

Seminararbeit aus Algorithmen in Akustik und Computermusik
WS 20/21

Surround Wiedergabe mit zwei 393-Lautsprecherarrays

Benedikt Brands
Peter Santner

Betreuung:
Ass.Prof. DI Dr.rer.nat. Franz Zotter
DI Ph.D. Matthias Frank

Graz, 9. Juni 2021



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird mit drei Hörversuchen die Gegenüberstellung von reflektierten virtuellen und direkten realen Schallquellen untersucht. Diese werden von zwei „393-Sphärischen Lautsprechern“ bzw. einem herkömmlichen 5.1-Surround Setup erzeugt. Die Versuche behandeln die wahrgenommene Quellbreite einzelner Quellen, Lokalisation im Raum und die wahrgenommene Einhüllung im diffusen Schallfeld. Ansporn hierzu waren verschiedene Arbeiten, die darauf hingewiesen haben, dass sich durch virtuelle Quellen die Ausdehnung der Sweetline für eindeutige Lokalisation deutlich erhöhen lässt (vgl. [DMKZF18], [MKZP18]). Diese Hypothese wird in den hier durchgeführten Experimenten durch signifikante Ergebnisse bestätigt. Darüber hinaus werden noch weitere Aspekte, wie z.B. die Form der Schallstrahlen zur Verbesserung dieses Effekts betrachtet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Surround-Wiedergabe mit kompakten Kugellautsprecherarrays	5
2.1	Kompakte Kugellautsprecherarrays und Schallstrahlen	5
2.2	Das 393-Lautsprecherarray	6
2.3	5.1 Wiedergabe mit Schallstrahlen	7
3	Hörversuch	10
3.1	Aufbau	10
3.2	Durchführung	12
4	Auswertung	14
4.1	Einstichprobentests	14
4.2	Multivariate Hypothesentests	16
4.3	Diskussion	18
5	Schlussfolgerung und Ausblick	20

1 Einleitung

Wiedergabesysteme für Rundumklang können aus zwei gegensätzlichen Ansätzen heraus entworfen werden. Ein Ansatz verfolgt das Ziel, ein vorhandenes Schallfeld in seiner Ganzheit möglichst genau wiederzugeben¹. Dabei stellen die in jedem Raum vorhandenen Reflexionen einen Störfaktor dar, die die Abbildung des wiederzugebenden Schallfelds verfälschen. Poletti et al. haben eine Methode zur Unterdrückung der ersten Reflexionen und frühen Nachhallzeit mit 2D-Lautsprecherarrays vorgestellt [PBA15]. Der dazu gegensätzliche Ansatz nutzt gezielt Reflexionen an Begrenzungsflächen, um daraus entstehende Eindrücke für die räumliche Wiedergabe nutzen zu können. Hierbei werden Lautsprecherarrays verwendet, die in der Lage sind richtungsabhängig gebündelte Schallstrahlen zu erzeugen („Beamforming“), um gezielt einzelne Reflexionsbereiche zu bespielen. Im kommerziellen Gebrauch hat Yamaha mit dem Soundbar eine Beispielkonfiguration vorgestellt [Tak06]. In der elektroakustischen Musik ist als Beispiel der Ikosaederlautsprecher (IKO) zu nennen [ZZFK17]. Der IKO und seine Schallbündel dritter Ordnung ermöglichen eine gezielte Bespielung des Raums oder von Reflektoren und somit eine Erweiterung des künstlerischen Klangapparats.

Eine interessante Anwendung ist die Erzeugung von Phantomschallquellen aus Reflexionen. So konnten Deppisch, Meyer-Kahlen et al. belegen, dass die Stabilität einer frontalen Schallquelle bei stereophoner Wiedergabe durch einen, aus Reflexionen erzeugten, virtuellen Centerlautsprecher, erheblich verbessert werden kann [DMKZF18]. Die verwendeten Lautsprecherarrays waren zwei, bzw. vier Würfellausprecher, mit denen Schallstrahlen erster Ordnung erzeugt werden können [MKZF18]. Der 393-Lautsprecher ist eine Weiterentwicklung der Würfellausprecher und des IKO, welcher in der horizontalen Ebene eine Bündelung bis zu vierter Ordnung in 3D ermöglicht [RZH19].

Anknüpfend an die Versuche mit Würfellausprechern und an eine Projektarbeit über die Wiedergabe von 5.1 Material mit dem IKO ([DMKZF18] und [MK19]) untersucht diese Seminararbeit die Lokalisationsstabilität und das Vorhandensein von einhüllendem, diffusen Hall von allen Seiten. Dies geschieht in einem Hörversuch mit einer frontalen Aufstellung aus zwei 393-Lautsprecherarrays. Da sich das Wiedergabesetup an einer 5.1-Aufstellung orientiert, werden Vergleiche zu einer ebenfalls aufgestellten, aus Einzellausprechern bestehenden, 5.1-Anordnung gemacht. Um zudem Erkenntnis über Reflexionen zu bekommen, wird die Quellbreite der physischen und konstruierten Quellen im Hörversuch mit abgefragt.

1. Schallfeldreproduktion, akustische Holophonie

2 Surround-Wiedergabe mit kompakten Kugellautsprecherarrays

Soll ein Schallereignis in seiner Ganzheit dargestellt werden, liegt es nahe, den ambisonischen Ansatz zu verfolgen. Für Lautsprecherwiedergabe mit Ordnung N ist eine Mindestanzahl von $(N + 1)^2$ auf einer Kugel gleichmäßig verteilten Lautsprechern nötig. Diese Beschränkung durch Anordnungs- und Anzahlvorgaben kann mit AllRAD-Dekodierung gelockert werden. Sie ermöglicht eine äquivalente Auflösung bei kleinerer Lautsprecheranzahl und quasi beliebiger Platzierung dieser [ZF12]. Die verteilte Aufstellung der Lautsprecher bleibt jedoch oft weiter ein Anwendungsproblem, vor allem im Konsumentenbereich (Anbringung an Decke, Vereinbarung mit Raumkonzept usw.).

Abhilfe kann die Verwendung von Reflexionen an Grenzflächen für die Konstruktion von virtuellen Quellen bieten. So schlägt beispielsweise Dolby in einer Konfiguration des Surround-Sound-Formats *Atmos* vor, die Decke als Reflexionsfläche zu nutzen. In der Beispielkonfiguration 5.1.4 spielen an den Links- und Rechts- sowie den Surround-Links- und Surround-Rechts-Lautsprechern angebrachte elevierte Lautsprecher an die Decke und erzeugen die gewünschten Beschallung von oben (siehe Abbildung 1).

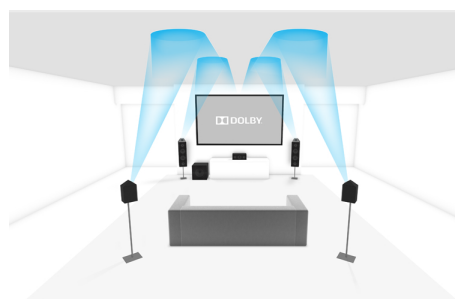


Abbildung 1 – 5.1.4 Dolby Atmos Aufstellung²

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird versucht, Surround-Wiedergabe auch mit zwei kompakten 393-Kugellautsprecherarrays zu ermöglichen.

2.1 Kompakte Kugellautsprecherarrays und Schallstrahlen

Wird nun statt herkömmlichen Ein- oder Mehrweglautsprechern ein Array benützt, ergeben sich neue Möglichkeiten. So kann das Konzept der ambisonischen Lautsprecherkugel zur Lautsprecherkugel umgedacht werden, indem die Abstrahlung von innen nach außen verlegt wird. Dies ermöglicht nun die Bündelung der Abstrahlung zu sogenannten Schallstrahlen in beliebiger Richtung, wobei die Richtungsauflösung und Schärfe dieser Strahlen wiederum von Lautsprecheranzahl und Anordnung abhängig ist. Der IKO bietet mit seinen 20 auf einem Ikosaeder verteilten Lautsprechern die Möglichkeit, Schallstrahlen mit bis zu dritter Ordnung abzuspielen [RZ20]. Der in [DMKZF18] verwendete Würfellautsprecher bietet mit vier Treibern eine Abstrahlcharakteristik bis zu erster Ordnung in 2D, er ist in Abbildung 2 zu sehen.

2. <https://www.dolby.com/siteassets/about/support/guide/setup-guides/5.1.4-dolby-atmos-enabled-speaker-placement/sell-sheet-5.1.4-upfiring.pdf>
aufgerufen am 18.02.2021



Abbildung 2 – Aufbau mit vier Würfellautsprechern mit jeweils vier Kanälen, aus [DMKZF18]

Da die Richtungswahrnehmung des menschlichen Gehörs in der Horizontalen am schärfsten ist, sind die Anforderungen an die Richtungsauflösung des Lautsprecherarrays hier die höchsten. Ausgehend vom Wunsch, die Abmessungen des Lautsprecherarrays und Anzahl der Lautsprecher klein zu halten, schlägt die Arbeit von Riedel ein Drei-Ringe Konzept vor, das auf dem horizontalen Ring die meisten Treiber aufweist [RZH19]. Riedel et al. haben in ihrer Arbeit solche sogenannten Mixed-Order Spherical Loudspeaker Arrays entworfen und untersucht.

2.2 Das 393-Lautsprecherarray

Der 393-Lautsprecher wurde als günstigere und kleinere Weiterentwicklung des Ikosaederlautsprechers entwickelt [RZH19]. Die Idee ist es, Lautsprecher möglichst effektiv auf einer Kugeloberfläche zu platzieren um so Schall in beliebige Raumrichtungen zu strahlen. Dazu gibt es viele Verschiedene Layouts (Siehe Abbildung 3). In diesem speziellen Layout wurden neun Lautsprecher um den horizontalen Großkreis einer Kugel platziert, um so eine höhere Richtungsauflösung in dieser Ebene zu erreichen. Dies ermöglicht eine genauer getrennte Bespielung der typischer Weise am meisten verfügbaren vertikalen Flächen am Horizont. An der oberen und unteren Halbkugel wurden jeweils drei Lautsprecher angeordnet, was die Namensgebung 393-Array erklärt.



Abbildung 3 – links: 484, rechts: 393-Lautsprecherarray, aus [RZH19]

Diese Anordnung führt mit mixed-order control (vgl. [RZH19]) zu einer effektiven vierten Ordnung des Schallstrahls in 2D und fast dritte Ordnung (ca 2.6) in 3D (bei Frequenzen über 400Hz) in der horizontalen Eben, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Bemerkenswert ist auch, dass das 393-Array mit weniger Lautsprechern eine annähernd so gute Auflösung wie der Ikosaeder-Lautsprecher erreicht.

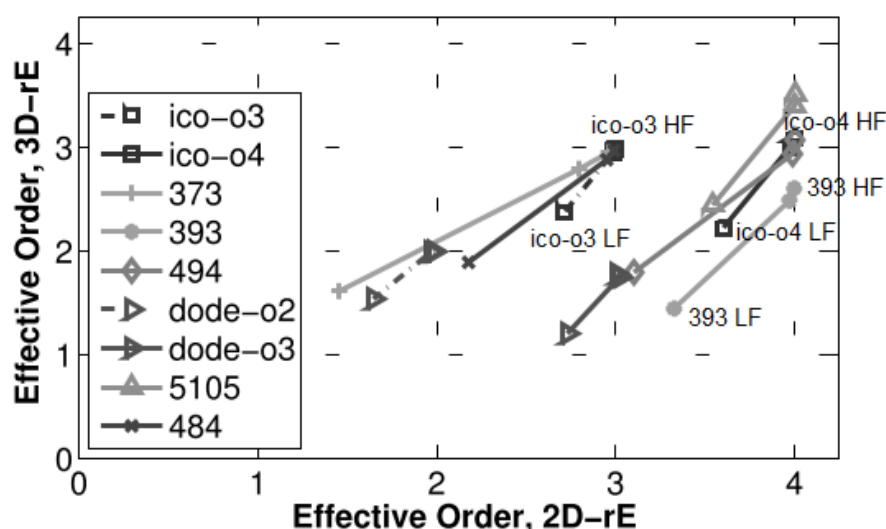


Abbildung 4 – Effektive Ordnung 2D/3D in der horizontalen Ebene für die Frequenzen [200, 400, 800] Hz und verschiedene Layouts; aus [RZH19]

2.3 5.1 Wiedergabe mit Schallstrahlen

Die Wiedergabeanordnung für den Hörversuch wurde in Vorarbeit aus Überlegungen zu verschiedenen Parametern experimentell entworfen. Auf diese soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

Um bei einem gängigen Surroundformat zu bleiben, wurde mit 5.1 Material gearbeitet und zuerst ein typisches Setup eingerichtet. Als Klangbeispiel wurde ein Experimental-Pop Album³ gewählt. Diese Produktion enthält sowohl aufwendige zeitvariante Spatialisierungen als auch statische Klänge.

Die Einrichtung der Schallstrahlen wurde zu zweit per Gehör abgestimmt. Dabei wurde von einer festen Hörerposition und mit Rosa Rauschen als Quellsignal mit Hilfe des DirectivityShaper Plugins aus der IEM-Suite [R⁺19] die Abstrahlrichtung (Azimuth, Elevation) des jeweiligen Schallstrahlen so eingestellt, dass der direkte, bzw. reflektierte Pfad deutlich hörbar ist. Eine Beispielkonfiguration für den Schallstrahl *Links* ist in Abbildung 5 zu sehen.

3. Yoshimi Battles The Pink Robots - The Flaming Lips (2003)



Abbildung 5 – Konfiguration des Schallstrahls *Links* mit dem DirectivityShaper Plugin

Abbildung 6 skizziert die per Gehör gefundenen Schallstrahlen. Für den Centerkanal wurde eine virtuelle Quelle aus zwei Schallstrahlen von jeweils einem 393-Lautsprecher konstruiert, da diese Konfiguration den größten Bereich für eindeutige Lokalisation mit sich bringt, wie Deppisch und Meyer-Kahlen bereits für die Würfellautsprecher gezeigt haben [DMKZF18]. Für die Surround Kanäle wurde mit verschiedenen Konfigurationen experimentiert. Es hat sich bewährt, die Seitenwände des Raums als Reflexionsflächen zu nutzen und somit virtuelle Quellen von der Seite zu konstruieren. In dieser Arbeit wurde versucht, mit zusätzlichen Reflektoren eine Platzierung von virtuellen Quellen hinter dem Hörer zu ermöglichen.

Es ist nicht ohne Weiteres möglich, eine tatsächliche Schallquelle mit einer durch Reflexionen erzeugten zu ersetzen. So wurde hier auch mehr Fokus auf die Bespielung des Raums als auf detailtreue 5.1 Wiedergabe gelegt. Zusätzliche Schallstrahlen in die oberen Raumecken wurden für die Surroundkanäle genutzt, da diese diffus und wenig ortbar reflektiert werden. Aus dieser Konfiguration entstand die Idee, alle gefundenen Quellen als virtuelle Lautsprecherkuppel zu verstehen und auf diese zu dekodieren. Dafür wurde mit dem AllRADecoder Plugin aus der IEM-Suite ein Dekoder konstruiert, der ambisonisches Panning auf alle Schallstrahlen ermöglicht [R⁺19], [ZF12].

Die in ambisonischer Theorie häufig gebräuchlichen max-r_E Gewichte wurden für die Form der Schallstrahlen gewählt. Sie werden analytisch aus der Maximierung des Energievektors gewonnen und dämpfen die Nebenkeulen der sphärischen Harmonischen auf Kosten der Verbreiterung der Hauptkeule. Eine andere Form sind die In-phase Gewichte, die alle Nullstellen bei -180° haben und somit keine Nebenkeulen, dafür eine sehr breite Hauptkeule ergeben. Meyer-Kahlen hat sich intensiv mit dem Design von Schallstrahlen beschäftigt [MK19]. Die Untersuchung verschiedener Schallstrahlen-Designs hätte den Umfang dieser Arbeit gesprengt und es wurden für alle Konfigurationen max-r_E Gewichte verwendet.

Beim Design der Schallstrahlen wurde vernachlässigt, dass die Ansteuerungsfilter des 393-Lautsprechers bereits max- r_E -Gewichtung 4. Ordnung beinhalten. Die effektive Ordnung der Schallstrahlen liegt somit unter der beabsichtigten 5. Ordnung.

Da die Reflexionswege der Schallstrahlen für die virtuellen Quellen länger sind als die der direkten, wurden letztere um 15 ms verzögert.

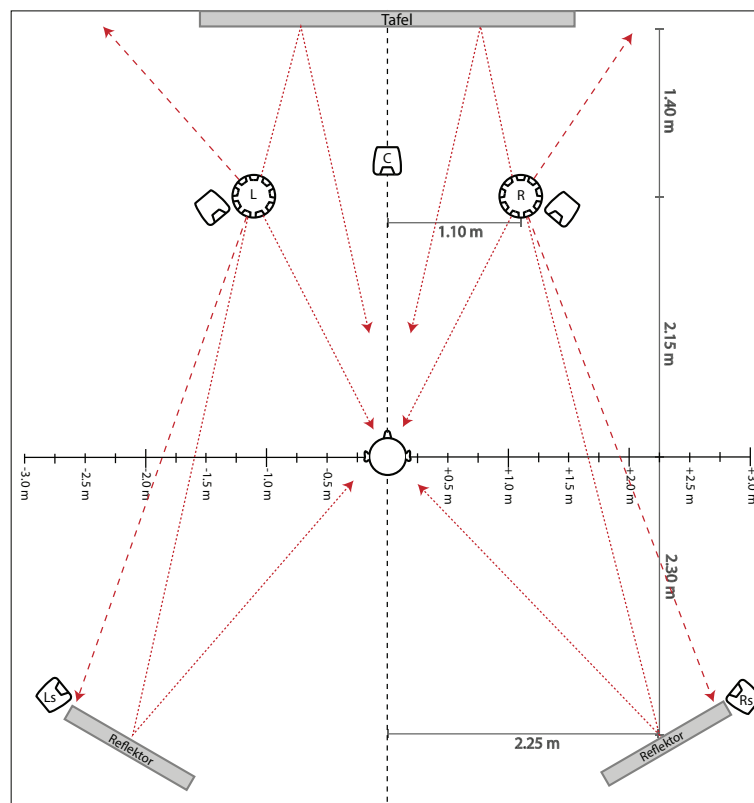


Abbildung 6 – Lautsprecher- und Reflektorpositionen, sowie Pfade der Schallstrahlen (rot gepunktet). Die gestrichelten Strahlen zeigen mit einer Elevation von $\varphi = 40^\circ$, bzw. $\varphi = 30^\circ$ in die vorderen, bzw. hinteren oberen Raumecken

3 Hörversuch

Die in 2.3 gefunden virtuellen Quellen wurden hinsichtlich ihrer wahrgenommenen Breite untersucht. Angelehnt an den in [DMKZF18] durchgeführten Hörversuch wurde hier die Länge der Sweetline für **eindeutige Quellenlokalisation** untersucht und darüber hinaus gehend jene für das Vorhandensein von **einhüllendem, diffusen Hall (Einhüllung)**.

3.1 Aufbau

Der Hörversuch fand im Hörsaal „Petersgasse 116, Erdgeschoß“ statt. Dort wurden die 393-Lautsprecher entsprechen Abbildung 6 vor der Tafel aufgestellt. Zum Vergleich wurde ein vollständiges 5.1-Setup bestehend aus fünf Genelec 8020 Lautsprechern und einem Subwoofer aufgebaut. Für die im Versuch relevanten Signale wurde der Subwoofer nicht bespielt, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den 393-Lautsprechern zu garantieren. Die klanglichen Unterschiede zwischen 393-Lautsprecherarrays und Genelec Lautsprechern wurden mittels MultiEQ Plugin [R⁺19] nach Gehör grob entzerrt. Die Entzerrungskurve ist in Abbildung 7 zu sehen.

Die Reflektor-Positionen wurden so festgelegt, dass sie bestmöglich gerichtete Schallergebnisse von hinten unterstützen. Für den ersten Versuch (Bestimmung der Quellbreite) wurde ein Fixpunkt in der Mitte des Raumes gewählt für den die Aufstellungen und Reflexionen optimiert wurden. Durch diesen Punkt wurde auch die Sweetline für für den zweiten und dritten Versuch gelegt. Die Aufstellungen sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 dokumentiert.

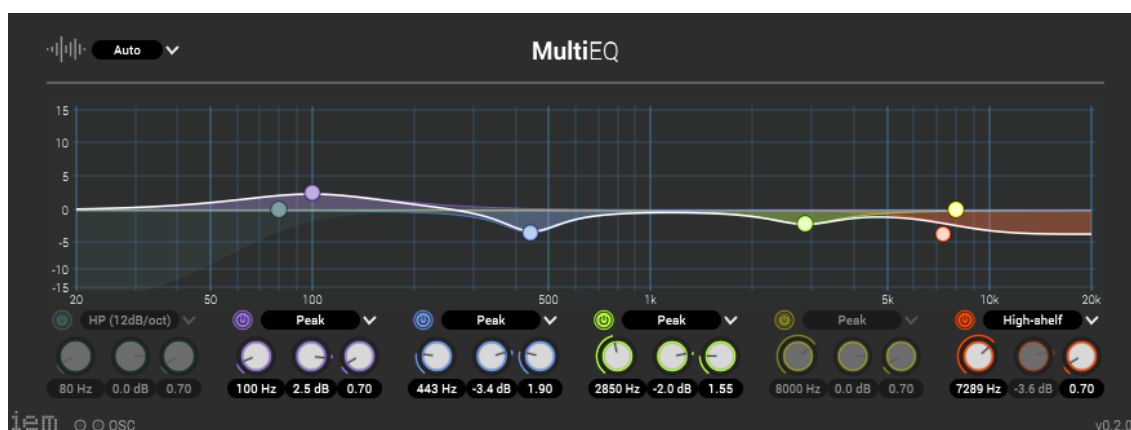


Abbildung 7 – EQ Einstellung zur klanglichen Anpassung der 393-Lautsprecher an die Genelec Lautsprecher des 5.1 Wiedergabesystems



Abbildung 8 – Aufbau Hörsaal Petersgasse in Blickrichtung, mit L-C-R Genelec 8020 und den zwei 393-Lautsprechern mit der reflektierenden Tafel dahinter



Abbildung 9 – Aufbau Hörsaal Petersgasse nach hinten mit den mit den Ls und Rs Genelec 8020, sowie den hinteren Reflektoren (weiß)

3.2 Durchführung

Quellbreite

Der erste Versuch zur Bestimmung der Quellbreite wurde sitzend und an einem markierten Punkt in der Mitte der Referenz-Linie (Abbildung 8, grüne Linie unten) durchgeführt. Die Motivation für diesen Versuch war, die Quellbreiten der diversen physikalischen und reflektierten Hörereignisse der 393-Lautsprecher in Abhängigkeit zur gewählten Richtwirkung (1. oder 5. Ordnung) miteinander vergleichen zu können. Unter Verwendung der bereitgestellten MUSHRA-Software⁴ und Reaper DAW wurden jeder Versuchsperson alleine die verschiedenen Bediungen in zufälliger Reihenfolge vorgespielt. Folgende Bedingungen wurden mit Schallstrahlen in erster und fünfter Ordnung über die 393-Lautsprecher getestet:

Links (L)	direkt
Rechts (R)	
Center (C)	Reflexion
Links surround (Ls)	
Rechts surround (Rs)	

Als Testsignale wurden hier ein männlicher Sprecher aus der SQAM Bibliothek [EBU08] und Rosa Rauschen genutzt. Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, für jedes Testsignal die Quellen nach dem Attribut der Quellbreite auf einer Skala von *sehr schmal* bis *sehr breit* zu sortieren.

Lokalisation

Der zweite Versuch zur Lokalisation wurde stehend auf der markierten Referenz-Linie durchgeführt. Ziel dieses Versuchs war es, herauszufinden, welche Lautsprecheranordnung eine möglichst ausgedehnte Sweetline ergibt. Jede Versuchsperson wurde gebeten, für eine zufällige Abfolge von Wiedergabekonfigurationen die Abstände vom Mittelpunkt nach links und rechts anzugeben, ab denen die wahrgenommenen Schallquelle nicht mehr von der Mitte der Tafel wahrgenommen wird. Betrachtet wurden folgende Wiedergabekonfigurationen:

Centerlautsprecher (5.1)	Genelec 8020
Links und Rechts (L+R)	393-Lautsprecher Schallstrahlen in erster, bzw. fünfter Ordnung
Links, Rechts und Center (L+R+C)	
Center (C)	
AllRAD	

Bei der Wiedergabekonfiguration *AllRAD* wurde die Schallquelle aus 0°-Richtung auf alle Schallstrahlen AllRAD-dekodiert.

4. MULTIPLE Stimulus with Hidden Reference Anchor (MUSHRA) nach ITU-R BS.1116-3

Für stationäre Rauschsignal sind Klangfarbenunterschiede sehr schnell bemerkbar. Diese ergeben sich durch den Einfluss des Raums an verschiedenen Abhörpositionen und sind hier unerwünscht, da sie von dem eigentlichen Attribut - der Lokalisation - ablenken. Um dies zu vermeiden, wurde dieser Versuch nur mit dem Sprachsignal durchgeführt.

Einhüllung

Der dritte Versuch zur Einhüllung wurde wieder auf der selben Referenz-Linie wie im zweiten Versuch durchgeführt. Ziel dieses Versuchs war es herauszufinden, mit welcher Lautsprecheranordnung ein möglichst diffuses Schallfeld erzeugt werden kann. Jede Versuchsperson war alleine im Raum und wurde gebeten, vom Mittelpunkt ausgehend die Abstände nach rechts und links anzugeben, an denen sie sich gerade nicht mehr vollständig vom Schall eingehüllt fühlten, bzw. ein einzelner Lautsprecher als einzelne Quelle zu hören war. Quellsignal ist hier das Sprachsignal, welches mittels FDNReverb Plugin [R⁺19] mehrkanalig verhallt wurde (Einstellungen in Abbildung 10). Die dekorrelierten Ausgänge des FDNReverb wurden für Wiedergabekonfigurationen auf die 5.1 Lautsprecher, bzw. auf die AllRAD-Konfiguration der Schallstrahlen in erster und fünfter Ordnung geroutet. Ursprünglich sollte auch eine Konfiguration mit den 5.1-Schallstrahlen (Links, Rechts, Center, Links Surround, Rechts Surround) getestet werden, durch einen Fehler in der Konfigurierung des Versuchs entfällt diese Testkonfiguration allerdings.

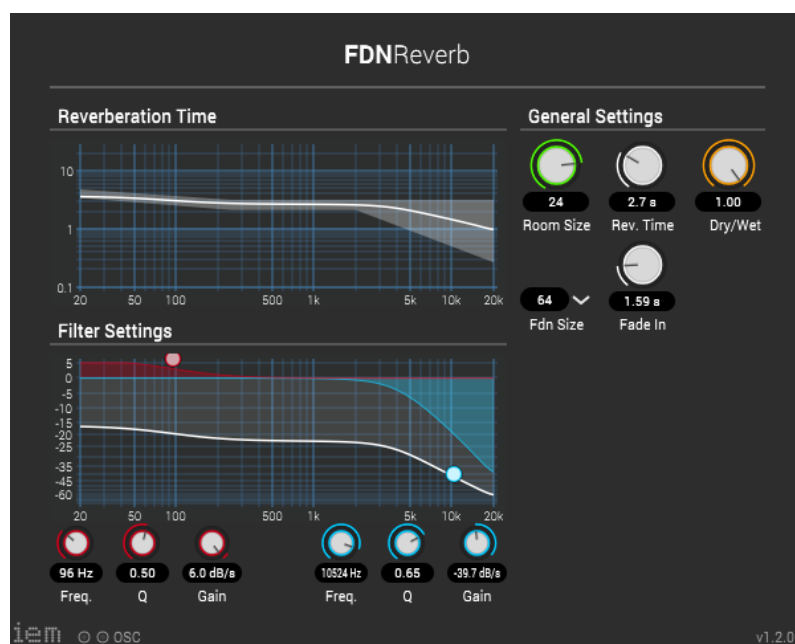


Abbildung 10 – Einstellungen des FDN Halls

4 Auswertung

Am Hörversuch nahmen 12 Personen mit geschultem Gehör teil. Durch einen Konfigurationsfehler wurde im diffusen Teil keine 5.1 Wiedergabe über die direkten Reflexionen getestet, jedoch die AllRAD-dekodierte Wiedergaben verdoppelt. Es ergeben sich somit für diese Konfigurationen 24 statt 12 Datenpunkte.

4.1 Einstichprobentests

Quellbreite

Abbildung 11 zeigt die Boxplots als Auswertung der wahrgenommenen Quellbreite. Die direkten Schallstrahlen in fünfter Ordnung (L o5, R o5) zeigen einen Trend zur Bewertung *sehr schmal*. Für diese Schallstrahlen zeigt sich auch der stärkste Unterschied in der Bewertung zwischen erster und fünfter Ordnung. Die virtuelle Centerquelle wird als am breitesten bewertet und die Bewertungen der virtuellen Surroundkanäle befinden sich im Mittelfeld. Die Tendenzen für Sprache und Raschen sind ähnlich, die Ergebnisse für Rauschen allerdings deutlicher von einander abgesetzt. Dies zeigt sich insbesondere zwischen Center und den übrigen, bzw. zwischen erster und fünfter Ordnung bei links und rechts.

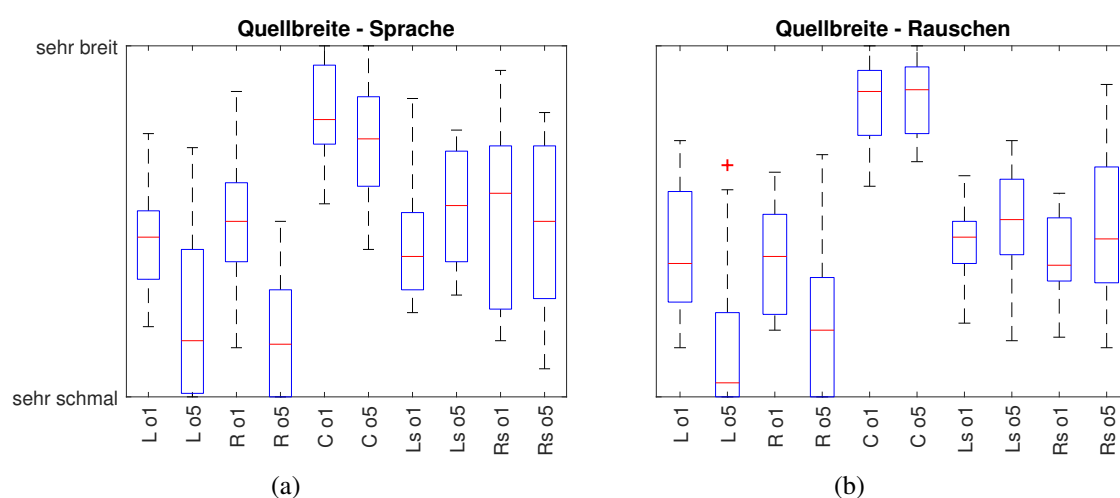


Abbildung 11 – Boxplots der wahrgenommenen Quellbreiten mit dem Testsignal a) Sprache und b) Rosa Rauschen

Lokalisation und Einhüllung

Für die Länge der Sweetline bezüglich Lokalisation sind in 12(a) die Boxplots dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der Genelec Center-Lautsprecher eindeutig die längste Sweetline als Bewertung mit sich bringt (5.1). Für die direkten Schallstrahlen (L+R), bzw. der

Kombination dieser mit dem virtuellen Center-Lautsprecher (L+R+C) liegt die Bewertung recht eindeutig bei kurzen Längen. Der virtuelle Center-Lautsprecher allein (C), also ohne DirektSchall durch die L-, bzw. R-Schallstrahlen und die AllRAD-Konfiguration (AllRAD) vergrößern wiederum den Bereich für eindeutige Lokalisation, wobei hier eine größere Streuung der Bewertungen vorliegt.

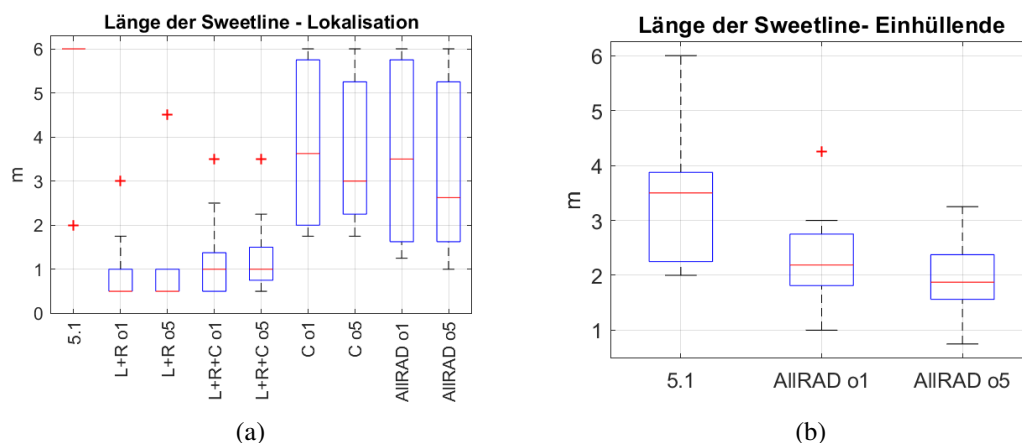


Abbildung 12 – Boxplots der Länge der Sweetline für a) Lokalisation und b) Einhüllung

Für die Länge der Sweetline für Einhüllung sind in 12(b) die Boxplots dargestellt. Hier zeigt die 5.1-Konfiguration der physikalischen Genelec Lautsprecher die längste Sweetline von etwa 3,5 m Länge, während 2 m durch die AllRAD-betriebene Surround-Schallstrahlenkonfiguration der 393-Lautsprecher bei frontalem Panning erreicht werden.

Histogramme

Für die Ergebnisse des Lokalisationsversuchs ist die Betrachtung der Histogramme der Längen der Sweetline interessant (Abbildung 13). So überrascht die eindeutige Bewertung der 5.1 Konstellation nicht; auch zeigen sich eindeutige Verteilungen für L+R und L+R+C. Beim virtuellen Center Lautsprecher (C) und der AllRAD Konstellation können zwei Häufungspunkte in der Bewertung beobachtet werden. Auf diese soll später eingegangen werden.

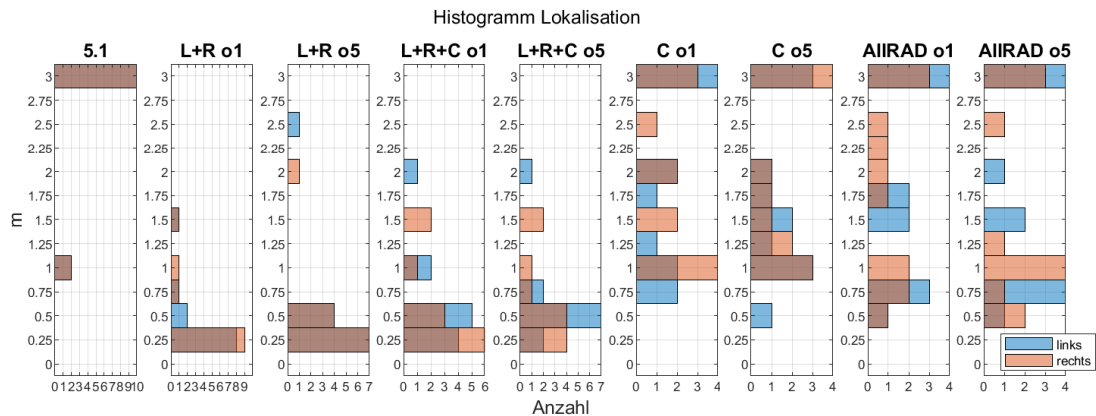


Abbildung 13 – Histogramme der Längen der Sweetline für Lokalisation

4.2 Multivariate Hypothesentests

Die Unterschiede in den Bewertungen wurden mit einem Wilcoxon Vorzeichenreihungstest mit Bonferroni-Holm Korrektur auf Signifikanz untersucht. Die Ergebnisse dieser Tests mit einem Fehlerniveau von $\alpha = 0.05$ sind in Abbildung 14 und 15 dargestellt.

Quellbreite

Bei der Quellbreite ist der Unterschied zwischen den Schallstrahlen erster und fünfter Ordnung nur für den Schallstrahl Rechts (R) signifikant ($p = 0.0210$). Die Bewertungen für die Centerquelle sind zu den meisten anderen Quellen signifikant unterschiedlich. Mit Rauschen als Quellsignal sind lediglich die Unterschiede zwischen den virtuellen Centerquellen in erster, bzw. fünfter Ordnung zu allen anderen Quellen signifikant ($0.0151 < p < 0.0220$).

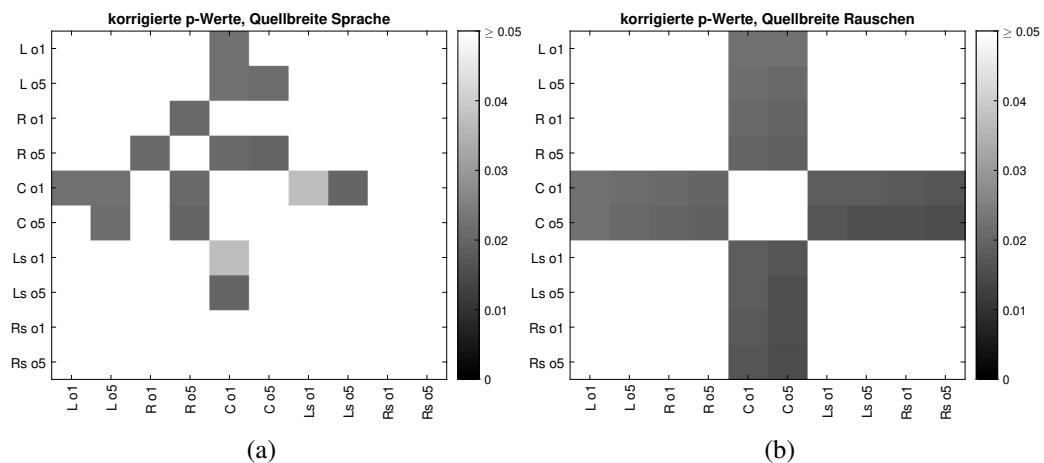


Abbildung 14 – Korrigierte p-Werte für a) Sprache und b) Rosa Rauschen. Die weißen Bereiche indizieren Werte oberhalb des Signifikanzniveaus ($p > 0.05$)

Lokalisation

Die offensichtlichen Unterschiede in der Länge der Sweetline zwischen realem Center Lautsprecher (5.1) und den direkten Schallstrahlen (L+R), bzw. der Mischung mit der virtuellen Centerquelle (L+R+C) lassen sich auch statistisch signifikant belegen ($0.0342 < p < 0.454$). Die virtuellen Centerquellen in erster, bzw. fünfter Ordnung (C o1/o5) bringen eine signifikant längere Sweetline als die direkten Schallstrahlen erster Ordnung (L+R o1) ($p = 0.0176$, bzw. $p = 0.0342$). Die AllRAD-Konfiguration in erster Ordnung hingegen bringt nur einen schwach signifikanten Unterschied zu den Direktschallstrahlen (L+R o1) erster Ordnung ($p = 0.0425$).

Einhüllung

Hier bringt die 5.1 Aufstellung eine signifikant längere Sweetline als die AllRAD-Konfiguration mit Schallstrahlen erster, bzw. fünfter Ordnung mit sich ($p = 0.0010$, bzw. $p = 0.005$). Die AllRAD-Konfiguration mit Schallstrahlen erster Ordnung bringt nur eine schwach signifikant längere Sweetline als für Schallstrahlen fünfter Ordnung mit sich ($p = 0.0458$).

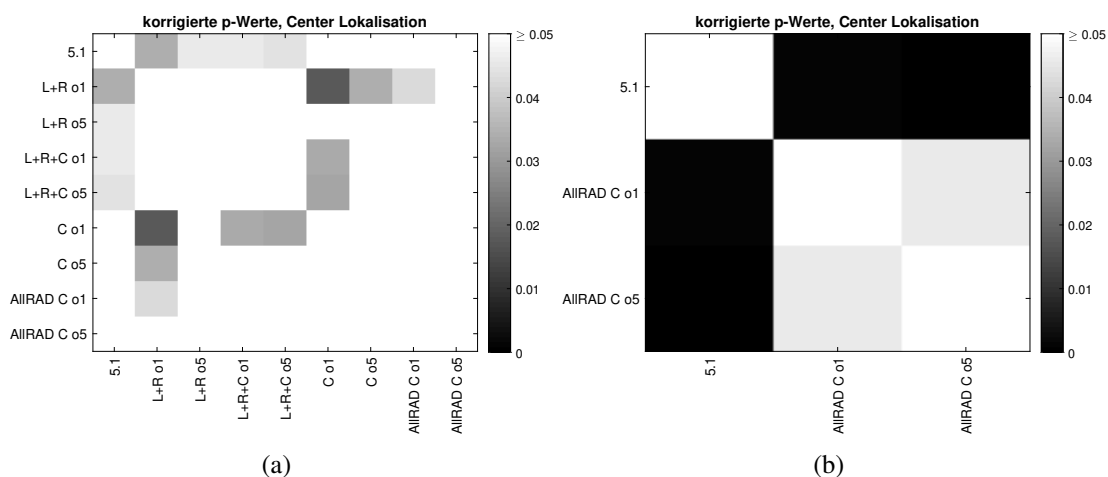


Abbildung 15 – Korrigierte p-Werte für a) Lokalisation und b) Einhüllung. Die weißen Bereiche indizieren Werte oberhalb des Signifikanzniveaus ($p > 0.05$)

4.3 Diskussion

Quellbreite

Insgesamt hat sich die Erwartung, dass reflektierte Quellen breiter wahrgenommen werden, erfüllt. Eine Ursache lässt sich geometrisch erklären, da der Schall einen längeren Laufweg zur Abhörposition zurücklegt und durch die resultierende Pegelabnahme das Pegelverhältnis von Spiegelquelle zu Diffusschall abnimmt.

Für die direkten Schallstrahlen lässt sich mit höherer Ordnung ein Trend zu schmaler Quellbreite erkennen. Dies überrascht nicht, da eine höhere Ordnung eine stärkere Bündelung und somit einen größeren Hallradius - also größeres direkt-diffus-Verhältnis - an der Hörposition mit sich bringt. Dieser Trend ist jedoch nur für die Richtung *Rechts* signifikant - für eine deutlichere Aussage müssten mehr Datenpunkte erhoben werden. Die schwächeren Unterschiede zwischen den verschiedenen Ordnungen bei Reflexionen sind auch dadurch zu erklären, dass die max- r_E -gewichteten Schallstrahlen natürlich weiterhin Nebenkeulen besitzen, die den restlichen Raum anregen und zur Diffusität beitragen.

Da der virtuelle Centerlautsprecher aus zwei Schallstrahlen konstruiert wird, ist die diffuse Anregung des Raums größer als mit einem Schallstrahl. Dies mag erklären, warum diese Quelle als *am breitesten* wahrgenommen wird.

Lokalisation

In diesem Experiment wurden die Probanden gebeten sich selbstständig auf der Sweetline zu bewegen, was natürlich einige Variation des subjektiv wahrgenommenen Schallfeldes mit sich bringt (i.e. Körpergröße, Kopfneigung, Raummoden an bestimmten Positionen etc.). Um die ortsvarianten Kammfilter bei mehrkanaliger Wiedergabe möglichst wenig zu betonen wurde hier als Testsignal eine Sprachaufnahme benutzt.

In diesem Versuch hat sich gezeigt, dass der virtuelle Centerlautsprecher bessere Ergebnisse liefert als die direkten Quellen L+R. Dies kann damit erklärt werden, dass die gedachten Spiegelquellen der Schallstrahlen eine größere Entfernung als die direkten Quellen besitzen und somit der Einfluss von Laufzeit- und Pegelunterschieden bei Abweichung von der Mitte viel geringer ist. Die so konstruierte virtuelle Phantomschallquelle ist in der Richtung stabiler als die direkte. Zusätzlich sind die beiden ageregten Reflexionspfade aber auch weniger scharf als ein direkter Centerkanal, und sie werden unschärfer und breiter lokalisiert wahrgenommen, wie sich im vorherigen Versuch gezeigt hat.

Das L+R+C-Setup wurde vergleichsweise schlecht eingestuft. Eine Pegelanpassung des Centerlautsprechers (z.B. -3dB wegen doppelter Schallstrahlen) zu den L und R Schallstrahlen könnte hier eine Verbesserung mit sich bringen. Weiters könnte man die Inhomogenität des Schallfelds mit diffusem Center zu direkten L und R Schallstrahlen ausgleichen, indem man die Form der Schallstrahlen für die direkten Quellen links und rechts variiert. Beispielsweise könnte eine omni-direktionale Abstrahlung eine bessere Angleichung an die virtuelle Centerquelle bringen.

Wie in Abbildung 13 zu sehen, ergeben sich für die Konfigurationen Center und AllRAD zwei Häufungspunkte. Für Center ist dies damit zu erklären, dass die zur Tafel gerichteten Schallstrahlen eine Nebenkeule in -180° -Richtung haben, die bei circa 1 – 1,5 m

durchschritten werden. Da bei der AllRAD-Konfiguration immer alle Quellen mitspielen, gibt es bei einer ähnlichen Entfernung einen Schnittpunkt der Sweet-Line mit dem Pfad des Schallstrahls für Rechts-, bzw. Links-Surround. Diese Kreuzung beeinträchtigt natürlich die Lokalisation, da ab einer genügend entfernten Hörposition außerhalb der Mitte ein Hörereignis vom nächstgelegenen Lautsprecher wahrgenommen wird.

Einhüllung

Man würde zunächst vielleicht annehmen, dass die Reflexionen bei der 393-Surroundwiedergabe das Schallfeld diffuser als bei der 5.1-Surroundwiedergabe machen, doch die Ergebnisse in diesem Versuch zeigen ein anderes Bild. Das 5.1 Setup wurde von den Probanden eindeutig in einem breiterem Bereich als einhüllend empfunden. Wie beim vorigen Experiment kam es dazu, dass bei ca. 1 – 1,5 m die Surround-Schallstrahlen durchlaufen wurden und so der Eindruck der Einhüllung zerfällt. Weiter außerhalb ist die Einhüllung wieder stabil. Es wäre interessant den gleichen Versuch noch einmal unter Berücksichtigung dieses Faktors zu wiederholen. Es zeigt sich hier wieder, dass die Ordnung der Schallstrahlen keinen signifikanten Unterschied bringen.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Für die Surroundwiedergabe mit 393-Lautsprechern konnten wir zeigen, dass die wahrgenommene Quellbreite des über Wandreflexionen erzeugten virtuellen Lautsprechers deutlich größer ist, als die wahrgenommene Quellbreite der über Direktschall erzeugten Höreignisse. Des Weiteren haben wir gezeigt, dass sich die Breite der Sweetline durch einen virtuellen Center-Lautsprecher im Gegensatz zur Phantomschallquelle eines physischen stereophonen Lautsprecherpaars signifikant vergrößert. Zusätzlich konnten wir in den verschiedenen Versuchen die Rolle der Form der Schallstrahlen in diesen Situationen untersuchen. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Ordnung der Schallstrahlen bei direkter Beschallung einen weit größeren Einfluss haben bei Beschallung über Reflexionen beider 393-Lautsprecher. Dies gilt es aber noch in weiteren Versuchen mit einer größeren Anzahl an Probanden herauszufinden. In den Ergebnissen des dritten Hörversuchs hat sich gezeigt, dass die Konfiguration der Surround-Schallstrahlen mittels Reflektoren ungünstig gewählt wurde. Der Hörer sollte in keiner Position den direkten Pfad zu einer virtuellen Quelle kreuzen. Eine Verwendung der Seitenwände als Reflektoren für virtuelle Surroundquellen wäre sinnvoller und in weiteren Studien zu empfehlen. Dabei könnten weitere Schallstrahlen im hinteren Bereich die Abbildung verbessern. Diese Einflüsse können in einer Wiederholung des Experiments nützlich sein um dieses entsprechend anzupassen.

Literatur

- [DMKZF18] T. Deppisch, N. Meyer-Kahlen, F. Zotter, and M. Frank, “Surround with depth on first-order beam-controlling loudspeakers,” in *Audio Engineering Society Convention 144*, May 2018. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19494>
- [EBU08] EBU, “Ebu sqam cd sound quality assessment material recordings for subjective tests,” 2008.
- [MK19] N. Meyer-Kahlen, “Surround playback on the icosahedral loudspeaker,” Toningenieursprojekt, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Kunstuni Graz, Technical University Graz, 08 2019.
- [MKZP18] N. Meyer-Kahlen, F. Zotter, and K. Pollack, “Design and measurement of first-order, horizontally beam-controlling loudspeaker cube,” 05 2018.
- [PBA15] M. A. Poletti, T. Betlehem, and T. D. Abhayapala, “Higher-order loudspeakers and active compensation for improved 2d sound field reproduction in rooms,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 63, no. 1/2, pp. 31–45, January 2015.
- [R⁺19] D. Rudrich *et al.*, “Iem plug-in suite,” *University of Music and Performing Arts, Graz, Austria: Institute of Electronic Music and Acoustics*. <https://plugins.iem.at/>(Accessed: February 2020), 2019.
- [RZ20] S. Riedel and F. Zotter, “Design, control and evaluation of mixed-order compact spherical loudspeaker arrays,” 11 2020.
- [RZH19] S. Riedel, F. Zotter, and R. Höldrich, “Design and control of mixed-order spherical loudspeaker arrays,” 05 2019.
- [Tak06] S. Takumai, “Loudspeaker array device and method for setting sound beam of loudspeaker array device,” WIPO patent WO 2,006,001,272 A1, filed 21 June 2005, and granted 5 January 2006, 2006.
- [ZF12] F. Zotter and M. Frank, “All-round ambisonic panning and decoding,” *Journal of The Audio Engineering Society*, vol. 60, pp. 807–820, 2012.
- [ZZFK17] F. Zotter, M. Zaunschirm, M. Frank, and M. Kronlachner, “A beamformer to play with wall reflections: The icosahedral loudspeaker,” *Computer Music Journal*, vol. 41, pp. 50–68, 09 2017.