

Untersuchungen zur räumlichen Genauigkeit bei der binauralen Auralisation von Kugelarraydaten

Masterarbeit

von

Annika Neidhardt

Graz 2015

Institut für Elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Technische Universität Graz

Prüfer: O.Univ.Prof.Mag.art.DI Dr.techn.Robert Höldrich
Betreuer: O.Univ.Prof.Mag.art.DI Dr.techn.Robert Höldrich

Kurzfassung

Kugelförmige Mikrofonarrays erlauben eine dreidimensionale Abtastung räumlicher Schallfelder. Die aufgezeichneten Messdaten können auf verschiedenen räumlichen Lautsprecheranordnungen oder auch mit Hilfe von Binauraltechnologie über Kopfhörer auralisiert werden. Die (räumliche) Qualität der Wiedergabe hängt dabei direkt von der verwendeten Arraykonfiguration und der entsprechenden Signalverarbeitung ab. Beim Entwurf von Mikrofonarrays ist die Aliasingfrequenz ein wesentliches Designkriterium. Dennoch gibt es sehr verschiedene Arraykonfigurationen mit einer mathematisch gleichen Aliasingfrequenz. Inwiefern die unterschiedlichen Anordnungen in einer Auralisation zu hörbaren Unterschieden führen, ist unklar.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird untersucht, wie sich die Genauigkeiten bei der räumlichen Abtastung auf die Qualität der binauralen Auralisation auswirkt. Eine angemessene Vorverarbeitung entsprechend des Standes der Technik liegt dem zugrunde. Dabei werden verschiedene sphärische Mikrofonanordnungen mit gleicher Aliasingfrequenz psychoakustisch untersucht.

Um einige praktische Fehlerquellen ausschließen zu können, erfolgt die Untersuchung zunächst anhand von simulierten Mikrofonarrayaufnahmen eines virtuellen Raumes. Diese Aufnahmen werden in den Bereich der Sphärischen Harmonischen überführt und die binauralen Raumimpulsantworten für die Auralisation daraus errechnet. Die Auralisationen der verschiedenen Arraykonfigurationen werden in einem Hörversuch bezüglich Gesamtqualität, Klangfarbe und wahrgenommener Externalität gegenübergestellt. Als Referenz dienen simulierte Kunstkopfaufnahmen derselben Szene. Neben unterschiedlichen Arraykonfigurationen werden in dem Experiment auch verschiedene Quellpositionen und Testsignale betrachtet. Ziel ist es, detailliertere Informationen darüber zu gewinnen, wie ein optimales Mikrofonarray entworfen werden kann.

Abstract

Spherical microphone arrays enable a three-dimensional sampling of spatial soundfields. The recorded data can be auralized with different spatial arrangements of loudspeakers or with binaural technology via headphones. The (spatial) quality of the playback directly depends on the microphone array configuration and the combination with an appropriate signal processing.

For the design of spherical microphone arrays the aliasing frequency is a decisive parameter. But there are very different array configurations with mathematically the same aliasing frequency. To what extent these different arrangements cause hearable differences in an auralization, remains unclear.

Within this master's thesis the effect of the spatial sampling accuracy on the quality of the binaural auralization of the recordings is examined. A signal processing according to the state of the art is fundamental for this study. Therefore, different microphone array configurations with equal aliasing frequencies are taken into account.

To exclude some practical sources of error, simulated microphone array recordings in a virtual room are considered in this investigation. The resulting array data are transferred to the spherical harmonics domain. From this representation binaural room impulse responses for the auralization are calculated.

The auralized recordings of the different arrays will be compared in a listening experiment with regard to the overall quality, colouration and perceived externalization. As a reference a virtual head and torso simulator is placed in the same scene. Besides various array configurations, different sound source positions and source signals are considered.

The goal of this investigation is to gain more detailed information about how an optimal microphone array could be designed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ziel der Untersuchung	1
1.2	Gliederung der Arbeit	2
2	Grundlegende Begriffe und Vorgehensweisen	3
2.1	Kugelförmige Mikrofonarrays	3
2.1.1	Kugelförmige Mikrofonarrays in der Praxis	4
2.1.2	Mathematische Analyse von Arraydaten	5
2.1.2.1	Sphärische Fouriertransformation	5
2.1.2.2	Inverse Sphärische Fouriertransformation	6
2.1.2.3	Plane-Wave Decomposition	6
2.1.3	Open Sphere mit Nierenmikrofonen	8
2.1.4	Räumliche Abtastung	9
2.1.4.1	Diskrete Sphärische Fouriertransformation (DSFT)	9
2.1.4.2	Sampling Strategien	11
2.1.4.3	Spatial Aliasing	11
2.1.5	Mikrofonarray-Design	12
3	Psychoakustische Untersuchung anhand von Binauralauralisation – Stand der Technik	13
3.1	Binauralauralisation	13
3.1.1	Darstellungsformen für HRTFs	13
3.1.2	Allgemeines Vorgehen	14
3.1.3	Wahrnehmungsaspekte bei Auralisation mittels dynamischer Bi- nauralsynthese	15
3.1.4	Begrenzung der Verstärkung - Regularisierung	17
3.2	Psychoakustische Analyse von Mikrofonarrayaufnahmen	17
3.2.1	Bekannte psychoakustischer Effekte	17

3.2.2	Psychoakustische Analyse	18
3.2.3	Equalizing-Strategien	19
4	Umsetzung	21
4.1	Simulation	21
4.1.1	Erstellung von SRIRs mit verschiedenen Arraykonfigurationen	21
4.1.2	Simulation des Rauschens bei der Aufnahme	23
4.1.3	Arrayprocessing - Errechnung der räumlichen Fourierkoeffizien- ten und Radialfilter	23
4.1.4	Wahl und Vorbereitung der HRTF	23
4.1.5	Realisierung der Auralisation	24
4.1.6	Erstellung der Referenz - Simulation einer Kunstkopfaufnahme	24
4.1.7	Wiedergabe und Tracking	25
4.2	Hörversuch	26
4.2.1	Vorüberlegungen und Vortests	26
4.2.1.1	Informelle Vortests	26
4.2.1.2	Vorüberlegungen	27
4.2.2	Konzeption des Hörversuchs	28
4.2.3	Durchführung	29
4.2.3.1	Beschreibung der verwendeten Sound Samples	29
4.2.3.2	Beschreibung der Probanden	31
4.2.3.3	Beschreibung eines Versuchsdurchlaufs	32
5	Ergebnisse und Auswertung	34
5.1	Ergebnisse des Hörversuchs	34
5.1.1	Gesamtqualität	34
5.1.2	Klangfarbe	36
5.1.3	Externalisierung	37
5.2	Varianzanalyse und Interpretation	38
5.2.1	Betrachtung der einzelnen Arrays	39
5.2.1.1	Unterschiede zur Referenz	39
5.2.1.2	Unterschiede zwischen den Arraykonfigurationen . .	40
5.2.1.3	Arrays mit unterschiedlichem Radius bei gleicher Ord- nung	41
5.2.1.4	Arrays mit gleichem Radius	41
5.3	Diskussion der Ergebnisse	43
5.3.1	Wahrgenommene Gesamtqualität	43

5.3.2	Wahrgenommene Klangfarbe bzw. Klangverfärbung	44
5.3.3	Wahrgenommene Externalisierung	45
5.3.4	Fehlerbetrachtung zur allgemeinen Vorgehensweise	47
6	Zusammenfassung und Fazit	49
6.1	Ausblick	50
	Bibliography	52
A	Errechnung der Nachhallzeit und des Hallradius des virtuellen Raumes	57
B	Anleitung und Fragebogen für die Probanden im Hörversuch	59
C	Ergebnisse im Überblick	62
C.1	Hörversuchsergebnisse: Überblick der Mittelwerte	62
C.2	Ergebnisse der ANOVA	63
C.3	Individuelle Bewertungen der Externalität	66

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiel für ein kugelförmiges Mikrofonarray 4. Ordnung: Eigenmike mit 32 Mikrofonen und einen Radius von 4,2cm [mha15]	4
2.2	Beispiel einer Open Sphere Mikrofonarray-Anordnung mit variablem Radius und variabler maximaler Ordnung: Die VariSphear-Messvorrichtung [Pic15]	5
2.3	Verlauf des Betrages von $b_n(kr)$ für $n = 0, \dots, 3$ eines Rigid Sphere Arrays mit $r = r_a$ und eines Open Sphere Arrays [Raf15]	7
2.4	Verlauf des Betrages von $b_n(kr)$ für $n = 0, \dots, 3$ einer Open Sphere Anordnung mit Druckempfängern und mit Druckgradientenempfängern [Raf15]	9
4.1	Simulation eines Mikrofonarrays 5. Ordnung in MCRoomSim	22
4.2	Beispiel einer simulierten Raumimpulsantwort von einer Schallquelle zu einem Mikrofon des Kugelarrays in MCRoomSim	22
4.3	Modale Verstärkung $ d_n(kr) $ für $n = 0, \dots, 5$ für ein Open Sphere Array aus Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik ohne Limitierung und Softlimiting-Regularisierung	24
4.4	Virtueller Raum mit den Maßen $20 \times 12, 5 \times 8m$ und einer Kunstkopfposition (blau, Pfeil zeigt in Blickrichtung) bzw. Mikrofonarrayposition bei $(x, y, z) = (7.5, 5, 2)$	30
4.5	Überblick zur Hörerfahrung der Probanden (Selbsteinschätzung) . . .	32
4.6	Nutzeroberfläche für den Hörversuch - Es kann zwischen mehreren verschiedenen dynamischen Auralisationen im Wechsel umgeschaltet werden, während das Headtracking aktiv bleibt	33
5.1	Bewertung der Gesamtqualität für $f_{alias} = 2000Hz$	35
5.2	Bewertung der Gesamtqualität für $f_{alias} = 6000Hz$	35
5.3	Bewertungen der Klangfarbe für $f_{alias} = 2000Hz$	36
5.4	Bewertungen der Klangfarbe für $f_{alias} = 6000Hz$	37

5.5	Bewertungen der Externalisierung für $f_{alias} = 2000Hz$	38
5.6	Bewertungen der Externalisierung für $f_{alias} = 6000Hz$	38
5.7	Regularisierte modale Verstärkung $ d_n(kr) $ für $n = 0, \dots, 9$ für ein Open Sphere Array aus Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik	43
5.8	Überblick zur Systemmodellierung mit Rauschen	48
C.1	Individuelle Bewertung der Externalität	66
C.2	Individuelle Bewertung der Externalität	67
C.3	Individuelle Bewertung der Externalität	68

Kapitel 1

Einleitung

Kugelförmige Mikrofonarrays bieten die Möglichkeit, räumliche Schallfelder aufzuzeichnen, zu analysieren und zu auralisieren. Eine Auralisation kann über räumliche Lautsprecheranordnungen, sowie mittels Binauraltechnologie über Kopfhörer erfolgen. Ein kugelförmiges Mikrofonarray aus unendlichen vielen, unendlichen kleinen Mikrofonen kann das reale Schallfeld theoretisch exakt erfassen. Reale Mikrofonarrays mit begrenzter Mikrofonzahl hingegen können Schallfelder nur mit begrenzter Genauigkeit aufzeichnen. In der Auralisation wirkt sich das durch mehr oder weniger hörbare Fehler und Abweichungen aus, wie z.B. Aliasingartefakte oder Klangverfärbungen.

1.1 Motivation und Ziel der Untersuchung

In der Forschung werden seit einigen Jahren verschiedene Ansätze vorgestellt, wie diese Fehler durch ein geeignetes Arraydesign und passende Signalverarbeitung reduziert werden können. Viele der Untersuchungen basieren auf theoretischen Überlegungen und mathematischen Betrachtungen. Gerade die Dimensionierung verschiedener Parameter in den Berechnungen sollten durch Hörversuche in Bezug auf Hörbarkeit und Ausmaß der Qualitätsbeeinträchtigung der Auralisation erfolgen. Das ist bisher nicht in ausreichendem Maß geschehen.

Diese Masterarbeit soll einen Beitrag zur besseren Kenntnis der hörbaren Auswirkungen des Arraysetups und der entsprechenden Verarbeitung leisten. Dazu werden die Auralisationen von simulierten Aufnahmen mit verschiedenen Mikrofonarraykonfigurationen psychoakustisch gegenübergestellt. In einem Hörversuch werden insbesondere Arrays mit theoretisch gleicher Aliasingfrequenz betrachtet, um zu analysieren, welche Aspekte sich über die Aliasingfrequenz hinaus hörbar auf die Qualität einer Auralisation auswirken.

1.2 Gliederung der Arbeit

Zunächst werden einige fundamentale Begriffe und Vorgehensweisen näher erläutert. Dabei wird ganz allgemein auf kugelförmige Mikrofonarrays, die wesentlichen mathematischen Grundlagen, das Prinzip der räumlichen Abtastung entlang einer Kugeloberfläche eingegangen. Des Weiteren werden wesentliche Aspekte der Binauralauralisation, sowie der dynamischen Binauralsynthese vorgestellt.

In Kapitel 3 wird der Stand der Forschung in Bezug auf hörbare Artefakte durch diskretes Abtasten eines Schallfeldes entlang einer Kugeloberfläche dargestellt. Dies beinhaltet eine Erläuterung der verschiedenen Artefaktkategorien sowie deren Ursachen. Außerdem werden aktuelle Arbeiten und Ansätze zur Verminderung oder Behebung dieser Artefakte vorgestellt. Insbesondere wird auf einige psychoakustische Betrachtungen des Sachverhaltes eingegangen.

Kapitel 4 enthält die Dokumentation der einzelnen praktischen Schritte in dieser Untersuchung. Im ersten Abschnitt wird die technische Realisierung von Simulation und dynamischer Auralisation beschrieben. Der zweite Abschnitt dient der Schilderung der Hörversuchsdurchführung.

Im fünften Kapitel werden die Ergebnisse des Hörversuchs präsentiert, analysiert und diskutiert.

Das sechste Kapitel enthält eine Zusammenfassung der Untersuchung, sowie der wesentlichen Erkenntnisse. Des Weiteren wird ein Ausblick auf interessante weiterführende Untersuchungen gegeben.

Kapitel 2

Grundlegende Begriffe und Vorgehensweisen

2.1 Kugelförmige Mikrofonarrays

Mikrofone in einem sphärischen Array können nach innen gerichtet sein, um beispielsweise die Abstrahlcharakteristik verschiedener Schallquellen zu erfassen. Zur Erfassung von Raumakustik und räumlichen Audioszenen werden die Mikrofone nach außen gerichtet. Diese Art von Mikrofonarrays stehen im Fokus der Untersuchungen in dieser Masterarbeit.

Des Weiteren wird zwischen *rigid sphere* und *open sphere*-Arrays unterschieden. In open sphere Arrays wird das Schallfeld entlang der Oberfläche einer gedachten Kugel abgetastet. Von rigid sphere wird gesprochen, wenn die Mikrofone in einer Kugel mit fester Oberfläche angeordnet sind, welche durch Reflexion Einfluss auf das aufgenommene Schallfeld nimmt. Dies muss beim Design von Mikrofonarrays, als auch bei der Analyse der aufgenommenen Daten beachtet werden.

Darüber hinaus sind Anzahl, sowie Anordnung der Mikrofone, als auch der Radius der abgetasteten Kugeloberfläche entscheidend für die Qualität der räumlichen Aufnahmen. Auch mit der Auswahl der Mikrofone, z.B. die Festlegung der Richtcharakteristik, werden wesentliche Eigenschaften des Arrays gestaltet.

Bevor die Zusammenhänge näher erläutert werden, gibt der nächste Abschnitt einen Einblick in die Praxis.

2.1.1 Kugelförmige Mikrofonarrays in der Praxis

Sehr bekannt und oft genutzt ist das *Eigenmike* der Firma *mhacoustics* (Abbildung 2.1). Es besteht aus 32 Mikrofonen, die entlang einer festen Kugeloberfläche mit dem Radius 4,2cm angeordnet sind. Das Eigenmike gehört damit zu den *rigid sphere arrays*.



Abbildung 2.1: Beispiel für ein kugelförmiges Mikrofonarray 4. Ordnung: Eigenmike mit 32 Mikrofonen und einen Radius von 4,2cm [mha15]

Eine speziell in der Forschung häufig genutzte *open sphere* Anordnung ist die VariSphear-Messvorrichtung [BPSW10] (Abbildung 2.2). Es ist im Wesentlichen eine Vorrichtung, mit welcher ein Mikrofon entlang verschiedener Kugeloberflächen positioniert werden kann. Ein Vorteil des Systems ist, dass damit verschiedenste Samplingstrategien sowie verschiedene Kugelradien bei der Erfassung von Schallfeldern umgesetzt werden können. Außerdem ist es für die Schallfeldanalyse vorteilhaft, dass immer das gleiche Mikrofon verwendet wird. Die Schallfeldabtastung erfolgt jedoch sukzessive. Daher eignet sich das VariSphear nur zur messtechnischen Schallfeldanalyse und nicht für tatsächliche räumliche Mitschnitte.

Welche Arraygröße für eine Anwendung günstig ist und wieviele Mikrofone es haben sollte, hängt auch von der Anwendung und den entsprechenden Anforderungen ab. Es ist sinnvoll, beim Entwurf auch die theoretischen Hintergründe und mathematischen Möglichkeiten der Analyse in Betracht zu ziehen. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Einblick in die grundlegende Vorgehensweise.

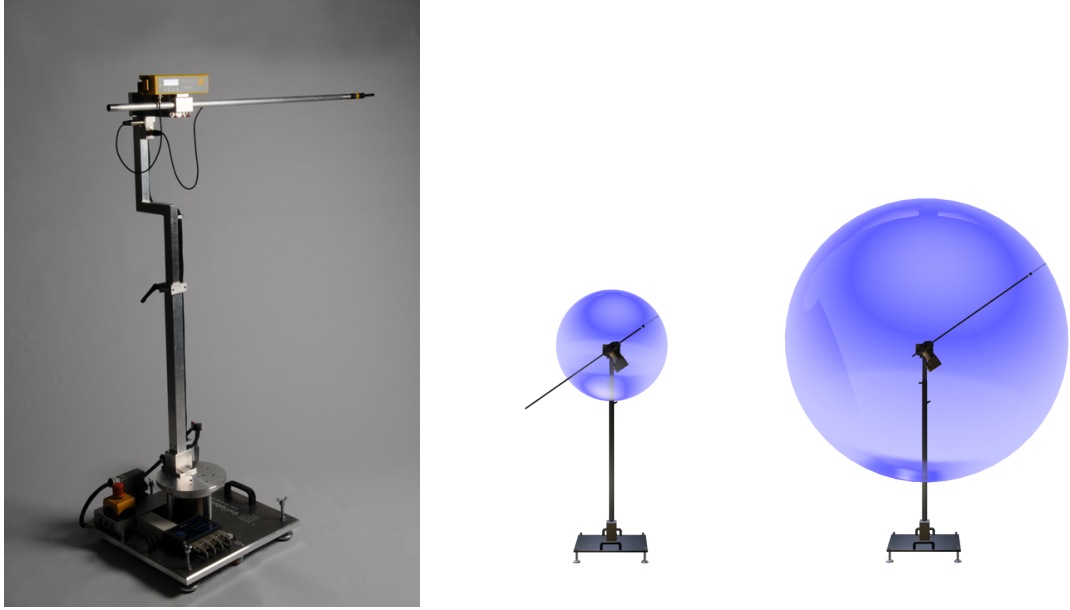


Abbildung 2.2: Beispiel einer Open Sphere Mikrofonarray-Anordnung mit variablem Radius und variabler maximaler Ordnung: Die VariSphear-Messvorrichtung [Pic15]

2.1.2 Mathematische Analyse von Arraydaten

2.1.2.1 Sphärische Fouriertransformation

Die Sphärische Fouriertransformation wird auch als Sphärische Harmonische Zerlegung (Spherical Harmonics decomposition) bezeichnet, denn mit Hilfe dieser Transformation werden Koeffizienten f_{nm} für die einzelnen Ordnungen n und Modi m der Sphärischen Harmonischen Y_n^m bestimmt. Die Sphärischen Harmonischen sind wie folgt definiert:

$$Y_n^m(\theta, \phi) \equiv \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos\theta) e^{im\phi} \quad (2.1)$$

wobei n die Nummer der sphärischen Harmonischen repräsentiert und $i = \sqrt{-1}$. P_n^m ist die Legendre Funktion, welche stehende sphärische Wellen in θ beschreibt [Raf05]. Die sphärische Fouriertransformation der Funktion $f(\theta, \phi)$ erfolgt unter Verwendung der Komplex-Konjugierten der Sphärischen Harmonischen (mit $*$ gekennzeichnet):

$$[Y_n^m(\theta_k, \phi_k)]^* = (-1)^m Y_n^{-m}(\theta, \phi) \quad (2.2)$$

$$f_{nm} = \int_{\Omega \in S^2} f(\theta, \phi) Y_n^{m*}(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.3)$$

wobei $\int_{\Omega \in S^2} d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin\theta d\theta d\phi$ mit $\Omega = (\theta, \phi)$ [Raf04].

S^2 kennzeichnet die Oberfläche der Einheitskugel, über welcher das Integral gebildet wird. Voraussetzung für die Anwendung ist, dass $f(\theta, \phi)$ über der Einheitskugel quadratisch integrierbar ist.

Die Sphärische Fouriertransformation dient unter anderem der Analyse von Kugelmikrofonarrayaufnahmen und deren Überführung in den Bereich der Sphärischen Harmonischen.

2.1.2.2 Inverse Sphärische Fouriertransformation

Bei der inversen sphärischen Fouriertransformation wird mittels einer entsprechend der Koeffizienten f_{nm} gewichteten Überlagerung der Sphärischen Harmonischen die Funktion $f(\theta, \phi)$ entlang der Kugeloberfläche bestimmt:

$$f(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n f_{nm} Y_n^m(\theta, \phi) \quad (2.4)$$

Diese Vorgehensweise findet beispielsweise bei der Auralisation von Kugelmikrofonarrayaufnahmen Anwendung. Dabei wird das Schallfeld entlang der Kugeloberfläche aus einer Schallfeldrepräsentation im Bereich der Sphärischen Harmonischen rekonstruiert.

2.1.2.3 Plane-Wave Decomposition

Mit Hilfe der Plane-Wave Decomposition (PWD) kann das Schallfeld in einem quellfreien sphärischen Volumen als Summe einfallender ebener Wellen aus den verschiedenen Richtungen ausgedrückt werden [Wil99]. Die Plane-Wave Decomposition kann daher genutzt werden, um räumliche Informationen aus modalen Schallfeldbeschreibungen zu extrahieren.

Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Schalldruck ist entlang der gesamten Kugeloberfläche bekannt
- Das einfallende Schallfeld ist aus ebenen Wellen zusammengesetzt

Trifft beispielsweise eine ebene Welle der Amplitude 1 aus Richtung (θ_l, ϕ_l) auf das Array, so kann der Schalldruck an der Position (r, θ, ϕ) auf einer Kugeloberfläche mit Hilfe sphärischer Harmonischer beschrieben werden [Raf04]:

$$p_l(kr, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n b_n(kr) Y_n^{m*}(\theta_l, \phi_l) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (2.5)$$

Die Kreiswellenzahl k ergibt sich aus $k = \frac{\omega}{c}$, wobei c die Schallgeschwindigkeit und ω die Kreisfrequenz bezeichnet. $b_n(kr)$ ist dabei abhängig von der Anordnung [Raf04]:

$$b_n(kr) = \begin{cases} 4\pi^n \left(j_n(kr) - \frac{j'_n(kr_a)}{h'_n(kr_a)} h_n(kr) \right), & \text{für Rigid Sphere} \\ 4\pi^n j_n(kr), & \text{für Open Sphere} \end{cases} \quad (2.6)$$

j_n und h_n sind die sphärischen Bessel- und Hankelfunktionen. j'_n und h'_n sind die jeweiligen ersten Ableitungen. r_a kennzeichnet den Radius des Rigid Sphere Arrays.

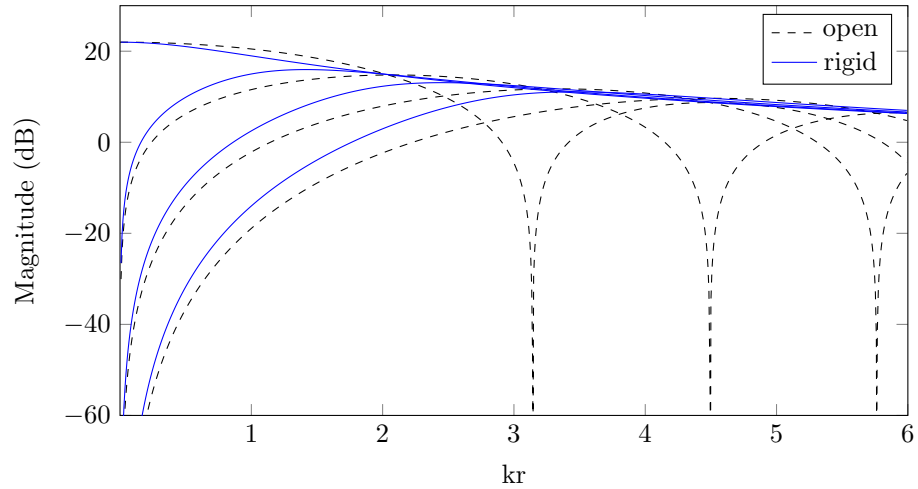


Abbildung 2.3: Verlauf des Betrages von $b_n(kr)$ für $n = 0, \dots, 3$ eines Rigid Sphere Arrays mit $r = r_a$ und eines Open Sphere Arrays [Raf15]

Bei der Betrachtung von Plane-Waves aus allen Richtungen $\Omega_l = (\theta_l, \phi_l)$ mit den Amplituden $a(k, \theta_l, \phi_l)$, ergibt sich die sphärisch Fouriertransformierte des Schalldrucks entlang der Kugeloberfläche mit:

$$\begin{aligned} p_{nm}(kr) &= \int_{\Omega_l \in S^2} a(k, \theta_l, \phi_l) b_n(kr) Y_n^{m*}(\theta_l, \phi_l) \\ &= a_{nm}(k) b_n(kr) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$b_n(kr)$ beschreibt die modalen Amplituden. Es ist ein wichtiges Maß, da es definiert, welcher Verlauf von $p_{nm}(k, r)$ entlang der Kugeloberfläche gemessen werden kann, wenn ein Plane-Wave-Schallfeld $a_{nm}(k)$ das Array umgibt. $b_n kr$ ist somit charakteristisch für das jeweilige Array. Um aus der Messung $p_{nm}(k, r)$ das Schallfeld $a_{nm}(k)$ zu errechnen, wird eine Division durch $b_n(kr)$ nötig.

Abbildung 2.3 zeigt den Verlauf von $|b_n(kr)|$ für Rigid Sphere Arrays und Open Sphere Arrays im Vergleich. Dabei fällt auf, dass der Betrag bei einem Open Sphere einige Einbrüche aufweist, welche den Verlauf der Besselfunktion widerspiegeln. Für Rigid Sphere Arrays verläuft der Betrag stabiler. Dennoch zeichnet sich für die einzelnen Ordnungen eine Bandpasswirkung ab.

Die Formeln (2.6) sowie die Verläufe in Abbildung 2.3 gelten nur unter der Annahme, dass die einzelnen Mikrofone des Arrays Druckempfänger mit jeweils kugelförmiger Richtcharakteristik sind.

2.1.3 Open Sphere mit Nierenmikrofonen

Ein Druckgradientenempfänger mit einer nierenförmigen Richtwirkung weist eine Empfindlichkeit von $s(\Theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos \Theta)$ auf, wobei Θ den Einfallswinkel beschreibt. Unter Berücksichtigung dieser Richtcharakteristik ergibt sich das für das Plane-Wave-Schallfeld $a_{nm}(k)$ entlang der Kugeloberfläche messbare $x_{nm}(kr)$ folgende Formel [Raf15]:

$$x_{nm}(kr) = 4\pi i^n [j_n(kr) - i j'_n(kr)] [Y_n^m(\theta_k, \phi_k)]^* \quad (2.8)$$

wobei $*$ die komplex Konjugierte darstellt (Gleichung 2.2).

$$b_n(kr) = 4\pi i^n [j_n(kr) - i j'_n(kr)] \quad (2.9)$$

In Abbildung 2.4 ist der Verlauf von $|b_n(kr)|$ für eine Open Sphere Anordnung mit Kugelmikrofonen und Nierenmikrofonen gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass bei der Verwendung von Nierenmikrofonen $b_n(kr)$ bereits für kleine Werte von kr einen höheren Betrag aufweist und dass die ungünstige Wirkung besonders kleiner Werte der Besselfunktion aufgehoben wird. Möglicherweise ist eine solche Anordnung weniger empfindlich auf Rauschen.

Es ist jedoch zu bedenken, dass Nierenmikrofone im Vergleich zu Kugelmikrofo-

nen in tiefen Frequenzen ein starkes Rauschverhalten aufweisen. Somit bleibt offen, ob sich in der Praxis tatsächlich eine merkliche Verbesserung einstellt [Raf15].

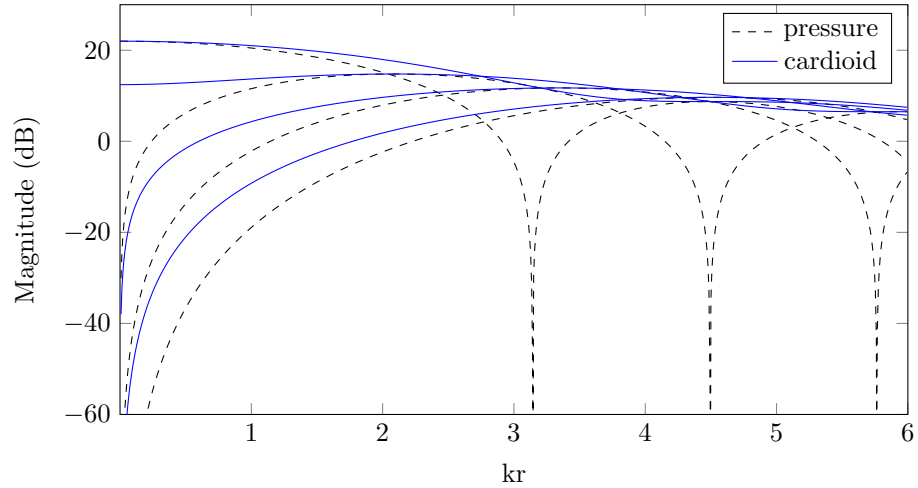


Abbildung 2.4: Verlauf des Betrages von $b_n(kr)$ für $n = 0, \dots, 3$ einer Open Sphere Anordnung mit Druckempfängern und mit Druckgradientenempfängern [Raf15]

Der Verlauf von $|b_n(kr)|$ ähnelt dem in einem Rigid Sphere Array. Daher lässt sich möglicherweise anhand der Untersuchungen von simulierten Open Sphere Anordnungen mit Cardioid-Mikrofonen auch die Verhaltensweise von Rigid Sphere Arrays abschätzen.

2.1.4 Räumliche Abtastung

Wird ein Schallfeld nicht kontinuierlich, sondern nur an bestimmten Punkten $q = 1, \dots, Q$ entlang einer Kugeloberfläche abgetastet, kann eine Zerlegung in Sphärische Harmonische anhand der Diskreten Sphärischen Fouriertransformation durchgeführt werden.

2.1.4.1 Diskrete Sphärische Fouriertransformation (DSFT)

Mit Hilfe der Diskreten Sphärischen Harmonischen Transformation (DSHT) werden die unbekannten Koeffizienten der Darstellung im Bereich der Sphärischen Harmonischen aus den winkel-diskreten Samples ermittelt.

Im Fall einer Funktion mit endlicher Ordnung können die Schallfeldsamples mit

Hilfe von sphärischen Harmonischen ausgedrückt werden:

$$f(\theta_q, \phi_q) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n f_{nm} Y_n^m(\theta_q, \phi_q) \quad (2.10)$$

Bei der Übertragung in eine Matrixschreibweise ergibt sich:

$$\mathbf{f} = \mathbf{Y} \mathbf{f}_{\mathbf{nm}} \quad (2.11)$$

wobei $\mathbf{f}$ ein Spaltenvektor der Länge Q , $\mathbf{f}_{\mathbf{nm}}$ ein Spaltenvektor der Länge $(N+1)^2$ und $\mathbf{Y}$ eine Matrix der Größe $Q \times (N+1)^2$ ist. N beschreibt dabei die maximale Ordnung, welche mit der Anordnung der Abtastpunkte eindeutig bestimmt werden kann.

Es müssen nun die Koeffizienten f_{nm} ermittelt werden.

Im Sonderfall $Q = (N+1)^2$ kann eine Lösung mit Hilfe der Inversen der Matrix $\mathbf{Y}$ erfolgen:

$$\mathbf{f}_{\mathbf{nm}} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{f} \quad (2.12)$$

Für $Q > (N+1)^2$ ist das Gleichungssystem (2.11) überbestimmt. Eine Lösung kann mit Hilfe der Pseudoinversen $\mathbf{Y}^\dagger = (\mathbf{Y}^H \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{Y}^H$ erfolgen.

Mit $Q < (N+1)^2$ liegt eine Unterabtastung vor, die hier nicht weiter betrachtet werden soll.

Für einige bestimmte Anordnungen der Abtastpunkte gibt es spezifische Berechnungsvorschriften. In diesen Fällen kann eine DSHT auch ohne eine Matrixinvertierung erfolgen. Es stehen dabei verschiedene Typen der DSHT zur Verfügung, die sich beispielsweise in Effizienz, Aliasingfehlern oder numerische Stabilität unterscheiden [Zot09]. Für die verschiedenen Typen bestehen verschiedene Anforderungen an die Sampling-Strategie. Insbesondere gleichmäßiges Sampling ist mathematisch von Vorteil, jedoch praktisch nicht immer zu realisieren.

2.1.4.2 Sampling Strategien

In der Praxis kommt vor allem folgenden Strategien eine größere Bedeutung zu [Raf05]:

Equiangle Sampling

Azimuth θ und Elevation ϕ werden gleichmäßig abgetastet. Die Anzahl der Abtastpunkte ist jedoch mit $4(N + 1)^2$ Samples vergleichsweise hoch.

Gaussian Sampling

Azimuth θ wird in $2(N + 1)^2$ Positionen gleichmäßig abgetastet, Elevation ϕ jedoch nicht. Der Vorteil dieser Anordnung liegt in der reduzierten Anzahl an Abtastpunkten gegenüber dem Equiangle Sampling.

Nearly Uniform Sampling

Dabei ist die Distanz zwischen benachbarten Mikrofonen (nahezu) gleich. Typisch ist eine Anordnung nach Lebedev [Leb92]. Für diese sind nur etwa $1,3(N + 1)^2$ Samples nötig.

2.1.4.3 Spatial Aliasing

Wird eine ordnungsbegrenzte Schallfeldfunktion entlang einer Kugeloberfläche in geeigneter Weise abgetastet, kann eine exakte Rekonstruktion erfolgen. Eine Schallfeldfunktion mit unbegrenzter oder zumindest sehr hoher Ordnung kann jedoch in der Praxis nicht ideal abgetastet werden. Eine nicht-ideale Abtastung erlaubt keine eindeutige Rekonstruktion. Es kommt zu Fehlern und man spricht von räumlichem Aliasing.

Im Fall einer Mikrofonanordnung nach Lebedev [Leb92] sind etwa $1,3 \cdot (N + 1)^2$ nötig, um das Schallfeld bis zu einer bestimmten maximalen Ordnung N zu erfassen. Für kr mit $kr \ll N$ werden die Ordnungen $n > N$ im Betrag gedämpft. Aliasing-Artefakte werden dabei als vernachlässigbar betrachtet. Für kr mit $kr > N$ kommt es zu hörbaren Artefakten durch Räumliches Aliasing [Raf07, AAG⁺13].

Eine Frequenz f , welche $N = kr = \frac{2\pi fr}{c}$ erfüllt, wird daher als *Aliasingfrequenz* bezeichnet, welche beim Entwurf eines Mikrofonarrays in Betracht gezogen werden muss. c ist die Schallgeschwindigkeit.

2.1.5 Mikrofonarray-Design

Die Aliasingfrequenz (Abschnitt 2.1.4.3) ist ein wesentliches Kriterium beim Entwurf von Mikrofonarrays. Sie wird vorwiegend durch die maximale Ordnung N und den Radius des Arrays bestimmt. Die Aliasingfrequenz könnte beispielsweise entsprechend einer bestimmten Zielanwendung gewählt und dann eine günstige Kombination aus N und r festgelegt werden. Dabei ist meist ein Kompromiss nötig.

Je größer das Array ist, desto robuster ist dieses bezüglich tiefer Frequenzen [ME02]. Dem entgegen steht, dass mit wachsendem Radius die obere Grenzfrequenz des Arrays abnimmt, welche durch das Spatial Aliasing bestimmt ist. Abhängig davon, nach welcher Sampling-Strategie die Abtastpunkte festgelegt werden, kann das Array das Schallfeld bis zu einer bestimmten Ordnung erfassen, ohne dass es zu Aliasing kommt. Dies ist die maximale Ordnung N des Arrays. Der Verlauf des Betrags von $b_n(kr)$ (siehe Abbildungen 2.3 und 2.4) zeigt, wie stark die Dämpfung der einzelnen Ordnungen zu höheren Frequenzen hin ausfällt. Der Verlauf der Dämpfung für die maximale Ordnung des Arrays bestimmt die obere Grenzfrequenz.

Der Entwurfsprozess beinhaltet ein auf die Zielanwendung angepasstes Abwägen der einzelnen Aspekte. Des Weiteren können auftretende Fehler oder Artefakte durch eine geeignete Nachverarbeitung der Aufnahmedaten zumindest reduziert werden. Daher sollten verfügbare Korrekturalgorithmen in den Designprozess einfließen.

Kapitel 3

Psychoakustische Untersuchung anhand von Binauralauralisation – Stand der Technik

3.1 Binauralauralisation

Bereits in [DZL⁺05] wurde eine Vorgehensweise zur binauralen Wiedergabe von Kugelmikrofonarrayaufnahmen vorgestellt und verifiziert. Psychoakustischen Studien wie [SEH08], [AR10], [AAG⁺13], [MTG⁺09] und [SVR14] basieren auf einer Binauralauralisation von sphärischen Arraydaten. Bevor einige für diese Arbeit relevante Untersuchungen näher erläutert werden, erklären die nächsten beiden Abschnitte, wie eine Binauralauralisation in geeigneter Weise erfolgen kann und was dabei zu beachten ist.

3.1.1 Darstellungsformen für HRTFs

Für eine binaurale Auralisation werden kopfbezogene Übertragungseigenschaften herangezogen. Diese können z.B. im Zeitbereich als sogenannte *head related impulse responses* (hrir) vorliegen und als räumlich diskrete FIR Filter angewendet werden. Für die Signalverarbeitung erfolgt eine Überführung in den Frequenzbereich. Es wird von räumlich diskreten, richtungsabhängigen *head related transfer functions* (HRTF) $H^l(k, \Omega)$ für links und $H^r(k, \Omega)$ für die rechte Seite gesprochen. Ω repräsentiert die möglichen Kombinationen aus Azimuth und Elevation, welche eine Kugel abdecken, d.h. $\Omega \equiv (\theta, \psi) \in S^2$. k ist die Kreiswellenzahl. Alternativ kann mit einer Repräsentation im Bereich der sphärischen Harmonischen $H_{nm}^l(k)$ und $H_{nm}^r(k)$ gear-

beitet werden. Diese wird durch Anwendung der sphärischen Fouriertransformation auf $H^l(k, \Omega)$ und $H^r(k, \Omega)$ erstellt. Einige Vor- und Nachteile beider Darstellungsformen werden in [RPFF14] aufgezeigt. Ein wichtiger Aspekt bei der Überführung in den Bereich der sphärischen Harmonischen ist, ob die HRTF-Daten in hoher räumlicher Auflösung vorliegen, um eine Darstellung möglichst hoher Ordnung zu erhalten. Im folgenden Abschnitt näher erläutert, in welcher Form sich die Ordnung der HRTF-Daten in der Auralisation auswirkt.

3.1.2 Allgemeines Vorgehen

Geeignete Kugelmikrofonarrayaufnahmen lassen sich in eine modale Beschreibung des aufgezeichneten Schallfeldes überführen. Theoretisch kann ein Satz an HRTFs ebenfalls in eine modale Beschreibung transformiert und durch Multiplikation im Bereich der Sphärischen Harmonischen auf die Schallfelddaten angewendet werden. Dem steht entgegen, dass in der Praxis Schallfeldbeschreibungen, welche durch Messungen oder mit Simulationswerkzeugen ermittelt wurden, oft nur mit relativ geringer Ordnung (z.B. $N = 5$) vorliegen. HRTFs enthalten jedoch insbesondere in höheren modalen Ordnungen wesentliche räumliche Informationen. Diese würde bei der beschriebenen Vorgehensweise, welche sich wie ein Tiefpass auswirkt, verloren gehen. Das hat sich auch in einigen Hörversuchen bestätigt [BVGPA14].

In der in [BVGPA14] vorgestellten Methode werden mittels Plane-Wave Decomposition (Abschnitt 2.1.2.3) räumliche bzw. richtungsbezogene Informationen aus der modalen Schallfeldbeschreibung ermittelt. Die errechnete Plane-Wave-Darstellung wird richtungsbezogen mit den entsprechenden Fernfeld-HRTFs gewichtet.

Für diese Vorgehensweise ist es wichtig, dass die räumlichen Abtastpunkte, auch als *nodes* bezeichnet, der PWD und der HRTFs übereinstimmen. Für die Untersuchung verschiedener Setups ist es allerdings bereits aus praktischer Sicht von Vorteil, wenn die HRTFs nicht für jede Konfiguration neu gemessen werden müssen. Es ist jedoch möglich, ein räumlich hoch aufgelöster Satz an HRTFs mit einer geeigneten Interpolationsmethode räumlich neu abzutasten (“spatial resampling”) [Ber14]. Auf diese Weise kann eine Anpassung der HRTF-nodes an die nodes der PWD erfolgen.

Dazu werden zunächst die HRTFs $H^{l,r}(\omega, \Omega)$ in das sphärische Wellenspektrum überführt:

$$\hat{H}_{nm}^{l,r}(\omega) = \sum_{g=1}^G H^{l,r}(\omega, \Omega_g) Y_n^m(\Omega_g)^* \beta_g \quad (3.1)$$

Mit Hilfe der inversen räumlichen Fouriertransformation werden die räumlich diskreten HRTFs für die nodes der PWD errechnet:

$$\tilde{H}^{l,r}(\omega, \Omega_c) = \sum_{n=0}^{N_i} \sum_{m=-n}^n \tilde{H}_{nm}^{l,r}(\omega) Y_n^m(\Omega_c) \quad (3.2)$$

Im letzten Bearbeitungsschritt werden die HRTFs auf das zerlegte Schallfeld angewendet und es ergibt sich ein Binauralsignal $Y^{l,r}(\omega)$ im Frequenzbereich:

$$Y^{l,r}(\omega) = \sum_{c=1}^C P_c(\omega, \Omega_c) \tilde{H}^{l,r}(\omega, \Omega_c) \beta_c \quad (3.3)$$

Mit dieser Vorgehensweise können auch binaurale Raumimpulsantworten (BRIRs) für variable Kopfausrichtungen generiert werden. Für eine Kopfrotation um beispielsweise 5° erfolgt bei dem spatial resampling der HRTFs zunächst noch eine Rotation in entsprechender Richtung.

Ein BRIR-Datensatz mit einer Azimutwinkelauflösung von beispielsweise 5° kann für eine dynamische Binauralsynthese mit Headtracking genutzt werden. Welche Aspekte dabei für eine psychoakustische Untersuchung beachtet werden müssen, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

3.1.3 Wahrnehmungsaspekte bei Auralisation mittels dynamischer Binauralsynthese

Individualisierte HRTFs scheinen bei der Lokalisation von Sprachquellen keine signifikanten Vorteile zu haben [BWA01, MHJS99]. Der Frequenzbereich von Sprache wird als weniger kritisch gegenüber individuellen Unterschieden angenommen. Nur in reflexionsarmer Umgebung war die Richtungslokalisation mit „eigenen Ohren“ geringfügig besser [MRT98]. Bei Rauschen oder impulshaften Signalen ist das Gehör jedoch kritischer.

Durch die Verwendung von Headtracking wird vor allem das Auftreten einer Vorne-Hinten-Vertauschung deutlich reduziert [BWA01]. Die Lokalisationsgenauigkeit mit einem durch Headtracking gesteuertem drehbaren Kunstkopf entspricht dem natürlichen Hören [MRT98].

In [LEW10] wird berichtet, dass die interaurale Zeitdifferenz (ITD), im HRTF-Datensatz an den Ohrabstand des jeweiligen Nutzers angepasst werden sollte, da es

sonst bei (getrackter) Kopfbewegung zu einem Mitlaufen oder Gegenlaufen der virtuellen Schallquelle kommt. Es entsteht also eine scheinbare Quellbewegung. Dennoch konnte in [BWA01] kein erhöhter Azimuthfehler bei Abweichung der ITD in einer Binauralwiedergabe mit Headtracking nachgewiesen werden.

Für die Umsetzung einer dynamischen Binauralsynthese werden typischerweise binaurale Raumimpulsantworten (BRIRs) herangezogen, welche für diskrete Kopfpositionen mit einer bestimmten Winkelauflösung gemessen (oder simuliert) wurden. Bei einer $2^\circ \times 2^\circ$ -Auflösung kann davon ausgegangen werden, dass die Wiedergabe frei von wahrnehmbaren Auflösungsartefakten ist. Für musikalische Stimuli und diffuse akustische Umgebungen ist eine $5^\circ \times 5^\circ$ -Auflösung ausreichend [LMW08].

Des Weiteren wurde in mehreren Studien geprüft, in welcher Form sich die systembedingte Verzögerung bei dynamischer Binauralsynthese mit Headtracking auf die Wahrnehmung der virtuellen auditiven Szene auswirkt. Nur sehr vereinzelt wird eine Total System Latency (TSL) unter $60ms$ überhaupt wahrgenommen. Der durchschnittliche Schwellwert liegt zwischen $60ms$ und etwas über $100ms$ [Lin09, BSK05]. Doch auch dann kommt es nicht unbedingt zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Lokalisation. Zunächst verursacht eine wahrnehmbare TSL, dass Testpersonen etwas mehr Zeit für die Lokalisationsaufgaben benötigten [San96].

Bei der Wiedergabe über Kopfhörer kann es zu Klangverfärbungen kommen, welche mittels Kopfhörerentzerrung reduziert werden können. In [SL09] werden verschiedene Verfahren anhand einer Auswahl verschiedener Kopfhörertypen gegenübergestellt. Besonders ein fehlender Bassanteil führte dazu, dass eine Wiedergabe als Simulation identifiziert werden konnte. Zudem wurde gezeigt, dass es Grenzen in der Kompensierbarkeit gibt, wie zum Beispiel bei Abweichungen durch unterschiedliche Positionierung der Kopfhörer auf einem Kopf. Diese lassen sich jedoch reduzieren, wenn die Hörer die Kopfhörer selbst in eine angenehme Position bringen dürfen. Dann kann auch die Erstellung individueller Kompensationsfilter sinnvoll sein [MF11]. Eine psychoakustische Untersuchung hat keine Nachteile für nicht-individuelle Kopfhörerentzerrung nachweisen können [LB12].

Die aufgeführten Wahrnehmungsaspekte müssen berücksichtigt werden, wenn die dynamischen Binauralsynthese als Werkzeug zur psychoakustischen Untersuchung räumlicher Auralisationen genutzt wird.

3.1.4 Begrenzung der Verstärkung - Regularisierung

Um das aufgezeichnete Schallfeld als eine Überlagerung von Plane Waves formulieren zu können, ist eine Division durch die Radialfunktion $B_n(\omega)$ nötig, welche vom Array-design abhängt. $B_n(\omega)$ kann z.B. für tiefe Frequenzen oder für höhere Ordnungen n Werte nahe Null annehmen. Bei der Anwendung der radialen Filter $D_n(\omega) = 1/B_n(\omega)$ kommt es daher zu hohen Verstärkungen. Deshalb muss für eine Auralisation die resultierende Verstärkung begrenzt werden.

Statt der Radialfilter $D_n(\omega)$ werden in der Verstärkung regulierte Filter $\hat{D}_n(\omega)$ angewendet:

$$\hat{D}_n(\omega) = H_n(\omega) * D_n(\omega) \quad (3.4)$$

$H_n(\omega)$ werden dabei als Regularisierungsfiler bezeichnet. In [RS14] werden einige Ansätze zur Erstellung von Regularisierungsfiltren erläutert. Eine sehr vielversprechende Methode scheint das Soft-Limiting der modalen Amplitudenverstärkung zu sein, welches in [BPSW11] näher vorgestellt wird. Dabei werden die Radialfilter nach folgender Gleichung erstellt:

$$\hat{d}_n(kr) = \frac{2\alpha}{\pi} \frac{|b_n(kr)|}{b_n(kr)} \arctan\left(\frac{\pi}{2\alpha} |b_n(kr)|\right) \quad (3.5)$$

$\alpha = 10^{(a/20)}$, wobei a die vorgegebene maximale Verstärkung in dB bezeichnet.

3.2 Psychoakustische Analyse von Mikrofonarray-aufnahmen

Bei der Auralisation von realen Kugelarrayaufnahmen kann es zu verschiedenen hörbaren Artefakten und Abweichungen kommen. Eine genauere Vorstellung des Zusammenhanges verschiedener Arrayeigenschaften und der entsprechenden Entstehung bestimmter Fehler in der Wiedergabe sind zum einen wichtig für ein optimales Array-Design. Zum anderen ist dies auch die Basis für den Entwurf gezielter Korrekturmaßnahmen. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick.

3.2.1 Bekannte psychoakustischer Effekte

Im folgenden werden einige wesentliche hörbare Artefakte kurz vorgestellt und die Hintergründe zu ihrer Entstehung angegeben:

Spatial Aliasing:

Durch die Abtastung des Schallfeldes mit einer endlichen Anzahl von Mikrofonen, können höhere Ordnung oft nicht ausreichend erfasst werden. Für kr mit $kr > N$ kommt es zu hörbaren Artefakten durch räumliches Aliasing (siehe Abschnitt 2.1.4.3).

Localisation Blur:

Durch eine eingeschränkte räumliche Auflösung des Arrays, werden Quellen mit abnehmender maximaler Ordnung des Arrays immer weniger scharf abgebildet. Die Position einer Schallquelle wird folglich zunehmend fehlerhaft beurteilt [BDPW13].

Klangfarbe:

Die Abbildungen 2.3 und 2.4 zeigen die Verläufe von $b_n(kr)$ für verschiedene Mikrofonarrays. Die einzelnen Ordnungen sind bandbegrenzt [AAG⁺13]. Die obere Grenzfrequenz wird somit vor allem durch den Verlauf von $b_n(kr)$ für die maximale Ordnung N der Mikrofonanordnung bestimmt und den Radius des Arrays bestimmt. Daher variiert die Klangfarbe stark mit N und r .

Verstärkung von Rauschen:

Wie in Abschnitt 2.1.5 angesprochen, muss beim Arrayentwurf meist ein Kompromiss eingegangen werden. Je weniger dieser zu Gunsten einer robusten Erfassung der tiefen Frequenzen ausfällt, desto stärker wird ein tieffrequentes Rauschen in der Auralisation zu hören sein. Dieser Effekt wird auch als White Noise Gain bezeichnet.

Fehler im Zeitbereich

Da bei der Errechnung des originalen Schallfeldes aus den aufgezeichneten Daten eine Division durch $b_n(kr)$ erfolgt (siehe Abschnitt 2.1.2.3), können kleine Werte für $b_n(kr)$ zu einer großen Verstärkung führen. Um diese zu begrenzen, werden verschiedene Regularisierungsstrategien genutzt, welche sich allerdings im Zeitbereich auf das Signal auswirken [RS14]. Es kann zu Echos oder zeitlicher Verschmierung kommen.

3.2.2 Psychoakustische Analyse

In der Reproduktion von Schallfeldern besteht ein wesentliches Ziel in der Erhaltung bzw. einer angemessenen Rekonstruktion der Schallfeldwahrnehmung. Die Zusam-

menhänge zwischen der Aufnahme eines Schallfeldes mit sphärischen Mikrofonarrays und der Wahrnehmung jener Schallfelder bei der Auralisation mittels Binauraltechniken ist nicht restlos geklärt. Bekannt ist allgemein, dass die Verwendung von sphärischen Harmonischen höherer Ordnung eine genauere Beschreibung des aufgezeichneten Schallfeldes erlaubt. Eine Erfassung der vollen hörbaren Frequenzbandbreite ist kaum realisierbar, da sehr viele Mikrofone nötig wären. Des Weiteren bereitet die Rauschverstärkung in den tiefen Frequenzen Schwierigkeiten.

In [AR10] werden die Auswirkungen unvollständig beschriebener Schallfelder im Bereich der Sphärischen Harmonischen auf die Schallquellenlokalisierung in der Binauralauralisation untersucht.

In [AAG⁺13] wird der Einfluss mehrerer Faktoren, wie der Ordnung der Sphärischen Harmonischen, Frequenzbandweite, sowie räumliche Abtastung untersucht. Mittels eines Repertory Grid Experiments wurden mehrere Attribute definiert, welche zur Beschreibung der qualitativen Wahrnehmung von Kugelmikrofonarrayaufnahmen herangezogen werden können. Der Einfluss der Ordnung des Arrays wird zwar näher betrachtet. Es kann jedoch keine quantitative Empfehlung erfolgen, da es noch an einem Maß mangelt, welches angemessene von unangemessener Schallfeldreproduktion unterscheidet.

Die Untersuchung der auditiven Wahrnehmung in Abhängigkeit der Ordnung der sphärischen Harmonischen wird aktuell durch die auftretenden Klangverfärbungen erschwert. In [AAG⁺13] wird diesbezüglich der Wunsch nach einer Methode formuliert, mit welcher die Ordnung der sphärischen Harmonischen geändert werden kann, ohne die Klangfarbe zu beeinflussen.

3.2.3 Equalizing-Strategien

In [SVR14] wird eine Vorgehensweise zur Klangfarbenkorrektur bei der Errechnung von BRIRs aus Kugelarraymessungen vorgestellt. Klangfarbe und Lokalisationsschärfe der virtuellen Quellen wurden im anschließenden Hörversuch signifikant besser bewertet. Auch die Externalisierung wurde geprüft. Allerdings fällt die Bewertung in diesem Fall nur geringfügig besser aus, so dass eine signifikante Verbesserung nicht eindeutig gezeigt werden konnte. Eine systematische psychoakustische Untersuchung verschiedener Ordnungen, Raumcharakteristiken, Quellpositionen etc. ist nötig.

Es gibt verschiedene weitere Ansätze, eine Stabilisierung des analytischen Frequenzganges mit möglichst geringer Beeinträchtigung im Zeitbereich zu erreichen,

z.B. [Lös14, LZ15, Mar14, ZFH15]. In diesem Versuch soll jedoch zunächst vor allem betrachtet werden, welchen Einfluss einige Aspekte Mikrofonarraykonfiguration auf die Qualität der Auralisation haben.

Kapitel 4

Umsetzung

Um vorerst Einflüsse verschiedener anderer Parameter, wie z.B. der ungenauen Positionierung der Mikrofone, auszuschließen oder gezielt steuern zu können, sollen die Untersuchungen zunächst in einer kontrollierbaren Umgebung durchgeführt werden. Daher werden die Kugelarrays in virtuellen Räumen simuliert. Dies hat außerdem den Vorteil, dass die Arrays sehr leicht variierbar und konfigurierbar sind und Aufnahmen mit wenig praktischem Aufwand realisiert werden können.

4.1 Simulation

4.1.1 Erstellung von SRIRs mit verschiedenen Arraykonfigurationen

In [WEJv10] wird das Softwarepaket *MCRoomSim* (Multichannel Room Acoustic Simulator) für effiziente raumakustische Simulation vorgestellt. Die Software ist in C geschrieben und bietet ein Interface zu Matlab, über welches Konfiguration und Steuerung möglich sind. Mit MCRoomSim können verschiedenste Mikrofonarrays in *shoebox*-förmigen Räumen simuliert und kontrolliert Aufnahmedaten erzeugt werden.

Die Toolbox unterstützt nur die Simulation von Open Sphere Arrays. Es ist jedoch möglich, den Mikrofonen eine nierenförmige Richtcharakteristik zuzuordnen. In dieser Arbeit wurde sich grundsätzlich auf die Verwendung von Mikrofonen mit einer nierenförmigen Richtcharakteristik festgelegt, da diese wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben einige Vorteile aufweisen. Außerdem erlauben entsprechende Ergebnisse ein leichteres Abschätzen des Verhaltens von Rigid Sphere Arrays.

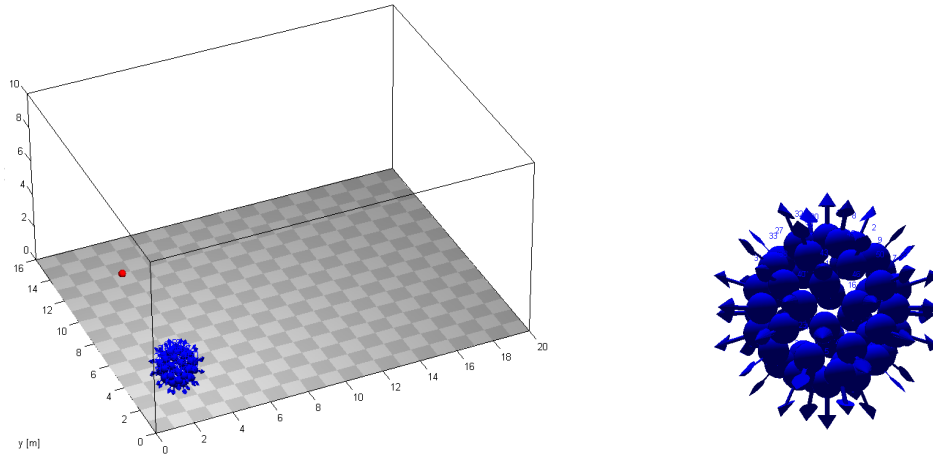


Abbildung 4.1: Simulation eines Mikrofonarrays 5. Ordnung in MCRoomSim

Für die gesamte Untersuchung wird eine konstante Temperatur von 20°C angenommen. Die Schallgeschwindigkeit beträgt daher $c = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Abb. 4.1 zeigt eine Beispielanordnung eines Mikrofonarrays mit einer maximalen Ordnung $N = 5$ zur Simulation in MCRoomSim. In Abbildung 4.2 ist beispielhaft eine mit MCRoomSim simulierte Raumimpulsantwort von der Schallquelle zu einem Mikrofon des Arrays abgebildet.

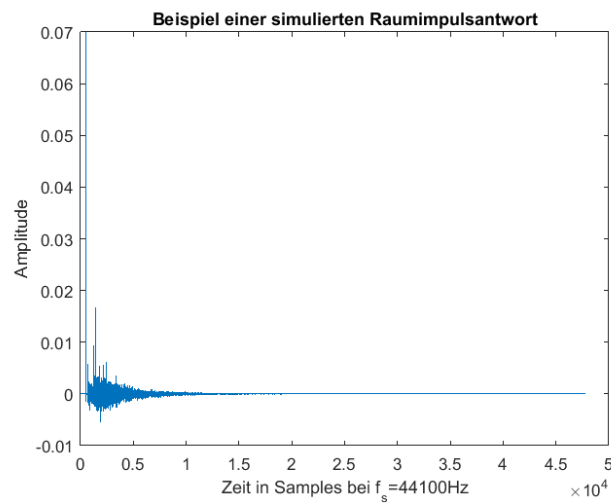


Abbildung 4.2: Beispiel einer simulierten Raumimpulsantwort von einer Schallquelle zu einem Mikrofon des Kugelarrays in MCRoomSim

4.1.2 Simulation des Rauschens bei der Aufnahme

MCRoomSim erlaubt keine Simulation von Rauschen bei der Aufnahme. Daher wurde nachträglich weißes gaußsches Rauschen zu den Raumimpulsantworten hinzu addiert, welches unter anderem das Rauschen der Mikrofone und der Verstärker nachbilden soll. Es wurde ein Pegel von $-80dBFS$ angenommen.

4.1.3 Arrayprocessing - Errechnung der räumlichen Fourierkoeffizienten und Radialfilter

Zunächst wurden die Raumimpulsantworten in den Frequenzbereich überführt. Mittels einer räumlichen Fouriertransformation wurden im Anschluss die Koeffizienten P_{nm} der Sphärischen Harmonischen entsprechend der Formel (2.3) ermittelt.

Da eine Open Sphere Anordnung aus Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik angenommen wurde, ergibt sich $b_n(kr)$ entsprechend der Formel 2.9.

Als Regularisierungsmethode bei der Erstellung der Radialfilter aus $b_n(kr)$ wurde das Softlimiting nach [BPSW11] gewählt. Die modale Verstärkung ergibt sich entsprechend Formel 3.5. Als Defaultwert für Verstärkungslimitierung wurde $+30dB$ festgelegt. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der regularisierten modalen Verstärkung $|d_n(kr)|$.

4.1.4 Wahl und Vorbereitung der HRTF

Es steht ein an der FH Köln gemessener HRTF-Datensatz eines Neumann KU100-Kunstkopfes [Ber13] zur Verfügung. Dieser wurde entlang eines Lebedev-Grids an 2702 Punkten abgetastet. Die HRTF-Messung wurde mit einer VariSphear-Anordnung durchgeführt, die eine Positionsgenauigkeit von $<0.01^\circ$ erlaubt. Aus praktischen Gründen musste der Kunstkopf ohne Torso gemessen werden. Allerdings ist der Datensatz ansonsten von hoher Genauigkeit und Qualität – daher ist er trotzdem interessant für diese Untersuchung. Eine gleichmäßige Abtastung entlang einer Kugel ist von Vorteil für eine Verarbeitung mit Hilfe der sphärischen Akustik. Natürlich ist zu bedenken, dass das Schallfeld nicht kontinuierlich entlang der Kugeloberfläche erfasst werden kann und sich auch daraus gewisse Limitierung für die Untersuchung ergeben.

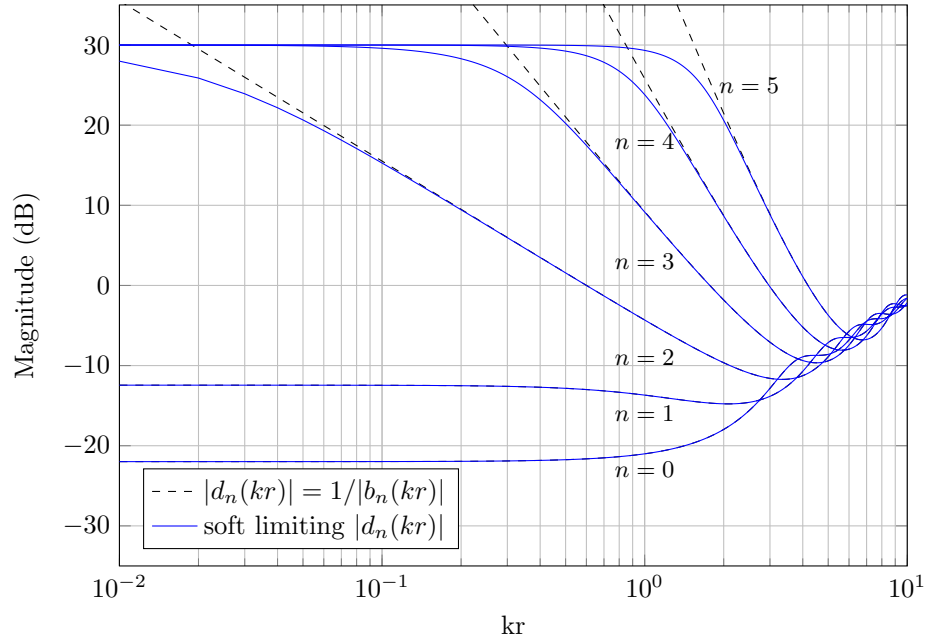


Abbildung 4.3: Modale Verstärkung $|d_n(kr)|$ für $n = 0, \dots, 5$ für ein Open Sphere Array aus Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik ohne Limitierung und Softlimiting-Regularisierung

4.1.5 Realisierung der Auralisation

Die Auralisation wurde entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 3.1 umgesetzt. Da bei der beschriebenen Vorgehensweise räumlich diskrete HRTF-Filter auf Plane Waves angewendet werden, erscheint die Wahl von Fernfeld-HRTFs, wie die hier verwendeten, sinnvoll.

Für die Anpassung der Audiowiedergabe an eine Kopfdrehung wurden binaurale Raumimpulsantworten im Abstand von je 5° für einen Azimuthwinkelbereich von -90° bis $+90^\circ$ erstellt. Das Headtracking ist auf das Erfassen des Azimuthwinkels beschränkt.

4.1.6 Erstellung der Referenz - Simulation einer Kunstkopfaufnahme

Die MCRoomSim-Toolbox erlaubt unter anderem das Erstellen von Empfängern mit einer beliebigen Richtcharakteristik in Form von richtungsabhängigen FIR-Filtern. Es können HRTFs für die Toolbox bereitgestellt werden. In MCRoomSim werden die HRTFs mittels eines Nearest-Neighbour-Approaches für die einzelnen Reflexionen angewendet.

4.1.7 Wiedergabe und Tracking

Die Auralisation erfolgt mittels getrackter Binauralwiedergabe über Kopfhörer des Typs AKG 271 MkII. Zur Kopfhörerentzerrung wurde ein von der FH Köln bereitgestellter Filter genutzt [Hea15].

Die Kopfdrehungen werden mit einem Trackingsystem erfasst und bei der Wiedergabe berücksichtigt. Positionsänderungen des Kopfes werden in diesem Versuch nicht betrachtet.

Für das Tracking wird der RAZOR AHRS [RAZ15] verwendet. Die Anbindung erfolgt über ein Softwaremodul, welches in Python verfasst wurde. Es kommuniziert über die COM-Schnittstelle mit dem Arduino der Trackingvorrichtung. Die Trackingdaten werden vorverarbeitet und über eine OSC-Schnittstelle an das Binauralmodul weitergeleitet.

Das Binauralmodul aktualisiert die Wiedergabe entsprechend der getrackten Kopfbewegung. Es stehen BRIRs in einer Azimuthauflösung von 5° zur Verfügung. Eine Überblendung erfolgt immer in der Mitte zwischen beiden Richtungen. Die Überblendzeit beträgt $2ms$ um eine schnelle Anpassung zu gewährleisten. Diese Vorgehensweise wurde in Anlehnung an [LMW08] entworfen.

4.2 Hörversuch

Die Auralisationen der simulierten Mikrofonarray-Aufnahmen sollen im Bezug zu einer Referenz bewertet werden. Als Referenz sollen dabei Kunstkopfaufnahmen der simulierten Räume dienen. Als Qualitätselemente einer Binauralauralisation sind beispielsweise Externalität, Klangfarbe und der Lokalisationsunschärfe von Interesse.

4.2.1 Vorüberlegungen und Vortests

4.2.1.1 Informelle Vortests

Arrays mit den folgenden Radien und Ordnungen wurden simuliert:

N	1	3	5	7	9	11
M	6	26	50	86	146	194
r=0.042m	1300	3899	6499	9098	11698	14297
r=0.087m	628	1882	3137	4392	5647	6902
r=0.108m	506	1516	2527	3538	4549	5560
r=0.218m	250	751	1252	1753	2254	2755
r=0.436m	125	376	626	876	1127	1377
r=0.860m	63	190	317	444	571	698

Tabelle 4.1: Übersicht der Aliasing-Frequenzen in $[Hz]$ für das jeweilige Array aus M Mikrofonen mit der maximalen Ordnung N

Beobachtungen bei Vergleich von Mikrofonarrays mit einer Lebedev-Konfiguration verschiedener Ordnung:

- Starke Klangfarbenänderungen zwischen den einzelnen Ordnungen
- Lokalisierbarkeit steigt mit der Ordnung durch steigende Lokalisationsschärfe
- Es gibt deutliche Unterschiede in der Externalisierung - ein Muster wurde bisher nicht erkannt
- Zeitliche Verschmierung - kaum wahrnehmbar (mit Softlimiting Regularisierung)

Beobachtungen bei Vergleich von Mikrofonarrays mit einer Lebedev-Konfiguration und verschiedenem Radius:

- Starke Klangfarbenänderungen zwischen den einzelnen Radien - die Aliasingfrequenz variiert jedoch auch stark
- Rauschen nimmt mit wachsendem Radius ab - könnte allerdings auch an allgemeiner Lautstärke liegen
- Externalisierung variiert
- Zeitliche Verschmierung - kaum wahrnehmbar (mit Softlimiting Regularisierung)

Beobachtungen bei Vergleich von verschiedener Verstärkungslimitierungen:

- Ohne Limitierung sind Echos hörbar
- Rauschen nimmt mit zunehmender Limitierung ab
- Beeinträchtigung des zeitlichen Verlaufes nimmt mit zunehmender Limitierung ab (mit Softlimiting Regularisierung)

4.2.1.2 Vorüberlegungen

Um für den Vergleich eine möglichst geringe Beeinträchtigung des zeitlichen Verlaufs zu gewährleisten, ist es sinnvoll, die Softlimiting Regularisierung [BPSW11] z.B. mit einer Limitierung auf $30dB$ auf alle simulierten Mikrofonarrayaufnahmen anzuwenden.

In [BVGPA14] wiesen die Autoren darauf hin, dass die Untersuchung mit nicht-individuellen und auch nicht individualisierten HRTFs durchgeführt wurde. Eine Anpassung der ITD wurde nicht vorgenommen, um damit keine zusätzlichen Fehler zu erzeugen. Es kann so allerdings zu Fehllokalisationen kommen. Bei einer dynamischer Auralisation kommt es bei abweichender ITD zu mitlaufenden oder gegenlaufenden Schallquellen bei einer Kopfdrehung. Inwiefern auf diese Weise die Lokalisation bzw. die Lokalisierbarkeit untersucht werden kann, bleibt offen.

Dieser Versuch konzentriert sich auf die Untersuchung von Gesamtqualität, Klangfarbe und wahrgenommener Externalisierung.

In [SVR14] wurde unter anderem nach einer externen Wahrnehmung der Auralisation verschiedener Arraykonfigurationen gefragt. Es konnte allerdings keine signifikante Abhängigkeit der Externalisierung vom Mikrofonarray-Setup nachgewiesen

werden. In den Vortests zu diesem Experiment wurden jedoch starke Unterschiede in der Externalität beobachtet. Möglicherweise ist das eine Auswirkung der neueren Vorgehensweise für die Auralisation [BVGPA14]. Deshalb ist es sinnvoll, die Frage nach der Externalität im Hörversuch erneut aufzugreifen.

4.2.2 Konzeption des Hörversuchs

Da die Aliasingfrequenz eines der wesentlichsten Designkriterien für Kugelmikrofonarrays darstellt, sollen im Hörversuch Arrays mit gleicher Aliasingfrequenz gegenübergestellt werden. Es wurden Simulationen für $N = 1, 3, 5, 7, 9$ durchgeführt und der Radius jeweils so angepasst, dass theoretisch gleiche Aliasingfrequenzen entstehen. Für die Untersuchung wurde festgelegt, dass eine Anordnung der Abtastpunkte innerhalb der Arrays jeweils nach dem Lebedev-Grid erfolgt. Es ist von hoher praktischer Bedeutung, da vergleichsweise wenig Mikrofone für eine gewisse Maximalordnung benötigt werden.

Für die Aliasingfrequenzen der simulierten Arrays wurden $2000Hz$ und $6000Hz$ gewählt, da diese beispielsweise bei der Erfassung von Sprachquellen interessante Frequenzbereiche darstellen.

Ein Array mit $N = 9$ und $f_{alias} = 6000Hz$ unter der Annahme eines Lebedev-Grids mit 146 Mikrofonen benötigt einen Radius $r = 8,19cm$. Ein solches Array in der Praxis tatsächlich zu entwerfen, erreicht schon die Grenze der Realisierbarkeit. Deshalb wurden in dieser Untersuchung keine Arrays mit einer maximalen Ordnung $N > 9$ betrachtet. Entsprechend der Formel $r = \frac{Nc}{2\pi f}$ wurden folgende Mikrofonarraysetups simuliert:

N	1	3	5	7	9
M	6	26	50	86	146
$f_{alias} = 2000Hz$	2.73	8.19	13.65	19.11	24.57
$f_{alias} = 6000Hz$	0.91	2.73	4.55	6.37	8.19

Tabelle 4.2: Übersicht der Radien in $[cm]$ zu möglichen Setups mit gleichen Aliasing-Frequenzen

Wahl der Hörversuchsmethode In den Vortests hat sich gezeigt, dass es zu deutlich hörbaren Unterschieden zwischen den verschiedenen Mikrofonarray-Konfigurationen,

sowie im Vergleich zur Referenz, kommt. Um einordnen zu können, wie stark die wahrgenommenen Unterschieden ausfallen, soll ein Versuch in Anlehnung an das MUSHRA-Verfahren (Multistimulus with hidden reference and anchor) [ITU14] durchgeführt werden. In der Abwandlung wird kein Anker verwendet, welcher ansonsten die Funktion besitzt, die Skala aufzuspannen. Das heißt, es wird dem Probanden damit verdeutlicht, welche unterschiedlichen Ausmaße der zu bewertenden Eigenschaft auftreten können. Da in diesem Experiment die Unterschiede zwischen den einzelnen Hörbeispielen recht groß sind, übernehmen sie teilweise die Funktion. Außerdem erfolgt vor dem eigentlichen Versuch ein kleines Training, in welchem sich der Proband bereits mit möglichen Ausprägungen vertraut machen kann. Auf diese Weise kann die Anzahl der Hörversuchs-Items etwas reduziert werden und die Probanden ermüden nicht so schnell. Um verlässliche Bewertungen zu erhalten, sollte Versuchsdauer im Rahmen gehalten werden.

Des Weiteren wird im standardisierten MUSHRA-Verfahren davon ausgegangen, dass die Referenz die beste Qualität bezüglich des zu untersuchendem Kriteriums besitzt. Das kann in diesem Versuch nicht sicher gewährleistet werden, da auch die Simulation einer Kunstkopfaufnahme die Realität nicht einwandfrei abbildet. Deshalb wird die Referenz auf einer Skala von 0 bis 100 bei 50 eingeordnet. Die Skala unterteilt sich daher nicht wie im Standard beschrieben in „Excellent“, „Good“, „Fair“, „Poor“, „Bad“, sondern in „sehr viel besser als die Referenz“, „besser als die Referenz“, „vergleichbar mit der Referenz“, „schlechter als die Referenz“, „viel schlechter als die Referenz“. Den Probanden wurde dies vor dem Versuch in schriftlichen Anleitung (siehe Anhang B) wie auch nochmal durch den Versuchsleiter erläutert.

4.2.3 Durchführung

4.2.3.1 Beschreibung der verwendeten Sound Samples

Für die Simulation wurde ein virtueller Raum der Größe $20 \times 12,5 \times 8m$ gewählt, da diese Maße als typisch für reale Konzerträume betrachtet werden können. Tabelle 4.4 zeigt die verwendeten Absorptionskoeffizienten.

Der simulierte Raum hat ein Volumen von $V = 2000m^3$. Die frequenzabhängigen Nachhallzeiten sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Die Berechnung in Einzelschritten ist im Anhang A zu finden.

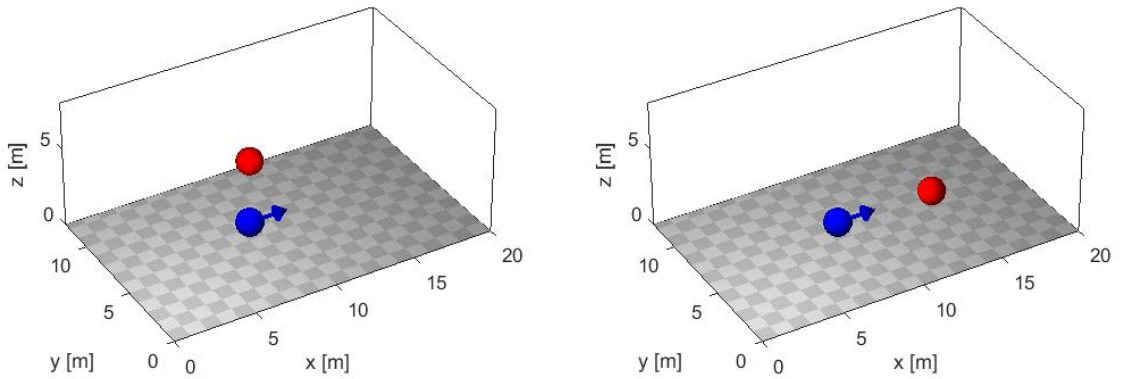
Zwei verschiedene Anordnungen aus Schallquelle und Mikrofonarray bzw. Kunstkopf wurden in dem Raum simuliert: Der Mittelpunkt der verschiedenen Mikrofonar-

Frequenz in $[Hz]$	100	200	400	800	1600	3200	6400
Wand 1 (hinten)	0.6	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6
Wand 2 (vorn)	0.7	0.6	0.6	0.3	0.4	0.6	0.7
Wand 3 (rechts)	0.6	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6
Wand 4 (links)	0.7	0.6	0.6	0.3	0.4	0.6	0.7
Wand 5 (Boden)	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6
Wand 6 (Decke)	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.6	0.7

Tabelle 4.3: Absorptionskoeffizienten für die virtuellen Räume, Wandbeschreibung in Bezug zur Blickrichtung des Kunstkopfes

Frequenz in $[Hz]$	100	200	400	800	1600	3200	6400
Nachhallzeit in $[s]$	0.51	0.56	0.61	0.86	0.80	0.58	0.50

Tabelle 4.4: Absorptionskoeffizienten für die virtuellen Räume, Wandbeschreibung in Bezug zur Blickrichtung des Kunstkopfes



(a) Omnidirektionale virtuelle Quelle (rot)
bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$

(b) Omnidirektionale virtuelle Quelle (rot)
bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 4.4: Virtueller Raum mit den Maßen $20 \times 12,5 \times 8m$ und einer Kunstkopfposition (blau, Pfeil zeigt in Blickrichtung) bzw. Mikrofonarrayposition bei $(x, y, z) = (7.5, 5, 2)$

rays auf $(x, y, z) = (7.5, 5, 2)$ festgesetzt.

Die Schallquelle bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$ befindet sich in einem Abstand von 6m bei einer Orientierung von 0° , also in Blickrichtung (des Kunstkopfes). Diese

Quelle wird im weiteren auch als „Quelle vorn“ bezeichnet. Mit einem Abstand von 6m befindet sich das Mikrofonarray deutlich außerhalb des Hallradius von $2,75m$ (bei $800Hz$). Das ist vorteilhaft um potentielle Unterschiede untersuchen zu können, welche durch die unterschiedlichen Arraykonfigurationen erzeugt werden.

Die zweite Schallquelle bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ befindet sich ebenfalls in einem Abstand von 6m vom Array. In Bezug zur Auralisationsperspektive bzw. zur Kunstkopfperspektive liegt die Quelle in einer Richtung von -60° , also links. Diese Quelle wird im weiteren auch als „Quelle links“ bezeichnet.

Beide Schallquellen wurden als Punktquellen mit omnidirektionaler Schallabstrahlung simuliert. Die jeweiligen Anordnungen sind Abbildung 4.4 visualisiert.

Als Signale wurden trockene Aufnahmen eines Schlagzeugs und eines Saxophons gewählt. Die Drums erlauben eine gute Beurteilung der Lokalisierbarkeit. Die enthaltene Bassdrum verdeutlicht auch potentielle Klangverfärbungen im tieffrequenten Bereich. Das Saxophonbeispiel wurde gewählt, da der Frequenzbereich dem menschlicher Sprache ähnelt. Die Artikulation ist vielfältig.

4.2.3.2 Beschreibung der Probanden

Es nahmen 15 Probanden teil, davon 4 weiblich und 11 männlich. Das Durchschnittsalter beträgt 30,6 Jahre, wobei der jüngste Teilnehmer 26 und der älteste 38 Jahre alt war. Alle Probanden gaben an, dass Ihnen keine Beeinträchtigungen des eigenen Gehörs bekannt sind.

Vor dem Versuch sollte jeder Teilnehmer die eigene Hörerfahrung, allgemein und in Bezug auf Binauralwiedergabe, selbst abschätzen und auf einer Skala von 1-5 einordnen. Abbildung 4.5 zeigt die entsprechende Verteilung.

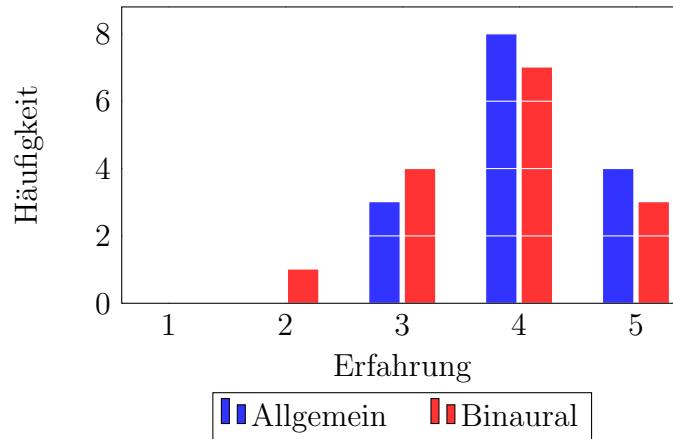


Abbildung 4.5: Überblick zur Hörerfahrung der Probanden (Selbsteinschätzung)

4.2.3.3 Beschreibung eines Versuchsdurchlaufs

Jeweils 5 verschiedene Arraykonfigurationen mit gleicher Aliasingfrequenz und die jeweilige Referenz werden in einem Durchgang gegenübergestellt. Darüber hinaus wurden verschiedene Testbedingungen festgelegt:

- 5 verschiedene maximale Ordnungen (1, 3, 5, 7, 9)
- 2 Positionen (0° und -60°)
- 2 Aliasingfrequenzen (2000Hz, 6000Hz)
- 2 Signale (Schlagzeug und Saxophon)

Zusammen mit der versteckten Referenz ergeben sich 8 Durchgänge mit je 6 Testitems. Die Referenz wird zusätzlich offen zum Vergleich bereitgestellt.

Um die Qualität detaillierter analysieren zu können, werden alle Hörbeispiele nach 3 verschiedenen Kriterien bewertet. Der Test ist so aufgebaut, dass zunächst in einem Block mit den benannten 8 Durchgängen nach der wahrgenommenen Gesamtqualität gefragt wird. Im Anschluss soll dann erneut in 8 Durchgängen die wahrgenommenen Klangfarbe und zum Abschluss die wahrgenommenen Externalität bewertet werden. Die Reihenfolge der Testitems wird für jede Testbedingung (ein Durchgang) erneut zufällig festgelegt. Auch die Reihenfolgen der Testbedingungen in den 3 Blöcken werden immer wieder variiert. Abbildung 4.6 zeigt die verwendete, für den Hörversuch in Python entwickelte, Nutzeroberfläche.

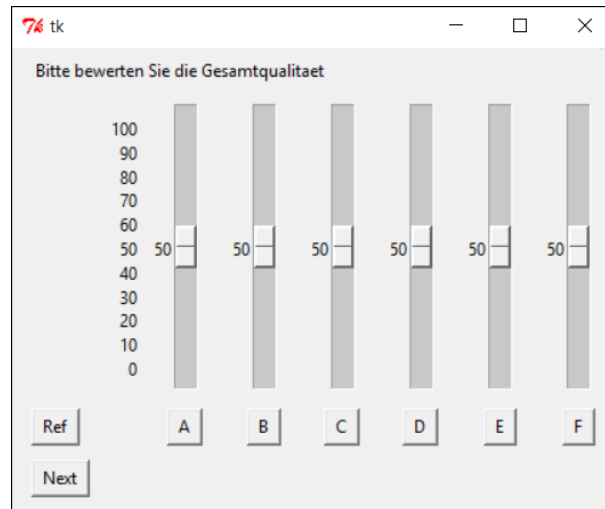


Abbildung 4.6: Nutzeroberfläche für den Hörversuch - Es kann zwischen mehreren verschiedenen dynamischen Auralisationen im Wechsel umgeschaltet werden, während das Headtracking aktiv bleibt

Die Hörbeispiele werden grundsätzlich im Loop abgespielt. Sie sind zeitlich synchronisiert, damit ein Umschalten zu jedem beliebigen Zeitpunkt möglich ist. Das Umschalten erfolgt durch zügiges Überblenden zum ausgewählten Hörbeispiel. Das Headtracking bleibt während dessen aktiv. Das erlaubt ein Umschalten in der jeweiligen Kopfausrichtung.

Mit Hilfe der Leertaste kann der Proband das Headtracking jederzeit auf eine 0°-Orientierung zurücksetzen. Das ist hilfreich, da das Headtracking nach einiger Zeit von der originalen Orientierung abweichen kann.

Kapitel 5

Ergebnisse und Auswertung

5.1 Ergebnisse des Hörversuchs

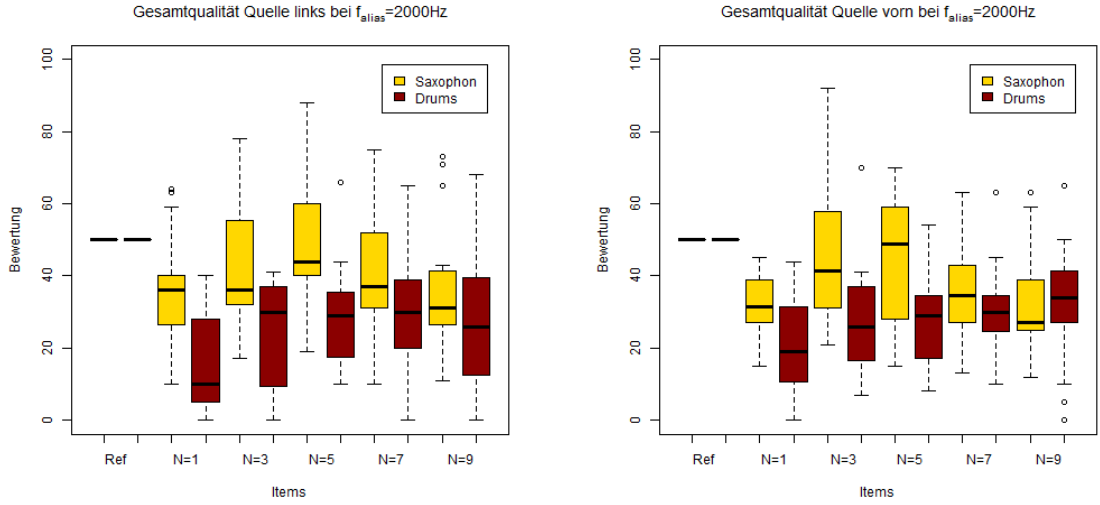
Die Probanden waren sehr zuverlässig in der Zuordnung der versteckten Referenz. Nur ein Proband bewertete die Referenz zweimal mit einem Wert verschieden von 50. Seine Bewertungen wurden nicht mit in die statistische Analyse einbezogen.

Die folgenden Boxplots geben einen Überblick über die Ergebnisse. Die dicke Markierung kennzeichnet den Medianwert der einzelnen Datenreihen. Die farbige Box markiert den Bereich in welchem die mittleren 50% der Werte enthalten sind. Die Gesamtlänge wird theoretisch von den mittleren 95% bestimmt. Da in diesem Experiment nur jeweils 15 Stichproben vorliegen, entsprechen 5% 0,75 Bewertungen, deshalb kennzeichnet die Gesamtlänge hier oft den gesamten Wertebereich. Die außerhalb liegenden Punkte stellen bei größeren Datensätzen Ausreißer dar. In dem vorliegenden Experiment müssen diese aufgrund der niedrigen Stichprobenzahl anders interpretiert werden.

5.1.1 Gesamtqualität

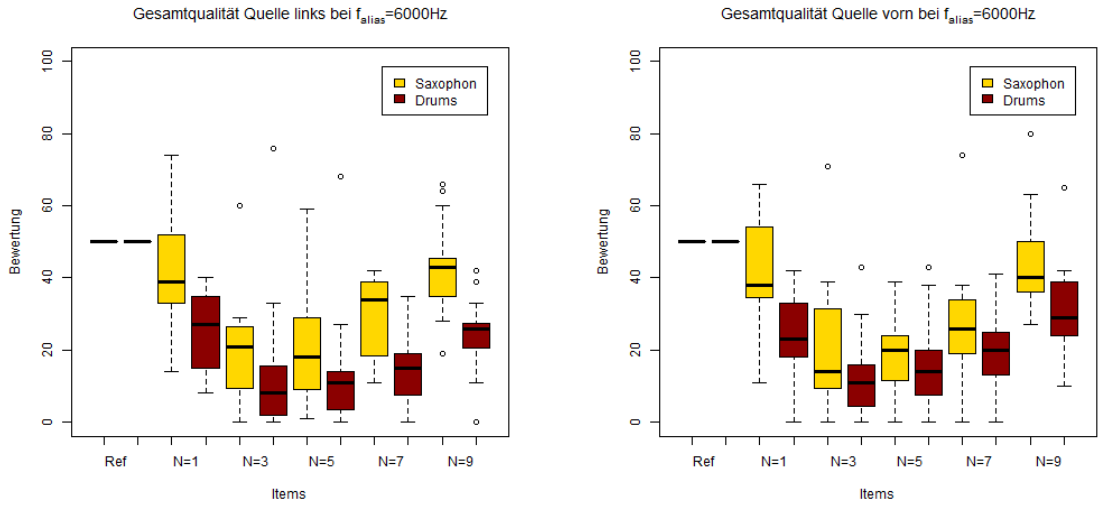
Zunächst sollte die Gesamtqualität im Bezug zur Referenz bewertet werden. Abbildung 5.1 zeigt die Ergebnisse für die Arraykonfigurationen mit einer Aliasingfrequenz von 2000Hz .

Es ist zu erkennen, dass die Arrayauralisationen im Vergleich zu Referenz vorwiegend abgewertet wurden. Es fällt auf, dass die Gesamtqualität der Schlagzeugbeispiele als schlechter empfunden wurde als jeweilige Saxophonbeispiel mit ansonsten gleichen Testbedingung. Des Weiteren wurden einige Testitems im Vergleich zur Referenz als



(a) Virtuelle Quelle links bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ = (b) Virtuelle Quelle vorn bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 5.1: Bewertung der Gesamtqualität für $f_{alias} = 2000Hz$



(a) Virtuelle Quelle links bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ = (b) Virtuelle Quelle vorn bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 5.2: Bewertung der Gesamtqualität für $f_{alias} = 6000Hz$

besser bewertet. Dies gilt insbesondere für die Saxophonbeispiele, jedoch gibt es auch für die Drums einzelne Bewertung über 50.

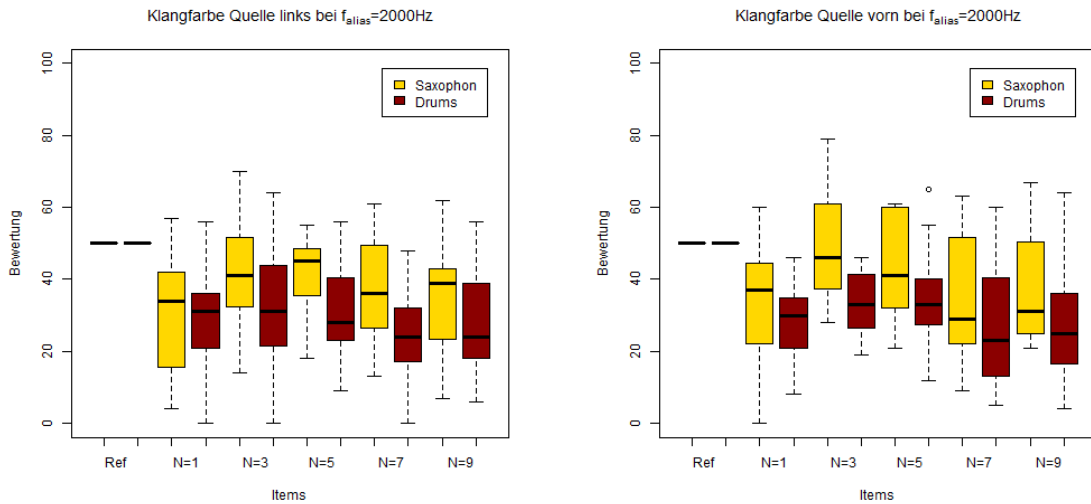
Abbildung 5.2 zeigt die Resultate für Anordnungen mit einer Aliasingfrequenz von $6000Hz$. Auch einige dieser Beispiele wurden gegenüber der Referenz als besser

eingestuft. Ebenso wurde auch in dieser Auswahl das Saxophon meist besser bewertet als Schlagzeug. Dennoch wird die Gesamtqualität gegenüber der Referenz vorwiegend als schlechter eingeschätzt. Interessanterweise ist das Gesamtniveau der Bewertung für beide Testsignale niedriger als für $f_{alias} = 2000Hz$. Zwischen den beiden Quellpositionen sind zunächst keine wirklichen Unterschiede zu erkennen.

Die Tabelle im Anhang C.1 gibt einen Überblick über die Mittelwerte, die bei der Bewertung der Gesamtqualität unter den einzelnen Testbedingungen erzielt wurden.

5.1.2 Klangfarbe

Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse der Klangfarbenbewertung für $f_{alias} = 2000Hz$. Auch in Bezug auf die Klangfarbe werden die Arraybeispiele im Vergleich zur Referenz überwiegend abgewertet. Es ergeben sich aber erneut recht große Konfidenzintervalle. Die Klangfarbe einiger Arraybeispiele wird im Vergleich zur Referenz vereinzelt als besser eingestuft, jedoch vereinzelt auch mit „0“ als viel schlechter eingeordnet. Des Weiteren zeichnet sich eine bessere Bewertung der Saxophonbeispiele ab.

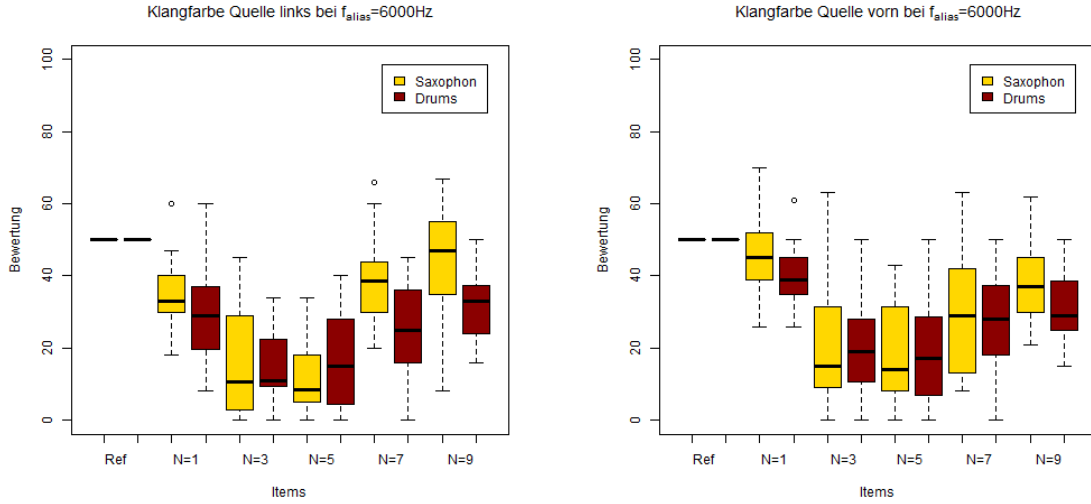


(a) Virtuelle Quelle links bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ (b) Virtuelle Quelle vorn bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 5.3: Bewertungen der Klangfarbe für $f_{alias} = 2000Hz$

Ein Effekt, der bei der Bewertung der Gesamtqualität zu beobachten war, zeigt sich auch bei der Klangfarbe: Die Arraykonfigurationen mit $f_{alias} = 6000Hz$ (Abb. 5.4) werden schlechter bewertet. Es lässt sich aber, ähnlich wie bei der Gesamtqualität,

ein positiver Trend zu höheren Ordnungen hin erkennen.



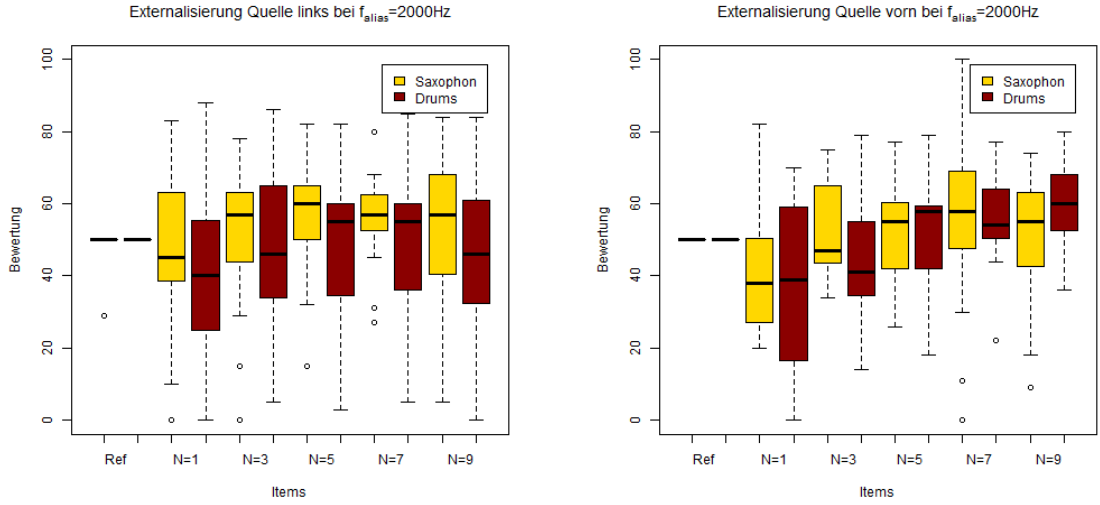
(a) Virtuelle Quelle links bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ = (b) Virtuelle Quelle vorn bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 5.4: Bewertungen der Klangfarbe für $f_{alias} = 6000Hz$

5.1.3 Externalisierung

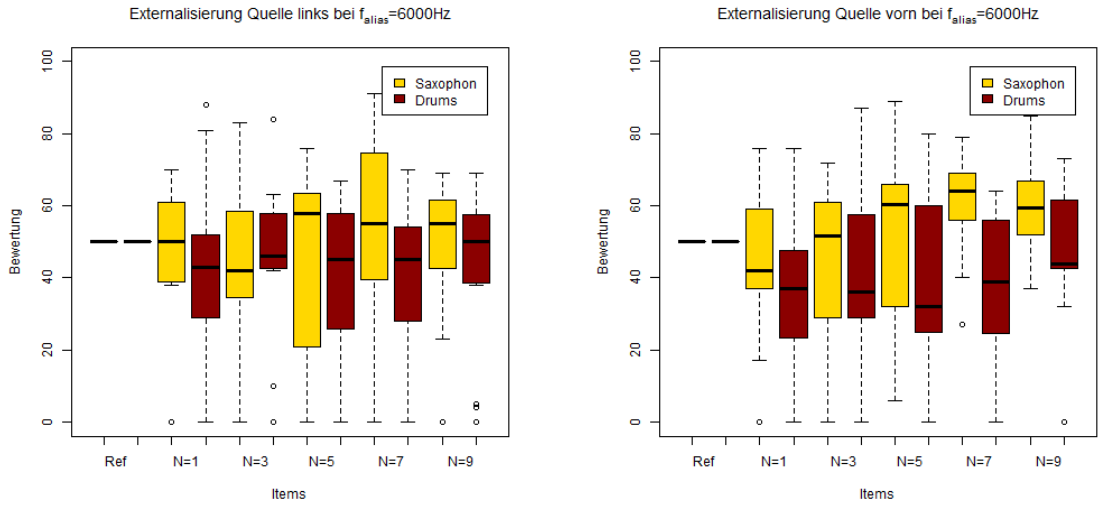
Bei der Bewertung der Externalität ergibt sich eine besonders große Streuung. Die Einschätzungen verteilen sich nahezu über die gesamte Skala. Des Weiteren fällt auf, dass die Mediane v.a. für $f_{alias} = 2000Hz$ (Abb. 5.5) in einem Bereich nahe der 50 liegen. Für die Quellposition vorn ist eine leichte Verbesserung mit steigender Ordnung zu erkennen.

Für die Anordnungen $f_{alias} = 6000Hz$ (Abbildung 5.6) sind ähnliche Ergebnisse zu beobachten. Allerdings liegen die Mediane bei der Quellposition vorn für Saxophon etwas über den Medianen für das Schlagzeug.



(a) Virtuelle Quelle links bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ = (b) Virtuelle Quelle vorn bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 5.5: Bewertungen der Externalisierung für $f_{alias} = 2000Hz$



(a) Virtuelle Quelle links bei $(x, y, z) = (10.5, 10.2, 2)$ = (b) Virtuelle Quelle vorn bei $(x, y, z) = (13.5, 5, 2)$

Abbildung 5.6: Bewertungen der Externalisierung für $f_{alias} = 6000Hz$

5.2 Varianzanalyse und Interpretation

Insbesondere bei einer kleinen Probandenzahl ist es gut möglich, dass gewisse Unterschiede zwischen den Mittelwerten zweier Testgruppen durch Zufall bzw. durch

Streuung entstehen und nicht durch die zu untersuchende Testbedingung ausgelöst werden. Deshalb ist es wichtig, eine Varianzanalyse durchzuführen. Mit Hilfe einer Varianzanalyse kann der Unterschied zwischen den Mittelwerten auf Signifikanz geprüft werden. In diesem Experiment werden verschiedene Kugelmikrofonarraykonfigurationen gegenübergestellt. Es soll unter anderem die Frage beantwortet werden, ob die Auralisationen verschiedenen Anordnungen signifikant unterschiedlich wahrgenommen werden.

Die Voraussetzung zur Anwendung einer Varianzanalyse ist in diesem Fall zum einen eine Normalverteilung der Bewertungen durch die Probanden für die verschiedenen Arraykonfigurationen. Zum anderen muss eine Varianzhomogenität vorliegen. Das heißt, die Varianzen innerhalb der zu vergleichenden einzelnen Versuchsbedingungen müssen gleich sein.

Um zu prüfen ob eine ANOVA (engl. analysis of variance) angewendet werden kann, wurden die Datenreihen mit Hilfe des Single Sample Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung geprüft. Dieser bestätigte, dass Bewertungen innerhalb der einzelnen Wertegruppe (Probandenbewertungen desselben Hörbeispiels) jeweils einer Standardnormalverteilung folgen.

Ein Wert $p > 0,05$ bestätigt die Null-Hypothese, dass die Mittelwerte der einzelnen Gruppen als gleich betrachtet werden können. Ein Wert $p < 0,05$ signalisiert, dass es mindestens eine Gruppe, in diesem Experiment ein Hörbeispiel, mit einer signifikanten Abweichung gibt.

5.2.1 Betrachtung der einzelnen Arrays

Die wesentliche Fragestellung dieser Arbeit besteht darin, welche Qualität mit den einzelnen Arraykonfigurationen erreichbar ist und ob es signifikante Unterschiede zwischen den Arrays gibt. Zunächst erfolgt eine separate Gegenüberstellung zur Referenz.

5.2.1.1 Unterschiede zur Referenz

Die Tabelle in Anhang C.4 gibt einen Überblick über die p-Werte die mit einer einseitige ANOVA bei der Gegenüberstellung der einzelnen Arrays mit der Referenz. Die 24 Zeilen repräsentieren dabei die einzelnen Testbedingungen. Die ersten acht zeigen die p-Werte für die Bewertungen der Gesamtqualität, davon zunächst 4 Werte für die Aliasingfrequenz von $2kHz$, dann für $6kHz$, in der Reihenfolge Saxophon

links, Saxophon vorn, Schlagzeug links, Schlagzeug vorn. Es folgen die beiden 8-zeiligen Blöcke für die Klangfarbe und die Externalität mit dem gleichen Aufbau. Werte $p < 0,05$ kennzeichnen signifikante Unterschiede und sind rot unterlegt.

Die Bewertung der Gesamtqualität sowie der Klangfarbe der einzelnen Arrays weisen signifikante Unterschiede gegenüber der Referenz auf. Die entsprechenden Mittelwerte in Tabelle C.1 und Tabelle C.2 enthalten keine Werte über 50.

Damit zeigt sich in diesem Experiment, dass es immer noch signifikante Defizite in der Gesamtqualität und der Klangfarbe von binaural auralisierten Kugelmikrofonarraydaten gibt. Dennoch reichen sie in Einzelfällen, insbesondere bei den Saxophonbeispielen, an die Qualität der simulierten Kunstkopfaufnahmen heran. Bei der Bewertung der Externalität können keine signifikanten Unterschiede zwischen Referenz und Arrayauralisationen ermittelt werden.

5.2.1.2 Unterschiede zwischen den Arraykonfigurationen

Die Ergebnisse der Überprüfung auf signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Arrays mit jeweils gleicher Aliasingfrequenz sind in Tabelle C.5 aufgelistet. Die 24 Zeilen repräsentieren hier ebenfalls die verschiedenen Testbedingungen. Auch wenn die Arrays in der Tabelle entsprechend Ihrer maximalen Ordnung benannt sind, ist zu bedenken, dass dies keine einfache Variation der maximalen Ordnung beinhaltet, sondern ebenso variable Radien. Die rot markierten Felder kennzeichnen dabei Werte $p < 0,05$, welche signifikante Unterschiede anzeigen.

Zunächst ist sehr auffällig, dass es in der gesamten Untersuchung zwischen $N = 3$ und $N = 5$ zu keinerlei signifikanten Unterschieden kommt. Gleiches gilt für die Gegenüberstellung der Arrays mit $N = 5$ und $N = 7$ mit einer Ausnahme bei der Bewertung der Klangfarbe des Saxophonbeispiels vorn mit $f_{alias} = 6000Hz$. Auch $N = 7$ und $N = 9$ unterscheiden sich nur bei der Gesamtqualitätsbewertung der Arrays mit $f_{alias} = 6000Hz$.

Bemerkenswert ist, dass auch zwischen den Arrays mit $N = 1$ und $N = 9$ nicht von signifikanten Unterschieden gesprochen werden kann.

Deutliche Abweichungen gab es bei der Bewertung der Arrays mit $N = 1$ und $N = 5$, sowie $N = 3$ und $N = 9$. Das ist nicht überraschend, da sich die Konfigurationen jeweils sehr stark unterscheiden.

Des Weiteren fällt auf, dass sich die signifikanten Unterschiede zwischen einzelnen Arrays insbesondere bei der Bewertung von Gesamtqualität und Klangfarbe bei einer Aliasingfrequenz von $6kHz$ bemerkbar machen.

Bei der Bewertung der Externalität kommt es nur bei der Quellposition vorn zwischen Arrays mit deutlich verschiedenen maximalen Ordnungen zu signifikanten Unterschieden. Für das Schlagzeugbeispiel vorn bei $f_{alias} = 2000Hz$ wurden signifikante Abweichungen zwischen der maximalen Ordnung $N = 1$ und $N = 7$ sowie $N = 9$ ermittelt, außerdem zwischen $N = 3$ und $N = 7$, sowie ebenfalls $N = 9$. Die anderen markierten p-Werte liegen nur sehr knapp unter 0,05.

5.2.1.3 Arrays mit unterschiedlichem Radius bei gleicher Ordnung

In Bezug auf Klangfarbe und Gesamtqualität ist in den Boxplots (Abbildung 5.2 und 5.4) zu den Auralisationsbeispielen der Arrays mit $f_{alias} = 6000Hz$ eine deutlich schlechtere Bewertung gegenüber der größeren Arrays mit gleicher maximaler zu erkennen. Dies gilt insbesondere für die Arrays mit einer maximalen Ordnung von 3 und 5. Bei den Arrays mit $N = 3$ werden die Radien $r = 8,19cm$ und $r = 2,73cm$ gegenübergestellt, bei $N = 5$ die Radien $r = 13,65cm$ und $r = 4,55cm$.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die p-Werte der ANOVA. Diese spiegeln die Beobachtungen aus den Boxplots wider. Für $N = 3$ und $N = 5$ ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen beiden Arraygrößen in Bezug auf die Klangfarbe und die Gesamtqualität. Des Weiteren können bei der Gesamtqualität signifikante Unterschiede zwischen beiden Arrays mit einer maximalen Ordnung von 7 festgestellt werden. Obwohl sich auch für $N = 1$ und $N = 9$ die Radien verdreifachen, zeigen die Bewertungen keine signifikanten Unterschiede bei der Gegenüberstellung.

Aus der statistischen Betrachtung der Externalisierungsbewertungen ergeben sich auch für diese Gegenüberstellung keinerlei signifikante Unterschiede. Die Werte werden deshalb nicht in der Tabelle aufgeführt.

5.2.1.4 Arrays mit gleichem Radius

Aus den Betrachtungen zu den Arrays gleicher maximaler Ordnung, aber deutlich unterschiedlichem Radius ergibt sich die Frage, inwiefern sich hörbare Unterschiede zwischen Arrays mit gleichem Radius, aber unterschiedlicher Ordnung ergeben.

In den untersuchten Setups können beispielsweise die Arrays mit $r = 2,73cm$ und den maximalen Ordnungen 1 und 3, sowie die Arrays mit $r = 8,19cm$ ($N = 3$ und $N = 9$) gegenübergestellt werden. Des Weiteren liegt das Array mit $r = 6,37cm$ und $N = 7$ in einer vergleichbaren Größenordnung und wird für eine Gegenüberstellung

	N=1	N=3	N=5	N=7	N=9
Gesamtqualität					
Saxophon links	0.2954	0.0004	0.0002	0.0458	0.4868
Saxophon vorn	0.0759	0.0013	0.0001	0.0731	0.0965
Schlagzeug links	0.0746	0.2341	0.0155	0.0053	0.4399
Schlagzeug vorn	0.5964	0.0060	0.0190	0.0181	0.8693
Klangfarbe					
Saxophon links	0.2602	0.0000	0.0000	0.5914	0.0709
Saxophon vorn	0.0370	0.0001	0.0001	0.5645	0.7464
Schlagzeug links	0.6118	0.0064	0.0042	0.9374	0.5642
Schlagzeug vorn	0.0021	0.0025	0.0069	0.8925	0.3233

Tabelle 5.1: p-Werte der Varianzanalyse für beide Aliasing-Frequenzen

herangezogen.

Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die p-werte aus den ANOVA.

	N=1 r=2,73cm N=3 r=2,73cm	N=3 r=8,19cm N=7 r=6,37cm	N=3 r=8,19cm N=9 r=8,19cm
Gesamtqualität			
Saxophon links	0.0098	0.0223	0.9065
Saxophon vorn	0.0407	0.0096	0.7098
Schlagzeug links	0.7774	0.1078	0.6828
Schlagzeug vorn	0.1021	0.0812	0.6218
Klangfarbe			
Saxophon links	0.0151	0.7615	0.4105
Saxophon vorn	0.0609	0.0039	0.0344
Schlagzeug links	0.0245	0.2704	0.9697
Schlagzeug vorn	0.0786	0.1204	0.4699

Tabelle 5.2: p-Werte der Varianzanalyse für Arrays mit gleichem bzw. ähnlichem Radius

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf der regularisierten modalen Verstärkung für die verschiedenen Ordnungen in Abhängigkeit von kr . Je nach Radius und maximaler Ordnung des Arrays ergibt sich der Frequenzbereich. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die entsprechenden Dimensionierungen der simulierten Arrays. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Radius die Robustheit in tiefen Frequenzen zunimmt.

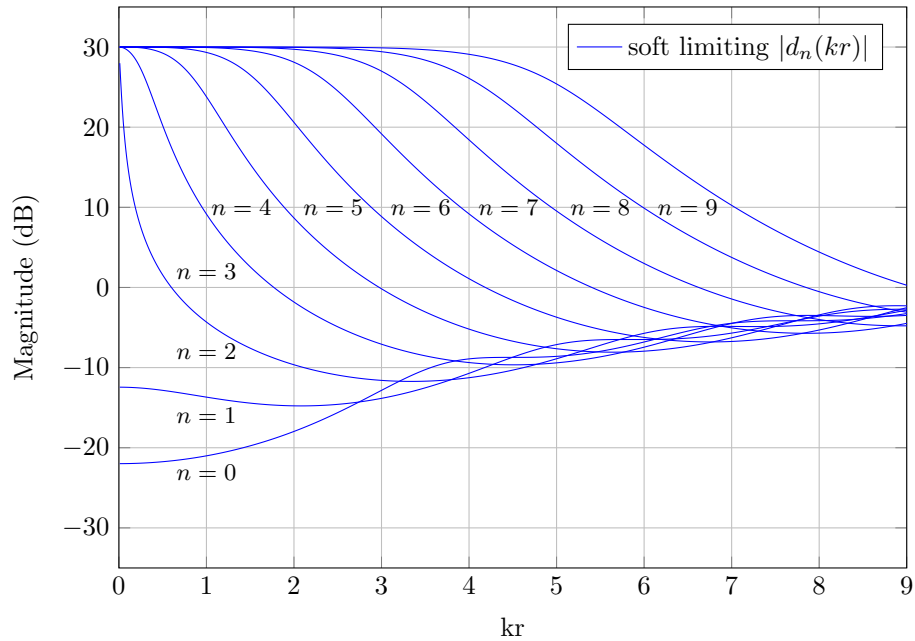


Abbildung 5.7: Regularisierte modale Verstärkung $|d_n(kr)|$ für $n = 0, \dots, 9$ für ein Open Sphere Array aus Mikrofonen mit nierenförmiger Richtcharakteristik

5.3.1 Wahrgenommene Gesamtqualität

Einige Probanden bewerteten die Gesamtqualität der Arrayaufnahmen besser als die der Referenz. In Gesprächen nach dem Versuch berichteten mehrere Teilnehmer, dass sie die Testitems teilweise als viel halliger empfanden und es in einigen Fällen für sie besser klang als die im Vergleich trockene Referenz.

Die wahrgenommene stärkere Halligkeit ist wohl durch das verstärkte Rauschen zu erklären. Es klingt anfangs wie ein Nachhall, bricht jedoch nach kurzer Zeit ab. Bei den Schlagzeugbeispielen ist das recht deutlich zu hören und wird als unnatürlich empfunden, was zu einer Abwertung führt. In dem Saxophonbeispiel gibt es jedoch Passagen, die gebunden gespielt werden. Dabei ist das Abreißen des vermeintlichen

kr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{alias} = 2kHz$									
r=2.73cm	2000	3999	5999	7999	9998	11998	13997	15997	17997
r=8.19cm	667	1333	2000	2666	3333	3999	4666	5332	5999
r=13.65cm	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600
r=19.11cm	286	571	857	1143	1428	1714	2000	2285	2571
r=24.57cm	222	444	667	889	1111	1333	1555	1778	2000
$f_{alias} = 6kHz$									
r=0.91cm	5999	11998	17997	23996	29995	35994	41992	47991	53990
r=2.73cm	2000	3999	5999	7999	9998	11998	13997	15997	17997
r=4.55cm	1200	2400	3599	4799	5999	7198	8398	9598	10798
r=6.37cm	857	1714	2571	3428	4285	5141	5999	6860	7712
r=8.19cm	667	1333	2000	2666	3333	3999	4666	5332	5999

Tabelle 5.3: Überblick zur Dimensionierung der Arrays

Nachhalls nicht immer so offensichtlich. Dies führte vermutlich zu den besseren Bewertungen der Saxophonbeispiele.

Des Weiteren war aufgefallen, dass die Gesamtqualität für die höhere Aliasingfrequenz als schlechter bewertet wurde. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Radien dieser Arrays deutlich kleiner waren, als bei den jeweiligen Arrays gleicher Ordnung mit der niedrigeren Aliasingfrequenz. Das kann zu ungünstigen Klangverfärbungen führen. Dieser Effekt zeigt den Kompromiss, welcher beim Arraydesign immer wieder zum Tragen kommt. Es ist aber auch anzumerken, dass dies vor allem für die Ordnungen $N = 3, 5, 7$ gilt. Für $N = 9$ nähern sich die Mittelwerte deutlich an.

5.3.2 Wahrgenommene Klangfarbe bzw. Klangverfärbung

Einige Probanden berichteten, dass sie die Referenz als dumpf und somit nicht optimal empfanden. Dies begünstigt, dass Arraybeispiele in Bezug auf die Klangfarbe als besser bewertet wurden. Jedoch wurden alle Arraybeispiele im Bezug zur selben Referenz bewertet. Daher sind die Bewertungen noch immer untereinander vergleichbar. Dies zeigt, dass es gut war, die Referenz auf der Skala nicht bei 100 anzulegen, sondern stattdessen auch die Bewertung „besser als“ zuzulassen.

Des Weiteren scheint auch hier der vermeintlich Hall in einzelnen Fällen zu einer

als natürlicher wahrgenommenen Klangfarbe zu führen. Das gaben zumindest einige Teilnehmer im Nachfolgespräch an.

Auch im Bezug auf die Klangfarbe waren die vergleichsweise schlechteren Bewertungen bei der eigentlich „besseren“ Aliasingfrequenz aufgefallen. Die recht kleine Radius verursacht ein schlechtes Verhalten in Bezug auf tiefe Frequenzen. Diese sind in der Auralisation kaum wahrzunehmen. Das verursacht einen unnatürlichen Klang und schlechte Bewertungen bezüglich der Klangfarbe. Es ist eben sehr wichtig, nicht nur auf die Aliasingfrequenz hin zu optimieren. Bei der Klangfarbe fällt der Effekt vor allem für $N = 3$ und $N = 5$ ins Gewicht.

5.3.3 Wahrgenommene Externalisierung

In den Bewertungen zur Externalität konnten in der ANOVA bis auf eine Ausnahme keine signifikanten Unterschiede im Bezug zur Referenz, sowie auch im Vergleich der Arrays untereinander aufgezeigt werden. Die Bewertungen sind auf der Skala stark gestreut. Interessant ist vor allem, dass die externe Wahrnehmung der Schallquellen in den Arrayauralisationen sehr häufig als besser im Vergleich zur Referenz eingeordnet wurde.

Es ist allgemein bekannt, dass die Bewertung von Externalität eng mit dem Direct-to-Reverberant-Energy-Ratio (DRR) verbunden ist. Möglicherweise kommt dabei der vermeintliche „Halleffekt“ zum Tragen, welcher einen höheren Hallanteil suggeriert. Die Quelle wird dann in größerer Distanz wahrgenommen und die Externalität als besser bewertet.

Des Weiteren wirkt sich hier vermutlich aus, dass die Lokalisierbarkeit in Kugellarrayauralisationen teilweise beeinträchtigt wird. Einige Probanden berichteten, dass tiefe Frequenzen an einer anderen Position wahrgenommen wurden als die höheren Frequenzen der gleichen Schallquelle. Die Bewertung der Externalität hängt dann davon ab, auf welchen Frequenzbereich sich der Proband konzentriert.

Außerdem waren in einigen Auralisationen die tiefen Frequenzen weniger zu hören. Ein Gedanke ist, dass es sich vorteilhaft auf die Externalisierung auswirkt, wenn vor allem höhere Frequenzen zu hören sind. Dieser Gedanke unterstützt auch die Beobachtung, dass die Schallquellen in verschiedenen Mikrofonarraysimulationen stärker extern wahrgenommen wurden als die Referenz, obwohl die Gesamtqualität abgewertet wurde.

In dem Boxplot in Abbildung 5.5 ist für die Quellposition vorn allgemein eine mit

der Ordnung steigende Externalisierung zu erkennen. Zum einen ist es möglich, dass eben der schwächer werdende Bassanteil eine Externalisierung begünstigt. Möglicherweise wirkt sich in diesem Fall aber tatsächlich die steigende räumliche Auflösung der Arrayaufnahme aus. Welcher Effekt von beiden hier wie stark ins Gewicht fällt, lässt sich anhand der Ergebnisse kaum sagen.

Für $f_{alias} = 6000\text{Hz}$ ist ein ähnlicher Trend vorwiegend für das Saxophone zu beobachten. Interessant ist, dass der Effekt für die seitliche Schallquelle nicht zu beobachten ist.

Individuelle Betrachtung der Bewertungen einzelner Probanden In Anhang C.3 sind die individuellen Bewertungen der Externalität abgebildet. Dabei ist zu erkennen, dass es teilweise zu großen Unterschieden kommt. Beispielsweise die Bewertungen von Proband 11 weisen eine starke Abhängigkeit der Externalität von der maximalen Ordnung des Mikrofonarrays auf. Allerdings nimmt der Proband für die Schlagzeugbeispiele welche mit den Arrays mit $f_{alias} = 6\text{kHz}$ simuliert wurden, keine Externalität war. Diese Beispiele wurden durchweg mit 0 bewertet. Jedoch für ein Saxophon an den gleichen Quellpositionen hat er teilweise hohe Bewertungen (65-85) abgegeben. Da der Proband jedoch ansonsten eine konsistente Bewertungen aufweist, sind die Bewertungen des Schlagzeugs in diesem Fall möglicherweise als persönliche Ausreißer zu betrachten.

Auch die Bewertungen der Externalität durch Proband 10 weisen tendenziell eine klare Abhängigkeit von der maximalen Ordnung auf, jedoch sinken die Werte mit steigender Ordnung. Das steht dem klaren Trend in den Urteilen von Proband 11 entgegen. Auch bei Proband 10 gibt es persönliche Ausreißer, wie z.B. die Bewertung des Saxophons Links bei $N = 7$ (blau) oder des Schlagzeugs vorn bei $N = 1$ (dunkelgrün). Bei den Schallquellen vorn liegt jedoch, anders als für die seitliche Quellposition, die Bewertung für $N = 9$ wieder über $N = 7$.

Beiden Probanden stehen die Bewertungen von Proband 9 entgegen, die keinerlei tendenzielle Abhängigkeit von der Ordnung erkennen lässt. Ähnliches kann über die Ergebnisse der Probanden 4, 5 und 12 gesagt werden. Proband 8 hat die Externalität der Testitems durchweg als besser im Vergleich zur Referenz beurteilt. Die besseren Urteile sind eher in den niedrigeren Maximal-Ordnungen zu finden. Eine klare Tendenz ist jedoch nicht erkennbar.

Neben Proband 10 weißt kein weiterer Versuchsteilnehmer Bewertungen auf, nach welchen die Externalität so strukturiert mit zunehmender Ordnung abnimmt. Da die Hörbeispiele in ihrer Reihenfolge immer wieder auf Neue zufällig angeordnet wurden,

ist es unwahrscheinlich, dass die Antwortstruktur auf willkürlichen Antworten beruht.

Weitere mit steigender Ordnung tendenziell bessere Externalität lässt sich in den Bewertungen der Probanden 6 und 7 erkennen. Die Bewertungen der Probanden 1, 2, 3, 13, 14 und 15 lässt eine solche Tendenz maximal erahnen.

Beispielsweise bei Proband 3 lässt sich erkennen, dass ähnliche Testbedingungen auch zu ähnlichen Bewertungen führte. So verlaufen die Werte für das Saxophon vorn bei beiden Aliasingfrequenzen sehr ähnlich, ebenso wie die Schlagzeugbeispiele bei $f_{alias} = 6kHz$ (hellgrün und dunkelgrün).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es konsistente Bewertungen bei einigen Probanden gibt. Jedoch lassen sich bei einigen Probanden größere Unsicherheiten in der Bewertung von Externalität erkennen. Die Probanden sind Studenten oder Mitarbeiter im Bereich Medientechnik. Alle haben bereits mehrfach an Hörversuchen teilgenommen. Ob die Unsicherheiten dennoch auf einen unzureichenden Erfahrungsschatz der Probanden zurückzuführen ist, lässt sich nicht mit Bestimmtheit ausschließen. Es ist jedoch auch möglich, dass die Hörbeispiele tatsächlich durch verschiedene Artefakte schwer zu beurteilen sind. Eine eingeschränkte Lokalisierbarkeit kann beispielsweise Unsicherheiten herbeiführen. Ebenfalls kann der vermeintliche Hall die Bewertungen beeinflussen.

Die individuellen Ausreißer betreffen immer wieder verschiedene Hörbeispiele und können daher nicht auf technische oder methodische Ursachen zurückgeführt werden.

Doch auch zwischen den Probanden mit in sich konsistenter Bewertung sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Eine Abhängigkeit der Bewertung von der Ordnung kann bei einigen sehr deutlich, bei anderen hingegen überhaupt nicht festgestellt werden. Inwiefern in diesem Zusammenhang interindividuelle Unterschiede bei der binauralen Wahrnehmung eine Rolle spielen, kann nur in Folgeexperimenten mit mehr Probanden und einem kritischeren Teilnehmer-Screening geklärt werden.

Ein markanter Unterschied zwischen den Bewertungen für Arrays mit $f_{alias} = 2000Hz$ und $f_{alias} = 6000Hz$ kann in den individuellen Betrachtungen nicht ausgemacht werden.

5.3.4 Fehlerbetrachtung zur allgemeinen Vorgehensweise

Durch Nutzung von simulierten Umgebungen können Fehler wie ungenaue Positionierung, Störgeräusche oder nicht-ideale Mikrofone ausgeschlossen werden. Insbesondere können auch Anordnungen mit sehr vielen Mikrofonen und hohe Ordnungen von

Sphärischen Harmonischen getestet werden. Durch die Idealisierung entstehen jedoch Abweichungen von der Realität. In der Simulationsalgorithmik können unmöglich alle realen physikalischen Vorgänge abgebildet werden. Die Untersuchung anhand von Simulationen kann daher nur Tendenzen aufzeigen. Die Ergebnisse müssen anschließend in realen Systemen verifiziert werden.

Durch die Verwendung nicht-individueller HRTFs kann es zu Fehllokalisationen kommen. Möglicherweise wird auch die Externalisierung beeinträchtigt. Die genutzten HRTF-Daten wurden außerdem mit einem Kunstkopf ohne Torso gemessen. Es ist nicht genau geklärt, inwiefern sich dies psychoakustisch auswirkt. Eine ITD-Anpassung der BRIR-Datensätze an den individuellen Probanden wäre für die Erzeugung einer stabilen Lokalisation der virtuellen Quelle theoretisch nötig. Allerdings kann das auch zusätzliche psychoakustische Artefakte einführen.

Simulation des Rauschens Für künftige Experimente ist zu bedenken, dass weißes, gaußsches Rauschen, welches z.B. das Rauschen der Mikrofonkapseln in der Simulation abbilden soll, nicht Teil der Übertragungsfunktion ist.

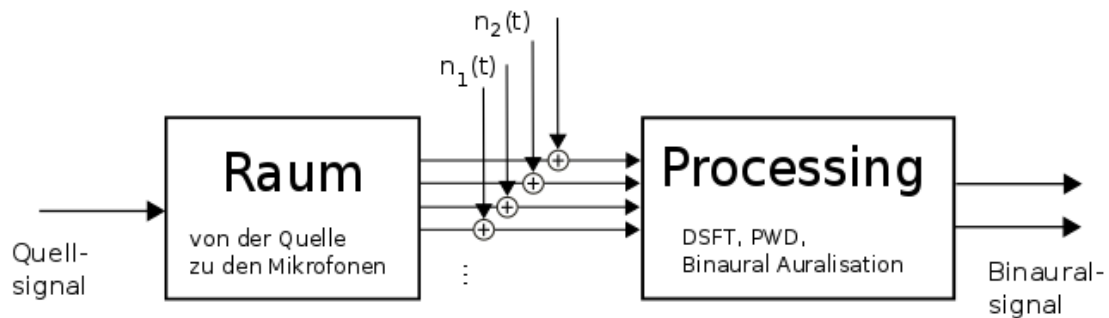


Abbildung 5.8: Überblick zur Systemmodellierung mit Rauschen

Eine Addition zu den einzelnen Raumimpulsantworten ist nicht korrekt, da das Rauschen in den Hörbeispielen somit nicht als signalunabhängiges kontinuierliches Rauschen zu hören ist. Stattdessen wird es mit dem Quellsignal gefaltet und es entsteht der vermeintliche Hall, welche die Bewertungen der Probanden nach deren Angabe sehr geprägt hat.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Fazit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den hörbaren Auswirkungen unterschiedlicher Mikrofonarrayentwürfe bei der binauralen Auralisation räumlicher Aufnahmen. Insbesondere werden verschiedene Anordnungen mit einer Samplingstrategie nach Lebedev und gleicher Aliasingfrequenz gegenübergestellt. Für den Entwurf der zu untersuchenden Mikrofonanordnungen wurden zunächst Aliasingfrequenzen von 2000Hz und 6000Hz , sowie die maximalen Ordnungen $N = 1, 3, 5, 7, 9$ festgelegt. Der Radius des Arrays wurde dann passend zu den Vorgaben ermittelt. Ein Kriterium bei der Auswahl der Anordnungen war auch die Realisierbarkeit, um hilfreiche Hinweise für den Entwurf realer Arrays gewinnen zu können.

Zunächst sollte eine Untersuchung in kontrollierter Umgebung stattfinden. Daher wurden die Mikrofonarraydaten für diesen Versuch simuliert. Mit Hilfe der Software MCRoomSim erfolgte die Simulation von Mikrofonarrayaufnahmen in einem virtuellen Raum, dessen Eigenschaften sich weitestgehend an einem realen Konzertsaal orientieren. Mittels dynamischer Binauralauralisation wurden die erzeugte Aufnahmedaten für insgesamt 10 Mikrofonanordnungen und je 2 Quellpositionen sowie 2 Quellsignale psychoakustisch gegenübergestellt. Als Referenz in dem Multi-Stimulus-With-Hidden-Reference-Versuch dienten simulierte Kunstkopfaufnahmen derselben Szenen. 15 Probanden bewerteten die verschiedenen Hörbeispiele nach der Gesamtqualität, der Klangfarbe, sowie der wahrgenommenen Externalisierung.

Als Fazit der Untersuchungsergebnisse lässt sich zunächst feststellen, dass die binaurale Auralisation der simulierten Arrayaufnahmen in ihrer Gesamtqualität sowie der Klangfarbe nicht an simulierte Kunstkopfaufnahmen derselben Szene herankommen. Die Externalität wurde jedoch im Wesentlichen als vergleichbar zu den Kunstkopfaufnahmen eingestuft.

Für die Externalität konnten in diesem Versuch generell kaum signifikante Unterschiede ermittelt werden, weder im Bezug zur Referenz, noch im Vergleich der Arrays untereinander.

Interessanterweise konnten auch nahezu keine signifikanten Unterschiede zwischen den Arrays mit einer maximalen Ordnung von $N = 1$ und $N = 9$ ermittelt werden. Es ist anzunehmen, dass eine separate Betrachtung der Lokalisierbarkeit von Schallquellen zu deutlichen Unterschieden führen würde.

Die Ergebnisse der Untersuchung erlauben noch keine klare Empfehlung einer bestimmten Kugelmikrofonarraykonfiguration. Die Betrachtung weiterer Qualitätskriterien wie Lokalisierbarkeit der Schallquelle, Natürlichkeit und Plausibilität der auralisierten Szene sind notwendig. Darüber wurde diese Untersuchung nur anhand von simulierten Array- und Kunstkopfaufnahmen durchgeführt. Für eine allgemeine Aussage ist eine Betrachtung realer Aufnahmen wesentlich. Des Weiteren ist zu bedenken, dass ein Hörversuch mit 15 Probanden nur Tendenzen aufzeigen kann.

6.1 Ausblick

In gezielten Vorbetrachtungen wurden geeignete Signalvorverarbeitungsschritte für diese Untersuchung gewählt. Dazu zählt die verbesserte Vorgehensweise bei der binauralen Auralisation (siehe Abschnitt 3.1), sowie die Softlimiting-Regularisierung (siehe Abschnitt 3.1.4), welche sich günstig auf den zeitlichen Verlauf auswirkt. Der Zeitrahmen einer Masterarbeit erlaubt jedoch nur die Erwägung einer gewissen Auswahl von Vorverarbeitungsmöglichkeiten.

Insbesondere bei der Analyse der Klangfarbenbewertung ist zu bedenken, dass aktuell verschiedene Ansätze zur Klangfarbenkorrektur verfolgt werden, z.B. [SVR14, SR14]. Die vorgestellte Untersuchung berücksichtigt noch keine dieser Korrekturmöglichkeiten. Doch es empfiehlt sich, die Leistungsfähigkeit der einzelnen Ansätze zu analysieren und geeignete Signalverarbeitungsschritte in den Entwurfsprozess von Kugelmikrofonarrays einzubeziehen.

In dieser Arbeit wurden nur die Gesamtqualität, die Klangfarbe, sowie die Externalität psychoakustisch untersucht. Bekanntlich spielen bei der Auralisation von Kugelmikrofonarraydaten unter anderen auch Artefakte in der Abbildung der Schallquellenposition, sowie Artefakte durch ungünstige Rauschverstärkungen eine wesentliche Rolle. Diese Aspekte müssen bei der Beurteilung, ob eine bestimmte Mikrofonarray-

konfiguration besonders empfehlenswert ist, berücksichtigt werden. Daher sollte eine entsprechende Untersuchung erfolgen. Zunächst wäre eine Betrachtung anhand der hier verwendeten Hörbeispiele interessant, um ein Gesamtfazit bezüglich der Qualität zu erlauben.

Darüber hinaus ist auch eine Analyse der einzelnen Qualitätsmerkmale an vielen weiteren Arrays nötig, beispielsweise mit anderen Samplingstrategien wie dem Gaussian Sampling. Auch die Frage, inwiefern sich die Richtcharakteristik der Mikrofone hörbar in der Auralisation auswirkt, wurde noch nicht in ausreichendem Maß untersucht.

Auch eine Betrachtung höherer Werte für die Aliasingfrequenz wäre interessant, da es möglicherweise einen Wert gibt, ab welchem eine Erhöhung der Aliasingfrequenz keine hörbare Änderung mehr hervorruft.

In einigen Studien, als auch in eigenen Voruntersuchungen deutete sich an, dass ab einer Aliasingfrequenz von 10kHz eine weitere Erhöhung kaum mehr hörbaren Verbesserungen mit sich bringt. Eine gezielte Untersuchung dieses Sachverhaltes konnte bisher in der Literatur jedoch nicht gefunden werden.

Der Effekt der vermeintlich stärkeren Halligkeit scheint sich auf die Ergebnisse dieses Versuchs ausgewirkt zu haben. Dieser Aspekt sollte in Zukunft näher betrachtet werden. Der virtuelle Raum in diesem Versuch hatte eine Nachhallzeit von 0,86s. Es sollte im Vergleich eine Untersuchung mit einem deutlich halligerem Raum durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit, diesen Effekt aus einer psychoakustischen Untersuchung zu eliminieren, wären Arraysimulationen ohne das Rauschen einzubinden. Dies führt zwar zunächst nicht zu praxisnahen Auralisationsbeispielen, erlaubt jedoch eine Trennung der Auswirkung einzelner Störgrößen.

Insbesondere für künftige Untersuchungen zur Lokalisierbarkeit von Quellen, sollte eine dynamische Binauralauralisation mit individuellen HRTFs oder zumindest mit einer Individualisierung in Form einer ITD-Anpassung erfolgen. Darüber hinaus wäre auch interessant, den durch fehlende Anpassung erzeugten Fehler näher zu bestimmen.

Literaturverzeichnis

- [AAG⁺13] A. Avni, J. Ahrens, M. Geier, S. Spors, H. Wierstorf, and B. Rafaely, “Spatial perception of sound fields recorded by spherical microphone arrays with varying spatial resolution,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 133(5), May, 2013.
- [AR10] A. Avni and B. Rafaely, “Sound localization in a sound field represented by spherical harmonics,” in *2nd Int. Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics, Paris, France*, 2010.
- [BDPW13] S. Bertet, J. Daniel, E. Parizet, and O. Warusfel, “Investigation on localisation accuracy for first and higher order ambisonics reproduced sound sources,” *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 99, No. 4, pp. 642-657, 2013.
- [Ber13] B. Bernschütz, “A Spherical Far Field HRIR/HRTF Compilation of the Neumann KU100,” *Fortschritte der Akustik AIA-DAGA 2013, DEGA e.V., Berlin*, pp.592-595, 2013.
- [Ber14] —, “Adaption of HRTFs to Plane Waves with Reduced Modal Order,” in *40. Jahrestagung Akustik, Oldenburg*, 2014.
- [BPSW10] B. Bernschütz, C. Pörschmann, S. Spors, and S. Weinzierl, “Entwurf und Aufbau eines sphärischen Mikrofonarrays für Forschungsanwendungen in Raumakustik und Virtual Audio,” in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2010, Dega e.V., Oldenburg*, pp. 717-718, 2010.
- [BPSW11] —, “Soft-Limiting der modalen Amplitudenverstärkung bei sphärischen Mikrofonarrays im Plane Wave Decomposition Verfahren,” in *37. Jahrestagung Akustik, Düsseldorf*, 2011.

- [BSK05] D. Brungart, B. Simpson, and A. Kordik, "The detectability of head-racker latency in virtual audio displays," in *11th Meeting of the Int. Conference on Auditory Display (ICAD)*, Limerick, 2005.
- [BVGPA14] B. Bernschütz, A. Vázquez Giner, C. Pörschmann, and J. Arend, "Binaural Reproduction Of Plane Waves With Reduced Modal Order," *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 100, pp. 972-983, 2014.
- [BWA01] D. R. Begault, E. M. Wenzel, and M. R. Anderson, "Direct comparison of the impact of head tracking, reverberation and individualized head-related transfer functions on the spatial perception of a virtual speech source," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 49, No. 10, October, 2001.
- [DZL⁺05] R. Duraiswami, D. N. Zotki, Z. Li, E. Grassi, N. A. Gumerov, and L. S. Davis, "High order spatial audio capture and its binaural head-tracked playback over headphones with HRTF cues," *119th Int. Convention of the Audio Eng. Soc.*, New York, USA, 2005.
- [Hea15] "FH Köln - Audio Group Download Server - HPCF Headphone Compensation Filters," 2015, abgerufen am 23.09. [Online]. Available: <http://audiogroup.web.th-koeln.de/FILES/HPCF.zip>
- [ITU14] ITU, Radiocommunication Sector, "Recommendation ITU-R BS.1534-2 (06/2014)," International Telecommunication Union, Tech. Rep., 2014.
- [Kut09] H. Kuttruff, *Room Acoustics - 5th edition*. Spon Press, 2009.
- [LB12] A. Lindau and F. Brinkmann, "Perceptual Evaluation of the Headphone Compensation in Binaural Synthesis Based on Non-individual recordings," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 60 (1/2), pp. 54-62, 2012.
- [Leb92] S. Lebedev, "Quadrature formulas of orders 41, 47 and 53 on the sphere," *Russ. Acad. Sci. Dokl. Math.*, Vol. 45, No. 3, pp. 587-592, 1992.
- [LEW10] A. Lindau, J. Estrella, and S. Weinzierl, "Individualization of dynamic binaural synthesis by real time manipulation of the ITD," in *128th AES Convention*, London, preprint no. 8088, 2010.
- [Lin09] A. Lindau, "The Perception of System Latency in Dynamic Binaural Synthesis," in *DAGA Rotterdam*, 2009.

- [LMW08] A. Lindau, H.-J. Maempel, and S. Weinzierl, “Minimum BRIR grid resolution for dynamic binaural synthesis,” in *Acoustics '08, Paris*, pp. 3851-3856, 2008.
- [Lös14] S. Lösler, “MIMO-Rekursiv Filter für Kugelarrays,” Master’s thesis, Kunstuniversität Graz, 2014.
- [LZ15] S. Lösler and F. Zotter, “Comprehensive radial filter design for practical higher-order ambisonics recording,” in *41. Jahrestagung Akustik, Nürnberg*, 2015.
- [Mar14] M. Marschall, “Capturing and reproducing realistic acoustic scenes for hearing research,” Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, 2014.
- [ME02] J. Meyer and G. Elko, “A highly scalable spherical microphone array based on an orthonormal decomposition of the soundfield,” in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2002.
- [MF11] B. Maseiro and J. Fels, “Perceptually robust headphone equalization for binaural reproduction,” in *130th AES Convention, London*, 2011.
- [mha15] mhacoustics - Webseite, “Abbildung Eigenmike,” 2015, abgerufen am 20.06. [Online]. Available: <http://www.mhacoustics.com/sites/default/files/imagepicker/1/i5.jpg>
- [MHJS99] H. Møller, D. Hammershøi, C. Jensen, and M. Sørensen, “Binaural Technique: Do we need individual recordings,” *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 44, pp. 451-469, 1999.
- [MRT98] P. Mackensen, K. Reichenauer, and G. Theile, “Einfluß der spontanen Kopfbewegung auf die Lokalisation beim binauralen Hören,” in *20. Tonmeistertagung des VDT*, 1998.
- [MTG⁺09] F. Melchior, O. Thiergart, G. D. Galdo, D. De Vries, and S. Brix, “Dual radius spherical cardioid microphone arrays for binaural auralization,” in *127th Int. Convention of the Audio Eng. Soc.*, 2009.
- [Pic15] “FH Köln - Webseite - Abbildung einer VariSphear-Anordnung,” 2015, abgerufen am 16.06. [Online]. Available: <http://www.f07.fh-koeln.de/imperia/md/content/int/projekte/asar/array1.jpg>

- [Raf04] B. Rafaely, “Plane-wave decomposition of the sound field on a sphere by spherical convolution,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 116(4), No. 1, October, 2004.
- [Raf05] ———, “Analysis and design of spherical microphone arrays,” *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 13, No.1, January, 2005.
- [Raf07] ———, “Spatial aliasing in spherical microphone arrays,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 55, No. 3, March, 2007.
- [Raf15] ———, *Fundamentals of Spherical Array Processing*. Springer, 2015.
- [RAZ15] “Razor AHRS,” 2015, zuletzt besucht am 20.02. [Online]. Available: <https://github.com/ptrbrtz/razor-9dof-ahrs/>
- [RPFF14] J.-G. Richter, M. Pollow, W. F., and J. Fels, “Spherical Harmonics Based HRTF Datasets: Implementation and Evaluation for Real-Time Auralization,” *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 100, S. 667-675, 2014.
- [RS14] T. Rettberg and S. Spors, “Time-domain behaviour of spherical microphone arrays at high orders,” *40. Jahrestagung Akustik, Oldenburg*, 2014.
- [Sab23] W. Sabine, “Collected Papers on Acoustics No. 1,” *Cambridge: Harvard University Press. See also The American Architect*, 1900, 1923.
- [San96] J. Sandvad, “Dynamic Aspects of Auditory Virtual Environments,” in *100th AES Convention, Copenhagen, preprint no. 4226*, 1996.
- [SEH08] W. Song, W. Ellermeier, and J. Hald, “Using beamforming and binaural synthesis for the psychoacoustical evaluation of target sources in noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol 123, 2, 2008.
- [SL09] Z. Schärer and A. Lindau, “Evaluation of equalization methods for binaural signals,” in *126th AES Convention, preprint 7721*, 2009.
- [SR14] J. Sheaffer and B. Rafaely, “Equalizing Strategies for Binaural Room Impulse Response Rendering using Spherical Arrays,” in *IEEE 28-th Convention of Electronics Engineers in Israel*, 2014.
- [SVR14] J. Sheaffer, S. Villeval, and B. Rafaely, “Rendering binaural room impulse responses from spherical microphone array recordings using timbre

- correction,” in *EAA Joint Symp. On Auralization and Ambisonics, Berlin*, 2014.
- [WEJv10] A. Wabnitz, N. Epain, C. Jin, and A. van Schaik, “Room acoustics simulation for multichannel microphone arrays,” in *Int. Symp. on Room Acoustics, ISRA, Melbourne, Australia*, 2010.
- [Wil99] E. G. Williams, *Fourier Acoustics*. Academic Press, 1999.
- [ZFH15] F. Zotter, M. Frank, and C. Haar, “Spherical microphone array equalization for Ambisonics,” in *41. Jahrestagung für Akustik, Nürnberg*, 2015.
- [Zot09] F. Zotter, “Sampling strategies for acoustic holography/holophony on the sphere,” in *NAG-DAGA, Rotterdam*, 2009.

Anhang A

Errechnung der Nachhallzeit und des Hallradius des virtuellen Raumes

Zur näherungsweisen Bestimmung der Nachhallzeit wurde die Sabinesche Formel [Sab23] [Kut09] herangezogen:

$$T_{60} = \frac{0.163 \cdot V}{A} = \frac{0.163 \cdot 2000m^3}{381m^2} = 0,86s \quad (A.1)$$

T_{60} = Nachhallzeit [sec]

V = Raumvolumen [m^3]

A = äquivalente Absorptionsfläche [m^2]

Die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche erfolgt nach:

$$\begin{aligned} A &= \sum S_i \cdot \alpha_i \\ &= (12,5m \cdot 8m) \cdot 0,3 + (12,5m \cdot 8m) \cdot 0,3 + (20m \cdot 8m) \cdot 0,3 \\ &\quad + (20m \cdot 8m) \cdot 0,3 + (20m \cdot 12,5m) \cdot 0,4 + (20m \cdot 12,5m) \cdot 0,5 \\ &= 381m^2 \end{aligned} \quad (A.2)$$

S = Summe der Oberflächen [m^2]

α = Absorptionsgrad des Materials [1] - wie in Tabelle 4.4 angegeben

Der Hallradius des virtuellen Raumes ergibt sich aus:

$$r_{Hall} = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{2000}{0,86}} = 2,75m \quad (\text{A.3})$$

Anhang B

Anleitung und Fragebogen für die Probanden im Hörversuch

Liebe(r) Proband(in),

zunächst einmal vielen Dank für die Teilnahme an meinem Experiment.

Alle Daten, die ich von Ihnen aufnehme, werden nur in anonymisierter Form gespeichert und zu keinem anderen Zweck als der wissenschaftlichen Auswertung des Hörversuchs verwendet.

Die Teilnahme am Hörversuch ist freiwillig und der Versuch kann jederzeit auf Wunsch des Probanden/der Probandin abgebrochen werden.

Anleitung für die Versuchsdurchführung

In diesem Hörversuch werden verschiedene Kugelmikrofonarraykonfigurationen gegenübergestellt. Diese sollen erst bezüglich der wahrgenommenen **Gesamtqualität**, der **Klangfarbe** und der wahrgenommenen **Externalisierung** bewertet werden. Dafür wurde eine dynamische Binauralauralisation verschiedener Aufnahmen der jeweiligen Konfigurationen als Hörbeispiele vorbereitet.

Bei der Wiedergabe wird mittels **Headtracking** die Kopfbewegung erfasst und berücksichtigt. Das System wurde auf „Peilbewegungen“ optimiert. Bitte beschränken Sie sich bei der Bewertung auf diese Form der Kopfbewegung.

Die Bewertung erfolgt in einer Multi-Stimulus-Anordnung. Das heißt, mehrere Hörbeispiele können im Vergleich gehört werden. Durch Auswählen der Buttons „A“ bis „E“, sowie „Ref“ können die verschiedenen Hörbeispiele bzw. die Referenz angewählt werden.

Jedes dieser Beispiele soll im Bezug zur Referenz beurteilt werden. Der Referenz ist dabei der Wert **50** auf der Skala zugeordnet. Wird z.B. die Gesamtqualität als gleichwertig zur Referenz eingeordnet, so ist ebenfalls der Wert 50 anzugeben. Ein Wert größer als 50 steht für eine besser Gesamtqualität, eine als besser empfundene Klangfarbe oder eine als besser empfundene Externalisierung. Der Wert **100** steht für „sehr viel besser als in der Referenz“ und ein Wert von **0** steht für „sehr viel schlechter als in der Referenz“. Die Werte dazwischen können für entsprechende Zwischenstufen gewählt werden.

Bevor die wirkliche Bewertung beginnt, werden einige **Trainingsbeispiele** zur Verfügung gestellt. Bitte nutzen Sie diese, um sich mit der Nutzeroberfläche, Headtracking und dem Bewertungssystem vertraut zu machen. Bitte beachten Sie ebenfalls, in welcher Form Gesamtqualität, Klangfarbe und Externalisierung in den Beispielen variieren.

Wenn Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich gern an die Versuchsleiterin.

Nochmals vielen Dank für die Teilnahme und viel Spaß beim Bewerten!

Probanden-Nr. _____

Alter: _____

Sind Ihnen Beeinträchtigungen Ihres Hörvermögens bekannt?

Wie schätzen Sie selbst Ihre Fähigkeit als aufmerksamer/kritischer Hörer ein?

Sehr erfahren ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **Sehr unerfahren**

Wie erfahren sind Sie in Bezug auf Hörversuche mit Binauralwiedergabe?

Sehr erfahren ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **Sehr unerfahren**

Anhang C

Ergebnisse im Überblick

C.1 Hörversuchsergebnisse: Überblick der Mittelwerte

	N=1	N=3	N=5	N=7	N=9
$f_{alias}=2000Hz$	r=2.73cm	r=8.19cm	r=13.65cm	r=19.11cm	r=24.57cm
Saxophon links	35.6	43.6	47.3	41.7	37.3
Saxophon vorn	32.7	47.6	44.9	38.7	35.1
Schlagzeug links	17.4	23.6	28.4	30.0	30.0
Schlagzeug vorn	21.0	28.0	28.0	30.0	30.7
$f_{alias}=6000Hz$	r=0.91cm	r=2.73cm	r=4.55cm	r=6.37cm	r=8.19cm
Saxophon links	42.2	18.9	20.0	30.9	43.4
Saxophon vorn	41.8	21.8	18.4	28.0	44.4
Schlagzeug links	25.0	14.7	13.5	14.4	24.9
Schlagzeug vorn	23.3	12.6	15.3	18.9	31.2

Tabelle C.1: Mittelwerte zur Bewertung der Gesamtqualität

	N=1	N=3	N=5	N=7	N=9
$f_{alias}=2000Hz$	r=2.73cm	r=8.19cm	r=13.65cm	r=19.11cm	r=24.57cm
Saxophon links	31.9	41.1	40.7	36.3	34.9
Saxophon vorn	35.0	50.0	43.4	35.6	37.8
Schlagzeug links	28.0	31.3	31.0	25.6	26.4
Schlagzeug vorn	27.5	32.9	34.4	28.5	27.1
$f_{alias}=6000Hz$	r=0.91cm	r=2.73cm	r=4.55cm	r=6.37cm	r=8.19cm
Saxophon links	37.4	16.6	15.8	40.6	49.4
Saxophon vorn	46.0	22.3	19.9	29.9	38.8
Schlagzeug links	30.0	14.8	15.9	25.6	31.7
Schlagzeug vorn	39.6	18.7	18.0	27.1	32.4

Tabelle C.2: Mittelwerte zur Bewertung der Klangfarbe

	N=1	N=3	N=5	N=7	N=9
$f_{alias}=2000Hz$	r=2.73cm	r=8.19cm	r=13.65cm	r=19.11cm	r=24.57cm
Saxophon links	47.5	49.8	55.2	55.4	52.4
Saxophon vorn	40.9	52.4	52.7	57.1	52.2
Schlagzeug links	39.6	46.9	48.0	50.4	44.8
Schlagzeug vorn	36.6	43.5	51.7	55.9	59.9
$f_{alias}=6000Hz$	r=0.91cm	r=2.73cm	r=4.55cm	r=6.37cm	r=8.19cm
Saxophon links	46.1	42.4	42.8	55.4	49.6
Saxophon vorn	45.0	41.3	52.3	57.9	56.9
Schlagzeug links	40.8	43.3	39.4	39.7	41.5
Schlagzeug vorn	35.0	40.7	39.3	37.4	47.4

Tabelle C.3: Mittelwerte zur Bewertung der Externalität

C.2 Ergebnisse der ANOVA

Tabelle C.4: p-Werte für Gegenüberstellung der einzelnen Arrays mit der Referenz
1-8 Gesamtqualität, 9-16 Klangfarbe, 17-24 Externalität, rot: $p < 0,05$

#	Bedingung	Ref zu N1	Ref zu N3	Ref zu N5	Ref zu N7	Ref zu N9
1	Sax links	$2.55 \cdot 10^{-3}$	$8.69 \cdot 10^{-2}$	$6.73 \cdot 10^{-1}$	$8.66 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$
2	Sax mitte	$2.14 \cdot 10^{-8}$	$4.80 \cdot 10^{-1}$	$2.72 \cdot 10^{-1}$	$6.15 \cdot 10^{-3}$	$6.36 \cdot 10^{-4}$
3	Drums links	$8.15 \cdot 10^{-10}$	$2.50 \cdot 10^{-7}$	$8.69 \cdot 10^{-6}$	$3.11 \cdot 10^{-5}$	$7.09 \cdot 10^{-4}$
4	Drums mitte	$2.72 \cdot 10^{-8}$	$2.19 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-7}$	$3.86 \cdot 10^{-6}$	$3.62 \cdot 10^{-4}$
5	Sax links	$6.77 \cdot 10^{-2}$	$8.77 \cdot 10^{-9}$	$7.63 \cdot 10^{-8}$	$2.12 \cdot 10^{-7}$	$3.13 \cdot 10^{-2}$
6	Sax mitte	$5.81 \cdot 10^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-6}$	$3.56 \cdot 10^{-11}$	$1.31 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-1}$
7	Drums links	$1.97 \cdot 10^{-9}$	$1.60 \cdot 10^{-7}$	$4.26 \cdot 10^{-9}$	$2.25 \cdot 10^{-13}$	$2.27 \cdot 10^{-10}$
8	Drums mitte	$1.58 \cdot 10^{-9}$	$1.11 \cdot 10^{-12}$	$4.08 \cdot 10^{-11}$	$9.08 \cdot 10^{-13}$	$7.18 \cdot 10^{-6}$
9	Sax links	$1.32 \cdot 10^{-4}$	$4.55 \cdot 10^{-2}$	$3.38 \cdot 10^{-3}$	$4.58 \cdot 10^{-3}$	$2.98 \cdot 10^{-3}$
10	Sax mitte	$9.94 \cdot 10^{-4}$	$9.47 \cdot 10^{-1}$	$1.49 \cdot 10^{-1}$	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$3.13 \cdot 10^{-3}$
11	Drums links	$3.64 \cdot 10^{-6}$	$3.22 \cdot 10^{-4}$	$5.86 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-7}$	$4.87 \cdot 10^{-6}$
12	Drums mitte	$4.52 \cdot 10^{-9}$	$1.62 \cdot 10^{-7}$	$3.97 \cdot 10^{-4}$	$1.51 \cdot 10^{-5}$	$2.25 \cdot 10^{-6}$
13	Sax links	$2.76 \cdot 10^{-5}$	$8.31 \cdot 10^{-10}$	$2.25 \cdot 10^{-10}$	$1.16 \cdot 10^{-2}$	$4.20 \cdot 10^{-1}$
14	Sax mitte	$2.03 \cdot 10^{-1}$	$3.46 \cdot 10^{-6}$	$5.82 \cdot 10^{-9}$	$3.11 \cdot 10^{-4}$	$9.08 \cdot 10^{-4}$
15	Drums links	$3.41 \cdot 10^{-6}$	$6.68 \cdot 10^{-13}$	$1.99 \cdot 10^{-10}$	$6.35 \cdot 10^{-8}$	$2.27 \cdot 10^{-8}$
16	Drums mitte	$2.58 \cdot 10^{-4}$	$4.61 \cdot 10^{-9}$	$1.02 \cdot 10^{-8}$	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$5.10 \cdot 10^{-8}$
17	Sax links	$6.55 \cdot 10^{-1}$	$9.61 \cdot 10^{-1}$	$2.27 \cdot 10^{-1}$	$1.10 \cdot 10^{-1}$	$5.89 \cdot 10^{-1}$
18	Sax mitte	$4.22 \cdot 10^{-2}$	$5.74 \cdot 10^{-1}$	$4.56 \cdot 10^{-1}$	$5.35 \cdot 10^{-1}$	$9.89 \cdot 10^{-1}$
19	Drums links	$1.32 \cdot 10^{-1}$	$7.13 \cdot 10^{-1}$	$5.89 \cdot 10^{-1}$	$9.80 \cdot 10^{-1}$	$3.37 \cdot 10^{-1}$
20	Drums mitte	$5.10 \cdot 10^{-2}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$	$6.08 \cdot 10^{-1}$	$1.07 \cdot 10^{-1}$	$1.02 \cdot 10^{-2}$
21	Sax links	$5.17 \cdot 10^{-1}$	$2.04 \cdot 10^{-1}$	$4.16 \cdot 10^{-1}$	$4.88 \cdot 10^{-1}$	$9.47 \cdot 10^{-1}$
22	Sax mitte	$2.79 \cdot 10^{-1}$	$1.63 \cdot 10^{-1}$	$6.38 \cdot 10^{-1}$	$6.58 \cdot 10^{-2}$	$7.19 \cdot 10^{-2}$
23	Drums links	$1.73 \cdot 10^{-1}$	$3.34 \cdot 10^{-1}$	$9.90 \cdot 10^{-2}$	$8.00 \cdot 10^{-2}$	$2.09 \cdot 10^{-1}$
24	Drums mitte	$1.87 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-1}$	$1.19 \cdot 10^{-1}$	$3.72 \cdot 10^{-2}$	$7.41 \cdot 10^{-1}$

Tabelle C.5: p-Werte für Gegenüberstellung der einzelnen Arrays mit der Referenz
1-8 Gesamtqualität, 9-16 Klangfarbe, 17-24 Externalität, rot: $p < 0,05$

#	Bedingung	N1-N3	N1-N5	N1-N7	N1-N9	N3-N5	N3-N7	N3-N9	N5-N7	N5-N9	N7-N9
1	Sax L - 2kHz	$2.71 \cdot 10^{-1}$	$6.20 \cdot 10^{-2}$	$3.61 \cdot 10^{-1}$	$7.69 \cdot 10^{-1}$	$3.86 \cdot 10^{-1}$	$8.93 \cdot 10^{-1}$	$4.51 \cdot 10^{-1}$	$3.42 \cdot 10^{-1}$	$1.29 \cdot 10^{-1}$	$5.54 \cdot 10^{-1}$
2	Sax M - 2kHz	$2.10 \cdot 10^{-2}$	$2.71 \cdot 10^{-2}$	$1.99 \cdot 10^{-1}$	$6.50 \cdot 10^{-1}$	$8.22 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$	$8.45 \cdot 10^{-2}$	$3.14 \cdot 10^{-1}$	$1.14 \cdot 10^{-1}$	$4.99 \cdot 10^{-1}$
3	Drums L - 2kHz	$2.74 \cdot 10^{-1}$	$3.19 \cdot 10^{-2}$	$2.66 \cdot 10^{-2}$	$6.04 \cdot 10^{-2}$	$2.92 \cdot 10^{-1}$	$2.46 \cdot 10^{-1}$	$3.29 \cdot 10^{-1}$	$8.90 \cdot 10^{-1}$	$9.22 \cdot 10^{-1}$	$9.85 \cdot 10^{-1}$
4	Drums M - 2kHz	$2.10 \cdot 10^{-1}$	$2.50 \cdot 10^{-1}$	$8.72 \cdot 10^{-2}$	$7.05 \cdot 10^{-2}$	$7.97 \cdot 10^{-1}$	$7.46 \cdot 10^{-1}$	$5.56 \cdot 10^{-1}$	$5.11 \cdot 10^{-1}$	$3.68 \cdot 10^{-1}$	$7.43 \cdot 10^{-1}$
5	Sax L - 6kHz	$4.52 \cdot 10^{-4}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$2.49 \cdot 10^{-2}$	$9.62 \cdot 10^{-1}$	$7.83 \cdot 10^{-1}$	$4.14 \cdot 10^{-2}$	$2.27 \cdot 10^{-4}$	$9.11 \cdot 10^{-2}$	$6.97 \cdot 10^{-4}$	$1.70 \cdot 10^{-2}$
6	Sax M - 6kHz	$3.77 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-4}$	$3.06 \cdot 10^{-2}$	$6.68 \cdot 10^{-1}$	$6.12 \cdot 10^{-1}$	$3.09 \cdot 10^{-1}$	$7.37 \cdot 10^{-4}$	$7.81 \cdot 10^{-2}$	$8.96 \cdot 10^{-6}$	$7.15 \cdot 10^{-3}$
7	Drums L - 6kHz	$8.46 \cdot 10^{-2}$	$3.44 \cdot 10^{-2}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$8.92 \cdot 10^{-1}$	$8.67 \cdot 10^{-1}$	$9.73 \cdot 10^{-1}$	$9.50 \cdot 10^{-2}$	$8.57 \cdot 10^{-1}$	$3.86 \cdot 10^{-2}$	$1.26 \cdot 10^{-2}$
8	Drums M - 6kHz	$1.73 \cdot 10^{-2}$	$7.25 \cdot 10^{-2}$	$2.92 \cdot 10^{-1}$	$1.14 \cdot 10^{-1}$	$5.91 \cdot 10^{-1}$	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$4.50 \cdot 10^{-4}$	$3.23 \cdot 10^{-1}$	$2.62 \cdot 10^{-3}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$
9	Sax L - 2kHz	$5.90 \cdot 10^{-2}$	$5.46 \cdot 10^{-2}$	$2.57 \cdot 10^{-1}$	$4.67 \cdot 10^{-1}$	$8.35 \cdot 10^{-1}$	$4.23 \cdot 10^{-1}$	$2.62 \cdot 10^{-1}$	$4.81 \cdot 10^{-1}$	$2.87 \cdot 10^{-1}$	$7.13 \cdot 10^{-1}$
10	Sax M - 2kHz	$1.35 \cdot 10^{-2}$	$9.27 \cdot 10^{-2}$	$9.33 \cdot 10^{-1}$	$6.78 \cdot 10^{-1}$	$3.36 \cdot 10^{-1}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$3.15 \cdot 10^{-2}$	$9.31 \cdot 10^{-2}$	$1.91 \cdot 10^{-1}$	$6.31 \cdot 10^{-1}$
11	Drums L - 2kHz	$4.96 \cdot 10^{-1}$	$4.37 \cdot 10^{-1}$	$6.27 \cdot 10^{-1}$	$8.12 \cdot 10^{-1}$	$9.91 \cdot 10^{-1}$	$2.52 \cdot 10^{-1}$	$6.36 \cdot 10^{-1}$	$1.84 \cdot 10^{-1}$	$5.89 \cdot 10^{-1}$	$4.58 \cdot 10^{-1}$
12	Drums M - 2kHz	$9.29 \cdot 10^{-2}$	$1.41 \cdot 10^{-1}$	$9.49 \cdot 10^{-1}$	$8.25 \cdot 10^{-1}$	$8.48 \cdot 10^{-1}$	$1.97 \cdot 10^{-1}$	$1.26 \cdot 10^{-1}$	$2.12 \cdot 10^{-1}$	$1.50 \cdot 10^{-1}$	$9.02 \cdot 10^{-1}$
13	Sax L - 6kHz	$1.12 \cdot 10^{-4}$	$5.47 \cdot 10^{-5}$	$3.86 \cdot 10^{-1}$	$4.62 \cdot 10^{-2}$	$9.10 \cdot 10^{-1}$	$5.06 \cdot 10^{-5}$	$5.54 \cdot 10^{-6}$	$2.71 \cdot 10^{-5}$	$3.03 \cdot 10^{-6}$	$2.56 \cdot 10^{-1}$
14	Sax M - 6kHz	$2.70 \cdot 10^{-4}$	$7.83 \cdot 10^{-6}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$7.15 \cdot 10^{-1}$	$2.46 \cdot 10^{-1}$	$7.22 \cdot 10^{-3}$	$9.88 \cdot 10^{-2}$	$4.81 \cdot 10^{-4}$	$1.48 \cdot 10^{-1}$
15	Drums L - 6kHz	$3.44 \cdot 10^{-3}$	$9.48 \cdot 10^{-3}$	$3.20 \cdot 10^{-1}$	$7.70 \cdot 10^{-1}$	$9.18 \cdot 10^{-1}$	$4.52 \cdot 10^{-2}$	$2.54 \cdot 10^{-4}$	$8.40 \cdot 10^{-2}$	$1.53 \cdot 10^{-3}$	$1.53 \cdot 10^{-1}$
16	Drums M - 6kHz	$6.90 \cdot 10^{-5}$	$8.35 \cdot 10^{-5}$	$7.17 \cdot 10^{-3}$	$2.09 \cdot 10^{-2}$	$9.22 \cdot 10^{-1}$	$1.93 \cdot 10^{-1}$	$1.23 \cdot 10^{-2}$	$1.74 \cdot 10^{-1}$	$1.20 \cdot 10^{-2}$	$3.14 \cdot 10^{-1}$
17	Sax L - 2kHz	$7.13 \cdot 10^{-1}$	$2.88 \cdot 10^{-1}$	$2.40 \cdot 10^{-1}$	$4.86 \cdot 10^{-1}$	$4.64 \cdot 10^{-1}$	$4.04 \cdot 10^{-1}$	$7.07 \cdot 10^{-1}$	$9.63 \cdot 10^{-1}$	$7.89 \cdot 10^{-1}$	$7.46 \cdot 10^{-1}$
18	Sax M - 2kHz	$4.84 \cdot 10^{-2}$	$4.27 \cdot 10^{-2}$	$9.17 \cdot 10^{-2}$	$1.59 \cdot 10^{-1}$	$8.43 \cdot 10^{-1}$	$7.64 \cdot 10^{-1}$	$7.45 \cdot 10^{-1}$	$8.74 \cdot 10^{-1}$	$6.40 \cdot 10^{-1}$	$6.14 \cdot 10^{-1}$
19	Drums L - 2kHz	$4.03 \cdot 10^{-1}$	$4.38 \cdot 10^{-1}$	$2.48 \cdot 10^{-1}$	$6.78 \cdot 10^{-1}$	$9.24 \cdot 10^{-1}$	$7.91 \cdot 10^{-1}$	$6.70 \cdot 10^{-1}$	$7.03 \cdot 10^{-1}$	$7.27 \cdot 10^{-1}$	$4.71 \cdot 10^{-1}$
20	Drums M - 2kHz	$4.49 \cdot 10^{-1}$	$5.66 \cdot 10^{-2}$	$1.48 \cdot 10^{-2}$	$4.29 \cdot 10^{-3}$	$1.69 \cdot 10^{-1}$	$4.14 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.90 \cdot 10^{-1}$	$1.86 \cdot 10^{-1}$	$4.93 \cdot 10^{-1}$
21	Sax L - 6kHz	$6.02 \cdot 10^{-1}$	$8.01 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$	$6.59 \cdot 10^{-1}$	$8.30 \cdot 10^{-1}$	$1.70 \cdot 10^{-1}$	$3.38 \cdot 10^{-1}$	$2.87 \cdot 10^{-1}$	$5.24 \cdot 10^{-1}$	$5.54 \cdot 10^{-1}$
22	Sax M - 6kHz	$7.08 \cdot 10^{-1}$	$2.93 \cdot 10^{-1}$	$4.85 \cdot 10^{-2}$	$5.45 \cdot 10^{-2}$	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$3.13 \cdot 10^{-2}$	$3.51 \cdot 10^{-2}$	$5.03 \cdot 10^{-1}$	$5.60 \cdot 10^{-1}$	$8.96 \cdot 10^{-1}$
23	Drums L - 6kHz	$7.52 \cdot 10^{-1}$	$9.49 \cdot 10^{-1}$	$9.54 \cdot 10^{-1}$	$8.71 \cdot 10^{-1}$	$6.87 \cdot 10^{-1}$	$6.85 \cdot 10^{-1}$	$8.69 \cdot 10^{-1}$	$9.93 \cdot 10^{-1}$	$8.09 \cdot 10^{-1}$	$8.10 \cdot 10^{-1}$
24	Drums M - 6kHz	$5.35 \cdot 10^{-1}$	$5.63 \cdot 10^{-1}$	$6.71 \cdot 10^{-1}$	$9.37 \cdot 10^{-2}$	$9.75 \cdot 10^{-1}$	$8.15 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-1}$	$8.44 \cdot 10^{-1}$	$2.97 \cdot 10^{-1}$	$1.76 \cdot 10^{-1}$

C.3 Individuelle Bewertungen der Externalität

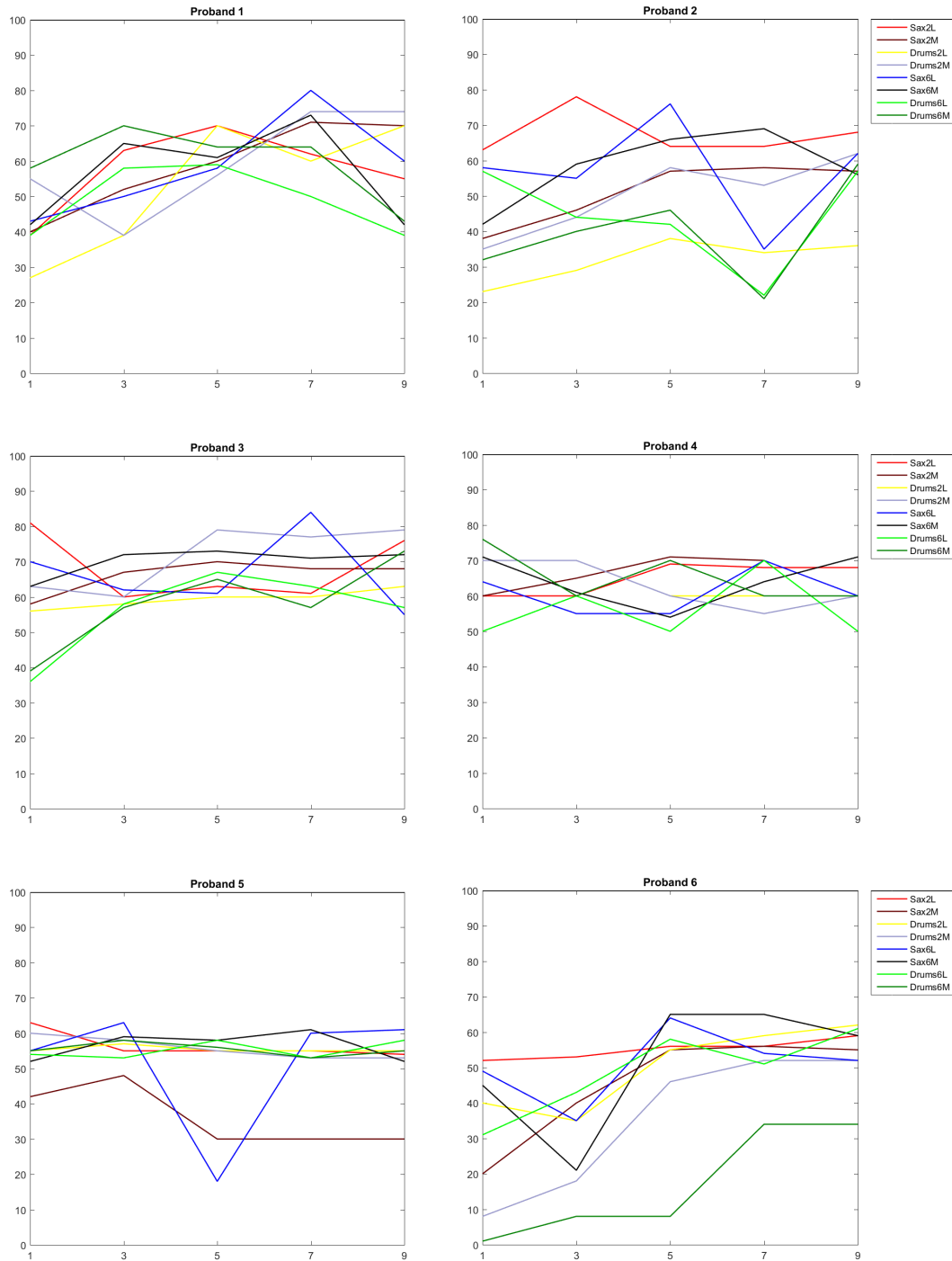


Abbildung C.1: Individuelle Bewertung der Externalität

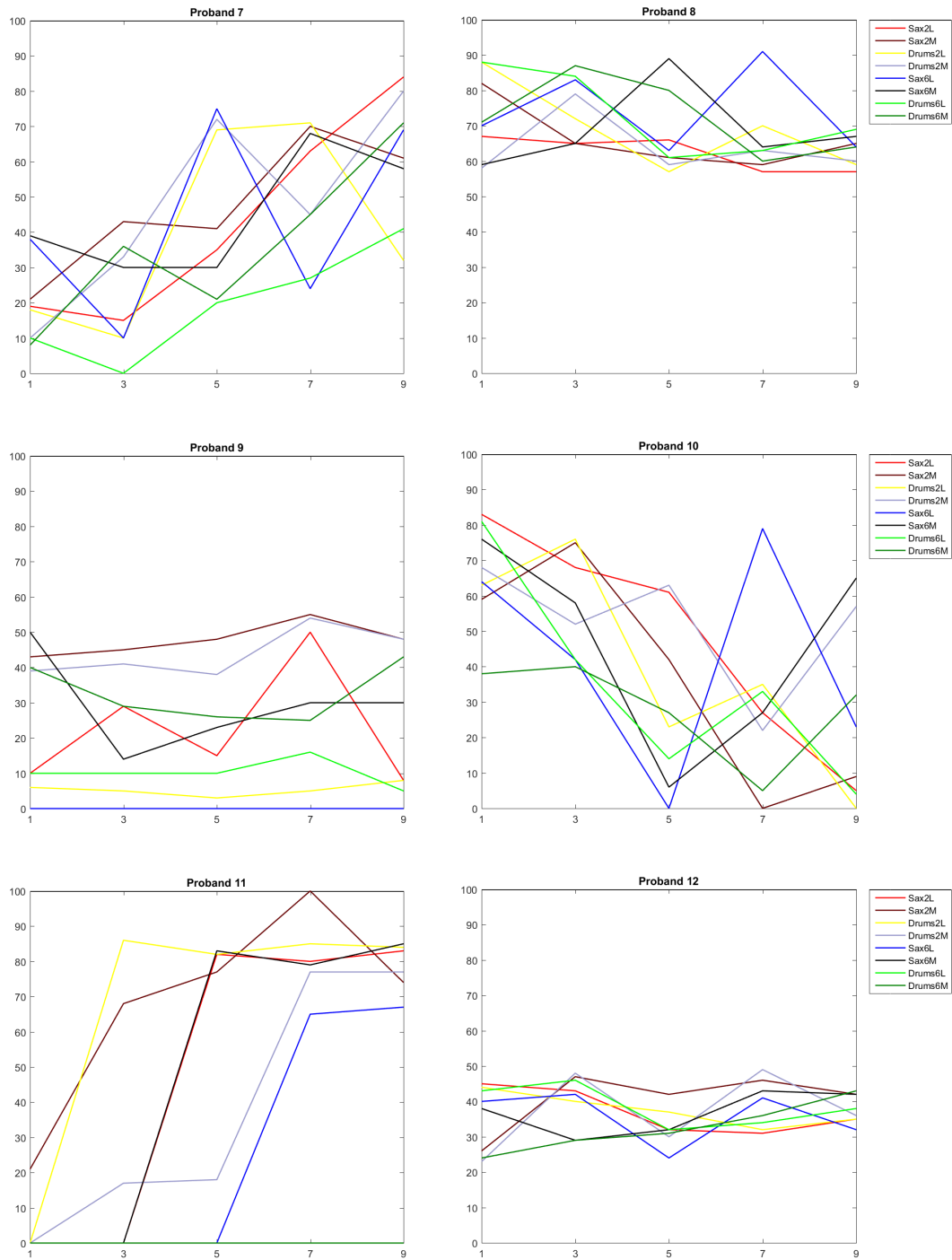


Abbildung C.2: Individuelle Bewertung der Externalität

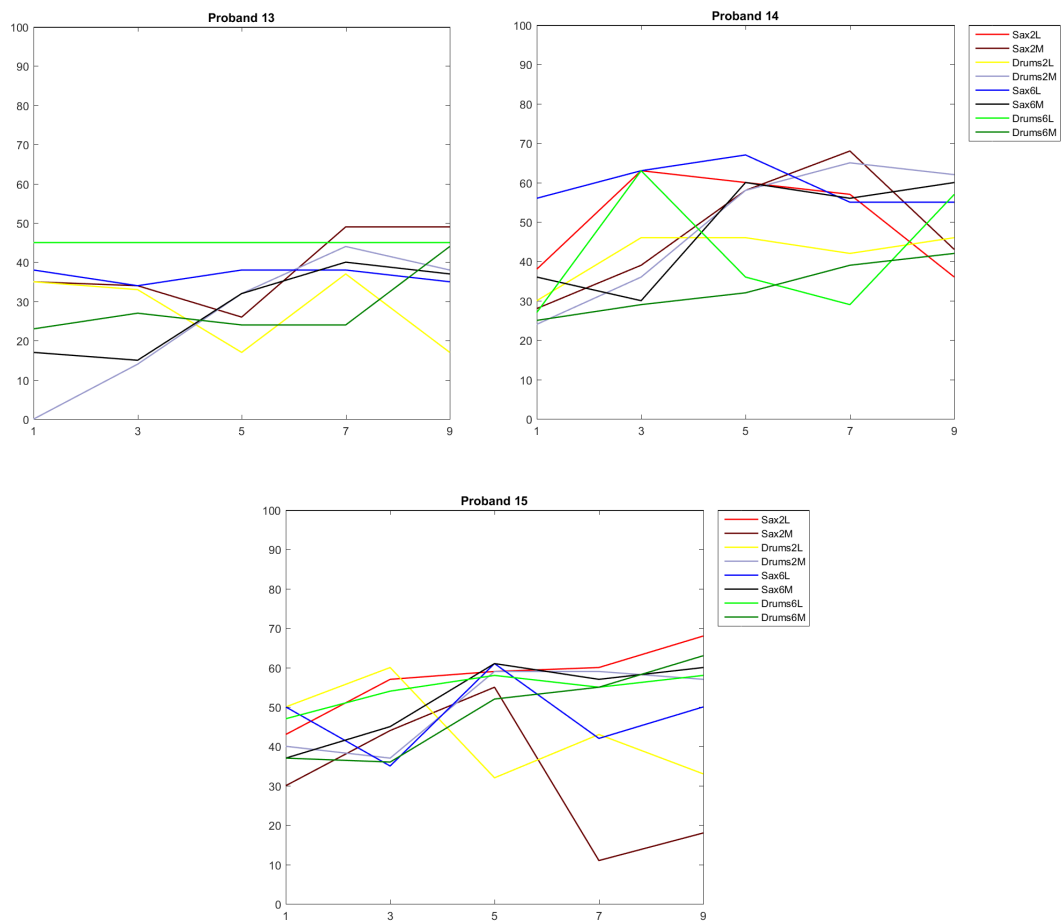


Abbildung C.3: Individuelle Bewertung der Externalität