicht werden.

Für den ersten Winkelbereich (Einfallswinkel des Direktpfads: -25.7° , Einfallswinkel

des Hauptreflexionspfads: 57.8°) konnten leider nur die tatsächliche Position der Quelle und eine Phantomschallquelle aus der Hauptreflexionsrichtung lokalisiert werden. Im zweiten Fall ist aus der Perspektive des Abhörplatzes der eingeschlossene Winkel zwischen Q_1 und Q_2 kleiner (Einfallswinkel des Hauptreflexionspfads: -63.2°). Ein Abgleich der Zeitunterschiede zwischen Wandreflexion aus Q_1 und Direktschall aus Q_2 entfaltet hier die größte Wirkung. Wir konnten feststellen, dass eine stabile Verschiebung der Phantomschallquelle innerhalb des Winkelbereichs durch Amplitudenpannung ermöglicht ist.

Im Falle einer neu angesetzten Versuchsreihe wäre es interessant, das tatsächliche Verhalten eines Ikosaederlautsprechers mit realen Schallstrahlen im realen Raum zu untersuchen, da in dem hier vorgestellten Experiment das Verhalten einer frequenzabhängigen Richtcharakteristik nicht berücksichtigt wurde (geringe Bündelung bei tiefen Frequenzen, räumliches Aliasing bei hohen Frequenzen). Außerdem wäre es natürlicher, komplexere Raumgeometrien zu betrachten und die Decken- und Bodenreflexionen mit einfließen zu lassen. Die Analyse könnte auch davon profitieren, dass den Versuchspersonen eine zweite Antwortmöglichkeit zugestanden wird, da manchmal zwei Quellen getrennt wahrgenommen wurden.

KomponistInnen der elektroakustischen Musik, die mit dem Ikosaederlautsprecher arbeiten, könnten die Ergebnisse dieser Voruntersuchung nutzen, um Phantomschallquellen kontrollierter um den Ikosaederlautsprecher herumwandern lassen zu können.

Literatur

- [ZF15] F. Zotter and M. Frank, “Investigation of auditory objects caused by directional sound sources in rooms,” *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 2015.
- [ZFFR14] F. Zotter, M. Frank, A. Fuchs, and D. Rudrich, “Preliminary study on the perception of orientation-changing directional sound sources in rooms,” *Forum Acusticum*, 2014.
- [Zot15] F. Zotter, *Vorlesungsskriptum: Akustische Holografie und Holophonie VO*, 2015, ch. 5.