



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

Untersuchung zur Verwendung eines
wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus für
kanalreduzierte Lautsprecher setups in kleinen Räumen

Verfasserin

Claudia Jenny, BA

angestrebter akademischer Grad

Master of Arts (MA)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 836

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Masterstudium Musikwissenschaft

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich für die Betreuung meiner Masterarbeit durch Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter, Universitätsprofessor für Systematische Musikwissenschaft an der Universität Wien bedanken, dessen volle Unterstützung ich während meines Studiums jeder Zeit in Anspruch nehmen konnte.

Großer Dank gilt meinen Betreuern am Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie IDMT in Ilmenau Dipl.-Mediensystemwiss. Christoph Sladeczek, Gruppenleiter der Virtual Acoustic, Alejandro Gasull Ruiz MSc und Javier Frutos Bonilla MSc für die Ermöglichung der Arbeit, den zahlreichen fachlichen Anregungen und der kompetenten Hilfestellung.

Des weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Fraunhofer IDMT bedanken. Ganz besonderer Dank gilt Sara Kepplinger PhD für die Unterstützung bei der Durchführung und statistischen Auswertung der subjektiven Evaluation. Vielen Dank allen Probanden, die sich die Zeit für den Hörtest genommen haben.

Für die Unterstützung und den Rückhalt während des gesamten Studiums und der Erstellung dieser Arbeit danke ich ganz herzlichst meinen Eltern und meinem Freund.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Akustik und Psychoakustik	5
2.1 Schall und Schallfeld	5
2.1.1 Schallgrößen	7
2.1.2 Wellenausbreitung	8
2.2 Räumliches Hören und Lokalisation	12
2.2.1 Horizontale und vertikale Lokalisation	14
2.2.2 Phasen- und Intensitätsunterschiede	16
2.2.3 Summenlokalisierung	18
2.2.4 Präzedenz Effekt	19
2.2.5 Richtungs- und Entfernungshören	20
3 Räumliche Audiowiedergabeverfahren	23
3.1 Stereophonie	24
3.1.1 Lineares Gesetz	25
3.1.2 Sinus Gesetz	27
3.1.3 Tangens Gesetz	28
3.2 Multikanal-Surround-Systeme	30
3.2.1 Vector Base Amplitude Panning	32
3.2.2 Ambisonic und andere Panning Verfahren	34
3.3 Wellenfeldsynthese	34
3.3.1 Prinzip der Wellenfeldsynthese	35
3.3.2 Realisierung und Anwendung in der Praxis	40
4 Objektbasiertes Rendering Konzept für Standard Panning-Verfahren	47
4.1 Kanalbasierte vs. Objektbasierte Audioproduktion	48
4.2 Signalverarbeitung des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus	49
4.3 Wellenfeldsynthesebasierter Algorithmus für ein Surround-Setup	54
4.4 Implementierung der Standard Panning Verfahren	61
5 Subjektive Evaluation	65
5.1 Ziel des Hörtests	65
5.2 Vorbereitung des Versuchsaufbaus	66
5.2.1 Lokalisationstest	68
5.2.2 Klangqualitätstest	68
5.3 Durchführung des Hörversuchs	69

5.3.1	Lokalisationstest	70
5.3.2	Klangqualitätstest	72
5.4	Statistische Auswertung der Ergebnisse	73
5.4.1	Lokalisationstest	74
5.4.2	Klangqualitätstest	80
6	Zusammenfassung und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	91
A	Anhang	96
A.1	Verstärkungsfaktor-Wertetabellen	97
A.2	Hörtest-Lokalisationstabelle	102
A.3	CD Inhalt	104
	Kurzfassung	105
	Abstract	107
	Lebenslauf	108

1 Einleitung

Hört ihr SIE? Ganz oben in der Mitte: die Königin der Nacht! Und jetzt hinten rechts: Papageno mit seiner Zauberflöte! Wie kann das sein, dass man genau hört, wo die Sänger singen und wo sie stehen? So viele Menschen sind von der Akustik der Bregenzer Festspiele fasziniert. Auf einer Open-Air Seebühne mit insgesamt 800 Lautsprechern wurde diese hochinteressante Technik des Bregenzer Richtungshörens realisiert. Wäre es nicht fantastisch, dieses akustische Highlight auf einer Heimkinoanlage mit einem kleinen Lautsprecher Setup wie etwa einem 5.1 Surround System erleben zu können? Seit Beginn der 90er Jahre ist die Nachbildung natürlicher Klangereignisse mittels Lautsprechertechnik Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung. Durch Wellenfeldsynthese (WFS) ist die Reproduktion eines natürlichen Schallfeldes möglich. Sie stellt ein Audiowiedergabesystem zur virtuellen Akustik dar und ermöglicht eine physikalisch korrekte Nachbildung eines Schallfeldes über einen Wiedergabebereich ohne Einschränkungen auf einen „Sweet Spot“ (Berkhout 1988). Herkömmliche, räumliche Audiowiedergabetechniken sind in der Lage, den räumlichen Eindruck nur für einen Hörerstandpunkt korrekt zu erzeugen. Dieser wird „Sweet Spot“ genannt. Mittels Wellenfeldsynthese ist eine korrekte Schallquellenlokalisierung über eine definierte „Hörfläche“ möglich. Hierzu wird für jeden Lautsprecher des den Hörraum umgebenden Lautsprecherarrays ein individuelles Signal berechnet, so dass die Überlagerung der Lautsprechersignale die Wellenfront einer virtuellen Schallquelle ergibt. Durch die so erzeugten Wellenfronten, ausgehend von der Positionierung von Sound-Objekten, kann eine virtuelle akustische Umgebung realitätsnah rekonstruiert werden. In diesem Bereich können virtuelle Schallquellen unabhängig vom Hörerstandort stabil lokalisiert werden.

Aufgrund des hohen Hardwareaufwands und Platzbedarfs ist man bestrebt, die Lautsprecheranzahl zu verringern. Dabei kann es bei Setups mit geringer Lautsprecheranzahl zu klanglichen Artefakten, Klangverfärbung und unstabilen virtuellen Schallquellenpositionen kommen. Gerade Lautsprechersysteme mit einer geringen Anzahl von Lautsprechern sind sehr interessant für Tontechniker, die meist in kleinen Räumen wie Übertragungswagen von Rundfunkanstalten oder Tonstudios arbeiten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein vom Fraunhofer - Institut für Digitale Medientechnologie IDMT entwickelter wellenfeldsynthesebasierter Tonwiedergabealgorithmus (Korn 2009) analysiert, um virtuelle Audioszenen mit einer geringen Anzahl von Lautsprechern wiederzugeben. Ziel ist es, die Lokalisationsgenauigkeit und Klangqualität für die Wiedergabe von virtuellen Schallquellen auf einem standardisierten 5.1 Lautsprechersystems zu untersuchen.

Der Algorithmus beinhaltet einen objektbasierten Audio-Renderer und baut auf den Grundprinzipien verschiedener räumlicher Audiotechnologien wie der Wellenfeldsynthese auf. Dieser berechnet einerseits mit Hilfe der verfügbaren Metadaten, die ein virtuelles Sound-Objekt beschreiben (z.B.: Position, Lautstärke, Typ der Schallquelle), und andererseits über das vorgegebene Lautsprechersystem, das Ausgangssignal für den jeweiligen Lautsprecher. Für die Untersuchung des Algorithmus wurden verschiedene objektbasierte Audio-Renderer implementiert und miteinander verglichen. Dies sind Renderer, die auf Standard Panning Verfahren arbeiten wie dem Intensitätspanning nach Linearem Gesetz, nach Sinus Gesetz und nach Tangens Gesetz, auf welchem das Vector Base Amplitude Panning (VBAP) basiert (Rumsey 2001). Im Gegensatz zu den Standard Panning Verfahren werden im wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus nicht nur Amplituden-, sondern auch Verzögerungskoeffizienten berechnet. Zur Evaluierung wurde ein Hörtest mit 16 Probanden auf einem Surround Sound 5.1 Lautsprechersystem durchgeführt, welches die Aufstellungsnorm ITU-R BS berücksichtigt. Aufgabe dieser Fallstudie war, die Lokalisationswahrnehmung und Klangqualität von statischen Quellen zu vergleichen. Als Vorlage für die Größe des Versuchsaufbaus dienten die Abmessungen des WDR FÜ4 HD Übertragungswagens. Für den Hörtest wurden verschiedene Testsignale je nach Funktionalität ausgewählt: 100ms Rauschimpulse für den Lokalisa-

tionstest und für den Klangqualitätstest, nach Komplexität steigernd, männliche und weibliche Sprache, ein einzelnes Instrument und ein komplexes Musikstück (Blauert 1974; Fastl, Zwicker 2007).

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in fünf weitere Kapitel, deren Inhalte im Folgenden kurz erklärt werden:

- *Kapitel 2* fasst die wichtigsten Grundlagen der Akustik zusammen und erläutert Begrifflichkeiten aus der Psychoakustik, die für das Verständnis dieser Arbeit bedeutend sind. Zudem werden grundlegende auditive Wahrnehmungseigenschaften des Menschen vorgestellt.
- *Kapitel 3* geht auf verschiedene Anwendungen räumlicher Audiowiedergabetechniken ein und gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Panning Verfahren. Ausgehend von herkömmlichen Zwei- oder Mehrkanaltonsystemen wird auch die Methode der Wellenfeldsynthese genannt. Auf Panning Verfahren wie Lineares Panning, Panning nach Sinus und Tangens Gesetz und VBAP und Ambisonic wird eingegangen.
- *Kapitel 4* dokumentiert die Entwicklung eines objektbasierten Rendering Konzept für Standard Panning Verfahren. Die Standard Panning Verfahren wurden in Python programmiert und implementiert. Zusätzlich wird der Signalverarbeitungsweg des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus beschrieben und dieser wird mit den Standards verglichen.
- *Kapitel 5* beschreibt die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Hörtest. Zur Evaluierung wurde ein Lokalisations- und Klangqualitätstest durchgeführt.
- *Kapitel 6* gibt abschließend eine Zusammenfassung der Erkenntnisse dieser Arbeit und einen Ausblick für Erweiterungsmöglichkeiten und zukünftige Forschungsansätze.

2 Grundlagen der Akustik und Psychoakustik

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit grundlegenden akustischen und psychoakustischen Kenntnissen, die speziell für diese Arbeit zur Nachvollziehbarkeit erläutert werden. Im ersten Abschnitt werden allgemeine Aspekte des Schalls wie Schallgrößen und Wellenausbreitung behandelt. Anschließend werden relevante psychoakustische Grundbegriffe beschrieben, die für das räumliche Hören und der Lokalisationswahrnehmung von Bedeutung sind.

2.1 Schall und Schallfeld

Als Schall werden mechanische Schwingungen in elastischen Medien bezeichnet. Diese Schwingungen entstehen durch Bewegungsimpulse, die die kleinsten Teilchen im Medium aus ihrer Ruhelage bewegen. Infolgedessen setzt sich eine Welle durch das Medium fort. Eine Schallwelle kann sich nur in einem Medium ausbreiten, zum Beispiel in Luft oder im Wasser. Ohne ein Medium, also im Vakuum, gibt es keinen Schall. Dabei wird zwischen Luft-, Flüssigkeits- und Körperschall unterschieden.

Bei der Ausbreitung einer Schallwelle in Luft kommen die Luftteilchen zum Schwingen und übertragen beim Zusammenstoßen die Schwingung weiter. In der Luft entsteht ein Über- und Unterdruck, der versucht, sich örtlich und zeitlich auszugleichen (Veit 2005, S. 25).

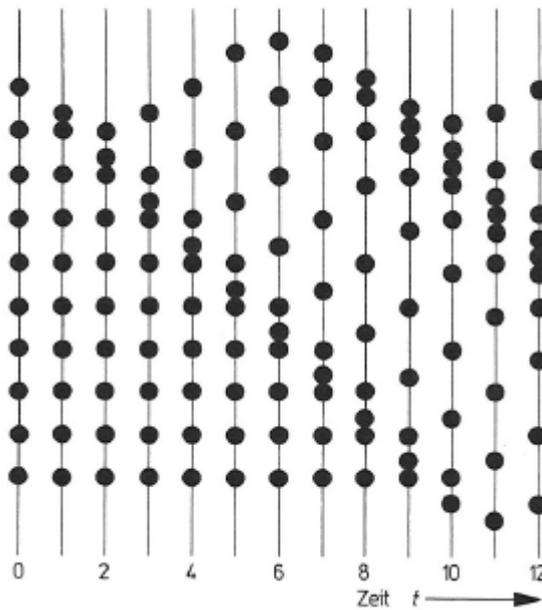


Abb. 2.1: Fortpflanzung einer sinusförmigen Erregung in einer Reihe elastischer Maseteilchen nach verschiedenen Zeitabschnitten (Veit 2005, S. 26).

Schall wird von einer Schallquelle erzeugt, das die Luftmoleküle in periodische Schwankungen versetzt. Die Welle breitet sich von einer Punktschallquelle kugelförmig dreidimensional in alle Richtungen aus. Die daraus folgende Verdichtung und Verdünnung verlagert sich auf die dahinterliegenden Luftbereiche. Mit zunehmender Entfernung entwickelt sich aus dieser Kugelschallwelle eine ebene Schallwelle.

Jede Schallwelle besitzt eine bestimmte Wellenlänge λ , eine Amplitude und eine Frequenz f . Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Spitzen einer Schwingung. Die Größe der periodischen Schwankungen von Verdichtung und Verdünnung ist die Amplitude der Schallwelle, welches vom Ohr schließlich als Lautstärke wahrgenommen wird. Die Einheit der Frequenz wird in Hertz [Hz] angegeben und entspricht der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Für das menschliche Gehör ist die Frequenz eine logarithmische Größe für die Tonhöhe. Frequenzen zwischen 16 Hz - 20.000 Hz rufen Hörereignisse hervor (Rumsey, McCormick 2009, S. 1-4).

Bei der Ausbreitung einer Kugelwelle im freien Schallfeld fällt der Pegel bei doppelter Entfernung um -6 dB. Der Schalldruck fällt also auf den halben Wert, da sich die Energie jeweils auf eine um das Quadrat größere Fläche verteilt. Dieses Gesetz wird Entfernungsgesetz bzw. Abstandsgesetz genannt (Rumsey 2001, S. 3).

2.1.1 Schallgrößen

Im Folgenden wird näher auf Schallgrößen wie Schalldruck, Schalldruckpegel und Schallgeschwindigkeit eingegangen.

Schalldruck

Der Schalldruck beschreibt periodische Druckschwankungen der Luft. Die Schallfeldgröße Schalldruck p (engl. pressure) ist in der Einheit Pascal [$Pa = N/m^2$] nach dem Mathematiker Blaise Pascal (1623-1662) festgelegt.

Vom Gehör werden Druckschwankungen bei mittleren Frequenzen von maximal 20 Pa bis minimal 20 μPa wahrgenommen. Der Schalldruck beschreibt einen minimalen Wechseldruck, der dem atmosphärischen Luftdruck überlagert ist. Verglichen mit dem Luftdruck ist der Schalldruck sehr klein. Der wetterabhängige Luftdruck beträgt im Durchschnitt 1013 hPa $\approx 10^5$ Pa (entspricht 1 bar), welcher etwa fünftausendmal größer als der größte wahrnehmbare Wechseldruck ist (Görne 2008, S. 29).

Schalldruckpegel

Der Schalldruckpegel (engl. sound pressure level, SPL) ist das Maß für die Schallstärke. Der Schalldruckpegel L_p ist das 20fache logarithmierte Verhältnis des Schalldrucks p zu einem vereinbarten Bezugsschallpegel p_0 . Maßeinheit des Schalldruckpegels ist das Dezibel [dB].

$$L_p = 20 * \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (2.1)$$

Der Bezugsschallpegel p_0 entspricht mit $p_0 = 2 * 10^{-5} Pa$ ungefähr dem kleinsten wahrnehmbaren Schalldruck. „Die Hörschwelle liegt für 1000 Hz bei 4 dB, für 2000 Hz bei -4dB; die Schmerzgrenze ist für 1000 Hz bei 130 dB, für 2000 Hz bei 120 dB. Der Bereich mittlerer Lautstärke entspricht einem Schallpegel von ungefähr 70 - 80 dB.“ (Dickreiter 2008, S. 7). Wird als Bezugsschallpegel ein beliebiger Schalldruck verwendet, so wird dieser im Gegensatz zum absoluten Schalldruckpegel relativer Schalldruckpegel genannt. Wenn man von der Wahrnehmung des Menschen ausgeht, wird eine Erhö-

lung von 10dB als doppelte Lautstärke empfunden (Dickreiter 2008, S. 590). Eine Erhöhung von 3 dB entspricht einer Energieverdopplung und eine Erhöhung von 6 dB einer Amplitudenverdopplung (Rumsey, McCormick 2009, S. 17).

Schallgeschwindigkeit

Im Jahre 1687 berechnete Isaac Newton erstmals die Schallgeschwindigkeit in einem Medium aus dessen Elastizität und Dichte (Eberlein in Auhagen, Reuter 2014, S. 24). Die Schallgeschwindigkeit c ist die Geschwindigkeit, in der sich eine Schallwelle in einem Medium ausbreitet. Sie ist abhängig vom jeweiligen Medium und dessen Temperatur. Unter Normalbedingungen bei Lufttemperatur von 20°C breitet sich der Schall mit einer Geschwindigkeit von $c = 343\text{m/s}$ aus. Die folgende Formel beschreibt die Schallgeschwindigkeit im Zusammenhang mit Frequenz und Wellenlänge:

$$c = f * \lambda \quad (2.2)$$

Demnach ist die Wellenlänge von 10Hz $\lambda = f/c = 34,3\text{m}$ und von 10kHz nur noch $\lambda = 3,43\text{cm}$ (Veit 2005, S. 33).

Aus der Schallgeschwindigkeit lässt sich auch die Laufzeitverzögerung berechnen. Mit der Geschwindigkeitsformel $c = s/t$ braucht der Schall für einen Weg s von einem Meter $t = 1/343 \approx 3\text{ms}$. Für einen Weg von 10 Meter benötigt der Schall $\approx 30\text{ms}$.

2.1.2 Wellenausbreitung

1690 wurde die Art und Weise, wie sich eine Welle ausbreitet, von Christiaan Huygens (1629-1695) in „Traité de la lumière“ erstmals genauer erklärt. Er deutete „die Fortpflanzung einer Welle in einem Medium mit Hilfe der Annahme, dass jedes angestoßene Teilchen zum Ausgangspunkt einer kugelförmigen Elementarwelle wird. Diese Elementarwellen überlagern sich gegenseitig: Sie addieren sich dort, wo sie in gleicher Phase ankommen, und löschen sich aus an Orten, an denen sie in gegensätzlicher Phase ankommen.“ Dieses Prinzip der Überlagerung und Auslöschung wird Interferenz genannt (Eberlein in Auhagen, Reuter 2014, S. 24).

Generell wird zwischen zwei verschiedene Arten von Schallfeldern unterschieden: das freie Schallfeld und das diffuse Schallfeld. Im freien Schallfeld erfolgt die Ausbreitung des Schalls ungestört (Dickreiter 2008, S. 1). Bei der Ausbreitung des Schalls in einem diffusen Schallfeld, wie zum Beispiel in einem Raum, beeinflussen Hindernisse wie Wände oder Objekte die Schallausbreitung. Kennzeichnend für ein diffuses Schallfeld sind gestörte Wellenausbreitungen wie das Auftreten von Schallreflexionen, Schallbeugungen und Schallbrechungen (Veit 2005, S. 57). Auch Interferenzen wie die Überlagerung von Wellen („Kammfiltereffekt“) und Stauchung und Dehnung von Wellen („Doppler-Effekt“) können im diffusen Schallfeld auftreten.

Schallreflexion

Wird eine Schallwelle als eine Gerade, also als Schallstrahl betrachtet, können die aus der Optik bekannten Gesetze der Reflexion angewendet werden. Trifft die Schallwelle auf eine schallharte Wand, so wird diese reflektiert. Bei einer Reflexion auf ebenen Flächen gilt das Gesetz Einfallswinkel ist gleich Ausgangswinkel (Veit 2005, S. 57).

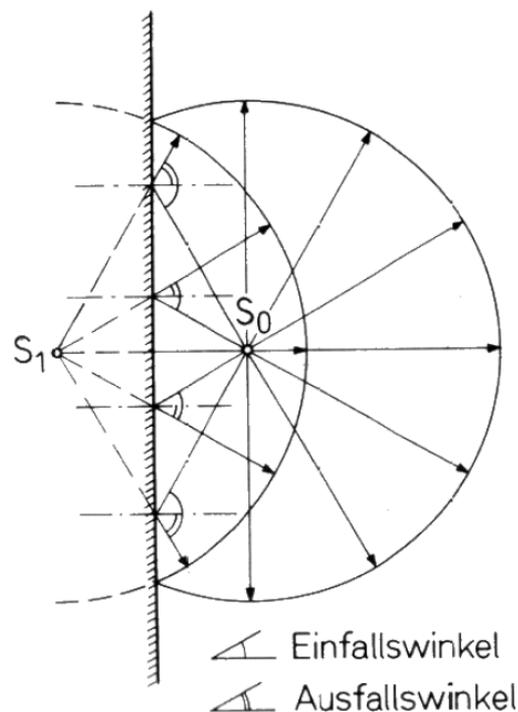


Abb. 2.2: Reflexion einer kugelförmigen Schallwelle an einer geraden Wand
 S_0 Originalschallquelle S_1 Spiegelschallquelle (Cremer 1978, S. 21).

Die Abbildung zeigt die Reflexion der gesamten Wellenfront einer einfallenden Kugelschallwelle nach dem Fresnel-Huygenschen Gesetz. Demnach kann jedes Teilchen, das durch die Wellenausbreitung in Schwingung versetzt wird, als Quelle neuer kugelförmiger Elementarwellen gesehen werden. Wird die Fläche nun als Anhäufung elementarer Kugelschallwellen betrachtet, wird die Wellenfront genau so wie in der Abbildung dargestellt reflektiert.

In geschlossenen Räumen wird die Laufstrecke zwischen direkten und reflektierenden Schallwellen einer Schallquelle als Nachhall wahrgenommen (Veit 2005, S. 58). Unerwünschte Reflexionen können durch Reflektoren umgelenkt, durch Diffusoren gestreut oder durch Absorber geschluckt werden (Görne 2008, S. 81).

Schallbeugung

Ob eine Schallwelle an einem Hindernis reflektiert oder gebeugt wird, entscheidet vor allem die Größe des Hindernisses im Vergleich zur Wellenlänge der Schallwelle. Ist das Hindernis kleiner als die Wellenlänge der Schallwelle, so findet eine Schallbeugung statt (Cremer 1978, S. 10).

Schallbrechung

Eine Schallbrechung beschreibt eine Richtungsänderung des Schalles beim Auftreffen auf zwei verschiedene Schallausbreitungsmedien. Die Richtungsänderung hängt von der Schallgeschwindigkeit und den beiden Medien ab (Veit 2005, S. 59).

Kammfiltereffekt

Ein Kammfiltereffekt entsteht bei einer ganz speziellen Überlagerung von Schwingungen. Bei der Ausbreitung von Schallwellen in einem Raum beeinflussen sich die Wellen gegenseitig. Wenn sich an einem Punkt im Raum zwei ähnliche, zeitlich verschobene Signale überlagern, so kann es zu kammfilterartigen Verformungen kommen. Es treten dabei in Abhängigkeit von der relativen Phasenlage der beiden Wellen konstruktive oder destruktive Interferenzen auf. Da die Phasenlage der beiden Wellen zueinander frequenzabhängig ist, ergibt sich ein charakteristischer Verlauf (Weinzierl 2008, S. 282).

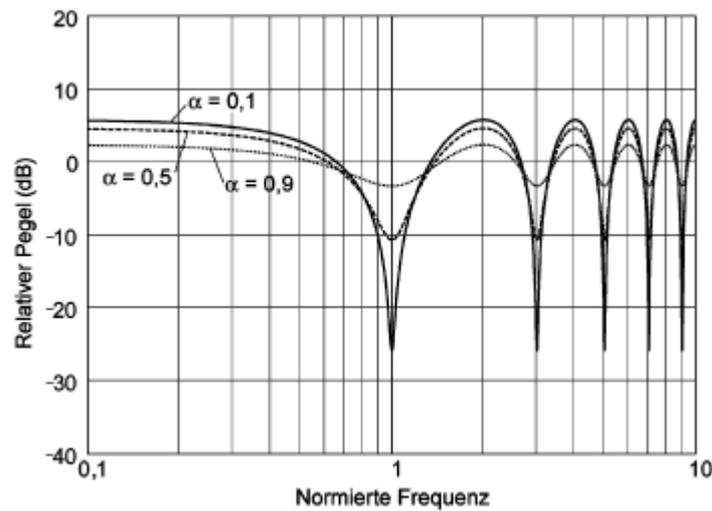


Abb. 2.3: Kammfilter für drei unterschiedliche Absorptionsgrade der reflektierenden Fläche für den Fall der ebenen Wellenausbreitung. Die Frequenz ist auf die Frequenz der ersten Auslöschung normiert (Weinzierl 2008, S. 283).

Zur Folge sind unerwünschte Klangverfärbungen, die sich durch Summierung und Auslöschung großer Pegelunterschiede gewisser Frequenzen ergeben. Wird der Frequenzgang der resultierenden Welle betrachtet, so ergibt sich ein charakteristischer kammförmiger Verlauf - daher die Bezeichnung Kammfilter.

Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt tritt bei bewegten Schallquellen ein und führt zur einer Frequenzverschiebung. Nähert sich einem Beobachter etwa ein Rettungswagen mit Sirene, dann eilt der Rettungswagen seiner eigenen Wellenfront hinterher. Dadurch wird die Wellenlänge verkürzt und die ausgesandte Frequenz erscheint für den Beobachter höher. Christian Doppler (1803-1853), österreichischer Physiker und Mathematiker, entdeckte diesen Effekt im Zusammenhang mit der Lichtausbreitung (Görne 2008, S. 39).

Bei räumlichen Audiowiedergabeverfahren spielt der Doppler-Effekt eine wichtige Rolle. Die Bewegung einer Quelle in einem räumlichen Wiedergabesystem ist mit Vorsicht durchzuführen, da unkontrollierte Frequenzmodulationen zu klanglichen Artefakten führen können. Dieser Effekt wird auch Doppler-Verzerrung genannt (Zölzer 2002, S. 147).

2.2 Räumliches Hören und Lokalisation

Zur Differenzierung von objektiven akustischen Ereignissen und der damit beim Hörer erzeugten subjektiven Wahrnehmung führte Jens Blauert 1966 die Begriffe „Schallereignis“ und „Hörereignis“ ein. „Mit Begriffen wie Schallquelle, Schallsignal, Schallwelle usw. sind immer physikalische Phänomene, in diesem Fall Schallereignismerkmale, gemeint. Das akustisch Wahrgenommene, das Gehörte, wird durch die Vorsilbe „Hör“ gekennzeichnet, und zwar vorwiegend in der Zusammensetzung Hörereignis.“ (Blauert 1974, S. 2).

Zwischen dem Ort eines Hörereignisses bezüglich der Richtung und Entfernung und einem bestimmten Merkmal eines Schallereignisses lässt sich der Begriff Lokalisation beschreiben (Blauert 1974, S. 30). Für diese Arbeit sind die Zuordnung von Hörereignisort und Schallquellenort und die Zuordnung von Hörereignisrichtung und interauraler Schalldruckpegeldifferenz relevant.

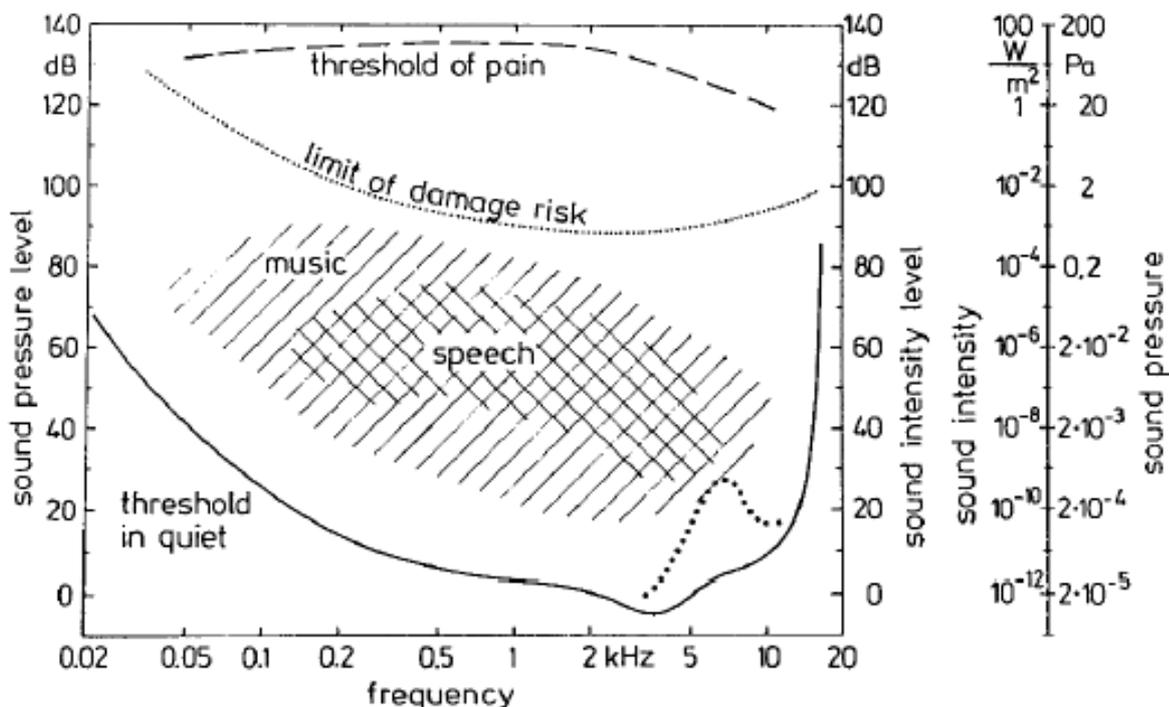


Abb. 2.4: Hörbereich des menschlichen Gehörs. Dargestellt sind die durchschnittlichen Pegel-Frequenz-Bereiche von Musik und Sprache und die Grenze des Schadensrisikos. Die Skala wird nicht nur in Schalldruckpegel, sondern auch in Schallintensität und Schalldruck ausgedrückt. (Fastl, Zwicker 2006, S. 17).

Die Hörschwelle, auch Ruhehörschwelle genannt, ist die Grenze zwischen nicht mehr hörbarem und gerade noch hörbarem Schall. Der Hörbereich bzw. die Hörfläche ist begrenzt durch Ruhehörschwelle und Schmerzgrenze (Fastl, Zwicker 2006, S. 17-18).

Mit dem Alter verschiebt sich die Hörschwelle im oberen Frequenzbereich: Im Alter von 60 Jahren ist die Hörschwelle bei 10.000 Hz etwa um 20 dB, bei 5000 Hz etwa um 15 dB angehoben. Unter 2000 Hz sollte es keine Veränderungen geben, da dieser Hörbereich (etwa zwischen 500 und 4000 Hz) der wichtigste Bereich ist, den Sprache und Musik einnehmen (Dickreiter 1997, S. 110). Die empfindlichste Stelle des Menschen liegt bei 2 und 5 kHz. Dies ist der Bereich, in dem sehr kleine Schalldruckpegel unter 0 dB erreicht werden können (Fastl, Zwicker 2006, S. 20).

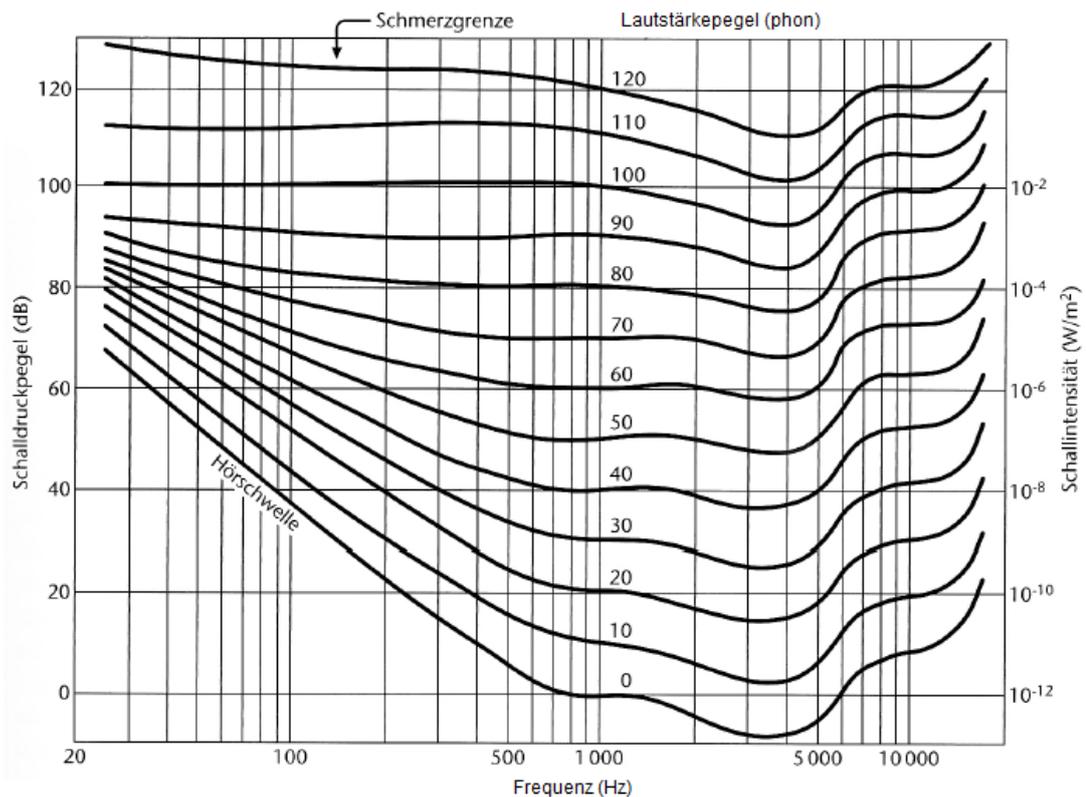


Abb. 2.5: Kurven gleicher Lautheit, Isophonenkurven nach DIN 45 630 (nach Fletcher, Munson 1933, S. 91).

Wenn ein Ton mit einem konstanten Schalldruckpegel den gesamten Hörbereich durchläuft, bleibt der Ton nach dem Wahrnehmungsempfinden des Menschen nie gleich laut. Richtung 4 kHz wird der Ton lauter empfunden, nach 4 kHz wieder leiser (Dickreiter

1997, S. 110). Die Kurven gleicher Lautstärkepegel für Sinustöne im freien Schallfeld werden in der Abbildung 2.5 dargestellt. Der Lautstärkepegel wird in der Einheit phon angegeben. „In der Einheit phon sind alle reinen Töne gleich, die zu einem Vergleichston bei 1 kHz als gleich laut empfunden werden.“ (Görne 2008, S. 113).

2.2.1 Horizontale und vertikale Lokalisation

Eine Eigenschaft der Lokalisationswahrnehmung ist die Lokalisationsunschärfe. Die Lokalisationsunschärfe beschreibt die kleinste Änderung eines Schallereignisses, die gerade zu einer Ortsänderung des Hörereignisses führt. Dies geschieht zum Beispiel bei der seitlichen Auslenkung einer Schallquelle (Blauert 1974, S. 30).

Zur Beschreibung von Hörereignissen wird das kopfbezogene bzw. sphärische Koordinatensystem verwendet. Mit dem Azimutwinkel, Elevationswinkel und Radius werden Schallquellenpositionen definiert (Blauert 1974, S. 11).

Abbildung 2.6 zeigt die Lokalisationsunschärfe zwischen Schalleinfallsrictungen in der Horizontalebene und den Seitenwinkeln der zugehörigen Hörereignisse.

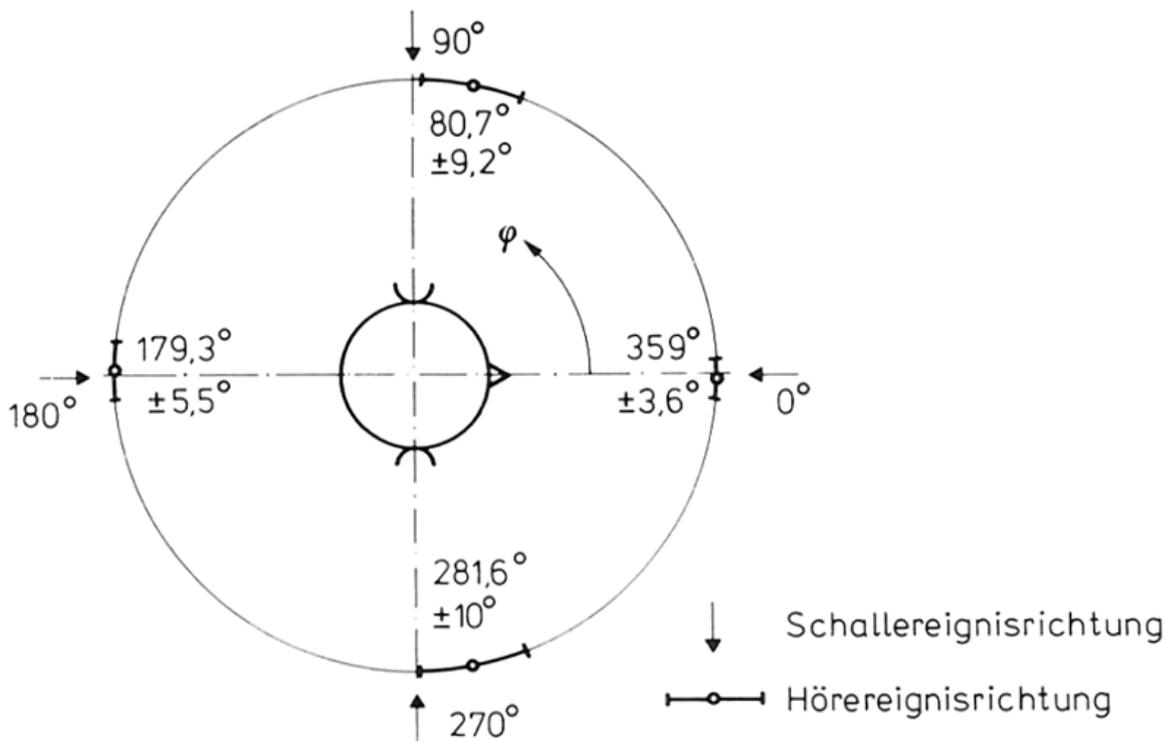


Abb. 2.6: Lokalisationsunschärfe: Lokalisation in der Horizontalebene; Winkelgrade im mathematisch positiven Drehsinn(Gegenuhrzeigersinn) (Blauert 1974, S. 33).

Die Abbildung basiert auf dem Hörversuch, der mit 600 bis 900 Versuchspersonen, die den Kopf nicht bewegen durften, durchgeführt wurde. Weiße Rauschimpulse mit einem Abstand von 100 ms und mit etwa 70 phon wurden als Testsignal verwendet (Blauert 1974, S. 33). Das Ergebnis zeigt, dass bei Schallereignisrichtungen von vorne oder hinten die Richtungswahrnehmung des Menschen genauer ist als jene von rechts oder links.

Die Lokalisationsunschärfe zwischen Schalleinfallsrictungen in der Medianebene, also vertikal, und den Erhebungswinkeln der zugehörigen Hörereignisse zeigt die folgende Abbildung:

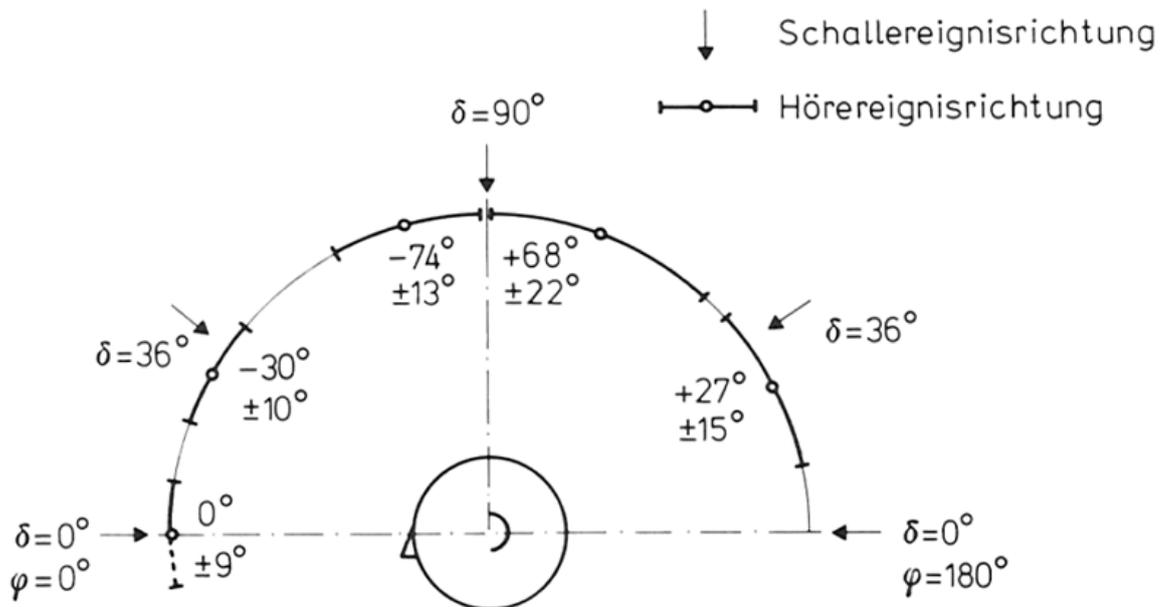


Abb. 2.7: Lokalisationsunschärfe: Lokalisation in der Vertikalebene (Blauert 1974, S. 36).

Dieser Versuch wurde mit 7 Versuchspersonen bei fortlaufendem Vortrag eines bekannten Sprechers durchgeführt. Wieder war der Kopf dabei fixiert und der Lautstärkepegel betrug 65 phon (Blauert 1974, S. 36). Werden die in der Abbildung 2.7 angegebenen Ergebnisse mit den Ergebnissen der Lokalisationsunschärfe in der Horizontalebene verglichen, fällt auf, dass die Richtungswahrnehmung des Menschen in der Horizontalebene besser ist als die in der Medianebene.

2.2.2 Phasen- und Intensitätsunterschiede

Zur Bestimmung des Ortes einer Schallquelle wertet das Ohr stets Pegel- und Phasenunterschiede aus. Wesentlich für die Richtungswahrnehmung ist der Ohrabstand. Mit den psychoakustischen Begriffen „interaurale Laufzeit- und Pegeldifferenz“ und dem „Cone of Confusion“ lässt sich erklären, warum die Richtungswahrnehmung des Menschen vorne und hinten genauer ist als von rechts und links und warum die Lokalisationsunschärfe in der Horizontalebene geringer ist als die in der Medianebene.

Interaurale Laufzeitdifferenz

Die interaurale Laufzeitdifferenz (engl. Interaural Time Difference, ITD) ist die zeitliche Differenz des Schallweges zwischen den beiden Ohren. Diese Zeitverzögerung ist bedeutend für die Ortung einer Schallquelle (Blauert, Braasch in Weinzierl 2008, S. 117).

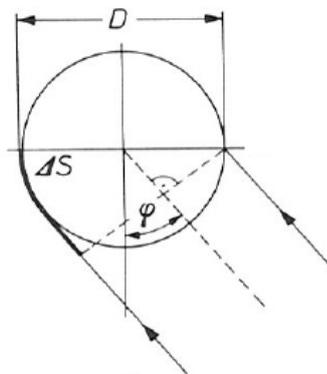


Abb. 2.8: Interaurale Laufzeitdifferenz: Kopfdurchmesser D , Differenz des Schallweges zu den beiden Ohren ΔS , Schalleinfallswinkel φ (Blauert 1974, S. 60).

Die maximal mögliche interaurale Verzögerung wird bei einem Schalleinfall von 90° erzeugt. Der durchschnittliche Abstand der Ohren beträgt 17,5 cm (Blauert 1974, S. 58). Bei einem Einfallswinkel von 90° ist der maximale Schallweg um den Kopf herum 21 cm, was einer Verzögerungszeit von 0,6 ms entspricht (Fastl, Zwicker 2006, S. 293). Der Schallweg von 21 cm bzw. die Wellenlänge von 21 cm entspricht der Frequenz von ca. 1600 Hz. Die tiefste Frequenz, bei der eine Phasenverschiebung von 180° noch wirksam ist, ist also ca. 800 Hz. Die interaurale Phasenlaufzeit nimmt bei

seitlicher Hörereignisauslenkung für Frequenzen ab 800 Hz stark ab. Bei Frequenzen oberhalb 1,6 kHz ist eine seitliche Auslenkung in der Regel nicht mehr erkennbar. Unterhalb von 800 Hz erfolgt die Richtungswahrnehmung von links und rechts nach Phasenunterschieden, da ab hier der Schall um den Kopf gebeugt wird und dadurch keine Lautstärkeunterschiede mehr vorhanden sind (Blauert 1974, S. 120).

Das Ohr kann Zeitunterschiede bis zu 0,03 ms erkennen, welches einem Schallwegunterschied von nur 1 cm bzw. der Hörereignisrichtung um 3° bis 5° aus der Mitte entspricht (Dickreiter 2008, S. 106).

Interaurale Pegeldifferenz

Bei der links-rechts Lokalisation werden Frequenzen oberhalb von 1600 Hz durch Intensitätsunterschiede vom Gehör ausgewertet. Da die Wellenlänge kleiner als der Kopf (das Hindernis) ist, wird der Schall reflektiert und aus der Schalleinfallrichtung als lauter empfunden. Die interaurale Pegeldifferenz (engl. Interaural Level Difference, ILD) ist die Differenz des Schalldruckpegels zwischen den beiden Ohren. Sie ist stark frequenzabhängig (Blauert 1974, S. 126). Unterhalb von 300 Hz kann das Gehör auf Grund der Schallbeugung am Kopf keine Pegelunterschiede feststellen. Über 300 Hz nehmen die Unterschiede mit der Größe der Wellenlänge zu (Dickreiter 2008, S. 107). Zur Beurteilung der Bedeutung interauraler Pegeldifferenzen für das räumliche Hören ist die kleinste Änderung der interauralen Schalldruckpegeldifferenz, die zu einer seitlichen Verschiebung des Hörereignisses führt, bedeutend. Diese liegt je nach Frequenz zwischen 0,6 und 1,5 dB Unterschied zwischen beiden Ohren (Blauert 1974, S. 129).

Cone of Confusion

Beim räumlichen Hören kommt es häufig zur Mehrdeutigkeit von Positionen mit gleicher interauraler Laufzeit- und Pegeldifferenzen. Das Gehör berechnet sich Phasen- und Pegelunterschiede mit Hilfe der Außenohrübertragungsfunktionen „Head related transfer function“ (HRTF) (Blauert 1999, S. 373). Zu den Außenohrübertragungsfunktionen gehören Kopf, Nase, Kinn usw., an denen der Schall reflektiert bzw. gebeugt wird.

Ist die Schallereignisrichtung direkt vorne oder direkt hinten, kann es zu einer Verwechslung der Hörereignisrichtung kommen. Da von vorne und von hinten gleiche Laufzeit- und Pegeldifferenzen am Ohr ankommen, kann das Gehör keine Unterscheidung mehr zwischen hinten oder vorne treffen. Gleiche Laufzeit- und Pegeldifferenzen kommen auch seitlich beim Ohr an, wenn sich eine Schallquelle seitlich entlang eines Kreises vertikal nach oben oder nach unten bewegt. Der virtuelle Kegel, der durch den Mittelpunkt des Kopfes und des Kreises der Schallquelle entsteht, wird „Cone of Confusion“ genannt (Zölzer 2002, S. 150). Die Filterwirkung der Außenohrübertragungsfunktionen ist offensichtlich nicht stark genug, um eine eindeutige Lokalisation zu erreichen. Erst durch Kopfbewegungen in Richtung des Schallereignisses kann eine genauere Lokalisation stattfinden (Blauert 1999, S. 179; Weinzierl 2008, S. 674-677).

Bei seitlichen Schallen arbeitet die Auflösung des Gehörs am ungenauesten. Maßgeblich hierfür sind Außenohrübertragungsfunktionen und der dadurch entstehende „Cone of Confusion“. Deswegen ist die Lokalisationswahrnehmung in der Horizontalebene vorne und hinten genauer als wie rechts und links.

Auch bei einer vertikalen Schallquellenbewegung von vorne - oben - hinten kommt es zu Auswertungen von gleichen interauralen Laufzeit- und Pegeldifferenzen. Da die Medianebene die Symmetrieebene des Kopfes ist, ergeben sich bei Schalleinfall aus dieser Ebene keine Unterschiede zwischen den Signalen an beiden Ohren. Aus diesem Grund ist eine deutlich bessere Lokalisation von Schallquellen in der Horizontalebene als in der Medianebene möglich.

2.2.3 Summenlokalisierung

Die Summenlokalisierung tritt bei der Richtungswahrnehmung von mehreren Schallquellen auf und ist abhängig von Pegel- und Laufzeitdifferenzen. Diese Schallquellen können zum Beispiel zwei Lautsprecher sein, die mit einem identischen elektrischen Signal gespeist werden. Wenn die beiden abgestrahlten Signale sich nur durch eine geringe Zeit- und/oder Pegeldifferenz unterscheiden, entsteht ein Hörereignisort, welcher das Gehör als Summe einer einzigen Schallquelle („Phantomschallquelle“) interpretiert.

Der Effekt der Summenlokalisierung bildet die Grundlage für die stereofonen Übertragungsverfahren bzw. Panning-Verfahren mit Wiedergabe über Lautsprecher (Blauert 1974, S. 163).

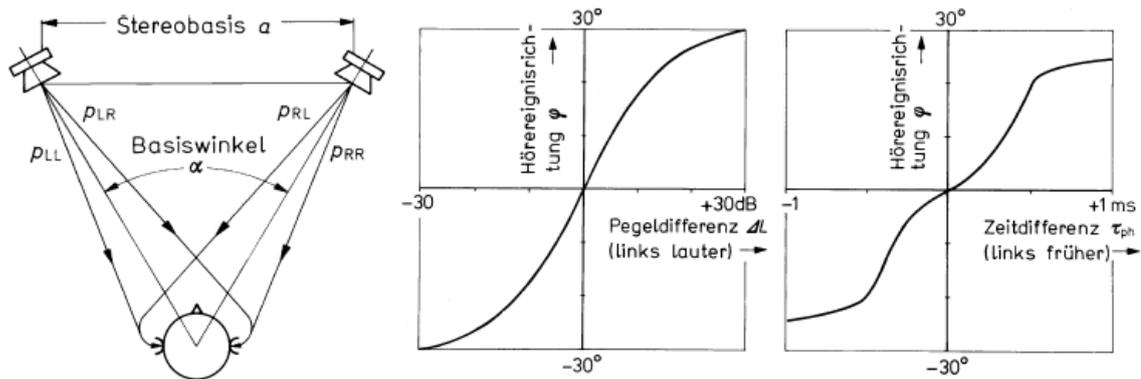


Abb. 2.9: Zwei Lautsprecher in Stereo-Standardaufstellung (Basiswinkel von $\alpha = 60^\circ$) Summenlokalisationskurven für Pegel- bzw. Laufzeitdifferenzen der beiden Lautsprechersignale (nach Wendt 1963) für impulsförmige Schallquellen (Knacke), Breitbandsignale, Kopf fixiert, 10 Versuchspersonen, $\alpha = 60^\circ$, reflexionsarmer Raum (Blauert, Braasch in Weinzierl 2008, S. 101 nach Blauert 1974, S. 164).

2.2.4 Präzedenz Effekt

Treffen die abgestrahlten Signale am Hörerort mit einer Zeitdifferenz größer als 1 ms ein, ist nur das frühere Signal für die Richtungswahrnehmung bestimmend. Für die Lokalisation wird das zuerst eintreffende Schallsignal (Primärschall) vom Gehör berücksichtigt und das spätere (Sekundärschall) bei der Auswertung unterdrückt. Dieser besonders für die Raumakustik und die elektro-akustische Beschallungstechnik wichtige Effekt wird Gesetz der ersten Wellenfront (Cremer 1978, S. 395) oder Präzedenz Effekt genannt. Überschreitet die Verzögerung der zwei Wellenfronten eine obere Schwelle, so treten zwei Höreignisse nacheinander auf. Das zweite Höreignis wird als Echo wahrgenommen (Blauert 1974, S. 163).

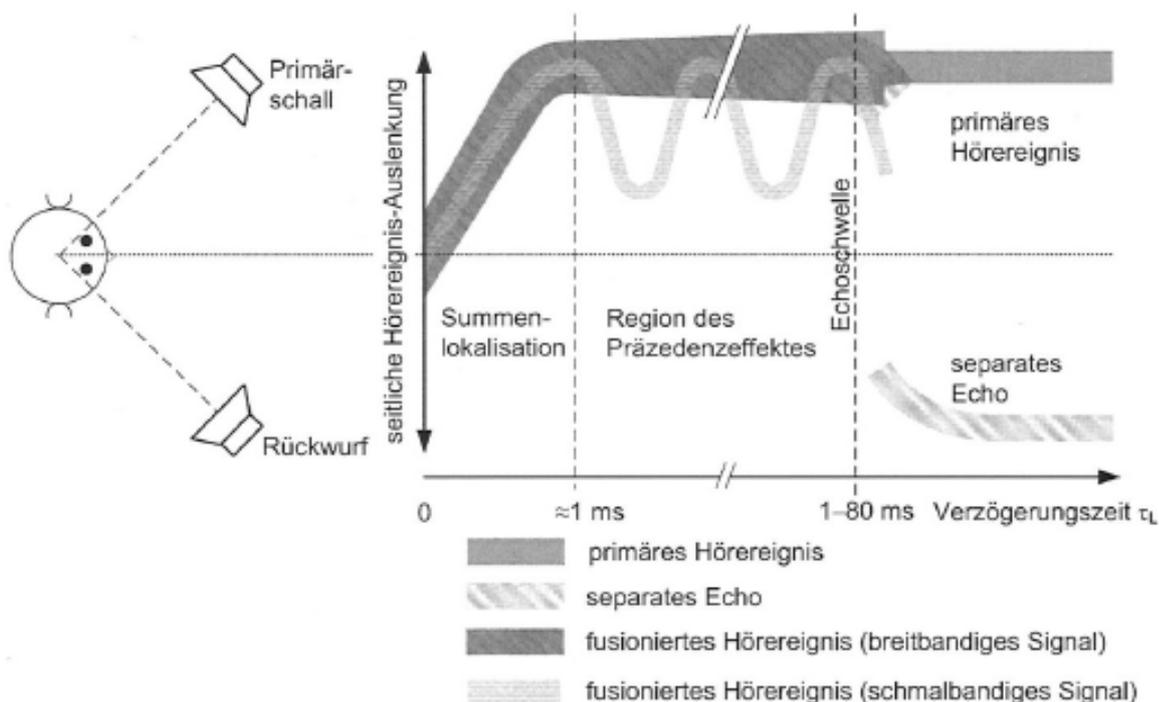


Abb. 2.10: Hörereignisrichtung als Funktion der Verzögerungszeit des Signals τ_L zur Erläuterung des Präzedenzeffekts und seiner Gültigkeitsgrenzen (Blauert, Braatsch in Weinzierl 2008, S. 104).

Der Wert der Echoschwelle kann zwischen 5 und 100 ms liegen. Dieser Wert hängt von der Art des Signals ab, ob artifizielle impulshafte Signale (5 ms), Sprache (50 ms) oder Musik (80 ms). Zusätzlich zur Laufzeitverzögerung können Pegelunterschiede wiedergegeben werden. Bei ca. 20 ms kann der Sekundärschall um 10 dB lauter sein als der Primärschall, ohne dass ein Echo hörbar wird. Dieser psychoakustische Effekt, der Haas-Effekt, wird in der Beschallungstechnik häufig genutzt, um einen noch größeren Gesamtpegel zu erreichen, ohne dass die Richtungswahrnehmung beeinflusst wird (Blauert, Braatsch in Weinzierl 2008, S. 103).

2.2.5 Richtungs- und Entfernungshören

Zu den psychoakustischen Grundlagen gehören vor allem das Richtungs- und Entfernungshören. Im Folgenden wird zuerst auf die richtungsbestimmenden Bänder nach Blauert und danach auf die Entfernungslokalisation eingegangen.

Blauertsche Bänder

Ein besonders psychoakustisches Phänomen sind die richtungsbestimmenden Bänder nach Blauert, auch als „Blauertsche Bänder“ bekannt. Dieser Effekt beschäftigt sich mit der Lokalisierung von Schmalbandrauschen in der vertikalen Ebene, der Medianebene. Die Untersuchung zeigt, dass die Häufigkeit mit der eine Person die Schallereignisrichtung erkennt, sich bei gezielter Anhebung oder Absenkung eines Frequenzbandes verändert. Schmalbandrauschen im Frequenzbereich von 300 Hz oder 3 kHz wird vom Hörer am sichersten vorne, 8 kHz oben und 1 oder 10 kHz hinten erkannt. Dieser Effekt ist auf die Frequenzcharakteristiken des Hörsystems zurückzuführen. Die Abbildung 2.11 zeigt die frequenzabhängige relative Angabehäufigkeit der Versuchspersonen (Blauert 1974, S. 87-90; Fastl, Zwicker 2006, S. 310).

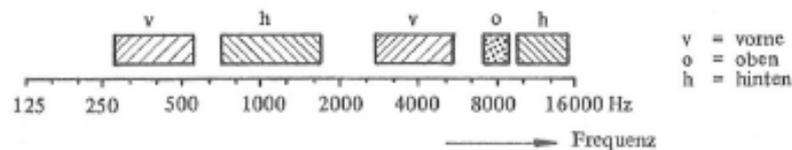


Abb. 2.11: Lage der richtungsbestimmenden Bänder und der Anhebungsbereiche auf der Frequenzachse (Dickreiter 2008, S. 109 nach Blauert 1974, S. 92).

Entfernungslokalisierung

Für die Wahrnehmung der Entfernung einer Schallquelle wertet das Gehör Merkmale des Schallsignals aus. Zur Beurteilung der Entfernung gehören Lautheit, frühe Reflexionen, Nachhall und Helligkeit. Der Lautstärkepegel eines Schallereignisses hat Einfluss auf die Entfernungslokalisierung des Menschen. Dabei werden lautere Geräusche als näher, anschwellende Töne als näher kommend und abschwelende als sich entfernend empfunden. Die Hörereignisentfernung in geschlossenen Räumen wird durch das Verhältnis von direktem zu diffusem Schall beeinflusst. Je stärker der Nachhall, desto entfernter wird die Schallquelle wahrgenommen. Vor allem im Fernfeld, also bei großen Entfernungen, sind neben dem Lautstärkepegel Klangfarbenänderungen maßgeblich für die Entfernungslokalisierung. Der Schall erhält bei der Entfernung eine zunehmend dumpfere Klangfarbe (Dickreiter 2008, S. 110). Zudem ist bei einer bereits bekannten

Schallquelle eine genaue Entfernungseinschätzung für den Hörer möglich (siehe Blauert 1974, S. 38, S. 95-111).

3 Räumliche

Audiowiedergabeverfahren

Das Leben besteht aus dreidimensionalen Klangerlebnissen unterschiedlichster Art. Die Fähigkeit des Menschen, Sinn aus der Umgebung zu machen, hängt stark von der räumlichen Wahrnehmung ab. Das Gehör spielt in diesem Prozess eine wichtige Rolle. Natürliche Schallquellen werden im Bezug auf ihren Standort wahrgenommen und enthalten in der Regel Schallsignale in allen drei Dimensionen: Breite, Höhe und Tiefe. Die Nachbildung solcher natürlicher Klangereignisse mittels Lautsprechertechnik ist seit Beginn der 90er Jahre Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung. Durch das Verfahren der Wellenfeldsynthese ist die physikalisch korrekte Reproduktion eines natürlichen Schallfeldes möglich (Rumsey 2001, S. 1). Mit dem Begriff räumlich (engl. spatial) ist die virtuelle akustische Umgebung in allen drei Dimensionen gemeint. Die räumliche Wahrnehmung des Menschen hängt von zwei Hauptfaktoren ab: der Schalldruck am Ohr des Hörers und die Psychoakustik des räumlichen Hörens. Der erste Faktor ist eine physikalische Größe, die mit elektroakustischen Lautsprecheranlagen hergestellt werden kann. Der zweite Faktor erfordert genaue Kenntnis darüber, wie unser Gehör physikalische Reize in räumliche Wahrnehmung übersetzt. Verschiedenste räumliche Audiowiedergabeverfahren nutzen diese Faktoren auf unterschiedliche Weise (Rabenstein, Spors in Benesty et al. 2008, S. 1095). Angefangen mit der herkömmlichen Stereophonie werden in diesem Kapitel elektroakustische Übertragungstechniken wie das 5.1 Surroundsystem bis hin zum Prinzip der Wellenfeldsynthese vorgestellt. Auf die dazu gehörenden Panning Verfahren wie Lineares Panning, Panning nach Sinus, Tangens Gesetz, VBAP und Ambisonic wird in darauffolgenden eingegangen.

3.1 Stereophonie

Das einfachste räumliche Audiowiedergabeverfahren ist die Tonwiedergabe mittels zwei Lautsprechern, die Stereophonie. Die Stereophonie basiert auf einer Anzahl von verschieden-en Techniken, um akustische Szenen räumlich wiedergeben zu können. Diese beschreiben mit welchem Signal die Lautsprecher entsprechend gespeist werden, um geeignete räumliche Informationen an den Ohren des Zuhörers zu erzeugen. Diese Informationen sind von den interauralen Pegel- und Zeitdifferenzen und von anderen psychoakustischen Prinzipien abhängig (Rabenstein, Spors in Benesty et al. 2008, S. 1100). Die Stereowiedergabe wird daher unterteilt in Intensitätsstereophonie, Laufzeitstereophonie und Äquivalenzstereophonie (Görne 2008, S. 121-122). Die Äquivalenzstereophonie ist eine Kombination aus Intensitäts- und Laufzeitstereophonie (Weinzierl S. 582). Zum Platzieren einer Phantomschallquelle zwischen den Lautsprechern wird von einem zum anderen Lautsprecher „geblendet“. Dieses Verfahren wird „Panning“ genannt. Hier wird ein identisches Audiosignal auf beiden Lautsprechern wiedergeben, wobei sich die Lautstärke bzw. Laufzeiten (oder eine Kombination aus beiden) der einzelnen Signale pro Lautsprecher unterscheiden. Die Signale werden vom Gehör zu einem Signal zusammengefasst, wodurch sich die Schallquelle innerhalb der Lautsprecheranordnung zu befinden scheint (Weinzierl 2008, S. 610).

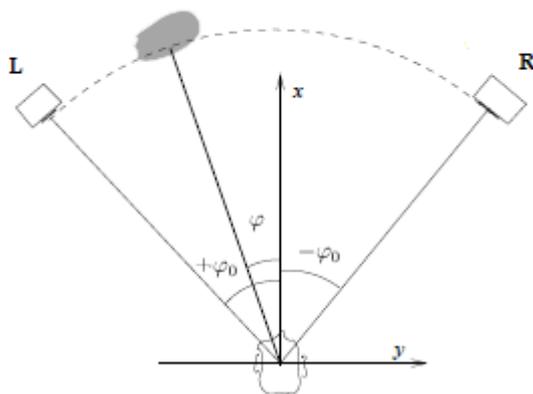


Abb. 3.1: Standard Stereoanstellung mit φ Winkel zwischen der Phantomschallquelle und dem Hörer und $\pm\varphi_0$ Winkel zwischen den Lautsprechern und der Mittelachse des Kopfes in mathematisch positive Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn (Pulkki 2001, S. 740).

„Obwohl sowohl Pegel- als auch Zeitunterschiede die gewünschte Auslenkung einer Phantomschallquelle aus der Mitte der Lautsprecherbasis bewirken, werden Zeitdifferenzen in den meisten Fällen nicht zur Panoramaregelung eingesetzt, da ein so erzeugtes Stereosignal eine geringere Monokompatibilität aufweist, die sich in kammfilterbedingten Klangverfärbungen der Monosumme zeigt.“ (Dickreiter 2008, S. 322). Das Panning Verfahren mittels Lautstärke, auch Intensitätspanning, Amplitudenpanning, Power Panning oder Pegelpanning genannt, wird daher am häufigsten verwendet.

In der Stereowiedergabe werden zwei Lautsprecher symmetrisch vom Hörer in der Medianebene rechts und links angeordnet. Die Lautstärke wird mit den Verstärkungsfaktoren g_1 für den linken Lautsprecher und g_2 für den rechten Lautsprecher (engl. gain) gesteuert. Die Richtung der virtuellen Quelle ist abhängig von diesen beiden Verstärkungsfaktoren. Damit die virtuelle Schallquelle an jeder Position mit einer konstanten Lautstärke zu hören ist, muss die Leistungssumme aller Signale immer den gleichen Wert betragen. Dieser konstante Wert wird als C definiert und mit folgender Formel bei zwei Lautsprechersignalen beschrieben:

$$C = (g_1)^2 + (g_2)^2 \quad (3.1)$$

Die Lautstärkeverhältnisse zwischen den Lautsprechern lassen sich mit unterschiedlichen Gesetzen ausrechnen. Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit dem Linearen, dem Sinus und dem Tangens Gesetz (Pulkki 1997, S. 457).

3.1.1 Lineares Gesetz

Die einfachste Formulierung zur Positionierung einer Schallquelle ist mit dem linearen Panning Gesetz möglich:

$$g_1 = \frac{1}{2\varphi_0} * (\varphi_0 + \varphi) \quad (3.2)$$

$$g_2 = 1 - g_1 \quad (3.3)$$

Der Verstärkungsfaktor g ist prozentuell ausgelegt und kann Werte von minimal 0 bis maximal 1 annehmen. Die Position der virtuellen Quelle bzw. die Schallereignisrichtung wird mit dem Winkel φ angegeben. Wenn nun der Lautsprecherwinkel $\varphi_0 = \pm 40^\circ$ Stereo gewählt wird, dann kann das Lineare Gesetz, wie Abbildung 3.2 zeigt, dargestellt werden.

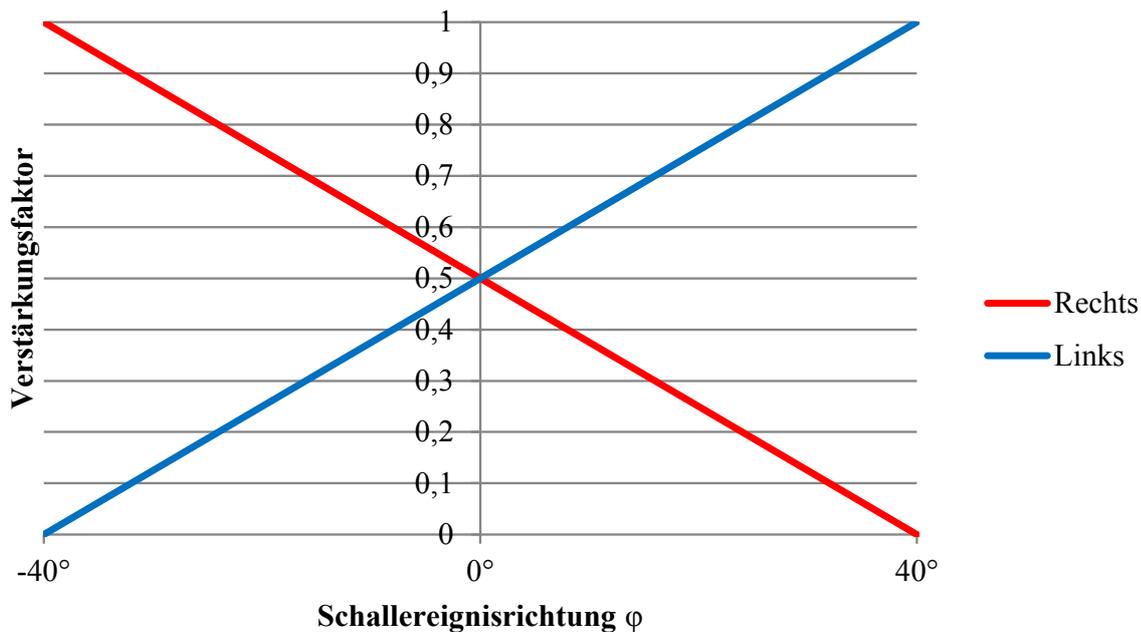


Abb. 3.2: Lineares Panning Gesetz in Stereo. Der Verstärkungsfaktor des rechten Lautsprechers (g_1) ist rot gekennzeichnet und des linken (g_2) blau.

Der unerwünschte Effekt, welcher beim Linearen Panning erzeugt wird, ist der Lautstärkeabfall von -3 dB in der Mitte. Bei der Bewegung einer Schallquelle (dynamische Schallquelle) empfindet der Hörer das Signal zur Mitte hin leiser werdend und zu den Lautsprecher hin lauter werdend. Dies beruht auf dem Gesetz der Schallintensität, das besagt, dass die wahrgenommene Lautheit eines Schalls proportional zu seiner Lautstärke ist (siehe Gleichung 3.1); (Roads 1996, S. 459). Mit dieser Gleichung wird die Lautheit der zwischen den Lautsprechern bewegten Phantomschallquelle konstant gehalten (Weinzierl 2008, S. 685).

Beim linearen Gesetz sind die Verstärkungsfaktoren in der Mitte $g_1 = 0,5$ und $g_2 = 0,5$, beim konstanten Panning mit Sinus bzw. Tangens Gesetz hingegen $g_1 = 0,707$ und $g_2 = 0,707$. Dies entspricht einer Differenz von 3 dB (Roads 1996, S. 460).

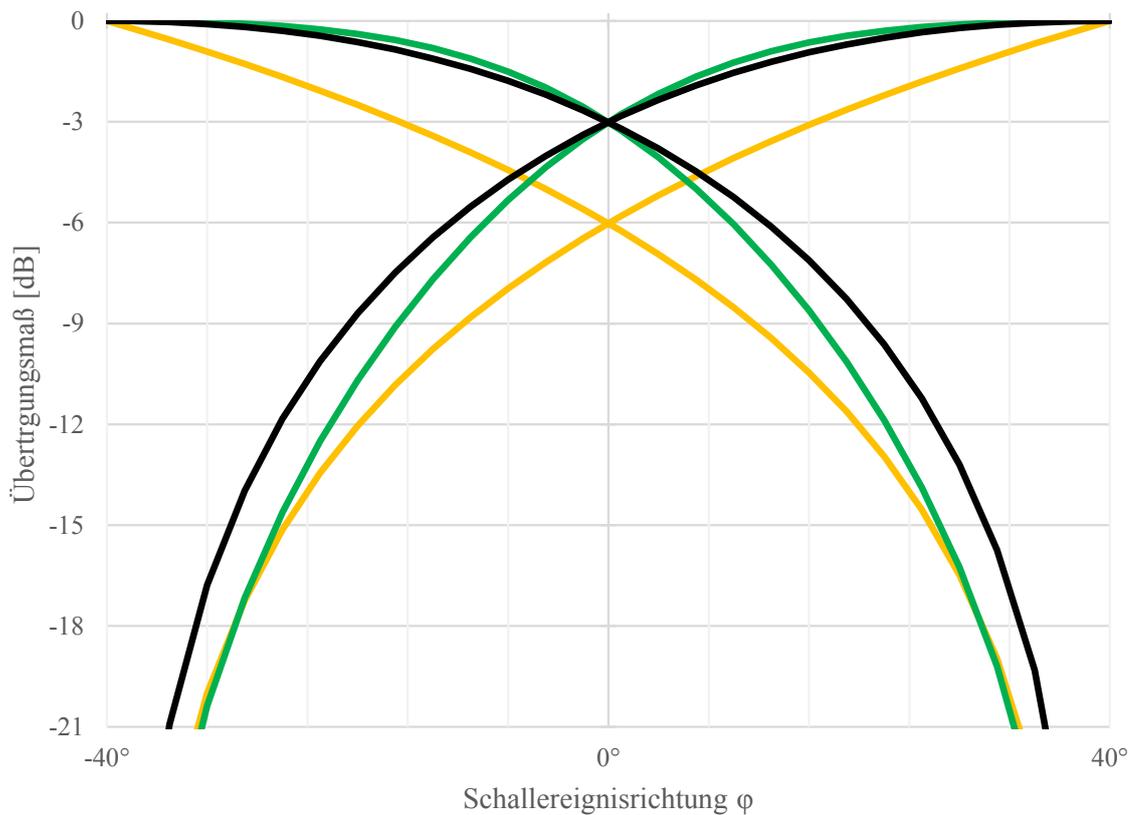


Abb. 3.3: Verläufe der Übertragungsmaße von Prozent in Dezibel. Der Lautstärkeabfall von -3 dB zwischen dem Linearen Gesetz (orange) und den anderen Gesetzen mit konstanter Leistungssumme (Tangens Gesetz (schwarz) Sinus Gesetz (grün)) wird ersichtlich.

Die Umwandlung von Prozent in Dezibel erfolgt mit der Formel Schalldruckpegel ist gleich der 20-fache Logarithmus vom Verstärkungsfaktor in Prozent geteilt durch hundert (Webseite Sengpiel Audio):

$$L = 20 * \log\left(\frac{g}{100}\right) \quad (3.4)$$

3.1.2 Sinus Gesetz

Zu den konstanten Intensitätspannungverfahren (engl. Constant Power Panning) gehören das Sinus und das Tangens Gesetz (Roads 1996, S. 460). Das Panning nach Sinus Gesetz, auch das Blumlein Gesetz genannt, wurde nach Grundlagen von Snows „Ste-

reophonic Situations“ (Rumsey 2001, S. 12) von Alan Blumlein patentiert (Blumlein 1931) und letztendlich von Bauer (Bauer 1961) formuliert (Pulkki 1997, S. 457):

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (3.5)$$

Die Abbildung zeigt das Amplitudenpanning und deren Verstärkungsfaktoren berechnet mit dem Sinus Gesetz:

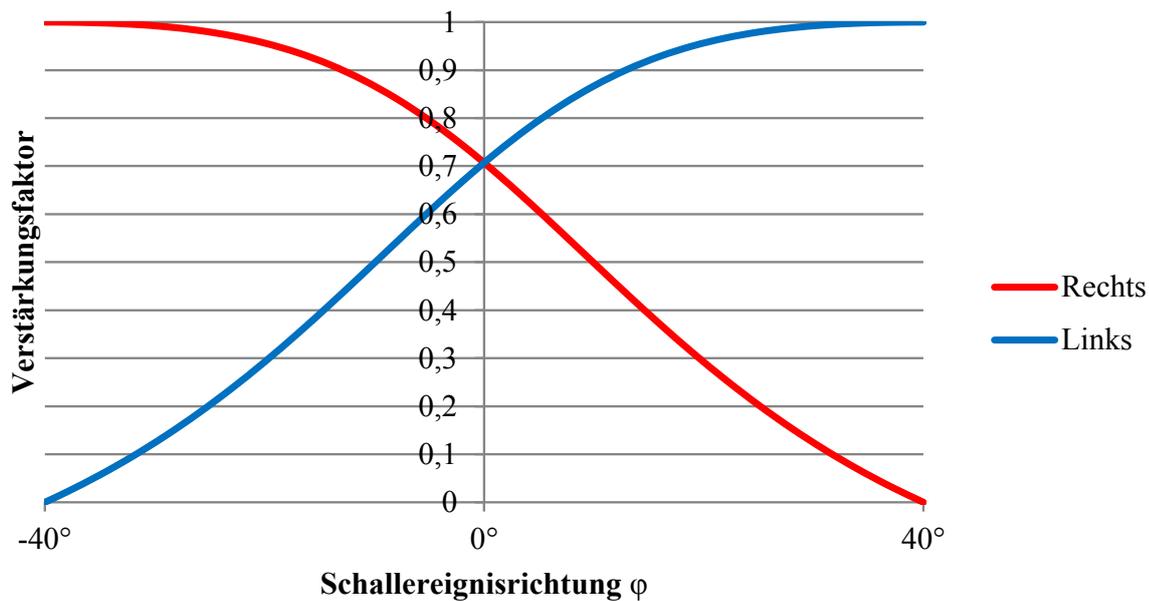


Abb. 3.4: Panning nach Sinus Gesetz in Stereo. Der Verstärkungsfaktor des rechten Lautsprechers (g_1) ist rot gekennzeichnet und des linken (g_2) blau.

3.1.3 Tangens Gesetz

Eine weitere Möglichkeit, zwei Signale zu überblenden, entwickelte Leakey bereits 1959 (Weinzierl 2008, S. 658). Später leiteten Bennett et al. (Bennett et al. 1985) aus einem akustischen Modell für die Schallausbreitung am Kopf die Gleichung für das Tangens Gesetz bei Stereo-Setups ab (Pulkki 2002, S. 3):

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (3.6)$$

In dieser Form ist das Tangens Gesetz nur im zweidimensionalen Bereich nützlich. Die Abbildung zeigt das Tangens Gesetz mit den Lautsprechern auf $\varphi_0 = \pm 40^\circ$.

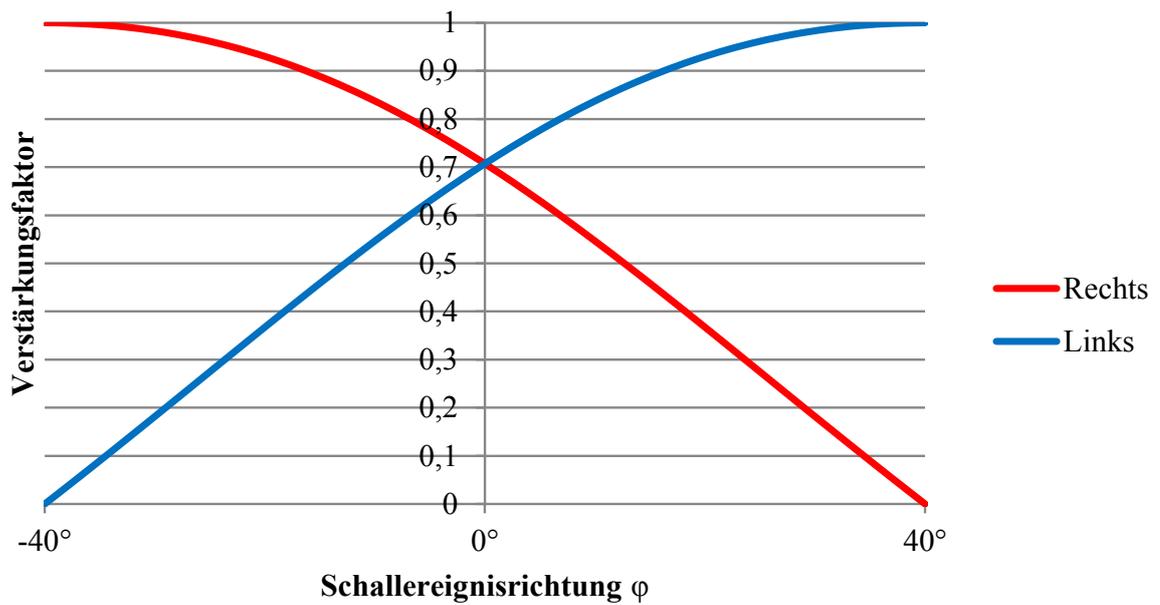


Abb. 3.5: Panning nach Tangens Gesetz in Stereo. Der Gainfaktor des rechten Lautsprechers (g_1) ist rot und des linken (g_2) ist blau.

Wird das Sinus Gesetz direkt mit dem Tangens Gesetz verglichen, werden nur kleine Unterschiede sichtbar:

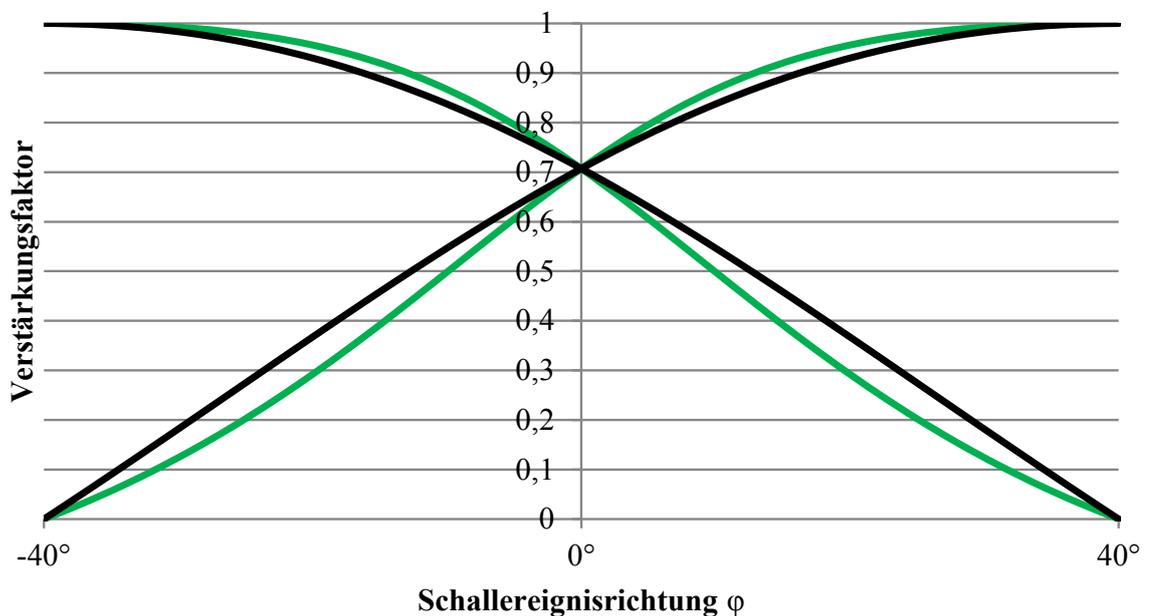


Abb. 3.6: Vergleich von Panning nach Sinus Gesetz (grün) und Tangens Gesetz (schwarz) in Stereo.

Der Unterschied zwischen dem Amplitudenpanning nach Sinus Gesetz und dem nach

Tangens Gesetz ist laut Pulkki folgendermaßen zu sehen: Das Sinus Gesetz ist gültig, wenn der Kopf des Hörers gerade nach vorne zeigt, hingegen beim Tangens Gesetz der Kopf des Hörers der virtuellen Quelle folgt. Jedoch wurde in subjektiven Tests gezeigt, dass dieser Effekt vernachlässigbar ist (Pulkki 1997, S. 457). Wie im Diagramm ersichtlich ist, sind die Pegelunterschiede minimal (siehe auch Abb. 3.3 Skala in dB).

3.2 Multikanal-Surround-Systeme

In der Entwicklungsgeschichte der Mehrkanalton-technik wurden die unterschiedlichsten Lautsprecheranordnungen konstruiert und immer wieder erweitert. Das am häufigsten gebrauchte Lautsprecher-Setup in den späten 1950er Jahren war die bereits beschriebene Stereophonie. In den 1970er Jahren wurde die Quadrophonie entwickelt, welches aus vier Lautsprechern, die gleichmäßig um den Zuhörer im Azimutwinkel $\pm 45^\circ$ und $\pm 135^\circ$ platziert sind, besteht. Dieses Setup wurde nie erfolgreich; Wegen der Probleme der Wiedergabetechnik zu dieser Zeit und auch die Anordnung selbst hat zu wenig Lautsprecher, um dem Hörer einen guten räumlichen Eindruck in alle Richtungen zu gewährleisten. Um akustische Effekte und atmosphärische Raumwahrnehmung im Kino zu schaffen, wurde das Standard-Stereophonie-Setup mit einem zusätzlichen Center-Kanal und zwei Surround-Kanälen erweitert. Diese Art der Anordnung wurde erstmals 1976 in Dolby-Surround-Sound-Systemen verwendet und im Jahr 1992 als ITU-Recommendation Standard festgelegt. Seit den späten 1990er Jahren wurde dieses Setup immer häufiger im heimischen Bereich verwendet. Es wird allgemein als 5.1 Surround Setup bezeichnet, in dem 5 für die Anzahl der Lautsprecher und .1 für den Niederfrequenzkanal, den Subwoofer, steht (Pulkki in Havelock et al. 2008, S. 748-749). „Nach ITU-R BS. 775-1 sind alle Lautsprecher eines 5.1-Systems entlang eines Kreisumfangs und mit gleichem Abstand zum Hörplatz angeordnet. Die Lautsprecher für linken und rechten Kanal sind um $\pm 30^\circ$ vom Center-Lautsprecher versetzt, die Surroundlautsprecher um $\pm 110^\circ$, wobei Abweichungen von etwa 10° zulässig sind. Der Subwoofer zur Wiedergabe des LFE-Kanals wird meist zwischen C und R angeordnet.“ (Weinzierl 2008, S. 643). Um noch mehr räumliche Schallanteile hinzuzufügen, kann das 5.1 Surround Setup um eine beliebige Anzahl an Lautsprechern erweitert werden.

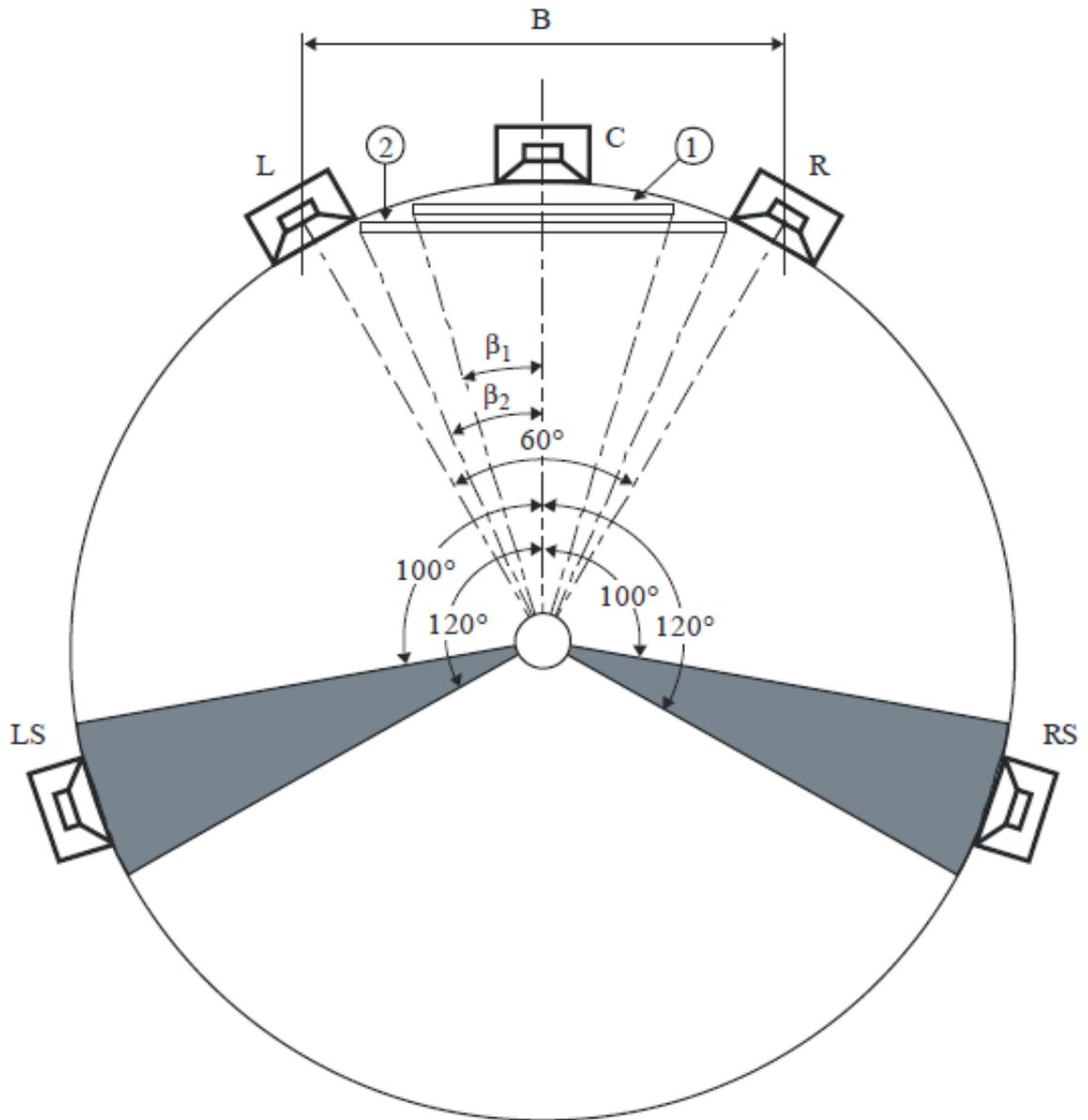


Abb. 3.7: Aufbau eines 5.0 Setups; ① Bildschirm 1 - Entfernung des Hörers zum Bildschirm = $3 H$ ($2 \beta_1 = 33^\circ$) ② Bildschirm 2 = $2 H$ ($2 \beta_2 = 48^\circ$)
 H: Höhe des Bildschirms B: Lautsprecherbasisbreite (ITU 2012).

Tab. 3.1: ITU-R BS.775-3 2012.

Lautsprecher	horizontaler Winkel von C aus (in Grad)	Höhe (in Meter)
C	0	1,2
L, R	30	1,2
LS, RS	100 - 120	$\leq 1,2$

3.2.1 Vector Base Amplitude Panning

Vector base amplitude panning (VBAP) ist ein Mehrkanal-Audiowiedergabeverfahren, das genau wie in der Stereophonie das Intensitätspannung verwendet. Der Unterschied ist, dass dieses Panning nicht nur auf zwei Lautsprechern angewendet werden kann, sondern im dreidimensionalen Bereich maximal drei benachbarte Lautsprecher aus einer beliebigen Anzahl anspielen kann. Auf diese Weise können virtuelle Quellen im Raum um den Hörer platziert werden (Rabenstein, Spors in Benesty et al. 2008, S. 1103). Dieses Verfahren wurde von Ville Pulkki (1997) unter der Bezeichnung Vector Base Amplitude Panning (VBAP) eingeführt und ist eine mathematische Formalisierung des Tangens Gesetz in Einheitsvektoren (Pulkki 2001, S. 741, S. 756).

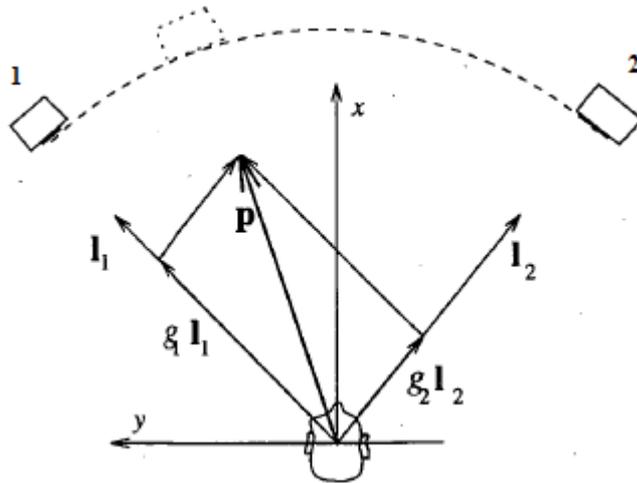


Abb. 3.8: Stereophone Anordnung formuliert mit Vektoren. (Pulkki 1997, S. 458)

„Betrachtet man die in Richtung der benachbarten Lautsprecher weisenden Einheitsvektoren $l_1 = [l_{11} l_{12}]$ und $l_2 = [l_{21} l_{22}]$ als Vektorbasis, so lässt sich der zur gewünschten Phantomschallquelle zeigende Vektor p als Linearkombination der Lautsprechervektoren konstruieren.“

$$p = g_1 l_1 + g_2 l_2 = g L_{12} \quad (3.7)$$

Diese Gleichung lässt sich auf drei Dimensionen erweitern, wenn man als Vektorbasis ein Triplet aus drei benachbarten Lautsprechern l_1, l_2 und l_3 dreidimensionale Vektoren

und die zugehörige L_{123} verwendet (Weinzierl 2008, S. 659).

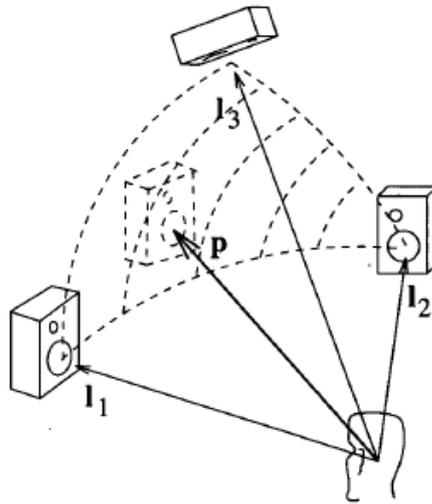


Abb. 3.9: Beispielkonfiguration für dreidimensionales Amplitudenpanning. Lautsprecher bilden ein Dreieck, in dem die virtuelle Quelle platziert werden kann (Pulkki 1997, S. 460).

Zudem können beliebig viele Lautsprecher hinzugefügt werden. Dabei werden im zweidimensionalen Bereich immer zwei Lautsprecher und im dreidimensionalen Bereich drei Lautsprecher ausgewählt und bespielt.

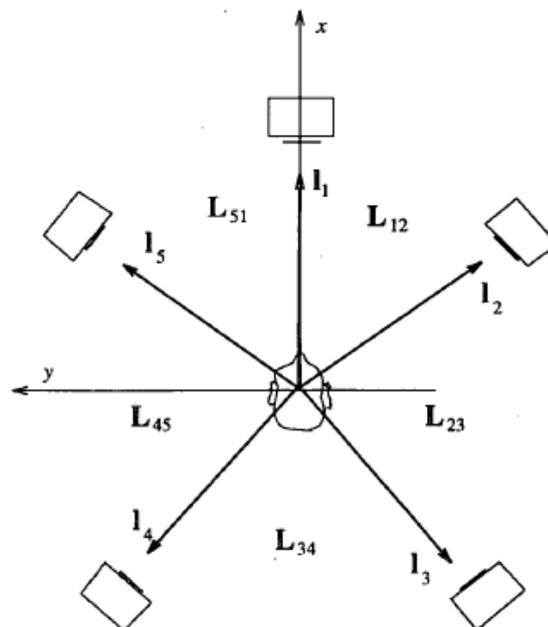


Abb. 3.10: Zweidimensionaler VBAP mit fünf Lautsprechern (Pulkki 1997, S. 459).

3.2.2 Ambisonic und andere Panning Verfahren

Basierend auf den Arbeiten von Gerzon (siehe Gerzon 1992, S. 1) wurde das sogenannte B-Format oder die Technik des Ambisonics entwickelt. Das B-Format ist ein Vier-Kanal-Aufzeichnungsstandard, welches ein Feldmikrofon zur Aufnahme verwendet (Vorländer 2008, S. 288). Ambisonics beschreibt eine Reihe von Methoden, die sich seit den 1970er Jahren entwickelt haben. Ambisonics verwendet eine flexible Anzahl von Lautsprechern, die in einem gewissen Abstand vom Hörer angebracht sind, so dass die Überlagerung der Wellenfelder als eine Überlagerung von ebenen Wellen betrachtet werden kann. Im Gegensatz zum VBAP wird eine virtuelle Quelle nicht nur zwischen zwei oder drei Lautsprecher „geblendet“, sondern von allen Lautsprechern innerhalb der Anordnung. In Kombination mit dem passenden Aufzeichnungsverfahren ermöglicht Ambisonics die Wiedergabe von realen Wellenfeldern (Rabenstein, Spors in Benesty et al. 2008, S. 1104). Eine Anzahl von Variationen auf Grundlage des Ambisonic Verfahren wurde entwickelt. Diese basieren vor allem auf der psychoakustischen Lokalisierungsgrundlage entsprechend niedrige und hohe richtungsbestimmende Frequenzbänder des menschlichen Gehörs (siehe Rumsey 2001, S. 211).

Neben der Lokalisierung nach Frequenzen gibt es auch noch weitere Panning Verfahren wie etwa das Entfernungspanning (Distance Panning) oder das kopfbezogene Panning (Head-Related Panning) (siehe Rumsey 2001, S. 208-218).

3.3 Wellenfeldsynthese

„Auch die Wellenfeldsynthese strebt keine Abbildung von Schallquellen als Phantom-schallquellen zwischen benachbarten Lautsprechern an, sondern - ähnlich wie Ambisonics höherer Ordnung - eine physikalisch reale Resynthese eines räumlich ausgedehnten Schallfelds durch die Interferenz von zahlreichen, dicht zueinander positionierten Lautsprechersignalen.“ (Weinzierl 2008, S. 664). Im Folgenden wird im Theorieteil das Prinzip der Wellenfeldsynthese erklärt und darauf aufbauend erläutert, wie dieses Verfahren in der Praxis realisiert werden kann.

3.3.1 Prinzip der Wellenfeldsynthese

Die Wellenfeldsynthese (englisch: wave field synthesis, WFS), früher auch Schallfeldsynthese (Weinzierl 2008, S. 93) genannt, ist ein Audiowiedergabeverfahren, mit dem ein Schallfeld eines Raumes in einem anderen Raum realistisch nachgebildet wird (Dickreiter 2008, S. 304.). Es ermöglicht die Erzeugung von Schallfeldern mit natürlichen zeitlichen und räumlichen Eigenschaften innerhalb eines Bereiches, begrenzt von Lautsprecherarrays (De Vries et al. 1999, S. 1). „Die Methode der Wellenfeldsynthese basiert auf Lautsprecherarrays mit einer Vielzahl an Lautsprechern, die um eine Hörzone herum angeordnet sind. Die Lautsprecher werden so mit Audiosignalen angesteuert, dass die Schallfelder der individuellen Lautsprecher zusammen ein Schallfeld mit „natürlichen“ akustischen Eigenschaften formen. Das Ergebnis ist ein natürlicher räumlicher Eindruck, der über eine große Hörzone konstant bleibt.“ (Boone et al. 1998, S. 265). Das erste Konzept, das heutzutage als Wellenfeldsynthese bekannt ist, wurde schon 1934 von Steinberg und Snow (Weinzierl 2008, S. 93) beschrieben. Allerdings reichten die technischen Gegebenheiten damals nicht für die Verwendung einer hohen Anzahl von Lautsprechern zur Klangwiedergabe. So blieb diese Idee lange Theorie bis sie nach einiger Zeit vom niederländischen Professor Berkhout wieder aufgenommen und neu formuliert wurde (Spors et al. 2008, S. 1-2). 1988 wurde das Verfahren an der niederländischen TU Delft entwickelt und dort das erste Mal in einem Demonstrationssystem mit 160 Lautsprechern realisiert (Dickreiter 2008, S. 304). Später wurde das Prinzip von de Vries und Kollegen an der TU Delft weiterentwickelt (siehe Berkhout et al. 1993, S. 2764-2777; Spors et al. 2013).

Die Idee des Prinzips der Wellenfeldsynthese stammt ursprünglich aus der Optik und zwar aus der Holographie. Daher wird die Wellenfeldsynthese auch als „akustische Holographie“ oder Holophonie bezeichnet (siehe Berkhout 1988, S. 978-995).

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit den physikalischen und mathematischen Grundlagen der Wellenfeldsynthese. Weiteres werden die Anwendungsmöglichkeiten der Wellenfeldsynthese im Gegensatz zu anderen Audiowiedergabeverfahren aufgezählt.

Huygens-Fresnel-Prinzip

Die physikalische Grundlage der Wellenfeldsynthese liefert das Huygens-Fresnel-Prinzip benannt nach den Physikern Christiaan Huygens (1629-1695) und Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) (Weinzierl 2008, S. 665). Das Huygens'sche Prinzip formuliert die Zerlegung beliebiger komplexer Wellenformen in Elementarwellen (Görne 2008, S. 299). Es beschreibt die Nachbildung des Schallfeldes einer virtuellen Quelle basierend auf der Verwendung einer Anzahl von sekundären Teilschallquellen (Beer 2007, S. 687).

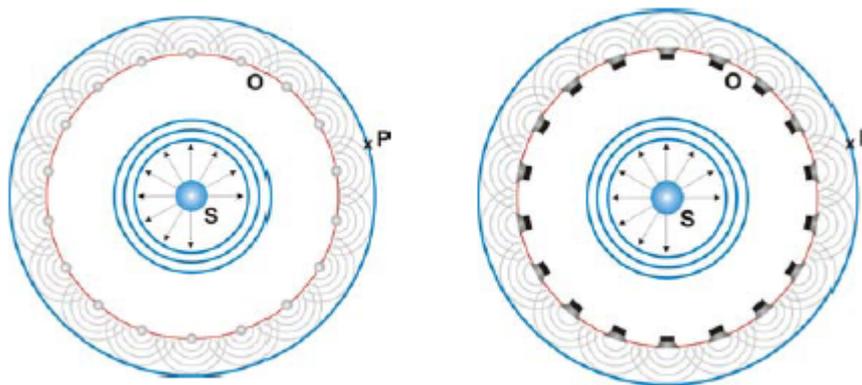


Abb. 3.11: Huygenssches Prinzip: Jeder Punkt von der Primärschallquelle S erzeugten, ausbreitenden Wellenfront kann als Ausgangspunkt für eine neue Elementarwelle gesehen werden. Die Überlagerung aller Elementarwellen, der sogenannten Sekundärschallquellen auf der Oberfläche O , ergibt eine Wellenfront durch den Punkt P , welche die gleichen Eigenschaften wie die erste Wellenfront besitzt (a) Theoretisches Modell (b) Anwendung WFS (Theile 2004, S. 126)

Zur Realisierung der Wellenfeldsynthese werden die Sekundärschallquellen durch Lautsprecherarrays ersetzt. Durch passende Pegel- und Laufzeitverzögerung kann die Anordnung des Lautsprecherarrays auf einer beliebigen Kurve erfolgen (Theile 2004, S. 126).

Mit diesem Prinzip erklärten Huygens und Fresnel verschiedene Phänomene der Wellenausbreitung, wie etwa von Reflexions-, Brechungs- und Beugungseffekten. Die Theorie stammt aus der Optik zur Ausbreitung von Licht und ist ebenso anwendbar im Bereich der Akustik (siehe Huygens 1690).

Mathematische Basis: Kirchhoff-Helmholtz-Integral

Die mathematische Formulierung für das Huygens-Fresnel'sche Prinzip gelang erst später durch das Kirchhoff-Helmholtz-Integral (siehe Williams 1999, S. 251-263; Spors 2008, S. 2-3; Verheijen 2010, S. 32-34). Es ergibt die Signale der Sekundärquelle (Lautsprecher) zur Schallfeldsynthese einer Primärschallquelle. Die Formel dazu lautet: (Weinzierl 2008, S. 666)

$$P_A = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[\left(P \frac{1 + jkr}{r} \cos\varphi \frac{e^{-jkr}}{r} \right) + \left(j\omega\rho V_n \frac{e^{-jkr}}{r} \right) \right] dS \quad (3.8)$$

Betrachtet man diese Formel als Anleitung für die Wellenfeldsynthese, so lässt sich mit einem Punkt A (Hörerplatz) innerhalb eines Raumvolumens V der Schalldruck P_A als Summe von Schallsignalen auf der Oberfläche S synthetisieren. Die Schallsignale sind einerseits angetrieben durch den Schalldruck der Primärquelle (PQ), die sich dipolförmig von jedem Punkt auf S zum Hörer ausbreiten und andererseits angetrieben durch die Schallschnelle V_n der Primärquelle, die sich monopol zum Hörer ausbreiten. Die Bedeutung der Gleichung ist in Abbildung 3.12 dargestellt:

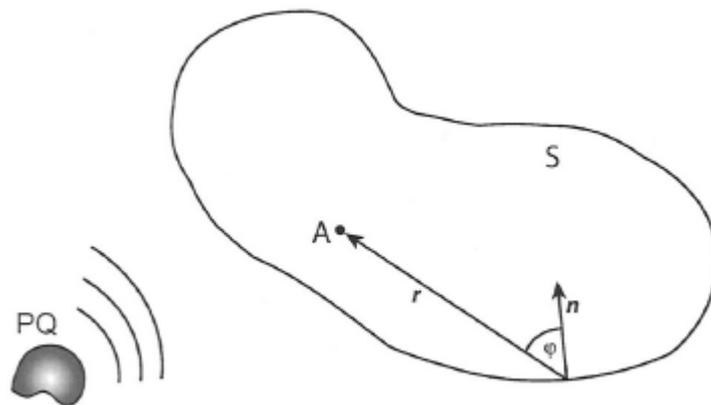


Abb. 3.12: Darstellung des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals (Weinzierl 2008, S. 667).

Die Oberfläche S wird bei der Wellenfeldsynthese mit Lautsprecherarrays gebildet. Eine unmittelbare praktische Umsetzung des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals erfordert eine unendlich große, auf einer geschlossenen Fläche um den Hörer unendlich dicht angeordnete Anzahl von monopol- und dipolförmig abstrahlenden Lautsprechern (Weinzierl 2008, S. 667).

Die folgende Darstellung zeigt, wie aus einem ursprünglichen Wellenfeld mittels Wellenfeldsynthese ein synthetisiertes Wellenfeld erzeugt wird:

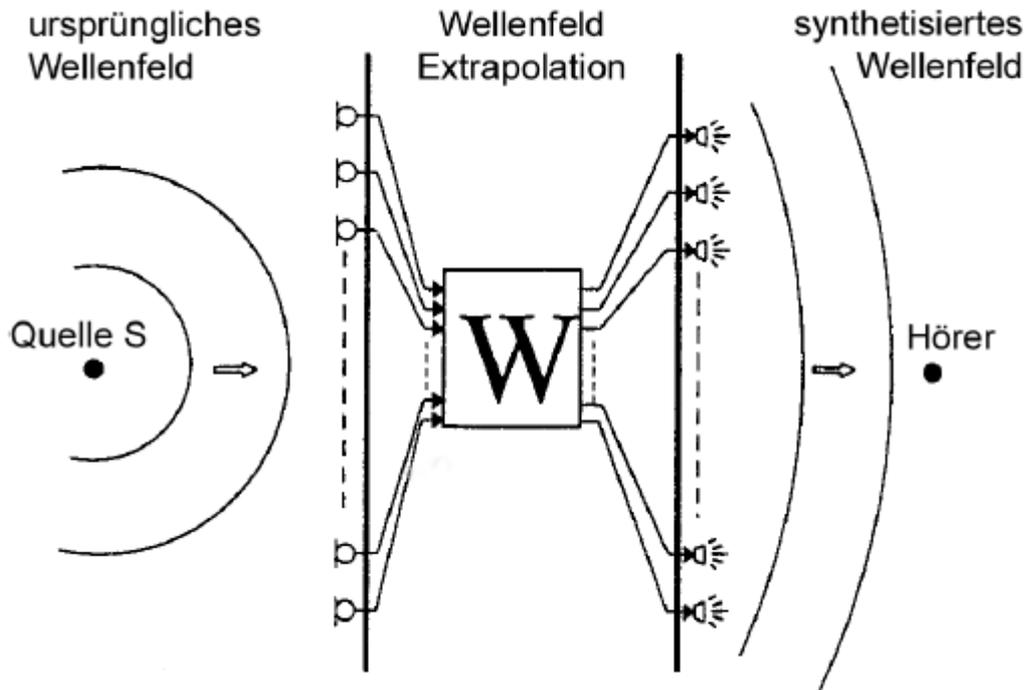


Abb. 3.13: Illustration, wie die Synthese eines Wellenfeldes erzeugt wird (Berkhout et al. 1993, S. 2768).

Vorzüge der Wellenfeldsynthese

Der Unterschied zwischen herkömmlicher Mehrkanal-Wiedergabe und der Wellenfeldsynthese ist, dass die Wellenfeldsynthese keine Abbildung von Schallquellen als Phantomschallquellen¹ zwischen benachbarten Lautsprechern anstrebt, sondern „eine physikalisch reale Resynthese eines räumlich ausgedehnten Schallfelds durch die Interferenz von zahlreichen, dicht zueinander positionierten Lautsprechersignalen.“ (Weinzierl 2008, S. 664). Bei der konventionellen Lautsprecher-Stereofonie ist der Lautsprecherabstand d groß im Vergleich zur Wellenlänge λ . Es entsteht dabei ein Interferenzfeld, wie Abbildung 3.14 darstellt:

¹Phantomschallquelle: Psychoakustischer Effekt aus der Stereofonie. Es entsteht ein Hörereignisort, dessen Ort von den Orten und den abgestrahlten Signalen beider Schallquellen abhängig ist. Bei der Bildung des Hörereignisortes hält der Hörer die Signale für eine einzige Schallquelle (Blauert 1974, S. 163).

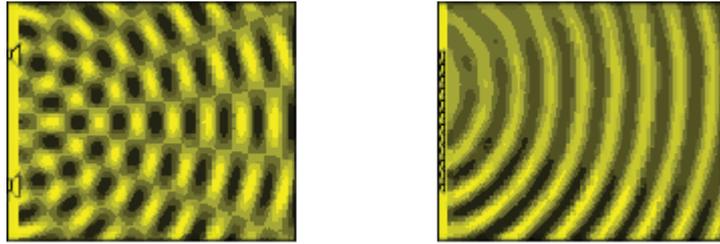


Abb. 3.14: Links: Resultierendes Feld bei Wiedergabe mit zwei Lautsprechern; Rechts: Signal einer Punktschallquelle platziert hinter dem Lautsprecherarray und von dieser Anordnung wiedergegeben. Zu erkennen sind die richtigen räumlichen und zeitlichen Eigenschaften der Wiedergabe bei WFS in der rechten Abbildung (de Vries et al. 1999, S. 15-16).

Bei der Wellenfeldsynthese hingegen gilt für $\lambda \gg d$ ein theoretisch fehlerfreies synthetisiertes Feld. Sie hat damit den Vorteil, eine unbegrenzte Hörzone zu besitzen (Görne 2008, S. 300).

Ein weiterer Vorteil der Wellenfeldsynthese im Gegensatz zu momentan gebräuchlichen Mehrkanal-Wiedergabeverfahren ist die Positionierung von virtuellen Punktschallquellen. „Virtuelle Punktschallquellen können an jedem Ort im Wiedergaberaum an der gleichen Stelle der Szene wie im Aufnahmeaum lokalisiert werden, auch im Bereich zwischen dem Hörer und den Lautsprechern, solange sich der Hörer innerhalb der Hörfläche bewegt.“ (Dickreiter 2008, S. 307).

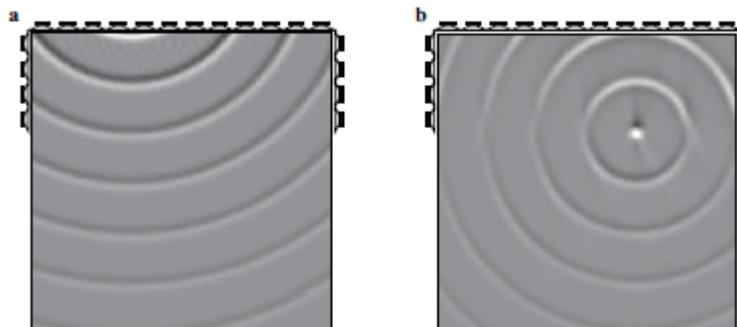


Abb. 3.15: Mit der Wellenfeldsynthese können virtuelle Schallquellen, nicht nur (a) außerhalb der Hörzone, sondern auch (b) innerhalb exakt nachgebildet werden (de Vries et al. 1999, S. 17).

Die Wellenfeldsynthese ermöglicht auch die Wiedergabe von ebenen Schallwellen im gesamten Bereich der Hörfläche. Die akustische Lokalisation ist dabei nicht von der

Hörerposition abhängig, weil die Hörereignisrichtung an jedem Ort der Hörfläche dieselbe ist. Für den Hörer entsteht durch die virtuellen Punktschallquellen eine realistische Perspektive der virtuellen akustischen Szene und durch die Synthese von ebenen Schallwellen ein realistisch empfundener Raumeindruck mit einer ausgewogenen Hallbalance (Dickreiter 2008, S. 306-307).

3.3.2 Realisierung und Anwendung in der Praxis

Dieses Kapitel beinhaltet die praktische Ausführung der Wellenfeldsynthese und deren Anwendung an verschiedenen Standorten. Zunächst wird auf die physikalischen Einschränkungen und bestehenden Fehler der Wellenfeldsynthese bei der Umsetzung in der Praxis eingegangen, danach auf Forschung und Entwicklung. Anhand von zwei konkreten Beispielen wird die Anwendung der Wellenfeldsynthese in der Praxis erläutert.

Einschränkungen

Die Wellenfeldsynthese funktioniert in der Theorie perfekt, jedoch in der Praxis ist die Wellenfeldsynthese nicht ohne Einschränkungen realisierbar. Sechs Effekte schränken die technische Umsetzung der Wellenfeldsynthese ein (Dickreiter 2008, S. 308-309; Start 1997, Diss.).

Spatial Aliasing (siehe Spors 2006)

Der Abstand zwischen den einzelnen Lautsprecherarrays ist von großer Bedeutung. Ab einer gewissen Frequenz wird die Wellenlänge zu klein und es entstehen dadurch räumliche und spektrale Fehler. Dies verursacht durch die Überlagerung der Felder mehrere Wellenfronten in unterschiedlichen Richtungen. Wenn etwa der Abstand eines Lautsprechers zum nächsten 20cm beträgt, so liegt die Grenzfrequenz bei 1 kHz. Das Spektrum unterhalb der Grenzfrequenz kann vom Gehör ohne Probleme für die Lokalisation der virtuellen Schallquellen ausgewertet werden. Diesen Effekt nennt man „Spatial Aliasing“ .

$$f_{alias} = \frac{c}{2d} \quad (3.9)$$

Die Aliasingfrequenz f_{alias} ergibt sich durch Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s dividiert durch den zweifachen Lautsprecherabstand d (Weinzierl 2008, S. 669).

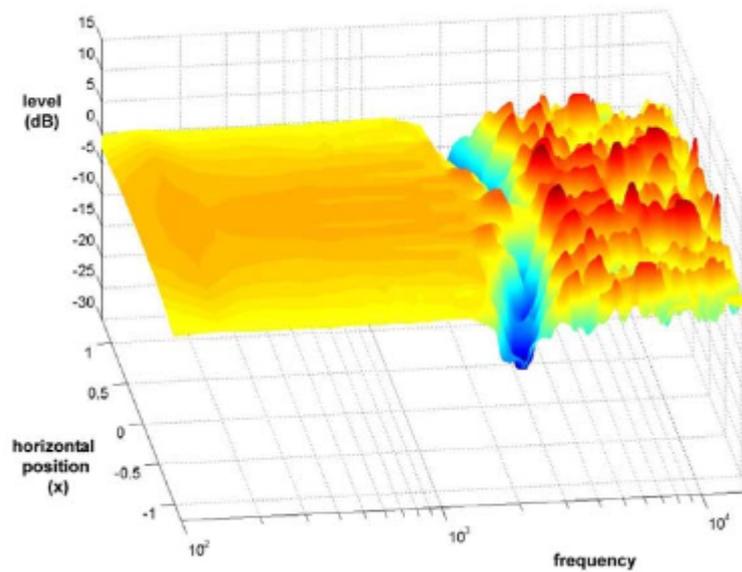


Abb. 3.16: Aliasing in der x - f Dimension, 15 cm Lautsprecherabstand, Aliasfrequenz ca. 1200 Hz (Wittek 2002, S. 3).

Wenn also der Lautsprecherabstand weniger als 2cm beträgt, liegt die Aliasfrequenz über 8500 Hz. Somit wäre vor allem der Frequenzbereich für Sprache und teilweise auch der der Musik unterhalb der Grenzfrequenz, was bedeutet, dass die Ortung der Schallquellen umso leichter fällt.

Spatial Truncation

In der Theorie wird bei der Wellenfeldsynthese von einem unendlich langen Lautsprecher-Array ausgegangen. In Wirklichkeit gibt es jedoch nur begrenzte Arrays mit zwei Enden. An diesen entstehen von den Rändern her Beugungswellen, die Klangverfärbungen verursachen. Diesen Effekt nennt man „truncation effect“. Abhilfe schaffen hier die sogenannten „tapering windows“, welche die Amplituden der äußeren Lautsprecher-signale reduzieren. Allerdings wird hierbei auch die Hörfläche verkleinert. Ein endliches

Array ohne diesen Nachteil gibt es - das Kreisarray. Dieser Arraytyp besitzt keine Enden und daher auch nur einen geringen „truncation effekt“. Da in der Praxis auch beim Kreisarray eine Anzahl der aktiven Lautsprecher selektiert wird, hat man so immer ein abgeschnittenes Array.

Spatial Interferences

Die Wandreflexionen des Wiedergaberaums können zu Veränderungen des angestrebten Schallfeldes führen. Das Reflexionsmuster des Raumes sollte dabei stark unterdrückt werden, damit die virtuellen Schallquellen und der virtuelle Raum nicht verdeckt werden. Am idealsten realisierbar ist eine Wellenfeldsynthese im „schalltoten“ Raum. Es können jedoch Reflexionen, die der Raum verursacht, berechnet werden und damit können die Wellenfeldsynthese-Signale statisch oder adaptiv in gewissen Grenzen kompensiert werden (siehe Spors 2006, Diss.).

2D/3D Fehler

Da sich bei der Wellenfeldsynthese die Wiedergabe auf die Horizontalebene beschränkt, weil es anders praktisch nicht realisierbar ist, können virtuelle Quellen nur horizontal synthetisiert werden. Auch die Reproduktion der dritten Dimension, der Höhe, ist auf der horizontalen Ebene beschränkt, obwohl diese mittels Raumimpulsantworten aufgezeichnet und wiedergegeben wird. Zusätzlich können Kugelwellen oder ebene Wellen nur dreidimensional geniert werden. Ein Line-Array erzeugt jedoch Zylinderwellen und daher kann bei der Wiedergabe keine echte ebene Welle synthetisiert werden.

Übertragungskapazität

Die erforderliche Übertragungskapazität bei einer Wellenfeldsynthese ist derart hoch, dass spezielle Methoden entwickelt werden müssen, um eine funktionierende Wellenfeldsynthese zu schaffen. Die Zahl der erforderlichen Kanäle für die Übertragung und Speicherung müssen dabei begrenzt werden, ohne gleichzeitig die Qualität der Audiowiedergabe zu beeinträchtigen.

Zu diesen negativen Effekten und Einschränkungen bei der praktischen Umsetzung der Wellenfeldsynthese gilt es Lösungen zu finden. Ziel der Forschung ist, die hervorragenden Eigenschaften des Systems aus der Theorie in die Praxis umzusetzen (Dickreiter 2008, S. 308-309).

Forschung und Entwicklung

Die Wellenfeldsynthese wurde 1988 an der Technischen Universität Delft entwickelt. Von 2001 bis 2003 gab es das Projekt CARROUSO, ein von der EU gefördertes Projekt, an dem mehrere Universitäten, Institute und Firmen zur Forschung an der Wellenfeldsynthese mitwirkten (Dickreiter 2008, S. 304; Vogel 1993). Dabei waren unter anderem die Forschungsinstitute Fraunhofer, Institut für Rundfunktechnik und das Pariser Institut IRCAM maßgeblich beteiligt. Von den Universitäten beteiligten sich die griechische Aristoteles-Universität Thessaloniki, TU Delft, Universität Erlangen-Nürnberg und die EPFL Lausanne. Weitere Forschungen und Entwicklungen zur Wellenfeldsynthese finden zurzeit am Fraunhofer Institut für Digitale Medien statt. Das Projekt nennt sich „SpatialAV“ (Webseite Fraunhofer IDMT).

Beispiele für die Anwendung

In den letzten Jahren wurden verschiedene Wellenfeldsynthese-Systeme installiert, im industriellen Bereich, in Kinos (z.B. Lindenlichtspiele in Ilmenau, Cinémathèque française in Paris, Bavaria Filmstadt bei München), für Freiluftbühnen (z.B. Bregenzer Festspiele und Seefestspiele Mörbisch) sowie an verschiedenen Universitäten, in Hörsälen, Auditorien und Konzertsälen (z.B. Tonmeisterinstitut in Detmold, TU Berlin, TU Delft, Fachhochschule Düsseldorf). Auch im Bereich der Fahrzeugakustik und zur Schallimmissionsforschung wurde die Wellenfeldsynthese eingesetzt (Weinzierl 2008, S. 670).

TU Berlin Hörsaal

Die Technische Universität Berlin setzt die Wellenfeldsynthese im Rahmen von Forschung, Lehre und für öffentliche Veranstaltungen in ihrem Hörsaal ein.



Abb. 3.17: Hörsaal der TU Berlin (Weinzierl 2008, S. 670).

Die Abbildung zeigt das Beschallungssystem zur Wellenfeldsynthese mit einem geschlossenen Lautsprecherarray aus 832 Kanälen. „Die Lautsprechermodule verfügen über einen Tieftonweg und einen DSP-gesteuerten Mittel/Hochtonweg aus je drei Einzelsystemen, so dass insgesamt über 2700 Lautsprecher zum Einsatz kommen.“ (Weinzierl 2008, S. 670).

Bregenzer Festspiele

Die Wellenfeldsynthese ist im Prinzip kompatibel zu verschiedenen Stereo- und Surround-Anordnungen (Görne 2008, S. 301). Ein Hybridsystem von konventioneller Frontbeschallung, das über einen Richtungsmischer regelbar ist, und Raumsimulation über Wellenfeldsynthese wurde für die Seeaufführungen der Bregenzer Festspiele vom Fraunhofer IDMT und der die IOSONO GmbH entwickelt. Diese neue Zusammensetzung nennt sich Bregenz Open Acoustics (BOA) (Weinzierl 2008, S. 670; Beckinger, Korn 2007).



Abb. 3.18: Open-Air-Beschallung auf der Seebühne Bregenz Links: Richtungsmischer zur Positionierung von Schallquellen auf der Bühne. Rechts: Lautsprecherarray seitlich und hinter dem Publikum zur Raumsimulation durch Wellenfeldsynthese.

Mit ca. 800 Lautsprechern wird ein Richtungshören bei den Operaufführungen auf der Seebühne in Bregenz möglich gemacht. Allein auf der Bühne kommen bis zu 100 Lautsprechersysteme in 15 Richtungsgebieten zum Einsatz. Das Lautsprecherarray der Wellenfeldsynthese aus 832 Zweiweg-Koaxial-Lautsprecher ist hinter und neben dem



Abb. 3.19: Mozarts Zauberflöte auf der Seebühne Bregenz (Gatzsche et al. 2014, S. 1).

Zuschauerbereich in einem Band angebracht und wird einzeln angesteuert. Der Richtungsmischer ermöglicht die Positionierung von Schallquellen auf der Bühne sowie die Einspielung diskreter Surround-Effekte und die Raumsimulation (Weinzierl 2008, S. 656-657).

Mittels Wellenfeldsynthese ist es möglich, natürliche Klangerlebnisse aus unserer Umwelt in der Audiotechnik nachzubilden. Dabei werden Wellenfelder virtueller Schallquellen durch die Verwendung von Lautsprecherarrays synthetisiert. Die theoretischen Vorzüge des Audiowiedergabeverfahrens zeigen die hervorragender Eigenschaften des Systems im Vergleich zu herkömmlichen Zwei- oder Mehrkanalstereophonie. Die praktische Realisierung der Wellenfeldsynthese ist jedoch noch nicht ohne Einschränkungen

ausführbar und es liegt an der zukünftigen Forschung, dafür Lösungsansätze zu entwickeln.

4 Objektbasiertes Rendering Konzept für Standard Panning-Verfahren

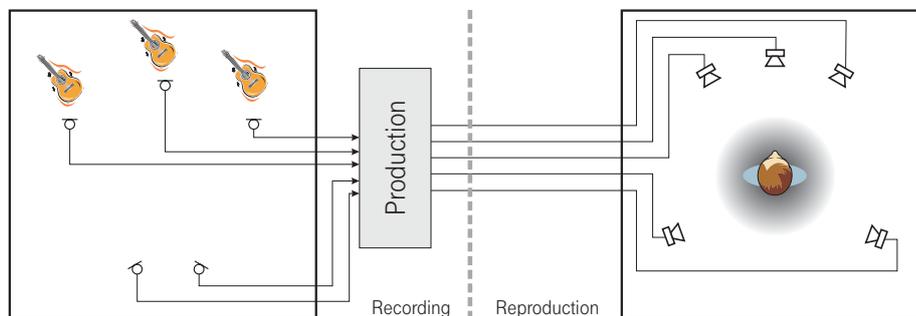
In dieser Arbeit wird ein wellenfeldsynthesebasierten Audiowiedergabealgorithmus analysiert, um virtuelle Audioszenen mit einer geringen Anzahl von Lautsprechern wiederzugeben. Der vom Fraunhofer IDMT entwickelte wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus ist Hauptbestandteil des SpatialSound Wave (SSW) Audioprodukts. Die SSW Technologie baut auf den Grundprinzipien verschiedener räumlichen Audiotechnologien wie der Wellenfeldsynthese auf. Mit dem SSW lassen sich dreidimensionale Audioszenen skalieren. Das System bietet die Möglichkeit zur Bewegung und Platzierung von Klangquellen in Echtzeit. Der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus selbst ist ein Offline Renderer. Er wurde anfangs in MATLAB implementiert. Zur Einbindung ins Rendering-Framework des IDMT wurde dieser C++ (Korn 2009) und letztendlich auch auf Python (Mittag 2014) übersetzt. Der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus ist der Koeffizientenberechner des SpatialSound Waves. Er berechnet einerseits mit Hilfe der verfügbaren Metadaten, die ein virtuelles Sound-Objekt beschreiben (z.B.: Position, Lautstärke, Art der Schallquelle), und andererseits über das vorgegebene Lautsprechersystem, die Pegel- und Laufzeitkoeffizienten für den jeweiligen Lautsprecher. Das System wurde für große Beschallungsanlagen wie etwa in Planetarien und Themenparks, zur Live-Beschallung, für Festinstallationen im Club- und Eventbereich entwickelt (siehe Webseite Fraunhofer IDMT). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verwendung des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus für eine extrem reduzierte Anzahl von Lautsprechern getestet. Ziel ist, die Grenze des Systems zu suchen. Die Untersuchung erfolgte nicht hardwaretechnisch, im Sinne von großem Lautsprechersystem.

tem auf kleines Lautsprecheresetup, sondern softwaretechnisch, und zwar wie arbeitet der Algorithmus im Vergleich zu anderen Standard Panning Verfahren. Dafür wurde ein objektbasiertes Rendering Konzept für Standard Panning-Verfahren entwickelt. Verschiedene objektbasierte Audio-Renderer wurden implementiert und miteinander verglichen. Dies waren Renderer, die auf Standard Panning Verfahren arbeiten, also Intensitätspanning nach Linearem Gesetz, nach Sinus Gesetz und nach Tangens Gesetz.

4.1 Kanalbasierte vs. Objektbasierte Audioproduktion

Der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus beinhaltet einen objektbasierten Renderer. Das Gegenstück zu objektbasiert (engl. object-based) ist die kanalbasierte (engl. channel-

Channel-based production



Object-based production

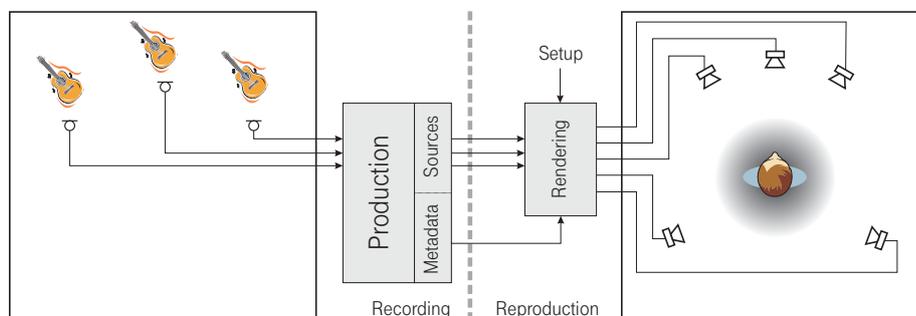


Abb. 4.1: Kanalbasierte vs. objektbasierte Audioproduktion (Melchior, Spors 2010, S. 3).

based) Audioproduktion. Hierbei werden die Audioquellen mittels Mischpult oder Digital Audio Workstations (DAW) für das Ziel-Setup nach Kanälen gemischt. Die Audioquellen werden genau so, wie sie aufgenommen werden gespeichert und sind dann nur für diese spezielle Tonwiedergabe übertragbar. Im Gegensatz dazu wird bei objektbasierten Produktionen die Audioquelle mit Zusatzinformationen (Metadaten) versehen (Petermichl in Weinzierl 2008, S. 694). Hierzu werden die Eigenschaften des Audio-Objekts, wie beispielsweise Position, Lautstärke oder Art der Schallquelle gespeichert und durch das Rendering im Wiedergabealgorithmus in Audiosignale übertragen. Daher kann es in jeder Ausführung, egal wie viele Lautsprecher sich am Ausgang befinden, verwendet werden. Der objektbasierte Ansatz wird beispielsweise in MPEG-4 zur audiovisuellen Beschreibung von Szenen verwendet (Melchior, Spors 2010).

4.2 Signalverarbeitung des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus

Die folgenden Abb. entsprechen der allgemeinen Struktur der Koeffizientenberechnung.

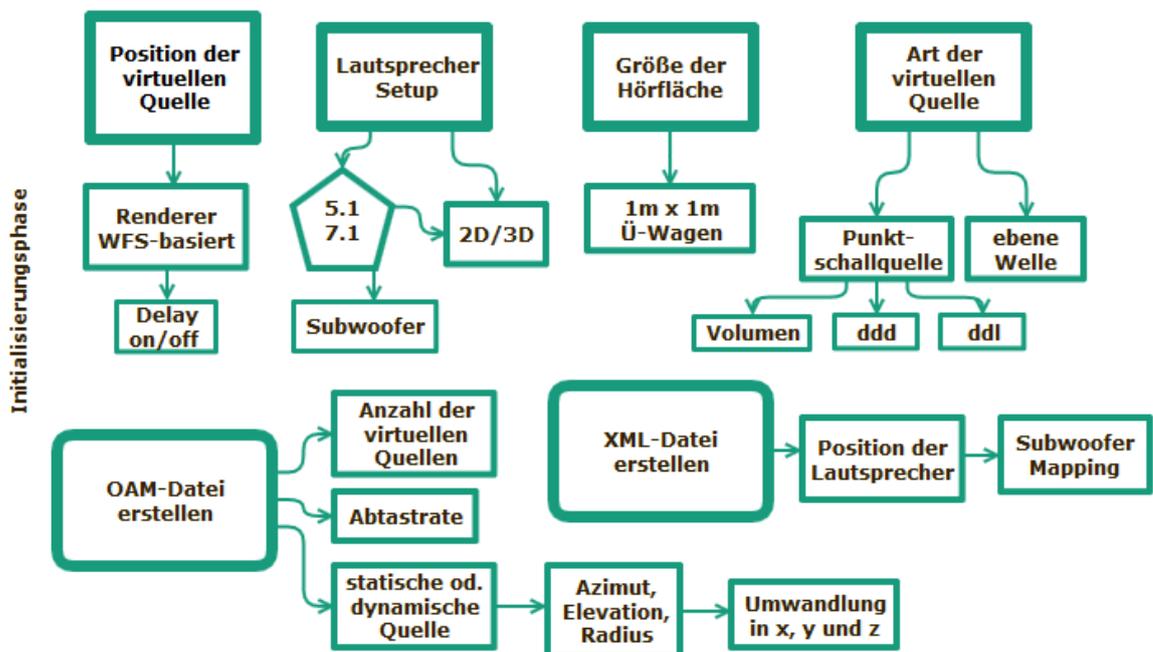


Abb. 4.2: Initialisierungsphase des WFS-basierten Algorithmus.

Der Algorithmus ist unterteilt in eine Initialisierungsphase und in eine Arbeitsphase (Korn 2009, S. 21). In der Initialisierungsphase werden Eingabeparameter festgelegt, die der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus zur Berechnung der Verstärkungs- und Verzögerungskoeffizienten braucht. Zu den Eingabeparametern gehören die Position der virtuellen Schallquelle, das Lautsprecher-setup, die Größe der Hörfläche und die Art der virtuellen Quelle. Bei der Positionierung der Quelle können beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus die Verzögerungskoeffizienten auch weggeschaltet werden. Die Lautsprecher-Aufstellung kann je nach Belieben gewählt werden, auch 3D Audio ist möglich. Zusätzlich wird die Größe der Hörfläche, in der sich der/die Hörer befinden, in Form eines Quadrats bzw. Rechtecks ausgewählt. Des Weiteren kann die Art der virtuellen Quelle, ob ebene Welle oder Punktschallquelle festgelegt werden. Dabei lassen sich auch das Quellvolumen der Punktschallquelle und Entfernungsparameter wie „Distance Dependent Delay“ (ddd) und „Distance Dependent Loudness“ (ddl) einstellen. Zusätzlich können auch Parameter wie die Schallgeschwindigkeit oder der Levelkorrekturfaktor geändert werden.

Die Position der virtuellen Schallquelle wird für die Untersuchung in der OAM-Datei festgelegt. OAM ist ein Dateiformat was aktuell bei MPEG-H für Untersuchungen im Standardisierungsprozess vereinbart wurde und steht für „Object Audio Metadata“. Hier werden die Zusatzinformationen wie die Anzahl der virtuellen Objekte, die Abtastrate und statische oder dynamische Quelle angegeben. Nach jeden 2048 Samples (Rate lässt sich einstellen) werden auf einer eingelesenen Audiodatei diese Zusatzinformationen gespeichert. Die Position der Quelle wird hierbei nach dem sphärischen Koordinatensystem in Azimutwinkel, Elevationswinkel und Radius angegeben und dann in das kartesische Koordinatensystem in x, y und z-Achse umgewandelt. Die Koordinaten der Lautsprecherpositionen werden in Python und in C++ über die XML-Datei eingegeben. Auch Subwoofer-Positionen können hier hinzugefügt werden.

Die Koeffizientenberechnung selbst erfolgt erst in der Arbeitsphase des Algorithmus. Dabei wird zuerst ein Indikator für die Beschreibung der Quellposition ermittelt und die Lautsprecher berechnet, die am nächsten zur virtuellen Quelle liegen (siehe Spors

2007). Thomas Korn erklärt in seinem Patent die verschiedenen Zonen für die Berechnung der Koeffizienten für Pegel (engl. gain) und Verzögerung (engl. delay). Die Koeffizientenberechnung erfolgt je nachdem, wo sich der Indikator für die Beschreibung der Quellposition befindet. Die Unterteilung erfolgt in drei Zonen: die Innenzone (innerhalb der Lautsprecheranordnung), die Außenzone (außerhalb der Lautsprecheranordnung) und die Übergangszone (zwischen Innen- und Außenzone).

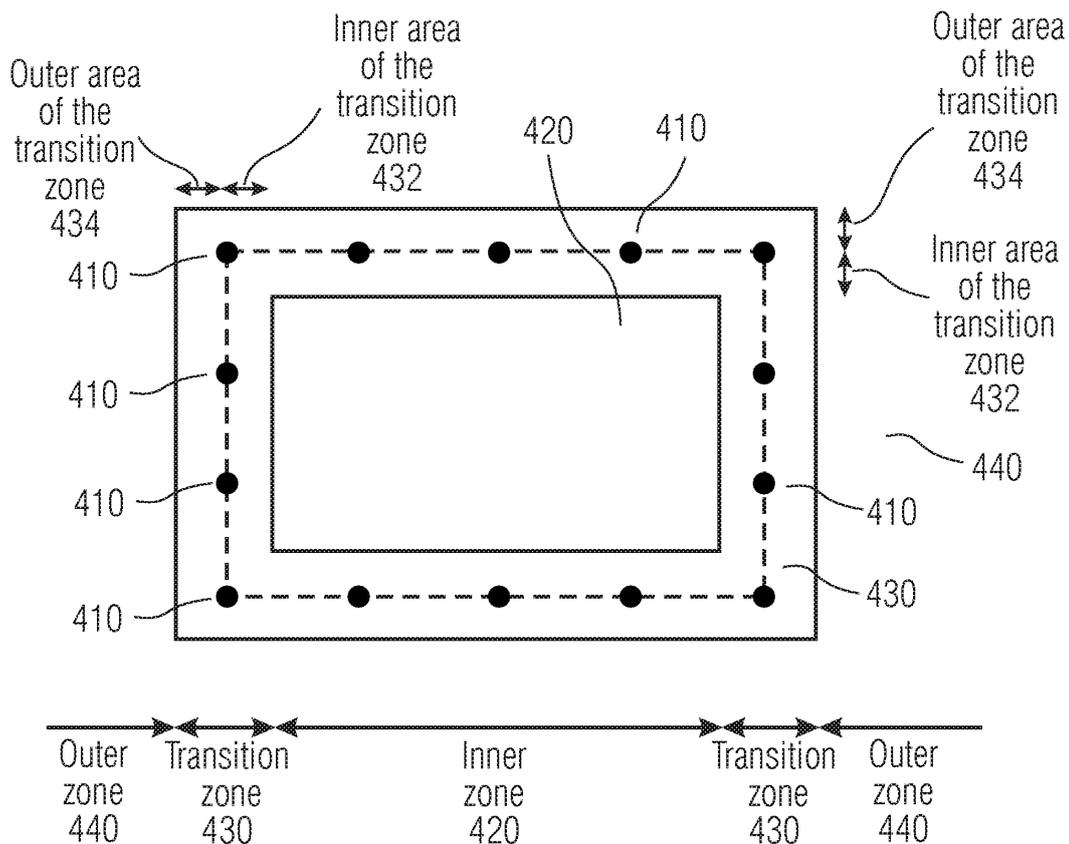


Abb. 4.3: Die drei Zonen der Koeffizientenberechnung (Korn 2012, Fig 4A).

Liegt die Quelle im Außenbereich des Lautsprechersetups wird der Verzögerungskoeffizient aus dem Abstand der Quellenposition zu den Lautsprechern berechnet. Zur Berechnung des Amplitudenkoeffizienten wird die Anwendung eines geometrischen Modells zur Beschreibung aller Lautsprecherpositionen relativ zur Quellenposition und Hörfläche verwendet. Die Berechnung zur Hörfläche erfolgt nach Winkelsegmenten. Diese Berechnung führt dazu, dass ein Lautsprecher, je nach Größe der Hörfläche hin- zu geschaltet wird.

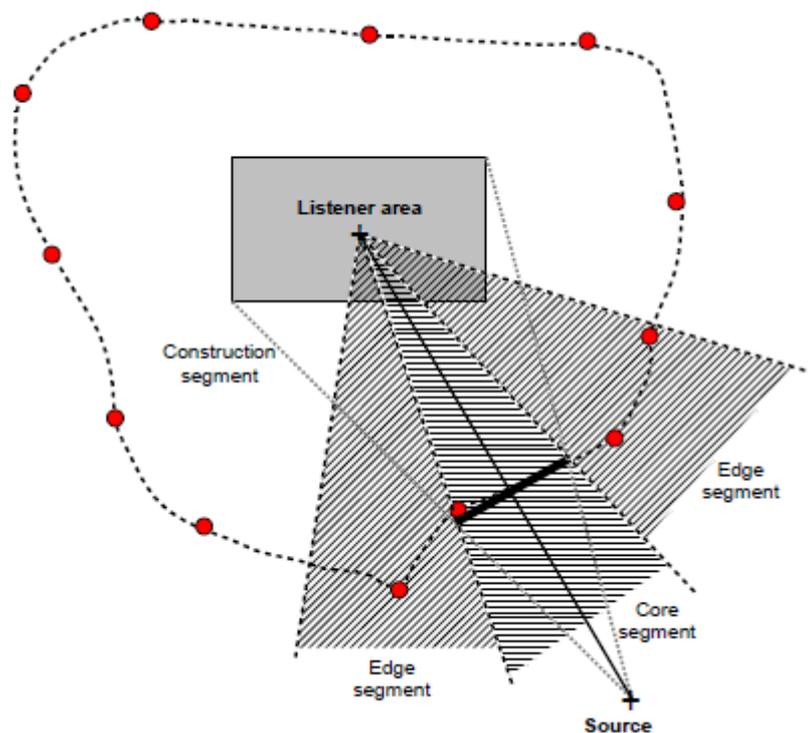


Abb. 4.4: Berechnung zur Hörfläche. Lautsprecher (rot) (Korn 2009, S. 26).

Eine Quelle im Innenbereich des Lautsprecher-Setups wird „Fokussierte Quelle“ genannt (Theile 2004, S. 127). Die Berechnung des Amplitudenkoeffizienten erfolgt hier, wie bei der Wellenfeldsynthese, durch die vektorbasierte Bestimmung des Amplitudenfensters nach dem Ansatz der durch die Gerade geteilten Ebene bzw. des durch die Ebene geteilten Raumes. Im Übergangsbereich ergibt sich das Berechnen auf Basis von Lautsprecherpaaren (in 2D) bzw. Tripeln (in 3D) wie beim Vector Base Amplitude Panning. Der Verzögerungskoeffizient wird im Innen- und Übergangsbereich aus dem negierten Abstand der Quellenposition zu den Lautsprechern berechnet.

Bei mehreren virtuellen Quellen kommt es zu einer Vereinigung der drei Koeffizientensätze zu einem Ergebniskoeffizientensatz. Liegt die Quelle an der Grenze zwischen Innen- und Übergangsbereich oder Übergangs- und Außenbereich, so gehen die Koeffizienten in ein gewichtetes Ergebnis ein. Diese Überblendung der Koeffizienten hat ein stetiges Verhalten der Quellenposition zur Folge. Als nächstes folgt die Amplitudenkompensation im Falle schwankender Lautsprecherdichte und zusätzlich eine Korrektur der Verstärkungskoeffizienten, so dass bei der Wiedergabe eine einheitliche Lautstärke

im Referenzpunkt gewährleistet wird. Dabei wird der Sollpegel der virtuellen Quelle berücksichtigt. Abschließend werden die Koeffizienten der Subwoofer ermittelt (Korn 2009, S. 22).

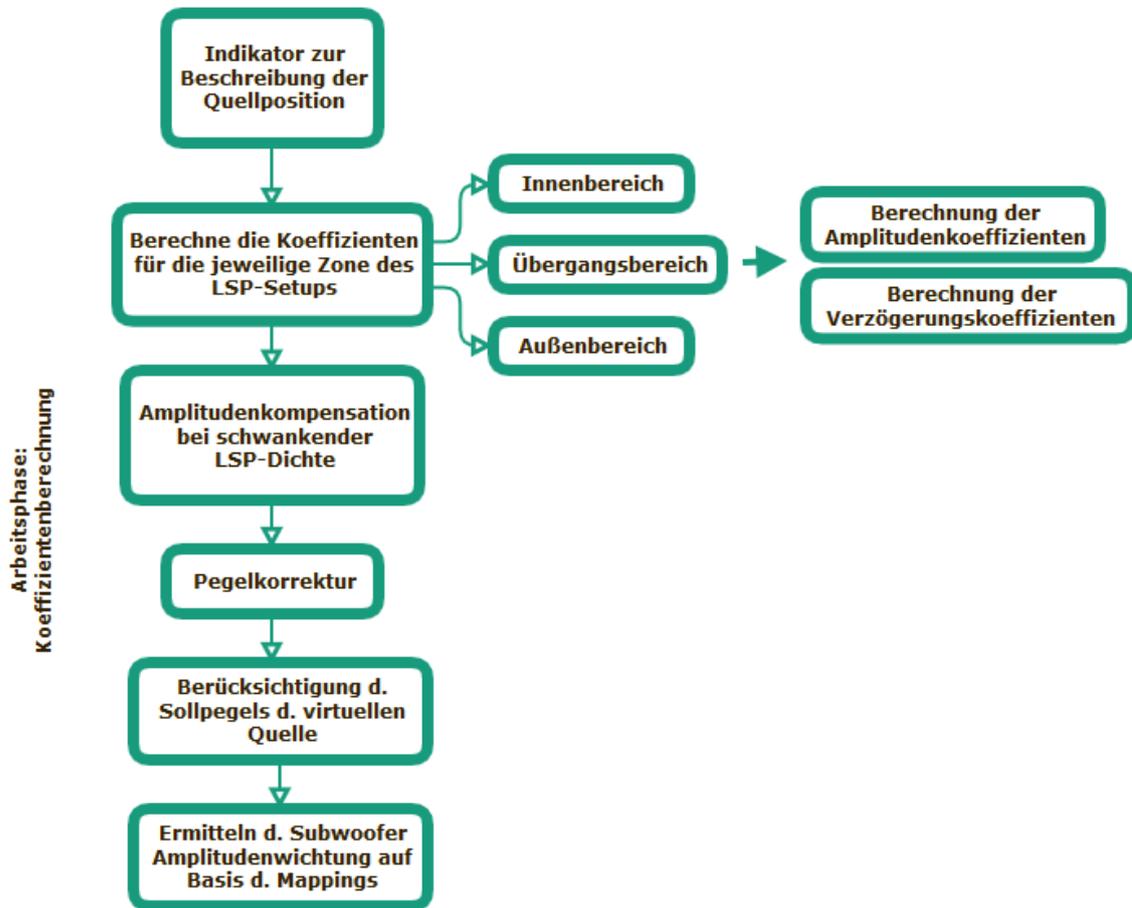


Abb. 4.5: Arbeitsphase des WFS-basierten Algorithmus: Die Koeffizientenberechnung.

Diese Phasen zusammengefasst bildet den objektbasierten Renderer. Rendern einer Audiodatei bedeutet die Verarbeitung eines Audiosignals zu einer fertigen Audiodatei passend zum ausgewählten Lautsprecher-Setup. Der Renderer arbeitet mit 24 Bit und 24 kHz WAVE-Dateien. Das WAVE-Format ist ein unkomprimiertes Audio-Dateiformat PCM (Puls-Code-Modulation) (Petermichl in Weinzierl 2008, S. 696). Im Rendering-Prozess werden zuerst die Audioquelle mit Zusatzinformationen (Metadaten) und die Lautsprecher Aufstellung eingelesen. Danach werden die entsprechenden Pegel- und Laufzeitkoeffizienten in der angegebenen Abtastrate auf die WAVE-Datei angewendet (siehe Franck 2011, Diss.). Pro Lautsprecher wird nun eine WAVE-Datei gerendert.

Im folgenden Blockdiagramm in Abbildung 4.6 wird der Rendering-Prozess des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus dargestellt:

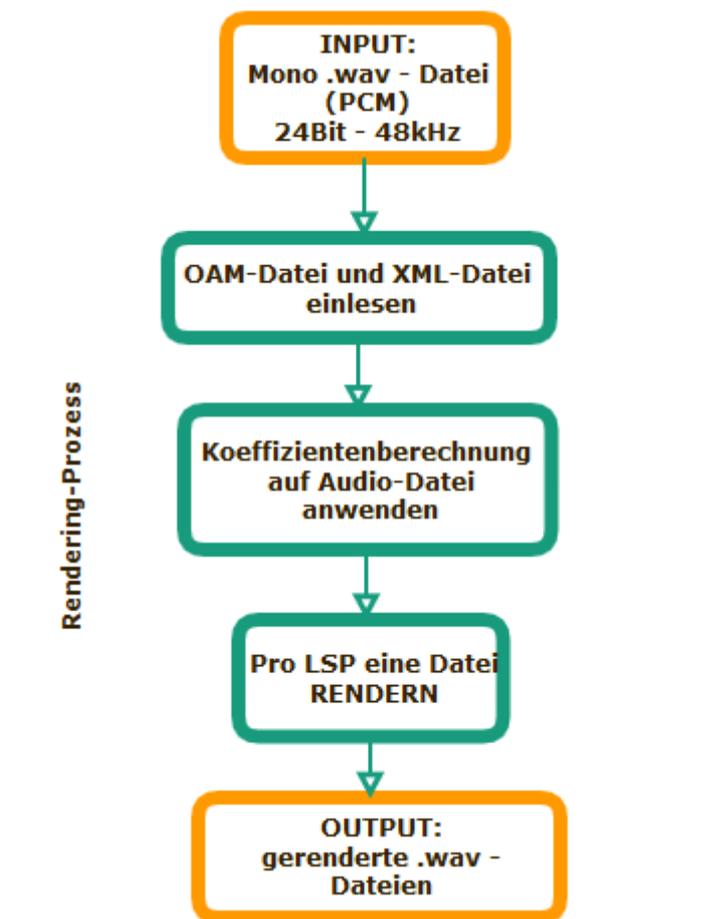


Abb. 4.6: Rendering-Prozess des WFS-basierten Algorithmus.

4.3 Wellenfeldsynthesebasierter Algorithmus für ein Surround-Setup

Wellenfeldsynthese erfordert eine große Anzahl von Lautsprechern, damit eine realistische Klangszene mit stabil lokalisierbaren virtuellen Schallquellen dargestellt werden kann. Aufgrund des hohen Hardwareaufwands ist man bestrebt die Lautsprecheranzahl zu verringern, die für die Wiedergabe notwendig ist. Vorallem Lautsprechersysteme mit einer geringen Anzahl von Lautsprechern sind sehr interessant für Tontechniker, die meist in kleinen Räumen wie Übertragungswagen von Rundfunkanstalten oder

Tonstudios arbeiten. Toningenieuren wird dadurch zum Beispiel die Möglichkeit einer Vorproduktion von Audiomaterial ermöglicht.

In diesem Abschnitt wird die Übertragung des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus auf ein 5.1 Surround-Setup beschrieben. Das 5.1 Surround-Setup wurde nach Standard ITU-R BS.775 (ITU 2012) in Python implementiert. Der Durchmesser des Surround Kreises wurde nach Größe einer Klangregie in einem Übertragungswagen definiert. Beim Ü-Wagen WDR FÜ4 HD ist die Tonregie ganz hinten (links in der Abbildung 4.7) platziert. Der Ü-Wagen ist 40 Tonnen schwer und hat Platz für 23 Personen. In der Tonregie sind eine 48-kanalige AURUS-Bedienkonsole, ein NEXUS-Audionetzwerk (128 Mikrofoneingangskanäle) und ein 5.1 Zuspieler angebracht (Webseite Salzburg Stagetec). Die Innenmaße der Tonregie: Länge mittig: 3,37 m, Länge seitlich: 2,97 m, Breite: 2,35 m; die gerade Frontfläche misst 0,95m (Email mit WDR).

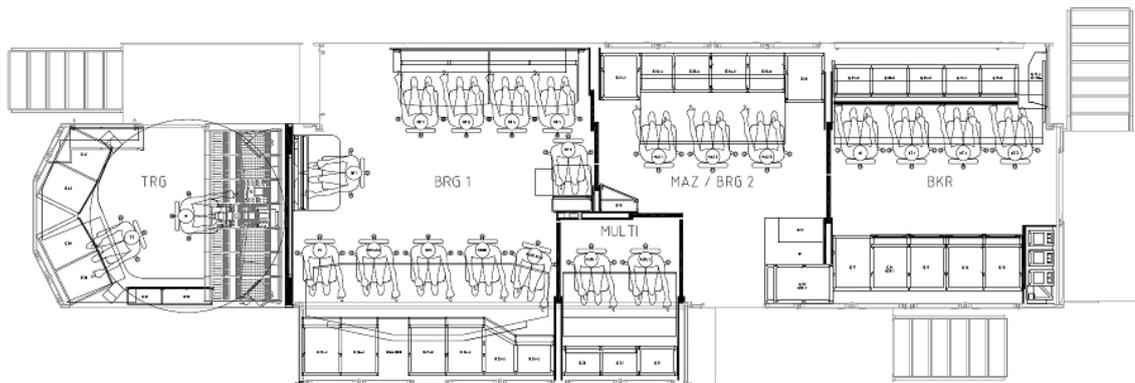


Abb. 4.7: Übertragungswagen WDR FÜ4 HD ausgefahren; TRG-Tonregie, BRG-Bildregie, BKR-Bildkontrolle, MULTI-Multifunktionsraum, MAZ-Magnetlaufwerk (Webseite Salzburg Stagetec).

Auch andere Übertragungswagen mit einem integrierten 5.1 Setup, wie etwa der HDTV Übertragungswagen HD5, besitzen eine Breite von etwa 2,5 m (Webseite Betamobil GmbH). Für die Positionierung der 5 Lautsprecher wird daher der Radius von 1,25 m gewählt. Als weiterer Eingabeparameter wird die Hörfläche innerhalb der Lautsprecheranordnung passend zum Abhörbereich im Ü-Wagen 1 m x 1 m definiert.

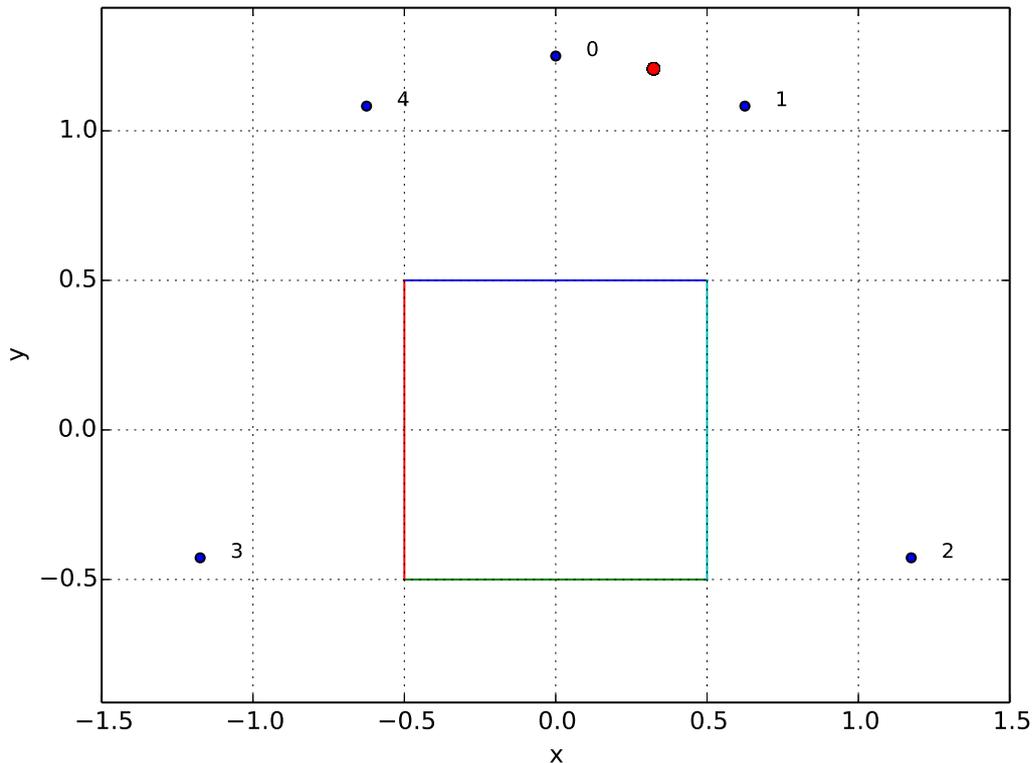


Abb. 4.8: Schematische Darstellung einer statischen Quelle auf -15 Grad. Virtuelle Quelle (rot), Lautsprecher (blau), Hörfläche (Quadrat in der Mitte), x- und y-Achse in Meter.

Abbildung 4.8 zeigt die graphische Darstellung (engl. plot) der Eingabeparameter, welche in Python programmiert wurde. Die Lautsprecher sind von 0 bis 4 im Uhrzeigersinn durchnummeriert (blaue Punkte). Der Hörer blickt in Richtung des Lautsprechers mit der Nummer 0. Der rote Punkt zeigt die Position der virtuellen Quelle, hier auf Azimutwinkel -15° . Das bunte Quadrat deutet die gewählte Hörfläche von $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Die nächsten beiden Plots stellen die Pegel- und Laufzeitdifferenzen der statischen Quelle auf -15° graphisch dar. -15° ist die Mitte zwischen dem Center- und dem Rechten Lautsprecher. Das Ergebnis der Verstärkungskoeffizienten ist für den Center- und den Rechten Lautsprecher $0,95459415$. Alle anderen bekommen den Wert 0. Alle Lautsprecher bekommen in diesem Fall die gleichen Verzögerungskoeffizienten $0,00152284$ sek. Abbildung 4.9 stellt die Verstärkungs- und Verzögerungswerte grafisch dar und diese werden darauffolgend diskutiert.

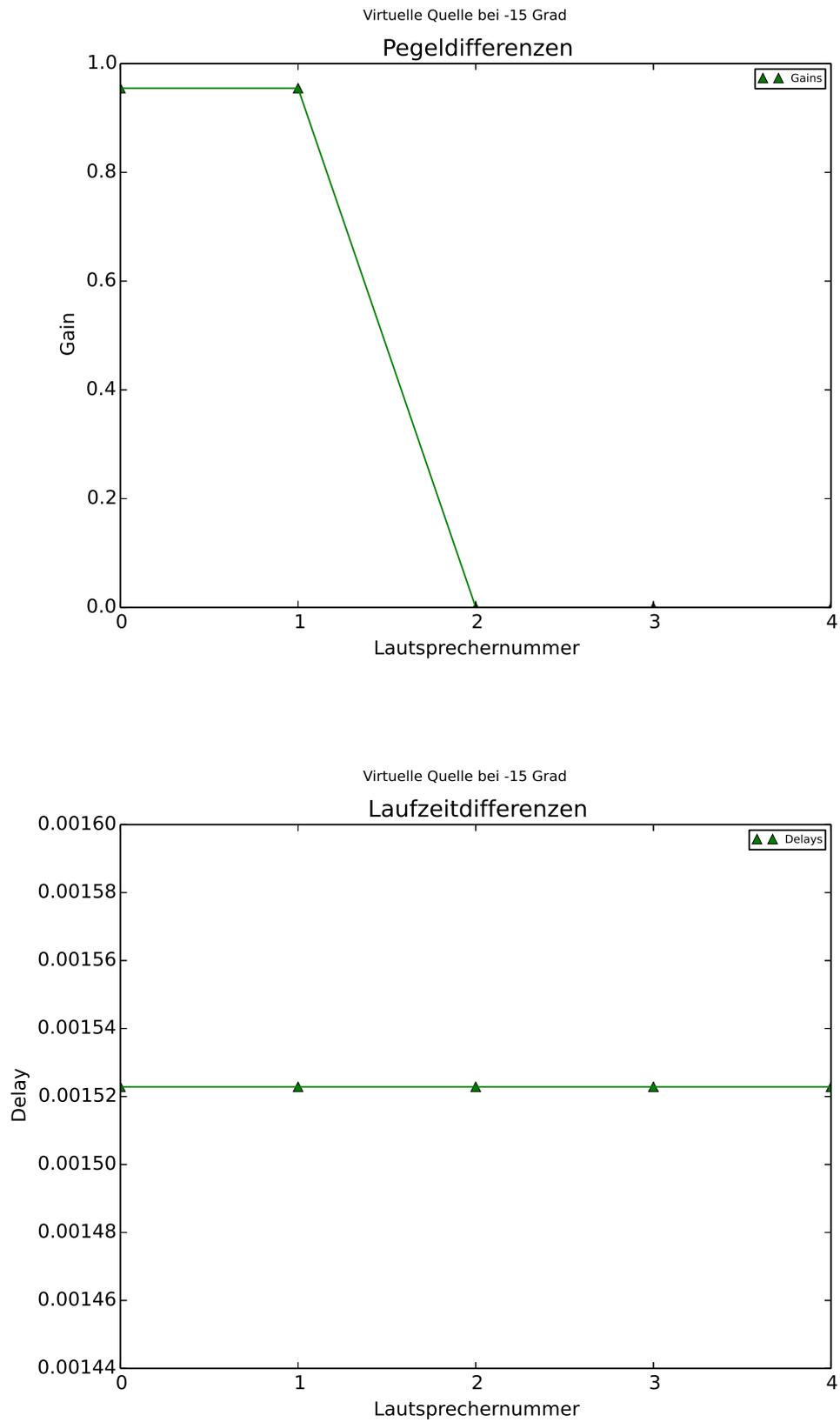


Abb. 4.9: Pegel- und Laufzeitdifferenzen einer statischen Quelle auf -15 Grad (Delaywerte in sek).

Der Maximalwert für den Verstärkungskoeffizienten mit einer virtuellen Quelle genau auf einen Lautsprecher positioniert ist 1,35. Um die ausgegebenen Werte vergleichen zu können, werden die berechneten Verstärkungskoeffizienten mit 1,35 dividiert, damit 0 minimal und 1 maximal wird. Somit hat eine Quelle in der Mitte zwischen den Lautsprechern einen Verstärkungsfaktor von $0,955/1,35 = 0,707$.

Wenn also die Position der virtuellen Quelle genau auf dem Lautsprecherradius gewählt wird, so berechnet sich der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus die Amplitudenkoeffizienten wie bei Pulkkis VBAP aus den Vektoren vom Referenzpunkt (dem mittleren Hörer) zu den beiden der Quellenrichtung benachbarten und sie einschließenden Lautsprecherpositionen (Korn 2009, S. 34). In diesem Spezialfall sind auch die Verzögerungskoeffizienten für beide Lautsprecher gleich. Sobald sich die Quelle nach außen oder nach innen bewegt, werden Delaykoeffizienten hinzugefügt und je nach Position und Größe der Hörfläche werden Lautsprecher hinzu geschaltet.

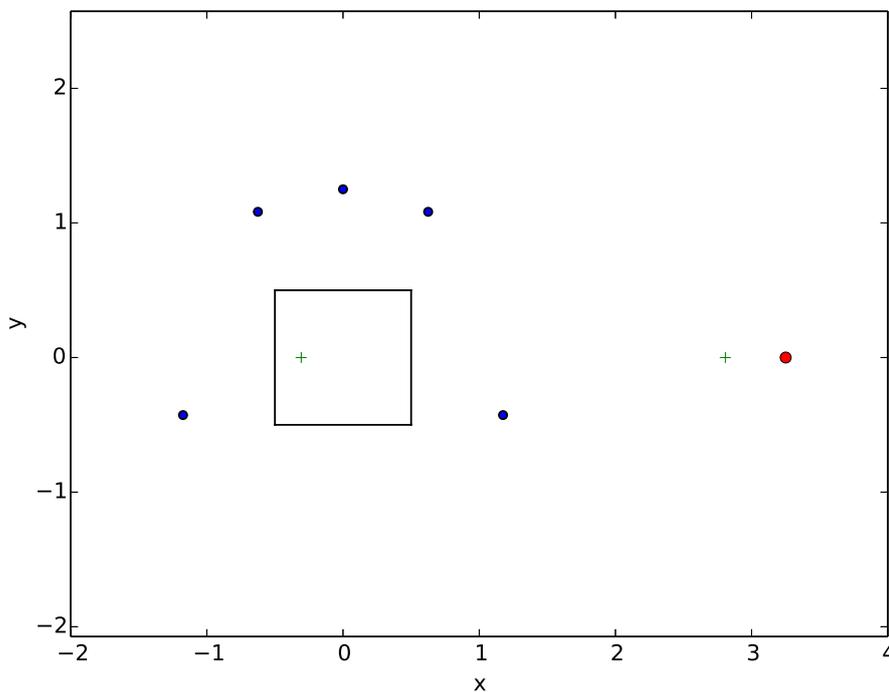


Abb. 4.10: Schematische Darstellung einer statischen Quelle bei -90 Grad in der Außenzone mit 3,25 m Abstand vom Sweet Spot. Grenze der Zonen (grünes Kreuz), Hörfläche (Quadrat), virtuelle Quelle (rot), Lautsprecher (blau), x- und y-Achse in Meter.

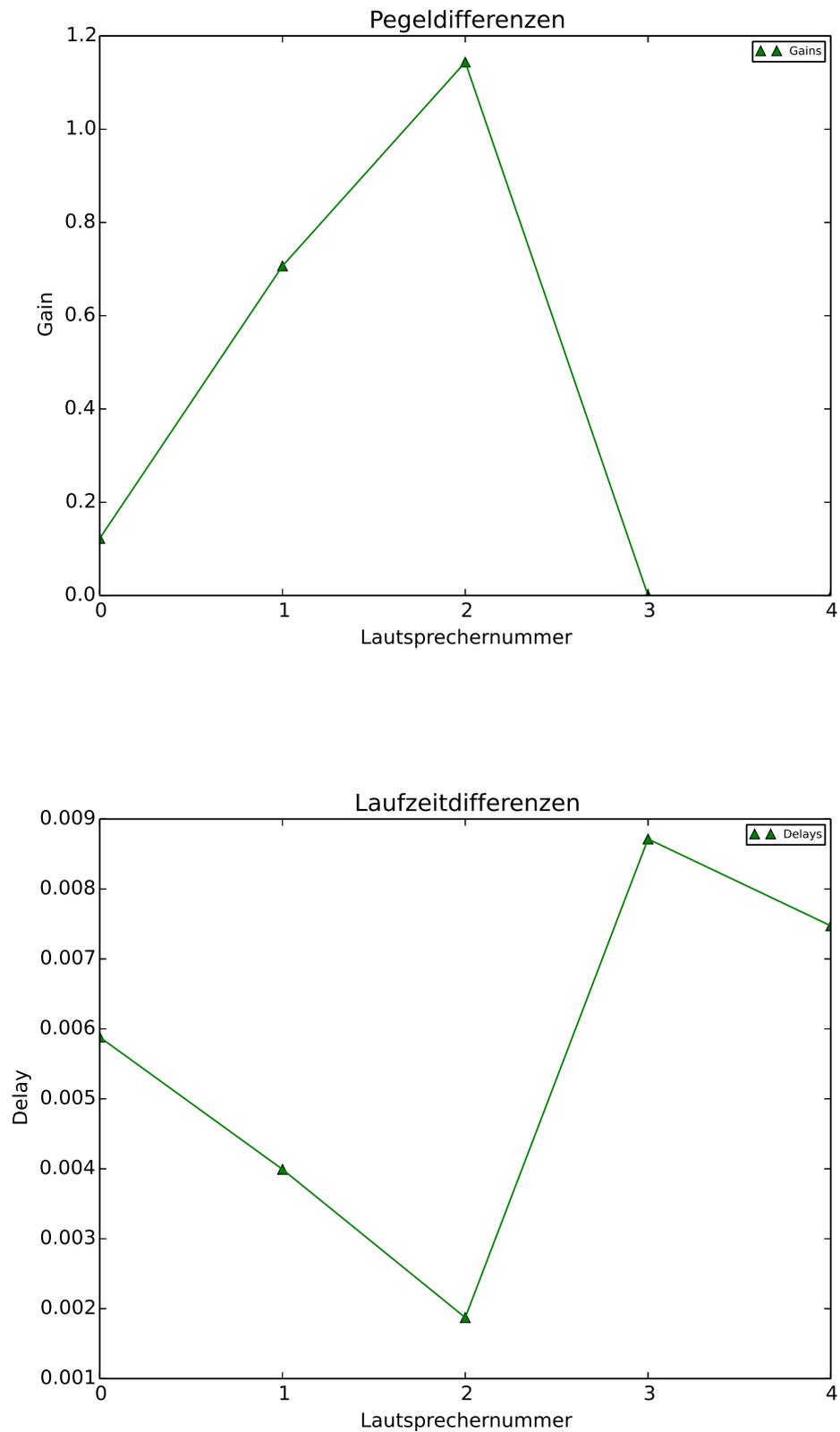


Abb. 4.11: Pegel- und Laufzeitdifferenzen einer statischen Quelle auf -90 Grad Außenzone (Delaywerte in sek).

In Abbildung 4.10 und 4.11 liegt die virtuelle Quelle auf -90° und 3,25 m Entfernung. Die grünen Kreuze sind die Indikatoren für die Grenzen der Außen-, Innen- und Übergangszonen. Diese Quelle liegt nun in der Außenzone. Dazu ergeben sich folgende Pegeldifferenzen und Laufzeitdifferenzen: Für den Center-Lautsprecher 0,12242185, für Rechts 0,7066727 und für hinten Rechts Surround 1,14373362. Die anderen Lautsprecher spielen bei einer virtuellen Quelle bei -90° und 3,25 m Entfernung nicht. Die Verzögerungskoeffizienten sind für den Center-Lautsprecher 0,00588195 sek (ca. 6 ms), Rechts 0,00399183 sek (ca. 4 ms), und hinten Rechts Surround 0,00187273 sek (ca. 2 ms). Die anderen Verzögerungswerte spielen hier keine Rolle, da die Pegelwerte auf 0 sind.

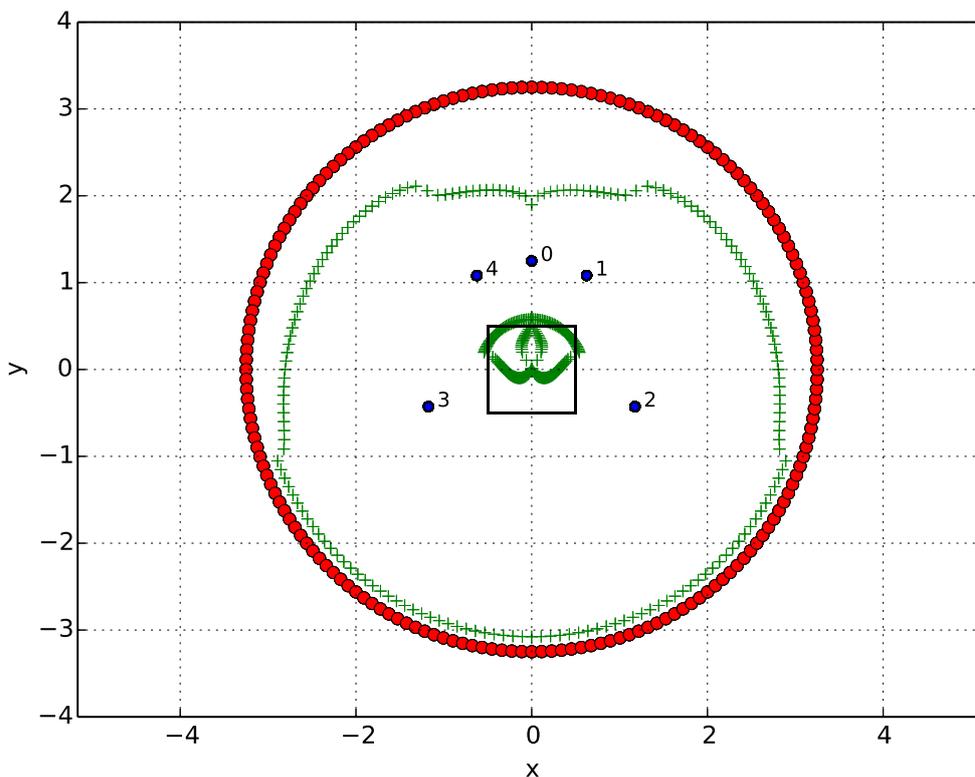


Abb. 4.12: Schematische Darstellung einer dynamischen Quelle mit einer Entfernung von 3,25 m und jeweils 2-Grad-Sprüngen. Grenze der Zonen (grüne Kreuze), Hörfläche (Quadrat), virtuelle Quelle (rot), Lautsprecher (blau), x- und y-Achse in Meter.

Die roten Punkte zeigen den Verlauf einer virtuellen Quellenbewegung mit jeweils 2-

Grad-Sprüngen an. Bei einer dynamischen Quelle werden je 2048 Samples die neuen Pegel- und Laufzeitkoeffizienten auf die Audio-Datei gespeichert.

4.4 Implementierung der Standard Panning Verfahren

Für die Untersuchung wurde ein objektbasiertes Rendering Konzept für Standard Panning-Verfahren entwickelt. Zum wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus wurden diese verschiedenen objektbasierten Audio-Renderer implementiert. Dies waren Renderer, die auf Standard Panning Verfahren arbeiten, wie dem Intensitätspanning nach Linearem Gesetz, nach Sinus Gesetz und nach Tangens Gesetz, auf welchem das Vector Base Amplitude Panning (VBAP) basiert.

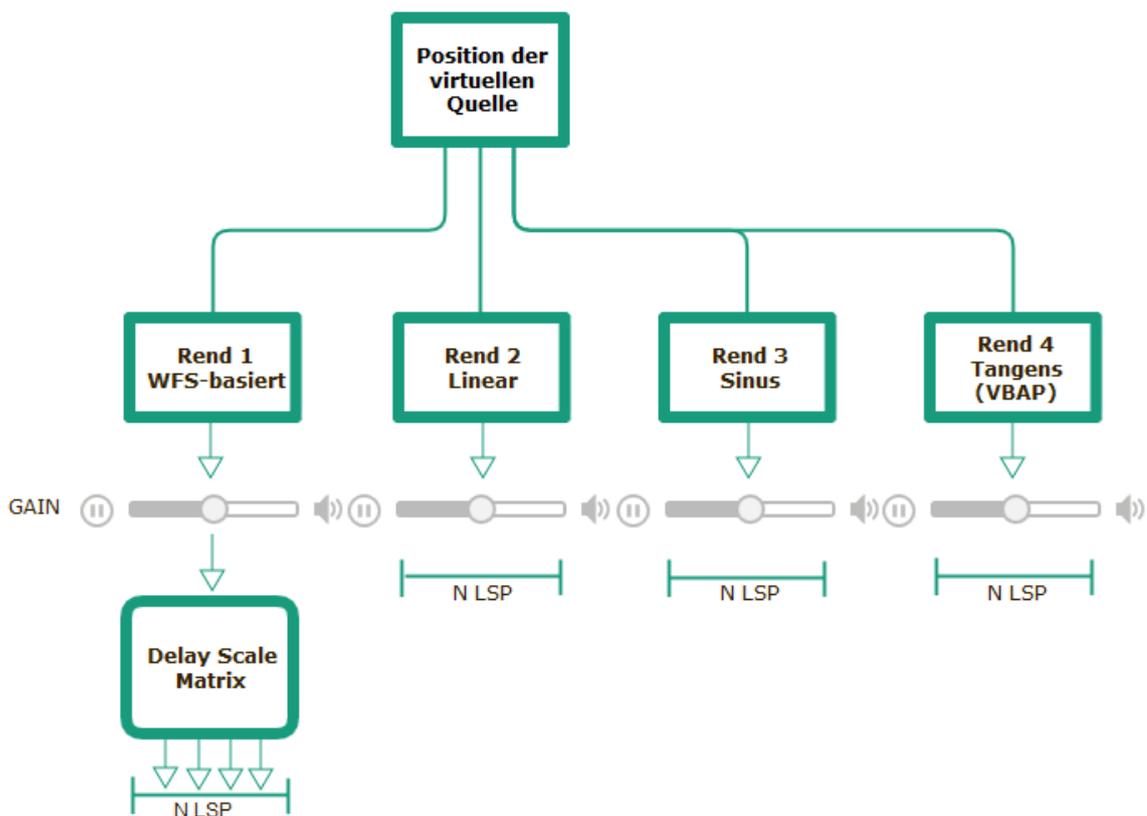


Abb. 4.13: Implementierung der Standard Panning Verfahren; LSP-Lautsprecher.

Für die Positionierung der Quelle werden die Pegeldifferenzen der Lautsprecher je

nach Renderer unterschiedlich berechnet. Beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus werden zusätzlich noch Laufzeitdifferenzen („Delay Scale Matrix“) zu den Pegeldifferenzen berechnet. Je nachdem, wo die virtuelle Quelle liegt, wird eine unterschiedliche Anzahl an Lautsprechern angespielt, wobei bei den Standard Panning Verfahren laut den Gesetzen maximal zwei Lautsprecher gespeist werden können.

Für die Programmierung des objektbasierten Rendering Konzepts der Standard Panning-Verfahren in Python wurden drei wichtige Eingangsparameter gewählt. Diese drei Input-Parameter sind die Position der Quelle, die Position des Hörers und die Position der Lautsprecher. Bei der Positionierung der Quelle mit einem Standard Panning Verfahren ist nur jeweils ein Punkt zwischen einem Lautsprecherpaar möglich. Eine Quelle innerhalb der Lautsprecheranordnung bzw. eine Quelle mit Entfernungsparemtern ist nicht möglich. Die Position des Hörers wurde in der Mitte, dem „Sweet Spot“ gewählt. Die Position der Lautsprecher ist nach ITU-R BS Standard gewählt. Der Center ist auf 0° , jeweils Links und Rechts sind auf $\pm 30^\circ$ und die Surround Links und Rechts sind auf $\pm 110^\circ$ angebracht. Als Output-Parameter ergibt sich der Verstärkungsfaktor der 5 Lautsprecher.

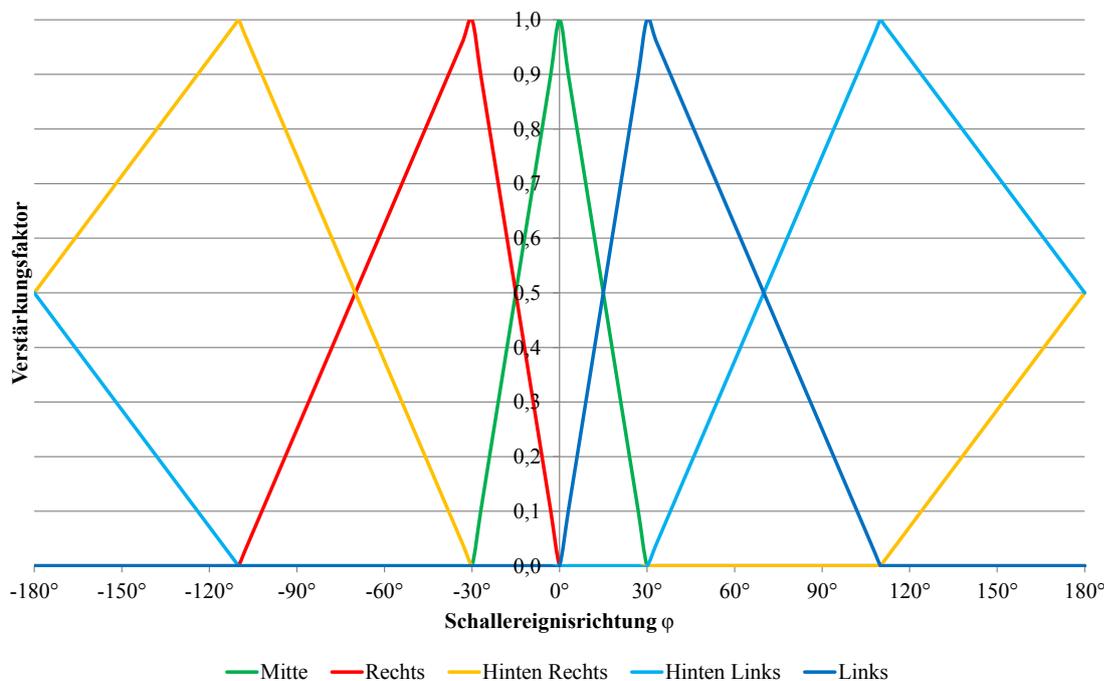


Abb. 4.14: Panning nach Linearem Gesetz für 5.0 Setup.

Abbildung 4.14 zeigt das Amplitudenpanning nach Linearem Gesetz für ein 5.1 LSP Setup. Für die Erstellung des Diagramms sind die Verstärkungsfaktor-Wertetabellen anbei (A.2.1).

Zu den paarweise konstanten Intensitätspanning Verfahren (engl. Pairwise Constant Power Panning (PCPP)) gehören das Sinus und das Tangens Gesetz (siehe Corey 2002; Carven 2003; Rumsey 2003; West 1998).

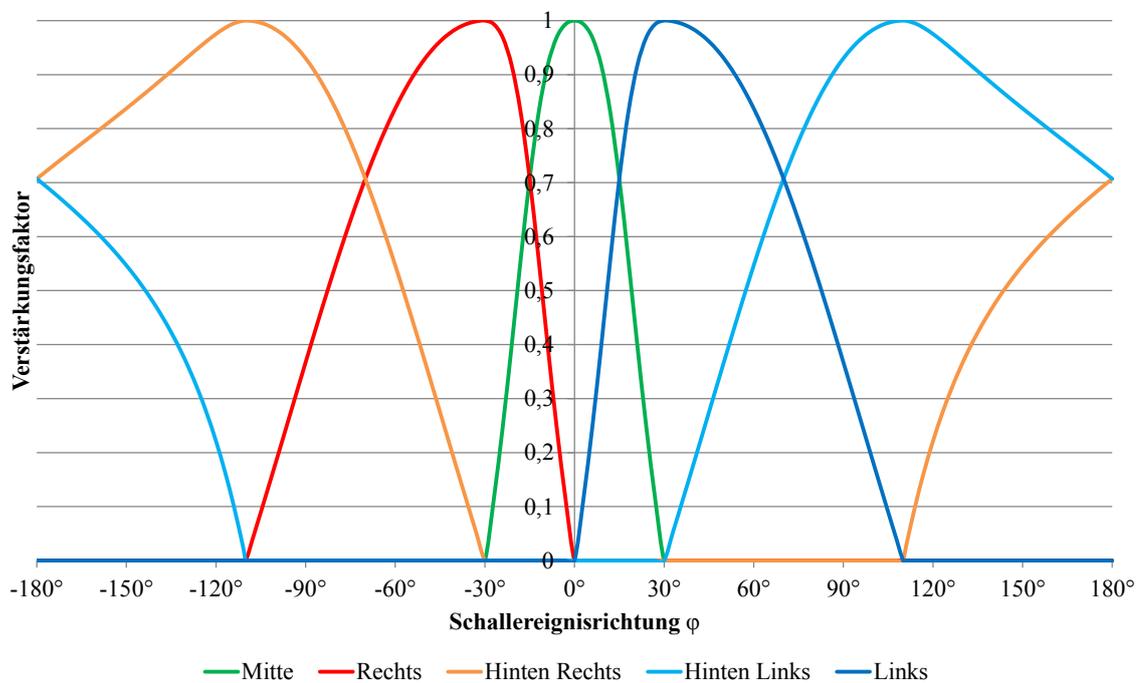


Abb. 4.15: Panning nach Tangens Gesetz für 5.0 Setup.

Werden die Verstärkungsfaktorwerte von Tangens Gesetz und Sinus Gesetz verglichen, so ergeben sich bei der Ausrechnung sehr ähnliche Ergebnisse für die Pegeldifferenzen. Beim Beispiel -10° sind die Werte 0,435 und 0,899 beim Sinus Gesetz, hingegen beim Tangens Gesetz 0,469 und 0,882. Dies sind zwar unterschiedliche Ergebnisse, aber bei kleinen Abständen nur minimal erkennbar.

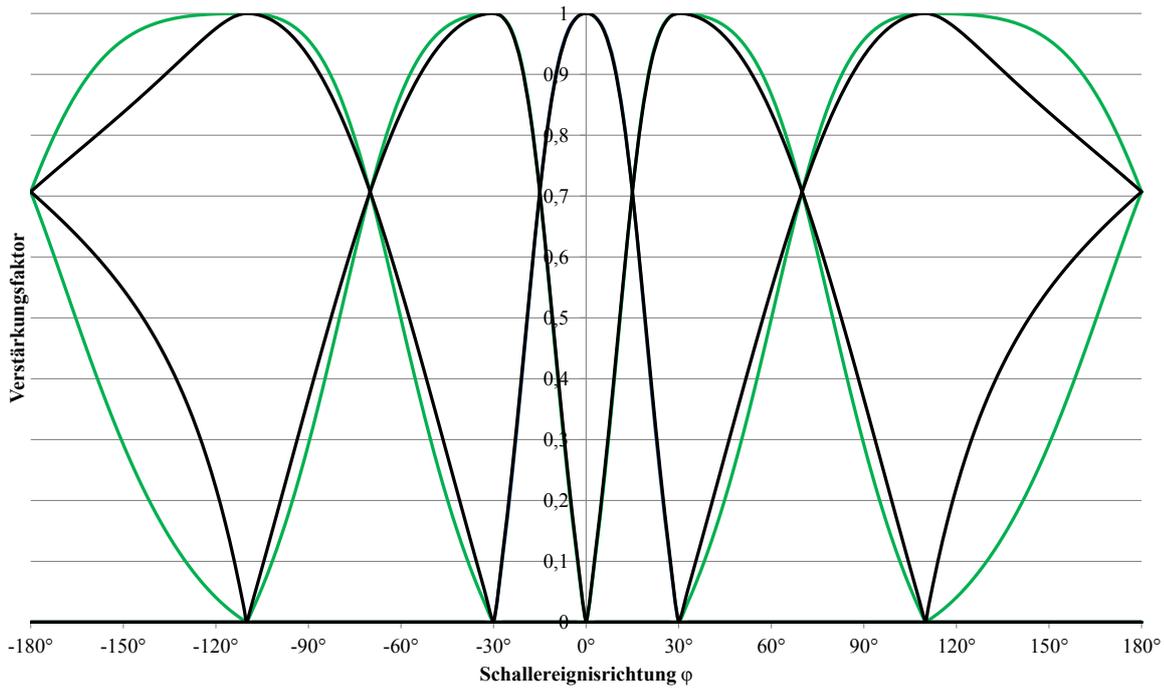


Abb. 4.16: Vergleich von Panning nach Sinus (grün) und Tangens (schwarz) Gesetz für 5.0 Setup.

Um den LFE-Kanal, den Subwoofer, zu implementieren, könnten die Frequenzen unter 300 Hz der eingehenden Audio-Datei entnommen werden. Das .1 wurde bei der subjektiven Evaluation nicht einbezogen, da laut Lokalisationswahrnehmung nach Blauert Frequenzen unter 300 Hz für das menschliche Gehör nicht mehr lokalisierbar sind.

Dieses entwickelte objektbasierte Rendering Konzept für die Standard Panning-Verfahren ist für statische Quellen programmiert. Zusätzlich könnten die entworfenen Python Skripte auf dynamische Quellen erweitert werden. Dazu könnte eine Vorschleife in der main-Datei mit einer Anfangsbedingung φ_1 , einer Endbedingung φ_2 und einer Zeitbedingung (z.B. Grad-Sprünge) eingefügt werden. Diese Winkel-Winkel-Grad-Schleife ergibt für jede Position bestimmte Verstärkungsfaktoren. Alle 2048 Samples soll die Audio-Datei mit den neuen Pegeldifferenzen gerendert werden. Dies lässt sich zum Beispiel mittels einer Delayanwendung „delay line“ programmieren (siehe Franck 2011, Diss.).

5 Subjektive Evaluation

Zur Evaluierung von der Verwendung des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus für kanalreduzierte Lautsprecher setups wurde ein Hörtest mit 16 Probanden auf einem Surround Sound 5.1 Lautsprecher setup durchgeführt, welches die Aufstellungsnorm ITU-R BS.775 berücksichtigt (ITU 2012). Aufgabe dieser Fallstudie war es, die Lokalisationswahrnehmung und Klangqualität von statischen Quellen zu vergleichen. Als Vorlage für die Größe des Versuchsaufbaus dienten die Abmessungen des WDR FÜ4 HD Übertragungswagens (Webseite Salzburg Stagetec). Für den Hörtest wurden verschiedene Testsignale je nach Funktionalität ausgewählt, wie etwa 100ms Rauschimpulse für den Lokalisationstest und für den Klangqualitätstest, nach Komplexität steigend, männliche und weibliche Sprache, ein einzelnes Instrument und ein komplexes Musikstück. Im Folgenden wird auf die Vorbereitung, Durchführung und Ergebnisse der subjektiven Evaluation eingegangen.

5.1 Ziel des Hörtests

„Hörversuche sind Experimente, bei denen unter definierten Bedingungen stattfindende akustische Wahrnehmungen untersucht werden. Unter Wahrnehmung sei dabei hier und im Folgenden stets bewusste Wahrnehmung verstanden.“ (Blauert 1974, S. 1). Die subjektive Wahrnehmung des Menschen hängt von verschiedensten Faktoren ab. Bei der Lokalisation eines Schallereignisses hängt das Hörereignis des Probanden nicht nur von den physischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs, sondern auch von anderen Faktoren wie etwa der psychischen Tagesverfassung oder den Kenntnissen des Probanden zum Thema des Hörtests (Training) ab.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde eine Fallstudie erstellt, um die Eigenschaften des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus im Vergleich zu anderen Standard Panning Verfahren subjektiv zu evaluieren. Das bedeutet, dass die Ergebnisse des Hörtests nur mit den in dieser Arbeit angegebenen Bedingungen gültig sind. Allein für diesen Fall mit genau diesen 16 Probanden in diesem Raum und zu dieser Zeit ist die Evaluierung erschließbar. Um allgemeinere gültige Ergebnisse zu erzielen, müsste der Hörtest mit mehreren Probanden und auch unterschiedlichen Arten von Lautsprechern durchgeführt werden.

Ziel der subjektiven Evaluation ist, die Lokalisationsgenauigkeit und Klangqualität des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus im Vergleich zu Standard Panning Verfahren für die Wiedergabe von virtuellen Schallquellen auf kleine Lautsprecher setups zu untersuchen.

5.2 Vorbereitung des Versuchsaufbaus

Der Hörversuch bestand aus zwei Teilen: Zuerst wurde die Lokalisationswahrnehmung und daraufhin die Klangqualität der räumlichen Wiedergabeverfahren auf einem standardisierten 5.1 Lautsprechersystems analysiert. Der Subwoofer wurde nicht miteinbezogen, da nach Blauert die Lokalisationswahrnehmung der Frequenzbänder unter 300 Hz keine Auswirkungen auf das menschliche Gehör hat. Für die Klangqualität ist ein Subwoofer hingegen schon bedeutend. Da jedoch alle Algorithmen unter den gleichen Bedingungen ohne Subwoofer abgefragt wurden, ist das Ergebnis der Studie wieder ausgeglichen. Zudem wurde der Hörversuch auf fünf Klein und Hummel Aktiv O 500 C Aktiv Monitor Boxen durchgeführt, auf denen Frequenzen bis zu 30 Hz spielbar sind (Webseite K & H).

Zur vergleichenden Analyse wurde das Standard Panning Verfahren nach Sinus Gesetz nicht miteinbezogen, da die Pegeldifferenzwerte sehr ähnlich zum Tangens Gesetz sind. Das Tangens Gesetz dient als Referenz zum wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus, da die Verstärkungskoeffizienten bei virtuellen Schallquellen auf dem Lautsprecherradius gleich sind. Auch der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus ohne Laufzeitdiffe-

renzen wurde nicht getestet, weil falls die virtuelle Quelle auf dem Lautsprecherradius liegt, sich die gleichen Verzögerungskoeffizienten ergeben. Dies ist aber nur in diesem Spezialfall möglich. Bei einer Quelle, in zum Beispiel der Außenzone, hätte der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus mit und ohne Laufzeitdifferenzen getestet werden können. Andere Eingabeparameter wie unterschiedliche Größen der Hörfläche oder die ebene Welle anstatt Punktschallquelle wurden nicht in die Evaluierung miteinbezogen. Auch das Quellvolumen und Entfernungsparameter wie „distant dependent delay“ oder „distant dependent loudness“ wurden in diesem Hörtest nicht untersucht.

Der Testaufbau erfolgte am Fraunhofer IDMT im Raum 0.62 „Testen und Messen“ mit fünf Klein und Hummel Aktiv Monitor Lautsprecher O 500 C angeordnet nach ITU-R BS.775 Standard (siehe Abbildung 5.1). Für die exakte Aufstellung der Lautsprecher im Raum wurden vom Sweet Spot mit einem Winkel-Laser-Messgerät jeweils die Positionen auf 0° , $\pm 30^\circ$ und $\pm 110^\circ$ mit einem Radius von 1,25 m ausgemessen.

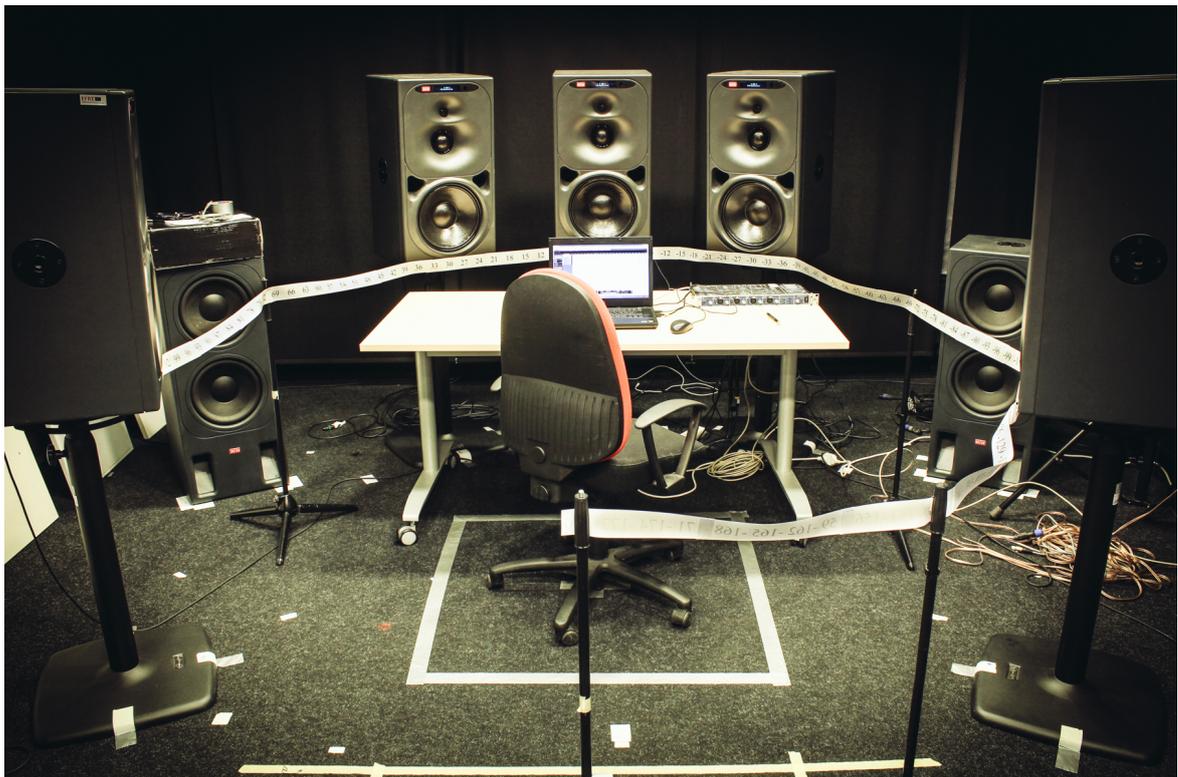


Abb. 5.1: Testsetup mit fünf KH O 500 C Aktiv Monitor Boxen auf Stativen. Hörfläche 1 m x 1 m am Boden eingezeichnet, Laptop, Fireface 800, Tisch als Mischpultsimulation für Ü-Wagen Aufstellung (wichtig: Reflexionen). Fraunhofer IDMT im Raum 0.62 „Testen und Messen“ ©neochrome.org.

5.2.1 Lokalisationstest

Zur Vorbereitung des Lokalisationstests wurden mehrere Testsignale ausgewählt, gerendert und angehört um zu entscheiden, welche am geeignetsten für den Hörtest sind. Die fünf gerenderten WAVE-Dateien wurden mittels der DAW Steinberg Nuendo 5 über das Fireface 800 zu den KH O 500 C Lautsprechern geroutet. Als Testsignal für den Lokalisationstest wurde rosa Rauschen in 100 ms Impulsen mit einer Länge von sieben Sekunden gewählt. „Der kurze Impuls als elementares Testsignal hat die Eigenschaft, dass seine Energie zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt konzentriert, jedoch gleichmäßig über alle Frequenzen verteilt ist.“ (Blauert 1974, S. 19). Das Impulssignal wurde mit vier unterschiedlichen Verfahren gerendert. Zum wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus wurden das Panning nach Linearem Gesetz und das Panning nach Tangens Gesetz ausgewählt. Als künstlerischer Zusatz wurde der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus mit einer Quelle in der Außenzone mit 3,25 m Entfernung zum Sweet Spot gewählt. Zu diesen vier Panning Verfahren wurden jeweils zehn virtuelle statische Quellenpositionen abgefragt. Die Positionen der virtuellen Quellen wurden nach extreme und ähnliche Unterschiede zwischen den Pegeldifferenzen des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus und des Panning nach Linearem Gesetz entschieden. Dabei wurde die kleinste Änderung der interauralen Schalldruckpegeldifferenz, die zu einer seitlichen Verschiebung des Hörereignisses führt, miteinbezogen. Dieser Wert liegt je nach Frequenz zwischen 0,6 und 1,5 dB Unterschied, welches in Prozent umgerechnet 7% bis 16% ausmacht (Blauert 1974, S. 129). Dabei fällt auf, dass die extremen Unterschiede zur Mitte hin eines Lautsprecherpaares größer werden und in Richtung zum Lautsprecher die Werte ähnlicher werden. Extremwerte für den Hörtest wurden hier bei $+12^\circ$, -15° , -57° , $+75^\circ$, -147° und ähnliche Werte bei -3° , $+24^\circ$, $+45^\circ$, -90° , -120° festgelegt. Somit ergeben sich für jedes Lautsprecherpaar zwei Positionen.

5.2.2 Klangqualitätstest

Für den Klangqualitätstest wurde mit dem Software Programm STEP 2.0 (Webseite Audio Research Labs) ein MUSHRA Test (ITU 2014) vorbereitet. Dafür mussten die für jeden Lautsprecher gerenderten WAVE-Dateien zu einer WAVE-Datei mittels

Nuendo zusammengefügt (engl. interpolated) werden. Die Testsignale wurden von der EBU-SQAM CD in 48 kHz und 24 Bit ausgewählt (siehe Tabelle 5.1);(Webseite EBU Technology & Innovation). Die WAVE-Dateien wurden von Stereo in Mono mittels Adobe Audition CS5.5 konvertiert.

Tab. 5.1: EBU-SQAM CD 1988.

Testitem	Track	Dauer
Sprache weiblich deutsch	53	00:21
Sprache männlich deutsch	54	00:21
Violine Ravel	59	00:29
Orchester/Chor Orff	64	00:31

Die Testsignale für den Klangqualitätstest wurden nach Komplexität steigend ausgewählt. Dabei waren eine männliche und weibliche Sprecherstimme, ein kurzer Ausschnitt aus Maurice Ravels Soloviolinstück und eine halbe Minute des Anfangs von Carl Orffs Carmina Burana zu hören. Die vier Audio-Dateien waren alle ungefähr gleich lang (ca. 25 Sek). Die Positionen der virtuellen Quelle wurden nach der maximalen Anzahl der Lautsprecher, die in der Außenzone angespielt werden, ausgesucht. Dies waren -15° (3 Lautsprecher), $+45^\circ$ (4 Lautsprecher), $+57^\circ$ (4 Lautsprecher) und -90° (3 Lautsprecher). Zudem wurden die gleichen vier Renderer wie beim Lokalisationstest gewählt und diese klanglich miteinander verglichen.

5.3 Durchführung des Hörversuchs

Die Durchführung des Hörtests für die 16 Probanden dauerte jeweils ca. 30 Minuten. Wichtig dabei war das vorherige Training des Lokalisations- und Klangqualitätstests, damit sich das Gehör an die Unterschiede gewöhnt. Eine bessere Lokalisationswahrnehmung bei schon bekannten Testsignalen ist erwiesen (Blauert 1974, S. 35).



Abb. 5.2: Lokalisationsskala mit jeweils 3-Grad-Sprung Winkelangaben für Lokalisations-test mit Laserpoint-Methode ©neochrome.org.

5.3.1 Lokalisationstest

Für das Training zum Lokalisationstest wurden drei verschiedene Positionen abgefragt, bevor der dokumentierte Test durchgeführt wurde. Während der Testphase durfte der Proband den Kopf nicht bewegen und musste im „Sweet Spot“ sitzen. Im Vorhinein wurde dem Proband gesagt, dass die virtuelle statische Quelle sich immer zwischen den Lautsprechern befindet, also nie auf nur einem Lautsprecher selbst. Mit einem Laserpointer (Seeber 2002) zeigte der Proband wo die virtuelle Quelle nach seiner Wahrnehmung liegt und sagte in der Pause zwischen den random abgefragten Positionen die Gradzahl an. Insgesamt wurden zehn virtuelle Schallquellenpositionen bei den vier verschiedenen Panning Verfahren, also 40 Testsignale geprüft.

	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	a	dd	ll	nn
-147	n	b	cc	mm
12	t	m	c	bb
-90	hh	u	l	d
45	e	gg	v	k
-15	r	f	ff	w
75	x	q	g	ee
-57	kk	y	p	h
-120	i	jj	z	o
24	s	j	ii	aa

Tab. 5.2: Lokalisationstest-Random 1: Position des Schallereignisses (linke Spalte), Panning Verfahren (erste Zeile). Die Position des Hörereignisses des jeweiligen Probanden werden nach diesem alphabetischen Ablauf eingetragen.

	Lin	Außen	Tan	WFS
24	a	dd	ll	nn
-120	n	b	cc	mm
-3	t	m	c	bb
-90	hh	u	l	d
75	e	gg	v	k
-15	r	f	ff	w
45	x	q	g	ee
-57	kk	y	p	h
12	i	jj	z	o
-147	s	j	ii	aa

Tab. 5.3: Lokalisationstest-
Random 2: Funkioniert
ähnlich wie Random 1,
jedoch in einer komplett
anderen Reihenfolge der
Positionenabfrage.

Die ersten 8 von 16 Probanden hatten Random 1 und die anderen 8 Random 2 als Reihenfolge der Positionenabfrage zu lösen. Die Reihenfolge der Positionen wurde verschieden gewählt, damit die Ergebnisse nicht von der Positionenabfrage beeinflusst werden.

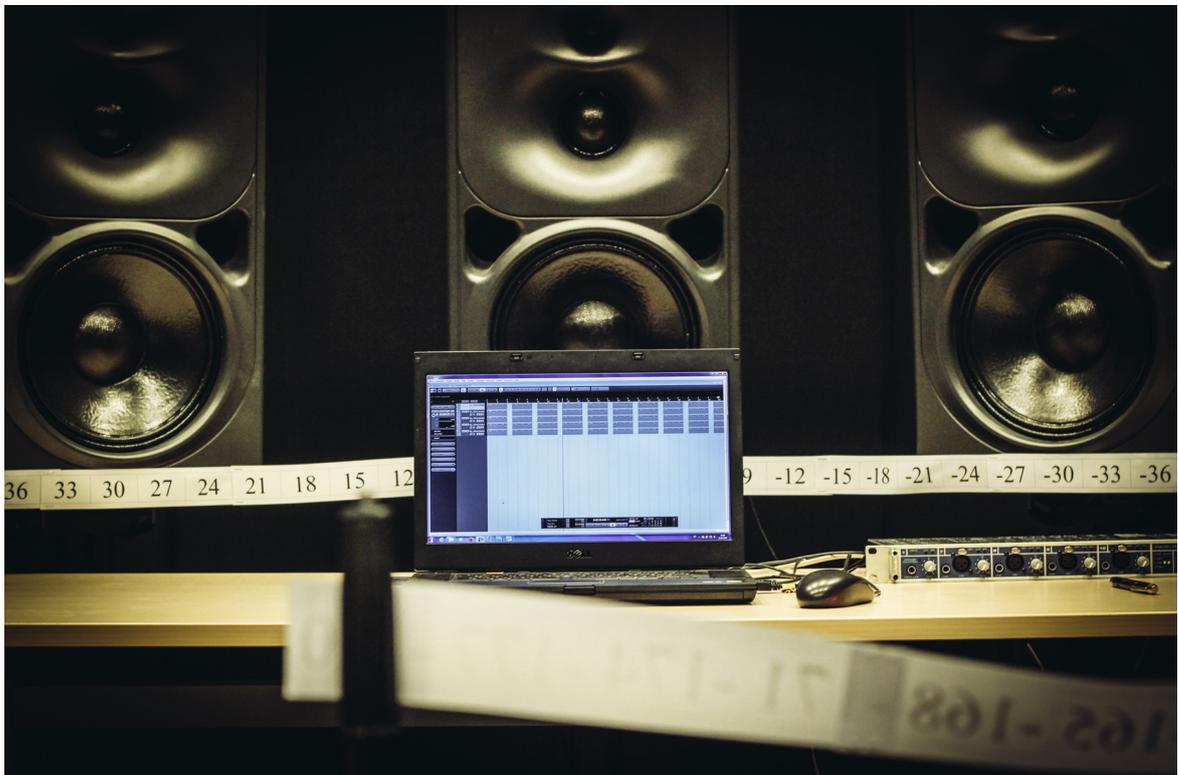


Abb. 5.3: Testaufbau: Lokalisationsskala im mathematisch positiven Drehsinn (Gegenurzeigersinn) ©neochrome.org.

5.3.2 Klangqualitätstest

Als Training zum Klangqualitätstest wurden alle vier Klangbeispiele mit einer der vier Positionen abgefragt. Mittels der grafischen Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface, GUI) von STEP wurden die vier Panning Verfahren mit den jeweiligen Positionen implementiert. Dabei war die Aufgabe des Probanden, die vier Renderer miteinander zu vergleichen und zu entscheiden, ob ein klanglicher Unterschied zu hören ist. Wenn kein Unterschied hörbar war, sollte der Hörer den Slider in die Mitte (auf 50 %) platzieren. Wenn hingegen ein klanglicher Unterschied hörbar war, sollte der Proband diesen Unterschied als „klingt besser“ (Richtung 100%) bzw. „klingt schlechter“ (Richtung 0%) im Vergleich zu den anderen Verfahren bewerten. Insgesamt wurden 16 Testaufgaben vorgelegt.

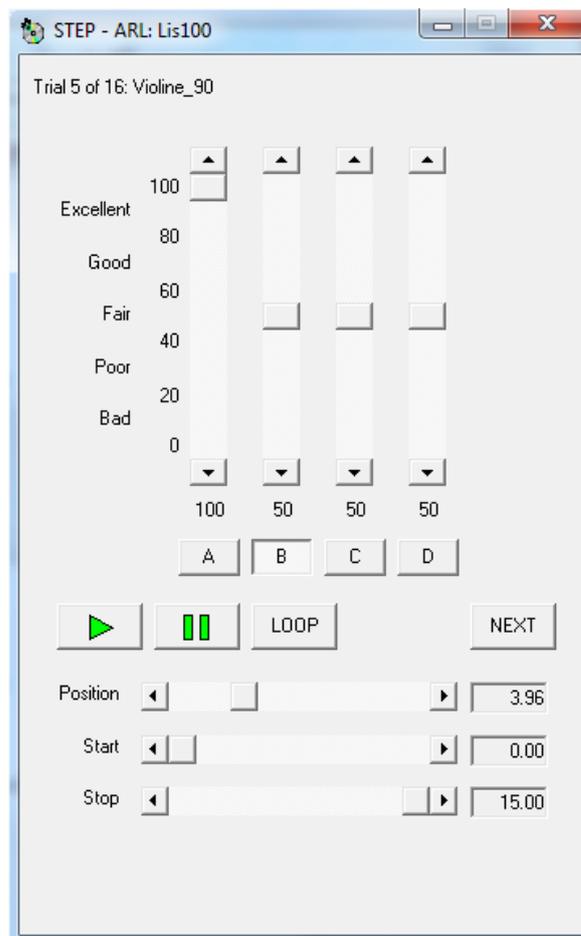


Abb. 5.4: GUI der STEP Software.

5.4 Statistische Auswertung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der subjektiven Evaluierung zum Lokalisations- und Klangqualitätstest beschrieben. Die Hörversuchsergebnisse werden mit einer statistischen Datenanalyse ausgewertet und mit Excel Diagrammen und MATLAB Plots erläutert. Am Hörtest haben insgesamt 16 Probanden teilgenommen, von denen 15 männlich und eine weiblich waren. Die Testpersonen waren aus jeder Altersklasse und die meisten waren erfahrene Hörer.

Für die Auswertung der Hörexperimente wurden Lage- und Streuungsparameter aus der Statistik genutzt. Dies sind statistische Kenngrößen wie der Mittelwert, die Varianz, die Standardabweichung und das Konfidenzintervall (Sachs 2007). Der arithmetische Mittelwert (engl. mean) ist der bekannteste Lageparameter und entspricht dem Durchschnittswert. In der Formulierung entspricht \bar{x} dem arithmetischen Mittelwert und n der Anzahl der Stichprobenwerte:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Die Varianz s^2 ist ein Parameter zur Beschreibung der Streuung einer Stichprobe. Sie berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der quadrierten Abstände aller Stichprobenwerte n vom arithmetischen Mittelwert \bar{x} .

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.2)$$

Die Standardabweichung s entspricht der positiven Quadratwurzel der Varianz und ist ein weiteres Maß für die Streuung. Sie beschreibt, wie weit die einzelnen Stichprobenwerte im Durchschnitt vom arithmetischen Mittelwert \bar{x} entfernt sind.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.3)$$

Das Konfidenzintervall (engl.: confidence interval, CI) beschreibt die Grenzen des Bereichs (Intervall), innerhalb der ein Mittelwert liegt, basierend auf einer Schätzung (z.B. mit 95%) aus einer Stichprobe (Coolican 2009, S. 320). Die Intervallgrenzen er-

geben sich aus dem Parameterwert der Stichprobe $\pm\mu$. Mit Stichprobenumfang n und einem Wert der t-Verteilung c ergibt sich folgende Formulierung:

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} * c \tag{5.4}$$

Die Intervallgrenzen ergeben sich mit CI_u für die untere Konfidenzintervallgrenze und CI_o für die obere Konfidenzintervallgrenze:

$$CI_u = \bar{x} - \mu \tag{5.5}$$

$$CI_o = \bar{x} + \mu \tag{5.6}$$

5.4.1 Lokalisationstest

In der Abbildung 5.5 wird die Auswertung der Daten des Lokalisationstests mit MATLAB aufbereitet und statistisch analysiert:

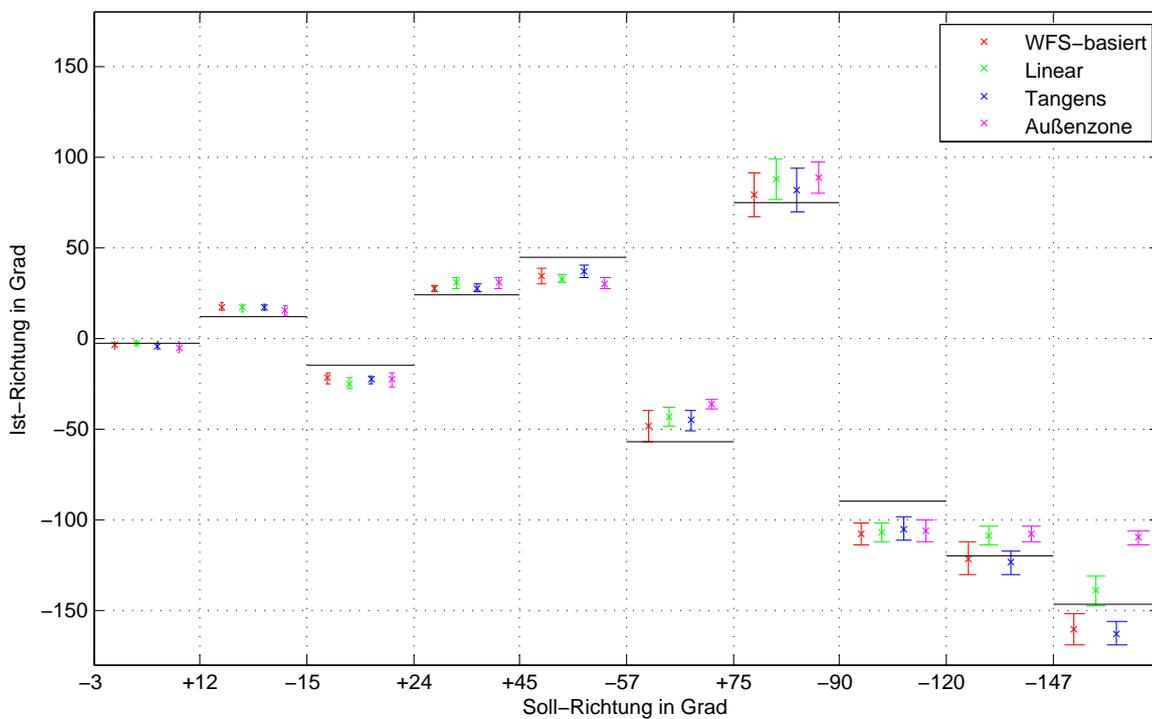


Abb. 5.5: Gesamtübersicht der Ergebnisse des Lokalisationstests; mit MATLAB erstellt und mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall ausgewertet.

Nach der Lokalisationsunschärfe von Blauert hört der Mensch vorne und hinten anders als an den Seiten. Das heißt: Vorne (bei 0 Grad) wird ein Gradunterschied von ± 3 -4 Grad gehört, an den Seiten (bei 90 bzw. -90 Grad) ein Gradunterschied von ca. ± 10 -11 Grad und hinten (bei ± 180 Grad) ein Gradunterschied von ± 5 -6 Grad (Blauert 1974, S. 33). Das Konfidenzintervall dazu in der Abbildung 5.5 zeigt sich deutlich zur Seite hin größer werdend und nach hinten wieder kleiner werden. Die schwarze Hilfslinie dient zur Übersichtlichkeit für die auf der y-Achse eingetragene Schallereignisrichtung (Ist-Richtung in Grad). Die x-Achse stellt die Hörereignisrichtung (Soll-Richtung in Grad) zur jeweiligen statischen Quellenposition dar. Auffallend sind die Trefferquoten im hinteren Bereich. Bei der Durchführung des Lokalisationstest waren die Gradzahlen hinter dem Probanden schwer zu erörtern, da mit einem Laserpointer die Winkelzahlen hinter dem Rücken, ohne sich bewegen zu dürfen fast unmöglich zu zeigen waren. Auch die visuelle Hilfestellung durch die Lautsprecher ist deutlich erkennbar. Bei der Schallereignisrichtung von -90 Grad zum Beispiel wurde hauptsächlich auf den Lautsprecher selbst -110 Grad gezeigt. Alleine schon die Augenbewegungen (selbst wenn der Proband im Sweet Spot und mit fixiertem Kopf positioniert ist) nehmen einen starken Einfluss die akustische Lokalisation (Getzmann 2002, S. 130-139).

Die Abbildungen 5.6 und 5.7 illustrieren das Gesamtergebnis des Lokalisationstests in Häufigkeits-Trefferquoten nach der Lokalisationsunschärfe von Blauert. Ein Treffer heißt hierbei, wenn vorne (definiert von +30 Grad bis -30 Grad) die Gradanzahl innerhalb von ± 6 Grad, war es ein Treffer. Auch seitlich wurde der Wert auf ± 12 Grad gerundet, da die Abstände bei der Durchführung des Hörtests jeweils mit 3-Grad-Sprüngen angegeben waren. Werden die Ergebnisse der Trefferquoten nach Blauert verglichen, fällt auf, dass der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus und das Panning nach Tangens Gesetz (die Referenz) am meisten getroffen wurden, im Gegensatz zum Linearen Panning und der Quelle in der Außenzone.

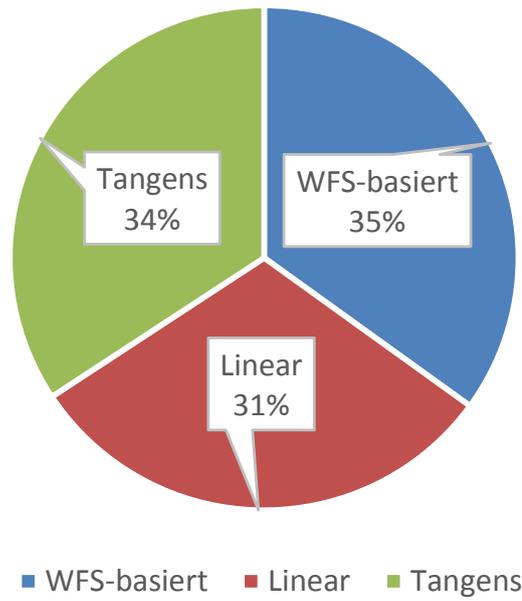


Abb. 5.6: Übersichtsdigramm des Lokalisationstests und der Häufigkeits-Trefferquote nach Blauert. Vergleich von wellenfeldsynthesebasiertem Algorithmus und den anderen Standard Panning Verfahren.

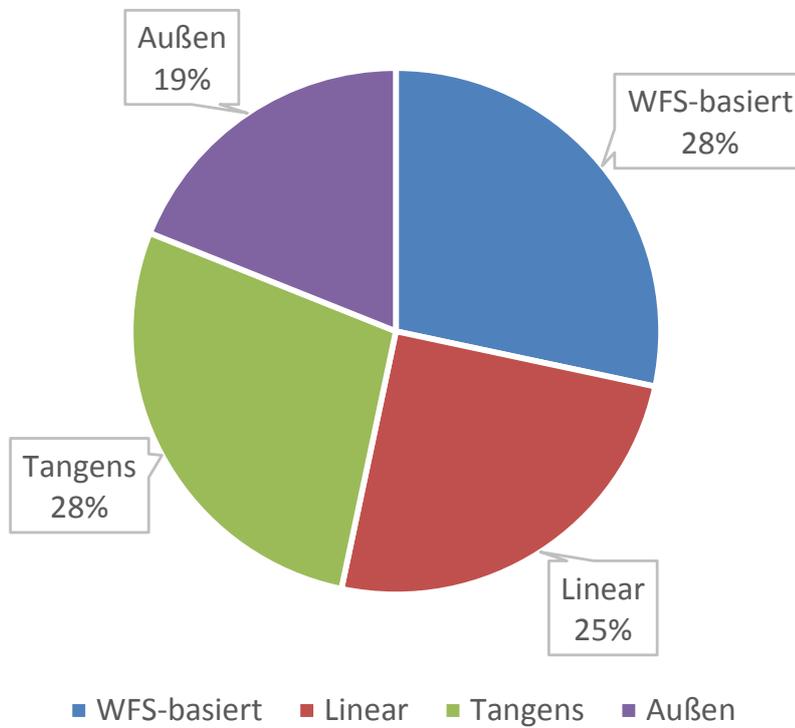


Abb. 5.7: Übersichtsdigramm des Lokalisationstests und der Häufigkeits-Trefferquote nach Blauert. Vergleich von allen vier Panning Verfahren.

Abbildung 5.8 zeigt die Gesamtübersicht der Häufigkeits-Trefferquote im Bezug auf die reinen Trefferquoten, d.h. ein Volltreffer gilt als Treffer. Die Lokalisationsunschärfe nach Blauert wurde hier nicht berücksichtigt.

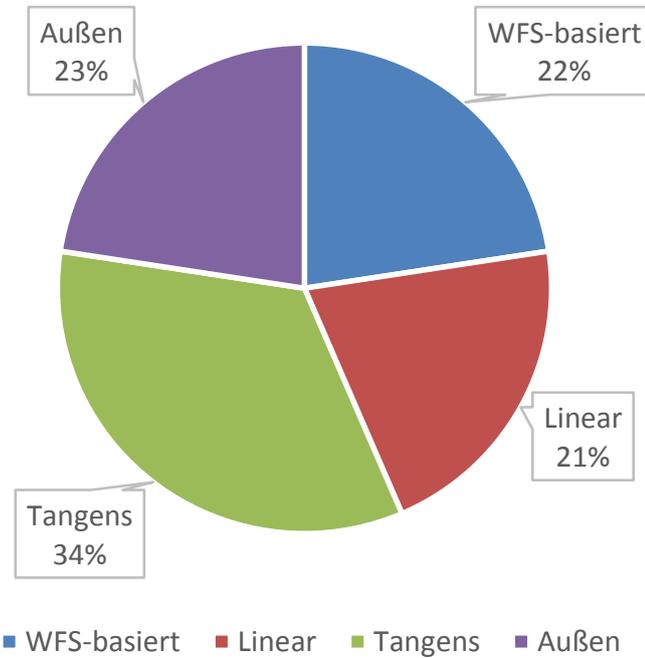
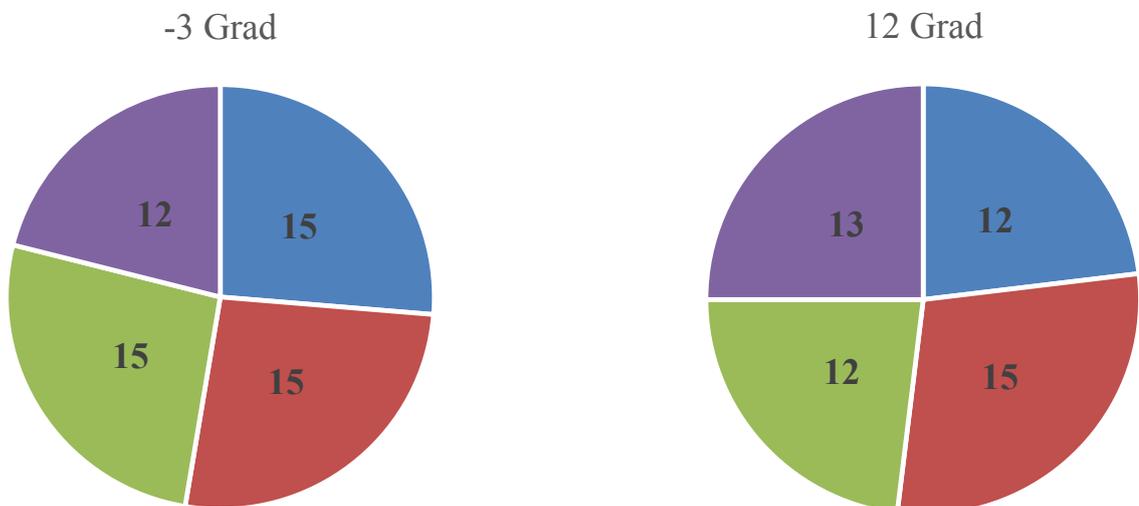
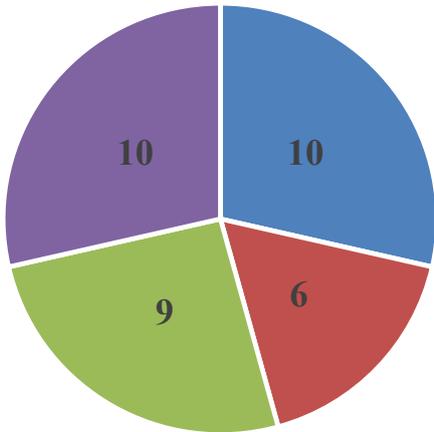


Abb. 5.8: Lokalisationstest Häufigkeits-Volltrefferquote.

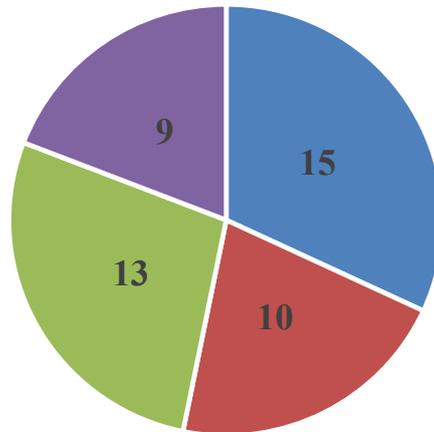
Unter Berücksichtigung der Lokalisationswahrnehmung nach Blauert lässt sich für jede abgefragte Position ein Diagramm erstellen. 16 Probanden haben an dem Lokalisationstest teilgenommen, daher ist 16 maximal und 0 minimal. Bei -3 Grad liegt die Trefferquote am höchsten.



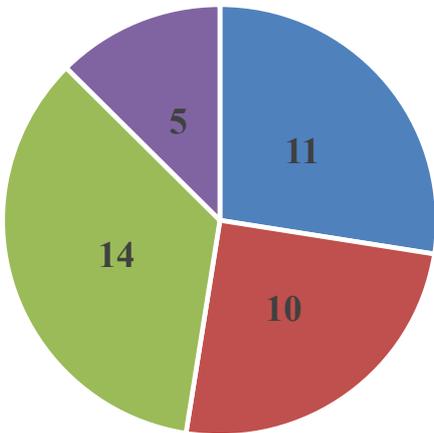
-15 Grad



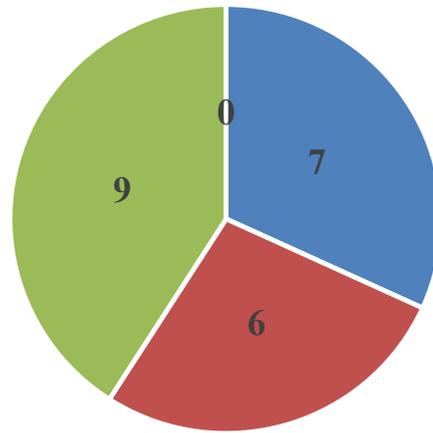
24 Grad



45 Grad



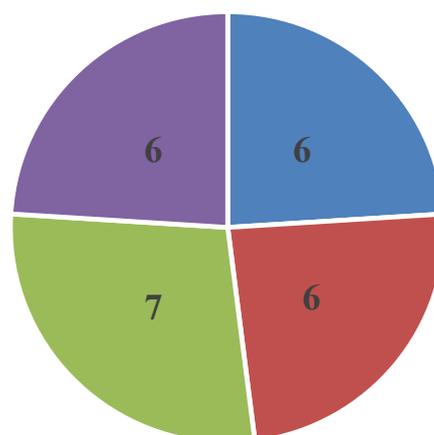
-57 Grad



75 Grad



-90 Grad



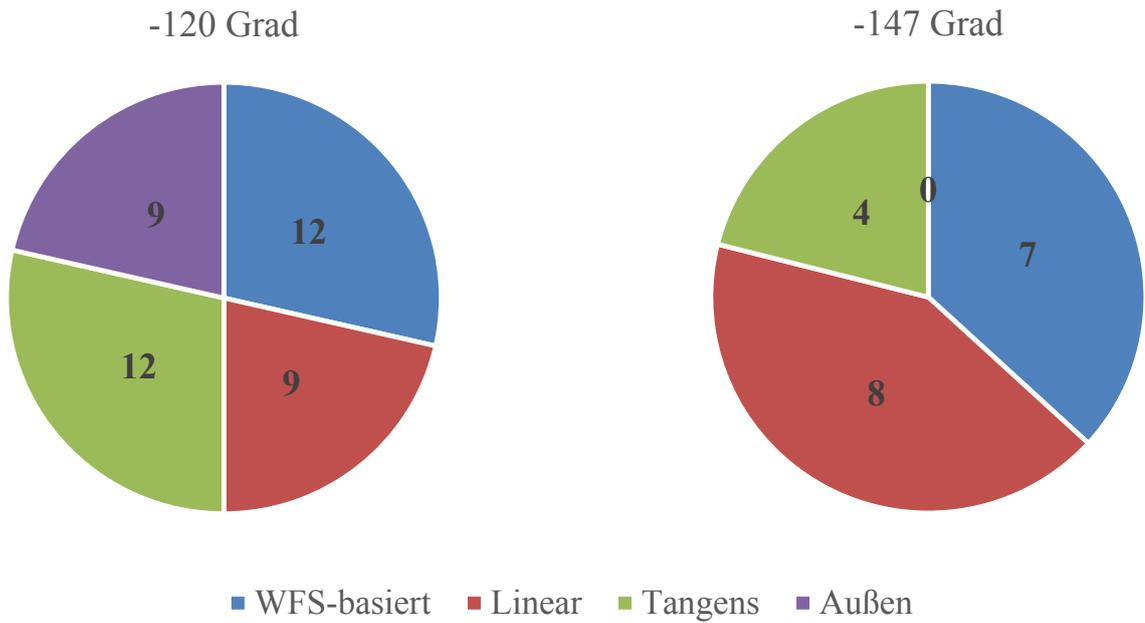


Abb. 5.9: Lokalisationstest der jeweiligen Positionen berücksichtigt mit der Lokalisationsunschärfe nach Blauert.

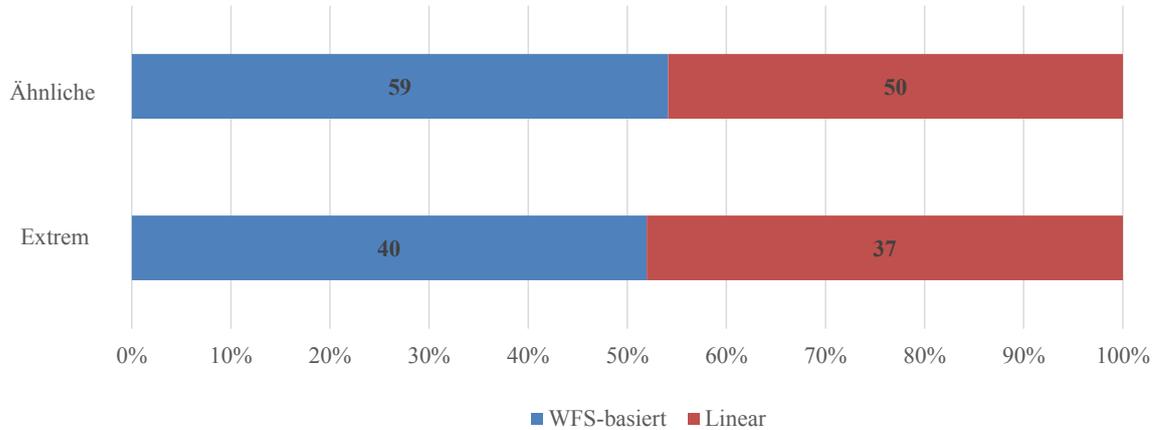


Abb. 5.10: Lokalisationstest: Extremwerte und ähnliche Werte der Positionen, Treffer nach Blauert.

Für die Auswahl der Positionen der virtuellen Quellen wurde in extreme und ähnliche Unterschiede zwischen den Pegeldifferenzen des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus und des Panning nach Linearem Gesetz eingeteilt. Dabei liegen die Extremwerte bei $+12^\circ$, -15° , -57° , $+75^\circ$, -147° und ähnliche Werte bei -3° , $+24^\circ$, $+45^\circ$, -90° , -120° . Diese Grade wurden jeweils separat ausgewertet. Abbildung 5.10 stellt das Ergeb-

nis der Trefferquoten nach Blauert dar. Der wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus wurde bei den Extremwerten und bei den ähnlichen Werten häufiger getroffen als das Standard Panning nach Linearem Gesetz.

Zur ursprünglichen Fragestellung, wie der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus im Vergleich zu Standard Panning Verfahren arbeitet, kann zum Lokalisationstest von statischen Quellen gesagt werden, dass die Ergebnisse in statistischer Hinsicht nur kleine Unterschiede ergeben. Schlussfolgernd macht es bezüglich der Lokalisationswahrnehmung eher weniger einen Unterschied, welchen Algorithmus genommen wird. Darauf folgend wurde entschieden einen Klangqualitätstest zu gestalten.

5.4.2 Klangqualitätstest

Beim Klangqualitätstest werden hingegen zum Lokalisationstest noch eindeutigerer Unterschiede erkennbar. Bei der Auswertung der Ergebnisse zum Klangqualitätstest wurde Proband Nummer 4 ausgeschlossen, da sich die Bewertungen von den anderen Probanden-Bewertungen deutlich unterschieden. Der klangliche Unterschied wurde hauptsächlich beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus mit der Quelle in der Außenzone festgestellt. Bei der Quelle in der Außenzone werden je nach Position bis zu vier Lautsprecher aktiv. Dies hat der Proband bei einer Nachbesprechung des Klangqualitätstest bei Testsignalen mit Sprache eher als klanglichen Artefakt, phasiger und flacher beschrieben, hingegen bei Musik als voller, raumfüllender und natürlicher empfunden (siehe Ellermeier, Hellbrück in Weinzierl, S. 74).

Zur Auswertung der Ergebnisse des Klangqualitätstest wurde der Excel PivotTabel von der STEP Software verwendet (Webseite Audio Research Labs).

In Abbildung 5.11 lässt sich die Tendenz erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Proband den wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus besser bewertet als das Lineare Standard Panning Verfahren, minimal höher ist. Wobei eine Analyse auf signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten ($\bar{x} = 52,58$ und $\bar{x} = 51,52$) keine Signifikanz ergab.

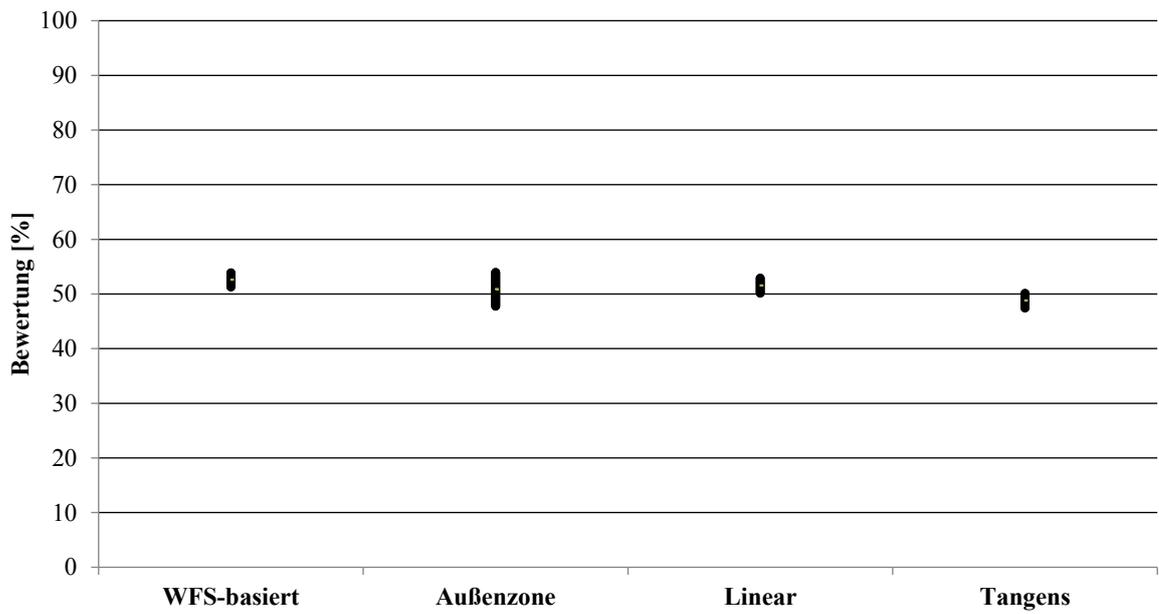


Abb. 5.11: Gesamtübersicht der Ergebnisse des Klangqualitätstests mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

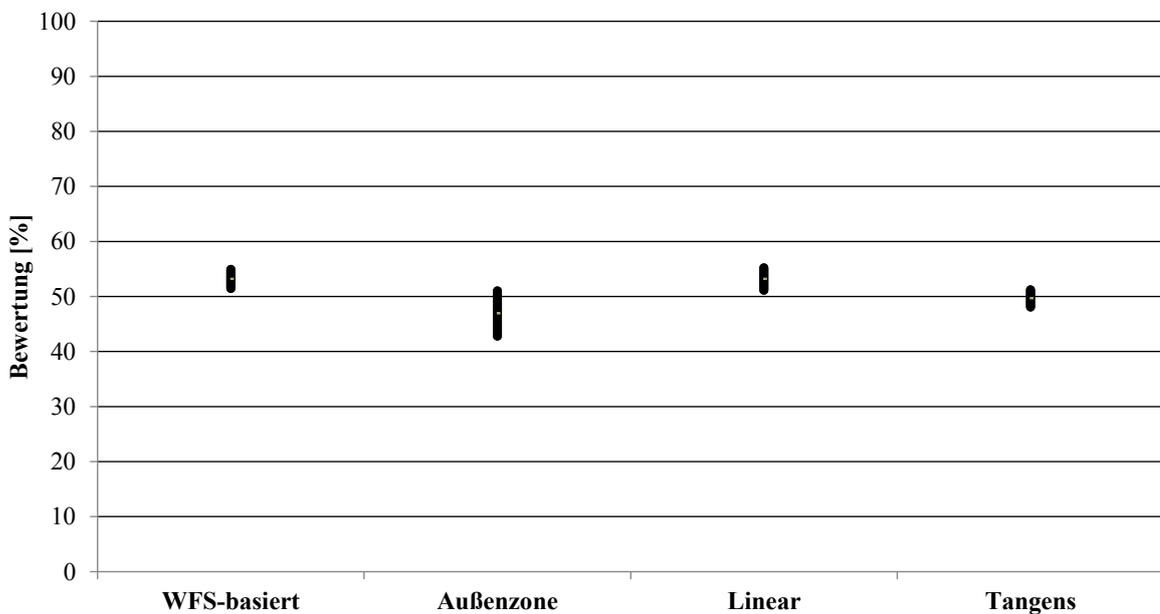


Abb. 5.12: Ergebnisse des Klangqualitätstests bei Sprache mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

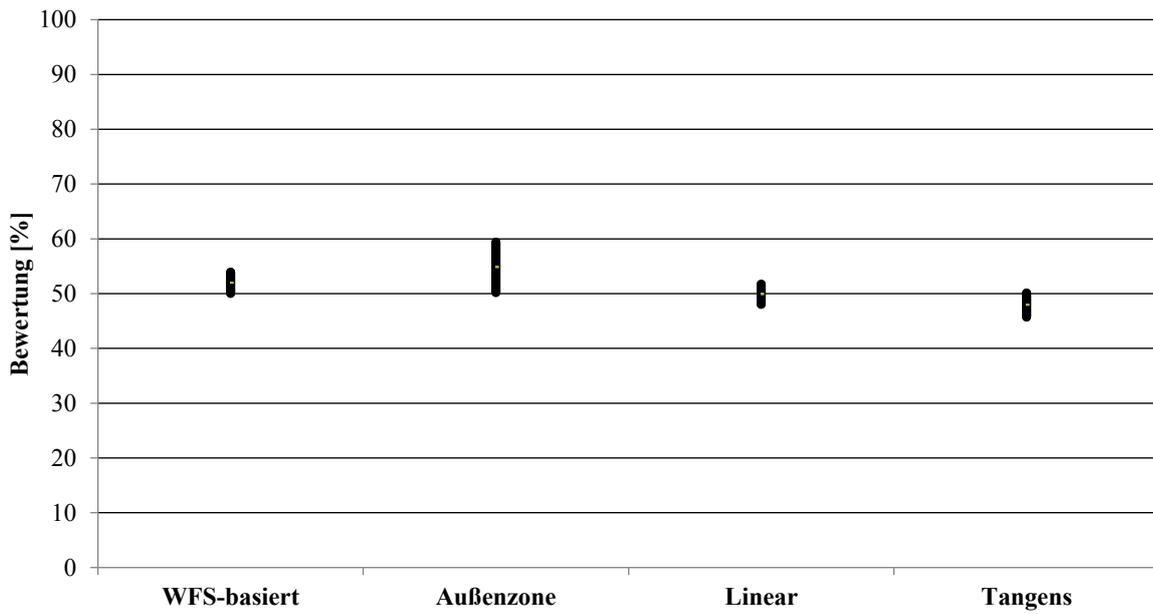


Abb. 5.13: Ergebnisse des Klangqualitätstests bei Musik mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

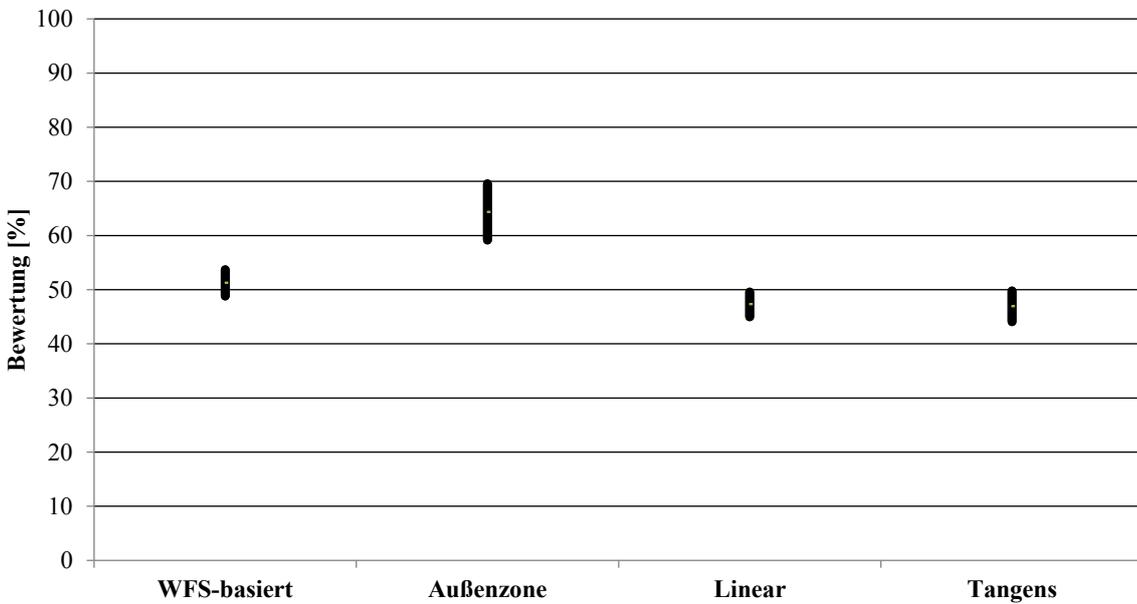


Abb. 5.14: Ergebnis des Klangqualitätstests bei 15 Grad mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

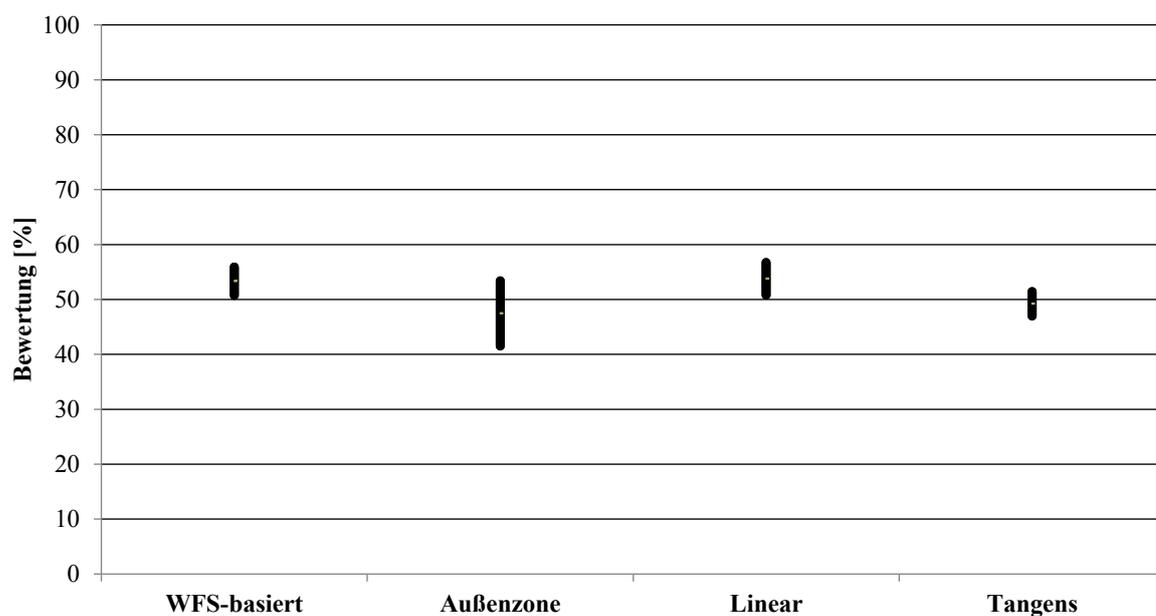


Abb. 5.15: Ergebnis des Klangqualitätstests bei 45 Grad mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

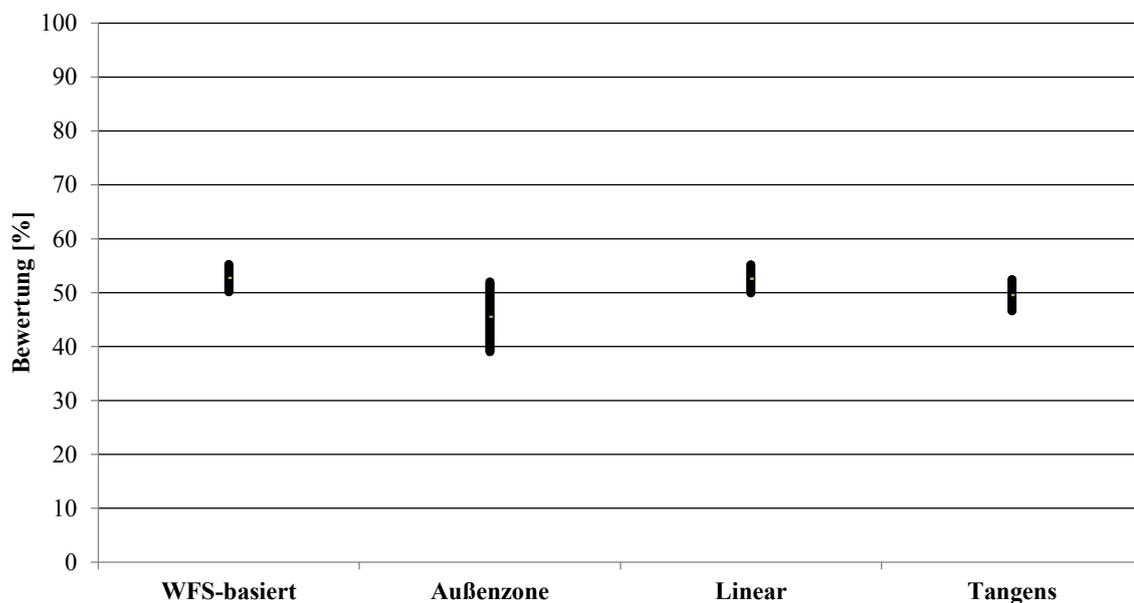


Abb. 5.16: Ergebnis des Klangqualitätstests bei 57 Grad mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

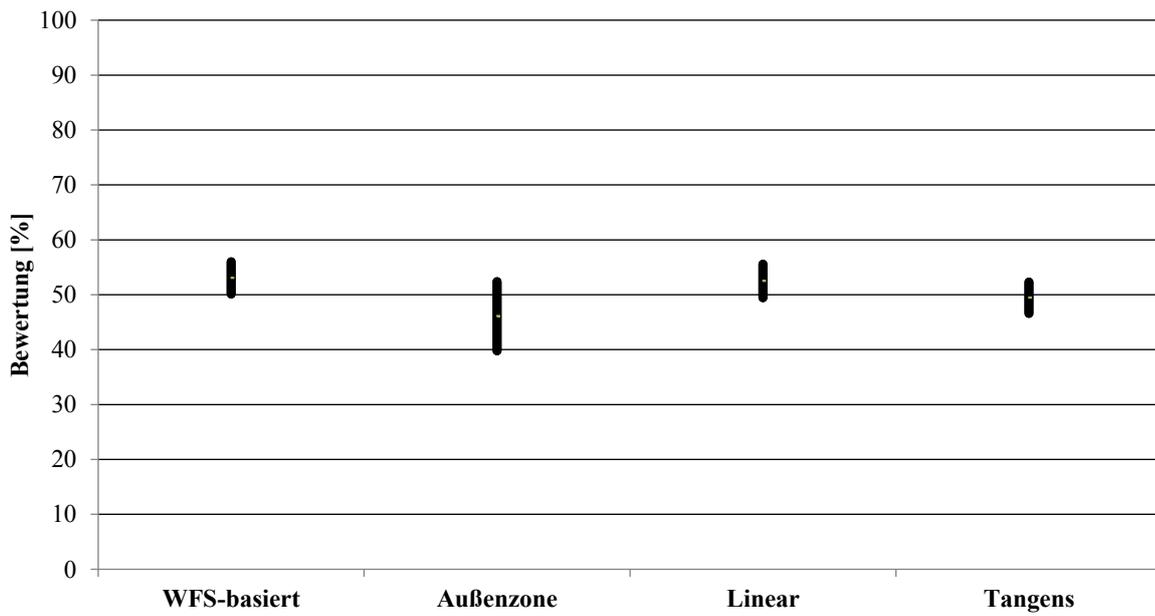


Abb. 5.17: Ergebnis des Klangqualitätstests bei 90 Grad mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

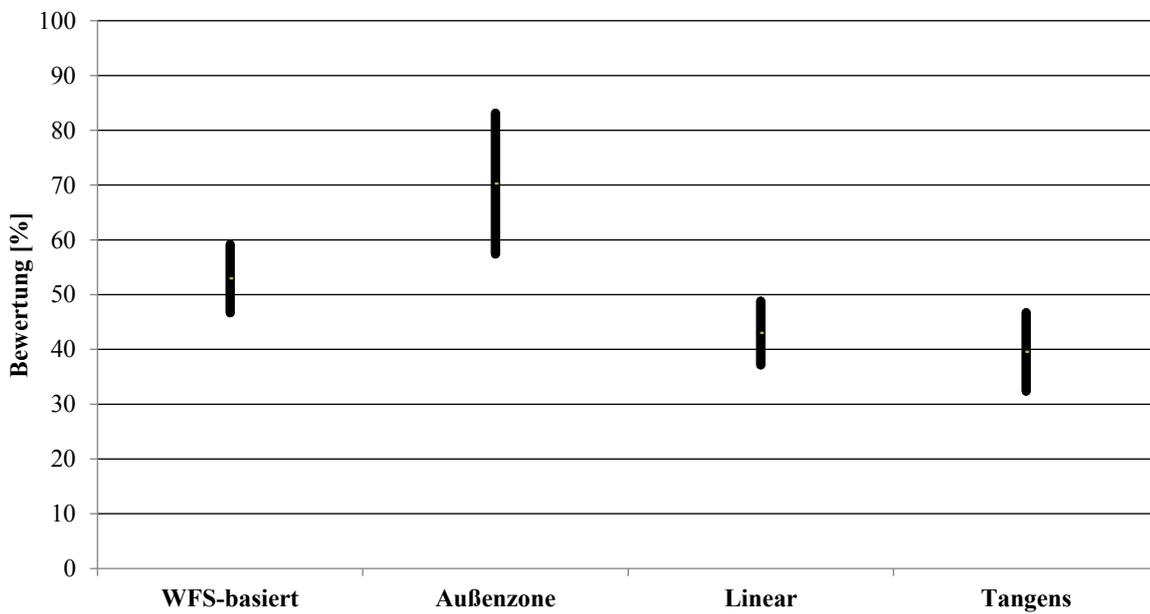


Abb. 5.18: Ergebnis des Klangqualitätstests bei Orff auf 15 Grad mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Beim Testsignal mit dem weiblichen und männlichen Sprecher wird der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus mit der Quelle in der Außenzone eher als nicht gut bewertet, wobei bei klassischer Musik, einer Solo-Violine und Orchester mit Chor das Ergebnis des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus mit der Quelle in der Außenzone eindeutig besser bewertet wurde (siehe Abbildungen 5.12 und 5.13).

Abbildungen 5.14 bis 5.17 zeigen die Auswertung der Ergebnisse des Klangqualitätstest für alle vier Positionen. Beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus mit der Quelle in der Außenzone waren bei den Positionen -15° und -90° drei Lautsprecher aktiv, bei $+45^\circ$ und $+57^\circ$ wurden vier Lautsprecher verwendet.

Ein auffallendes Ergebnis lässt sich beim Klangbeispiel von Carl Orff bei einer Position von -15 Grad erkennen. Bei den Standard Panning Verfahren spielen nur zwei Lautsprecher, Center und rechts. Hingegen sind beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus mit der Quelle in der Außenzone drei Lautsprecher aktiv. Hierbei wird der linke Lautsprecher hinzugeschaltet. Dies wird vom Probanden eher als besser bewertet, da sich so das linke Ohr hinzuschaltet bzw. das gesamte Klangbild eines Orchesters mit Chor räumlicher und daher auch natürlicher klingt. Bei der dazugehörigen Abbildung 5.18 ist der Mittelwert $\bar{x} = 70,26666667$, die Standardabweichung $s = 23,22396135$ und das Konfidenzintervall $CI = 12,90$ bei einer statischen Quelle des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus in der Außenzone.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde die Verwendung des wellenfeldsynthesebasierten Tonwiedergabealgorithmus auf kanalreduzierten Lautsprecher setups in kleinen Räumen untersucht. Im Versuch ging es darum, das was auf vielen Lautsprechern funktioniert, auf wenig Lautsprecher zu realisieren. Die Untersuchung erfolgte nicht hardwaretechnisch, im Sinne von großem Lautsprechersystem auf kleines Lautsprecher setup, sondern softwaretechnisch, und zwar wie arbeitet der Algorithmus im Vergleich zu anderen Standard Panning Verfahren. Nach intensiver Beschäftigung mit dem wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus lassen sich mehrere Attribute erkennen, die im Vergleich zu den Standard Panning Verfahren ersichtlich werden. Mit dem wellenfeldsynthesebasierten Konzept ist 3D Audio möglich, welches nur beim VBAP umsetzbar ist. Jedoch können beim VBAP nicht mehr als drei Lautsprecher im 3D-Modus gleichzeitig angespielt werden (im 2D sogar nur bis zu zwei Lautsprecher). Je nachdem, wo die virtuelle Quelle liegt, berechnet sich der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus Amplituden- und Verzögerungskoeffizienten für eine beliebige Anzahl von Lautsprechern. Der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus besitzt eine Hörfläche, deren Größe man verändern kann. Im Vergleich dazu besitzen die Standards nur einen „Sweet Spot“ , d.h., nur wenn der Hörer in der Mitte sitzt, funktioniert das Panning. Beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus kann die Art der virtuellen Quelle gewählt werden. Ebene Welle oder Punktschallquelle und auch das Quellvolumen, also wie groß die Punktschallquelle sein soll, kann verändert werden. Laufzeitverzögerungen werden beim wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus zusätzlich zu den Pegeldifferenzen hinzugefügt. Distanzwahrnehmung wird durch die verschiedenen Zonen festgelegt. Entfernungsparameter wie „Distance Dependent Delay“ und „Distance

Dependent Loudness“ können hinzugefügt werden.

Wenn nun die Position der virtuellen Quelle genau auf dem Lautsprecherradius gewählt wird, so berechnet sich der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus die Amplitudenkoeffizienten wie bei Pulkkis VBAP aus den Vektoren vom Referenzpunkt (dem mittleren Hörer) zu den beiden der Quellenrichtung benachbarten und sie einschließenden Lautsprecherpositionen (Korn 2009, S. 34). In diesem Spezialfall sind auch die Verzögerungskoeffizienten für beide Lautsprecher gleich. Sobald sich die Quelle nach außen oder nach innen bewegt, werden Delaykoeffizienten hinzugefügt und je nach Position und Größe der Hörfläche werden Lautsprecher hinzu geschaltet.

Die derzeitigen Berechnungen lassen darauf schließen, dass der vom Fraunhofer IDMT entwickelte Algorithmus im Vergleich zu den Standard Panning Verfahren geringere Lokalisationsfehler und einen größeren „Sweet Spot“ aufweist. Unter Berücksichtigung der Lokalisationswahrnehmung nach Blauert lässt sich erkennen, dass die Häufigkeitstrefferquote des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus am höchsten ist. Beim Klangqualitätstest lassen sich hingegen zum Lokalisationstest noch eindeutigere Unterschiede erkennen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Proband den wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus besser bewertet als das Lineare Standard Panning Verfahren, ist minimal höher. Am größten ist das Konfidenzintervall, wenn die virtuelle Quelle in der Außenzone mit 3,25 m Entfernung des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus liegt. Dabei werden mehrere Lautsprecher angespielt, was vor allem bei Musik als klanglich besser empfunden wird.

Abschließend kann gesagt werden, dass der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus auf einem Surround Setup wie 5.1 für eine objektorientierte Tonproduktion verwendet werden kann, auch wenn dieser dafür nicht speziell entwickelt wurde.

Als Gegenstand künftiger Untersuchungen bieten sich weitere Hörtests mit dynamischen Quellen an. Bei Hörversuchen mit dynamischen Quellen hätte der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus vermutlich im Vergleich zum Linearen Panning Gesetz wesentlich besser abgeschnitten, da bei statischen Quellen der -3dB Lautstärkeabfall des Linearen Panning Verfahren nicht deutlich auffällt. Bei einer bewegten Quelle wäre

dieser Vorteil noch mehr zur Geltung gekommen. Entscheidende Konzepte und Funktionalitäten sind in der vorgestellten Implementierung dargestellt.

Das kanalreduzierte System könnte zusätzlich auf die dritte Dimension erweitert werden. Dabei wäre der bereits bestehende 3D-Modus des wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus in C++ auf Python zu übersetzen. Die Anwendbarkeit dieser könnte überprüft werden. Darüber hinaus wäre die Funktion des Subwoofers zu programmieren und zu implementieren. Zu dem 5.1 Setup könnte ein Lautsprecher über den Kopf („Voice Of God“) angebracht werden.

Um bessere Vergleiche und fairere Ergebnisse zu erzielen, sollten die Standard Panning Verfahren weiter entwickelt werden. Außerdem könnten diese wie der wellenfeldsynthesebasierte Algorithmus eine Hörfläche besitzen, Entfernungparameter hinzugefügt werden oder mit Verzögerungskoeffizienten belegt werden.

Zukünftig bedeutende Untersuchungen wären verschiedene Versuche mit der 5.1 Lautsprecheraufstellung. In der Realität wird ein 5.1 Lautsprechersystem nicht immer nach Standard ITU-BS aufgestellt, jedoch der Renderer rechnet sich die Pegel- und Laufzeitdifferenzen trotzdem auf ein 5.1 ITU-BS nach Standard Aufstellung aus. Dabei könnte untersucht werden, wie sich die Lokalisationswahrnehmung und die Klangqualität auswirkt. Ein Renderer, der die Positionen der Lautsprecher, welche nicht nach diesem Standard aufgestellt sind, selbständig ausrechnet, könnte entwickelt werden. Ein solches System wäre vor allem zuhause von Vorteil, da dort meist die Lautsprecherpositionen so aufgestellt sind, wie diese gerade in den Raum passen. Mit Mehrkanalkodierverfahren wie DTS (Digital Theater Systems) wäre dies möglich (Weinzierl 2008, S. 634).

Versuche mit unterschiedlichen Eingabeparametern wie verschiedene Größen der Hörfläche oder Zugabe von Entfernungparameter könnten erforscht werden. Auch weitere Panning Verfahren, wie Ambisonic Panning oder Panning, die andere gegenwärtige räumliche Audiowiedergabeprodukte verwenden (Dolby Atmos, Auro 3D, New Audio Technologie oder das Panning nach Steinberg's Nuendo), könnten zum wellenfeldsynthesebasierten Algorithmus verglichen werden. Des Weiteren könnten diverse Lautsprechersystems wie etwa reines Stereo oder auch eine Surround 7.1 Lautsprecheraufstellung

zukünftig als Anschluss zu dieser Masterarbeit erforscht werden.

Durch die angestrebte Übertragung der Wellenfeldsynthese auf ein Surround Setup wie 5.1 ist eine objektorientierte Tonproduktion sowie räumliche Wiedergabe auch für diese Systeme möglich. Somit ist auch zuhause auf einem kleinen Lautsprechersystem ein akustisches Erlebnis wie etwa beim Klangerlebnis bei den Bregenzer Festspielen möglich.

Literaturverzeichnis

AUHAGEN, Wolfgang; REUTER, Christoph (Hrsg.): *Musikalische Akustik*. Laaber-Verlag Laaber 2014.

BAUER, Benjamin B.: *Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena*. In: Journal of the Acoustical Society of America 33 (1961), S. 1536–1539.

BECKINGER, Michael; KORN, Thomas: *Wave Field Synthesis and Delta Stereophony for Open Air Sound Reproduction: The Hybrid PA System at Bregenz Festival*. In: DEGA Symposium WFS 2007.

BEER, Daniel; STRAUß, Michael: *Untersuchung zur Verwendung von Line-Array-Technologie für die Wellenfeldsynthese*. In: DAGA, Stuttgart 2007, S. 687–688.

BENESTY, Jacob; SONDHI, M. Mohan; HUANG, Yiteng (Hrsg.): *Handbook of Speech Processing*. Springer Berlin London 2008, S. 1095–1114.

BENNETT, John C.; BARKER, Keith; EDEKO, Frederick O.: *A new approach to the assessment of stereophonic sound system performance*. In: Journal of the Audio Engineering Society 33/5 (1985), S. 314–321.

BERKHOUT, A. J.: *A Holographic Approach to Acoustic Control*. In: Journal of the Audio Engineering Society 36/12 (1988), S. 977–995.

BERKHOUT, A. J.; DE VRIES, Diemer; VOGEL, P.: *Acoustic control by wave field synthesis*. In: Journal of the Acoustical Society of America 93 (1993), S. 2764–2777.

BLAUERT, Jens: *Räumliches Hören*. Hirzel Stuttgart 1974.

BLAUERT, Jens: *Spatial Hearing - The Psychophysics of Human Sound Localization*. Massachusetts 1999.

BLUMLEIN, A. D.: *Stereophonic Techniques: U.K. patent 394.325 (1931)* In: Audio Engineering Society, New York 1986.

BOONE, Marinus M.; DE VRIES, Diemer: *Wave Field Synthesis using array technology*. In: 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe 1998, S. 265–272.

COOLICAN, Hugh: *Research Methods and Statistics in Psychology*. London 2009, S. 305–320.

COREY, Jason; WOSZCZYK, Wieslaw: *Localization of Lateral Phantom Images in a 5-channel System with and without Simulated Early Reflections*. In: Audio Engineering Society, 113th Convention, Los Angeles 2002.

CRAVEN, Peter G.: *Continuous Surround Panning for 5-Speaker Reproduction*. In: Audio Engineering Society, 24th Conference, 2003.

CREMER, Lothar; *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*. Band 1, Hirzel Stuttgart 1978.

DE VRIES, Diemer; BOONE, Marinus M.: *Wave field synthesis and analysis using array technology*. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York 1999, S. 15–18.

DICKREITER, Michael: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Band 1, K.G. Saur München 2008.

FASTL, Hugo; ZWICKER, Eberhard: *Psychoacoustics: Facts and models*. Springer Berlin Heidelberg New York 2007.

FRANCK, Andreas : *Efficient Algorithms for Arbitrary Sample Rate Conversion with Application to Wave Field Synthesis*. Dissertation TU Ilmenau 2011.

GATZSCHE, Gabriel; FRUTOS-BONILLA, Javier: *UI.FM - A Software Framework for Distributed Multi User Realtime Configuration of Large Spatial Audio System*. In: International Conference of Spatial Audio, Erlangen 2014.

GERZON, Michael A.: *Panpot Laws for Multispeaker Stereo*. In: Audio Engineering Society, 92nd convention, Wien 1992

GETZMANN, Stephan: *The effect of eye position and background noise on vertical sound localization*. In: Hearing Research 169/1?2 (2002), S. 130–139.

GÖRNE, Thomas: *Tontechnik*. Carl Hanser Verlag München 2008.

HAVELOCK, David; KUWANO, Sonoko; VORLÄNDER, Michael: *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Springer New York London 2008, S. 747–760.

HUYGENS, Christiaan: *Traité de la lumière*. 1690.

KORN, Thomas: *Skalierbare 3D-Wiedergabesysteme: Dokumentation zu AP3, Milestone M9b*. Forschungsbericht Fraunhofer IDMT Ilmenau 2009.

-
- MELCHIOR, Frank; SPORS, Sascha: *Spatial Audio Reproduction: From Theory to Production*. In: Audio Engineering Society, 128th Convention, London 2010.
- MITTAG, Christina: *Untersuchung zur Berechnung von Lautsprecher-signalen bei wellenfeldsynthesebasierter Tonwiedergabe mit reduzierter Lautsprecheranzahl*. Bachelorarbeit TU Ilmenau 2014.
- PULKKI, Ville: *Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning*. In: Journal of the Audio Engineering Society 45/6 (1997), S. 456–466.
- PULKKI, Ville; KARJALAINEN, Matti: *Localization of amplitude panned virtual sources I: Stereophonic panning*. In: Journal of the Audio Engineering Society 49/9 (2001), S. 739–752.
- PULKKI, Ville: *Localization of amplitude-panned virtual sources II: Two- and three-dimensional panning*. In: Journal of the Audio Engineering Society 49/9 (2001), S. 753–767.
- PULKKI, Ville: *Compensating Displacement of Amplitude-Panned Virtual Sources*. In: Audio Engineering Society, 22th Convention, Finland 2002.
- ROADS, Curtis: *The Computer Music Tutorial*. Massachusetts 1996, S. 451–463.
- RUMSEY, Francis: *Spatial Audio*. Focal Press 2001.
- RUMSEY, Francis; NEHER, Tobias; BROOKES, Tim; CRAVEN, Peter: *Unidimensional simulation of the spatial attribute ensemble width for training purposes*. In: Audio Engineering Society, 114th Convention, Amsterdam 2003.
- SACHS, Michael: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik*. Carl Hanser Verlag Leipzig 2007.
- SEEBER, Bernhard U.: *Untersuchung der Lokalisation in reWexionsarmer Umgebung und bei virtueller akustischer Richtungsdarbietung mit einer Laser-Pointer-Methode*. In: Fortschritte der Akustik 28 (2002), S. 482–483.
- SPORS, Sascha: *Active Listening Room Compensation for Spatial Sound Reproduction Systems*. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg 2006.
- SPORS, Sascha; RABENSTEIN, Rudolf: *Spatial Aliasing Artifacts Produced by Linear and Circular Loudspeaker Arrays used for Wave Field Synthesis*. In: Audio Engineering Society, 120th Convention, Paris 2006.

SPORS, Sascha: *An analytic secondary source selection criterion for wave field synthesis*. In: DAGA 2007.

SPORS, Sascha; RABENSTEIN, Rudolf; AHRENS, Jens: *The Theory of Wave Field Synthesis Revisited*. In: Audio Engineering Society, 124th Convention, Amsterdam 2008.

SPORS, Sascha; WIERSTORF, Hagen; RAAKE, Alexander; MELCHIOR, Frank; FRANK, Matthias; ZOTTER, Franz: *Spatial Sound With Loudspeakers and It's Perception: A Review of the Current State*. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers 101/9 (2013), S. 1920–1938.

START, Evert W.: *Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis*. Dissertation Delft University of Technology 1997.

STEINBERG, J.C.; SNOW W.B.: *Auditory perspective - Physical factors*. In: Electronic Engineering 13 (1934), S. 245–258.

THEILE, Günther: *Wave field synthesis: A promising spatial audio rendering concept*. In: Digital Audio Effects, 7th Conference, Naples 2004, S. 125–132.

VEIT, Ivar: *Technische Akustik*. Vogel Würzburg 2005, S. 25–62.

VERHEIJEN, Edwin: *Sound Reproduction By Wave Field Synthesis*. Dissertation Technische Universität Delft 2010, S. 32–34.

VOGEL, Peter: *Application of Wave Field Synthesis in Room Acoustics*. Dissertation Technische Universität Delft 1993.

VORLÄNDER, Michael: *Auralization*. Springer Berlin Heidelberg 2008, S. 284–293.

WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Berlin Heidelberg 2008.

WEST, James R.: *Five-Channel Panning Laws: An Analytical and Experimental Comparison*. Masterarbeit University of Miami 1998.

WILLIAMS, Earl G.: *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. Academic Press 1999, S. 251–263.

WITTEK, Helmut: *OPSI – Optimised phantom source imaging*. In: Internal Carrouso Paper, München 2002, S. 1–10.

ZÖLZER, Udo (Hrsg.): *DAFX - Digital Audio Effects*. John Wiley & Sons England

2002, S. 137–170.

Online-Quellen:

Audio Research Labs, http://www.audioresearchlabs.com/step/STEP_User_Manual.pdf, letzter Zugriff: 21.08.2014.

Betamobil Gmbh, <http://www.betamobil.de/downloads/HD5.pdf>, letzter Zugriff: 23.08.2014.

Fraunhofer IDMT, http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Publikationen/Produktinformationen/SpatialSound%20Wave/SpatialSound%20Wave_DE.pdf, letzter Zugriff: 30.08.2014.

EBU Technology & Innovation, <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3253.pdf>, letzter Zugriff: 03.09.2014.

K & H, [http://www.neumann-kh-line.com/klein-hummel/globals.nsf/resources/an1_o500c_kh1.051_150604.pdf/\\$File/an1_o500c_kh1.051_150604.pdf](http://www.neumann-kh-line.com/klein-hummel/globals.nsf/resources/an1_o500c_kh1.051_150604.pdf/$File/an1_o500c_kh1.051_150604.pdf), letzter Zugriff: 03.09.2014.

Salzbrenner Stagetec, http://www.stagetec.com/images/stories/mediagroup/download/Stages_2013_dt_web.pdf, S. 20-21, letzter Zugriff: 23.08.2014.

Sengpiel Audio, <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-klirr.htm>, letzter Zugriff: 15.09.2014.

Patente und Normen:

US 20120237063 A1: 2012 „Apparatus and Method for Calculating Driving Coefficients for Loudspeakers of a Loudspeaker Arrangement and Apparatus and Method for Providing Drive Signals for Loudspeakers of a Loudspeaker Arrangement Based on an Audio Signal Associated with a Virtual Source“

ITU-R BS.775-3: 2012 „Multi-Channel Stereophonic Sound System with or without Accompanying Picture, International Telecommunications Union“

ITU-R BS.1534-2: 2014 „Method for the Subjective Assessment of Intermediate Quality Level of Audio Systems“

A Anhang

Anbei sind die Excel Tabellen und der Inhalt der CD angefügt. Dazu gehören die ausführlichen Herleitungen der Diagramme zu den Panning Verfahren, die Verstärkungsfaktor-Wertetabellen und die Hörtest-Lokalisationstabellen. Als Abschluss dieser Masterarbeit ist eine Kurzfassung, das Abstract und der Lebenslauf angebracht.

A.1 Verstärkungsfaktor-Wertetabellen

Tab. A.1: Verstärkungsfaktoren-Wertetabelle für Stereo beim Linearen, Sinus und Tangens Gesetz; φ Schallereignisrichtung.

φ	Linear		Sinus		Tangens	
	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts	Links
-40	1	0	1	0	1	0
-38	0,975	0,025	1,000	0,022	0,999	0,036
-35	0,938	0,063	0,998	0,057	0,996	0,090
-32	0,900	0,100	0,995	0,096	0,989	0,145
-29	0,863	0,138	0,990	0,139	0,980	0,200
-26	0,825	0,175	0,983	0,186	0,967	0,256
-23	0,788	0,213	0,972	0,237	0,950	0,312
-20	0,750	0,250	0,956	0,292	0,930	0,367
-17	0,713	0,288	0,936	0,351	0,906	0,422
-14	0,675	0,325	0,911	0,413	0,879	0,476
-11	0,638	0,363	0,879	0,477	0,848	0,529
-8	0,600	0,400	0,841	0,541	0,814	0,581
-5	0,563	0,438	0,796	0,606	0,777	0,630
-2	0,525	0,475	0,744	0,668	0,736	0,677
1	0,488	0,513	0,688	0,726	0,692	0,722
4	0,450	0,550	0,627	0,779	0,646	0,763
7	0,413	0,588	0,563	0,826	0,597	0,802
10	0,375	0,625	0,498	0,867	0,547	0,837
13	0,338	0,663	0,434	0,901	0,494	0,869
16	0,300	0,700	0,371	0,929	0,440	0,898
19	0,263	0,738	0,311	0,950	0,386	0,923
22	0,225	0,775	0,255	0,967	0,330	0,944
25	0,188	0,813	0,202	0,979	0,275	0,962
28	0,150	0,850	0,154	0,988	0,219	0,976
31	0,113	0,888	0,110	0,994	0,163	0,987
34	0,075	0,925	0,069	0,998	0,108	0,994
37	0,038	0,963	0,033	0,999	0,054	0,999
40	0	1	0	1	0	1

Tab. A.2: Verstärkungsfaktoren-Wertetabelle für 5.0 Setup beim Linearen, Sinus und Tangens Gesetz; φ Schallereignisrichtung.

φ	Linear					Sinus					Tangens				
	C	R	RS	LS	L	C	R	RS	LS	L	C	R	RS	LS	L
180	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0,707	0,707	0	0	0	0,707	0,707	0
177	0	0	0,479	0,521	0	0	0	0,667	0,745	0	0	0	0,693	0,720	0
174	0	0	0,457	0,543	0	0	0	0,625	0,781	0	0	0	0,680	0,734	0
171	0	0	0,436	0,56	0	0	0	0,581	0,814	0	0	0	0,665	0,747	0
168	0	0	0,414	0,586	0	0	0	0,538	0,843	0	0	0	0,650	0,760	0
165	0	0	0,393	0,607	0	0	0	0,494	0,869	0	0	0	0,635	0,772	0
162	0	0	0,371	0,63	0	0	0	0,451	0,893	0	0	0	0,619	0,785	0
159	0	0	0,350	0,650	0	0	0	0,409	0,913	0	0	0	0,602	0,798	0
156	0	0	0,329	0,671	0	0	0	0,368	0,930	0	0	0	0,585	0,811	0
153	0	0	0,307	0,69	0	0	0	0,329	0,944	0	0	0	0,566	0,824	0
150	0	0	0,286	0,714	0	0	0	0,292	0,956	0	0	0	0,547	0,837	0
147	0	0	0,264	0,736	0	0	0	0,257	0,966	0	0	0	0,525	0,851	0
144	0	0	0,243	0,76	0	0	0	0,225	0,974	0	0	0	0,503	0,864	0
141	0	0	0,221	0,779	0	0	0	0,194	0,981	0	0	0	0,478	0,878	0
138	0	0	0,200	0,800	0	0	0	0,166	0,986	0	0	0	0,452	0,892	0
135	0	0	0,179	0,82	0	0	0	0,140	0,990	0	0	0	0,423	0,906	0
132	0	0	0,157	0,843	0	0	0	0,116	0,993	0	0	0	0,391	0,921	0
129	0	0	0,136	0,864	0	0	0	0,094	0,996	0	0	0	0,355	0,935	0
126	0	0	0,114	0,89	0	0	0	0,075	0,997	0	0	0	0,315	0,949	0
123	0	0	0,093	0,907	0	0	0	0,057	0,998	0	0	0	0,271	0,963	0
120	0	0	0,071	0,929	0	0	0	0,041	0,999	0	0	0	0,221	0,975	0
117	0	0	0,050	0,95	0	0	0	0,027	1,000	0	0	0	0,164	0,986	0
114	0	0	0,029	0,971	0	0	0	0,014	1,000	0	0	0	0,100	0,995	0
111	0	0	0,007	0,993	0	0	0	0,003	1,000	0	0	0	0,027	1,000	0
110	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
108	0	0	0	0,975	0,03	0	0	0	1	0,022	0	0	0	0,999	0,036
105	0	0	0	0,938	0,063	0	0	0	0,998	0,057	0	0	0	0,996	0,090
102	0	0	0	0,900	0,1	0	0	0	0,995	0,096	0	0	0	0,989	0,145
99	0	0	0	0,863	0,138	0	0	0	0,990	0,139	0	0	0	0,980	0,200
96	0	0	0	0,825	0,175	0	0	0	0,983	0,186	0	0	0	0,967	0,256
93	0	0	0	0,79	0,213	0	0	0	0,972	0,237	0	0	0	0,950	0,312
90	0	0	0	0,750	0,25	0	0	0	0,956	0,292	0	0	0	0,930	0,367
87	0	0	0	0,713	0,288	0	0	0	0,936	0,351	0	0	0	0,906	0,422
84	0	0	0	0,675	0,325	0	0	0	0,911	0,413	0	0	0	0,879	0,476
81	0	0	0	0,64	0,363	0	0	0	0,879	0,477	0	0	0	0,848	0,529
78	0	0	0	0,600	0,4	0	0	0	0,841	0,541	0	0	0	0,814	0,581
75	0	0	0	0,563	0,438	0	0	0	0,796	0,606	0	0	0	0,777	0,630
72	0	0	0	0,525	0,475	0	0	0	0,744	0,668	0	0	0	0,736	0,677

A.1 Verstärkungsfaktor-Wertetabellen

φ	Linear					Sinus					Tangens				
	C	R	RS	LS	L	C	R	RS	LS	L	C	R	RS	LS	L
69	0	0	0	0,488	0,513	0	0	0	0,688	0,726	0	0	0	0,692	0,722
66	0	0	0	0,450	0,55	0	0	0	0,627	0,779	0	0	0	0,646	0,763
63	0	0	0	0,413	0,588	0	0	0	0,563	0,826	0	0	0	0,597	0,802
60	0	0	0	0,375	0,625	0	0	0	0,498	0,867	0	0	0	0,547	0,837
57	0	0	0	0,338	0,663	0	0	0	0,434	0,901	0	0	0	0,494	0,869
54	0	0	0	0,3	0,7	0	0	0	0,371	0,929	0	0	0	0,440	0,898
51	0	0	0	0,263	0,738	0	0	0	0,311	0,950	0	0	0	0,386	0,923
48	0	0	0	0,225	0,775	0	0	0	0,255	0,967	0	0	0	0,330	0,944
45	0	0	0	0,188	0,813	0	0	0	0,202	0,979	0	0	0	0,275	0,962
42	0	0	0	0,15	0,85	0	0	0	0,154	0,988	0	0	0	0,219	0,976
39	0	0	0	0,113	0,888	0	0	0	0,110	0,994	0	0	0	0,163	0,987
36	0	0	0	0,075	0,925	0	0	0	0,069	0,998	0	0	0	0,108	0,994
33	0	0	0	0,038	0,963	0	0	0	0,033	0,999	0	0	0	0,054	0,999
30	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
27	0,1	0	0	0	0,9	0,108	0	0	0	0,994	0,115	0	0	0	0,993
24	0,2	0	0	0	0,8	0,239	0	0	0	0,971	0,249	0	0	0	0,969
21	0,3	0	0	0	0,7	0,391	0	0	0	0,920	0,400	0	0	0	0,916
18	0,4	0	0	0	0,6	0,553	0	0	0	0,833	0,558	0	0	0	0,830
15	0,5	0	0	0	0,5	0,707	0	0	0	0,707	0,707	0	0	0	0,707
12	0,6	0	0	0	0,4	0,833	0	0	0	0,553	0,830	0	0	0	0,558
9	0,7	0	0	0	0,3	0,920	0	0	0	0,391	0,916	0	0	0	0,400
6	0,8	0	0	0	0,2	0,971	0	0	0	0,239	0,969	0	0	0	0,249
3	0,9	0	0	0	0,1	0,994	0	0	0	0,108	0,993	0	0	0	0,115
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
-3	0,9	0,1	0	0	0	0,994	0,108	0	0	0	0,993	0,115	0	0	0
-6	0,8	0,2	0	0	0	0,971	0,239	0	0	0	0,969	0,249	0	0	0
-9	0,7	0,3	0	0	0	0,920	0,391	0	0	0	0,916	0,400	0	0	0
-12	0,6	0,4	0	0	0	0,833	0,553	0	0	0	0,830	0,558	0	0	0
-15	0,5	0,5	0	0	0	0,707	0,707	0	0	0	0,707	0,707	0	0	0
-18	0,4	0,6	0	0	0	0,553	0,833	0	0	0	0,558	0,830	0	0	0
-21	0,3	0,7	0	0	0	0,391	0,920	0	0	0	0,400	0,916	0	0	0
-24	0,2	0,8	0	0	0	0,239	0,971	0	0	0	0,249	0,969	0	0	0
-27	0,1	0,9	0	0	0	0,108	0,994	0	0	0	0,115	0,993	0	0	0
-30	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
-33	0	0,963	0,038	0	0	0	0,999	0,033	0	0	0	0,999	0,054	0	0
-36	0	0,925	0,075	0	0	0	0,998	0,069	0	0	0	0,994	0,108	0	0
-39	0	0,888	0,113	0	0	0	0,994	0,110	0	0	0	0,987	0,163	0	0
-42	0	0,85	0,15	0	0	0	0,988	0,154	0	0	0	0,976	0,219	0	0
-45	0	0,813	0,188	0	0	0	0,979	0,202	0	0	0	0,962	0,275	0	0
-48	0	0,775	0,225	0	0	0	0,967	0,255	0	0	0	0,944	0,330	0	0
-51	0	0,738	0,263	0	0	0	0,950	0,311	0	0	0	0,923	0,386	0	0
-54	0	0,7	0,3	0	0	0	0,929	0,371	0	0	0	0,898	0,440	0	0
-57	0	0,663	0,338	0	0	0	0,901	0,434	0	0	0	0,869	0,494	0	0

A Anhang

φ	Linear					Sinus					Tangens				
	C	R	RS	LS	L	C	R	RS	LS	L	C	R	RS	LS	L
-60	0	0,625	0,375	0	0	0	0,867	0,498	0	0	0	0,837	0,547	0	0
-63	0	0,588	0,413	0	0	0	0,826	0,563	0	0	0	0,802	0,597	0	0
-66	0	0,55	0,45	0	0	0	0,779	0,627	0	0	0	0,763	0,646	0	0
-69	0	0,513	0,488	0	0	0	0,726	0,688	0	0	0	0,722	0,692	0	0
-72	0	0,475	0,525	0	0	0	0,668	0,744	0	0	0	0,677	0,736	0	0
-75	0	0,438	0,563	0	0	0	0,606	0,796	0	0	0	0,630	0,777	0	0
-78	0	0,4	0,6	0	0	0	0,541	0,841	0	0	0	0,581	0,814	0	0
-81	0	0,363	0,638	0	0	0	0,477	0,879	0	0	0	0,529	0,848	0	0
-84	0	0,325	0,675	0	0	0	0,413	0,911	0	0	0	0,476	0,879	0	0
-87	0	0,288	0,713	0	0	0	0,351	0,936	0	0	0	0,422	0,906	0	0
-90	0	0,25	0,75	0	0	0	0,292	0,956	0	0	0	0,367	0,930	0	0
-93	0	0,213	0,788	0	0	0	0,237	0,972	0	0	0	0,312	0,950	0	0
-96	0	0,175	0,825	0	0	0	0,186	0,983	0	0	0	0,256	0,967	0	0
-99	0	0,138	0,863	0	0	0	0,139	0,990	0	0	0	0,200	0,980	0	0
-102	0	0,1	0,9	0	0	0	0,096	0,995	0	0	0	0,145	0,989	0	0
-105	0	0,063	0,938	0	0	0	0,057	0,998	0	0	0	0,090	0,996	0	0
-108	0	0,03	0,98	0	0	0	0,022	1	0	0	0	0,036	0,999	0	0
-110	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
-111	0	0	0,993	0,007	0	0	0	1,000	0,003	0	0	0	1,000	0,027	0
-114	0	0	0,971	0,029	0	0	0	1,000	0,014	0	0	0	0,995	0,100	0
-117	0	0	0,95	0,05	0	0	0	1,000	0,027	0	0	0	0,986	0,164	0
-120	0	0	0,929	0,071	0	0	0	0,999	0,041	0	0	0	0,975	0,221	0
-123	0	0	0,907	0,093	0	0	0	0,998	0,057	0	0	0	0,963	0,271	0
-126	0	0	0,886	0,114	0	0	0	0,997	0,075	0	0	0	0,949	0,315	0
-129	0	0	0,864	0,136	0	0	0	0,996	0,094	0	0	0	0,935	0,355	0
-132	0	0	0,843	0,157	0	0	0	0,993	0,116	0	0	0	0,921	0,391	0
-135	0	0	0,821	0,179	0	0	0	0,990	0,140	0	0	0	0,906	0,423	0
-138	0	0	0,8	0,2	0	0	0	0,986	0,166	0	0	0	0,892	0,452	0
-141	0	0	0,779	0,221	0	0	0	0,981	0,194	0	0	0	0,878	0,478	0
-144	0	0	0,76	0,243	0	0	0	0,974	0,225	0	0	0	0,864	0,503	0
-147	0	0	0,736	0,264	0	0	0	0,966	0,257	0	0	0	0,851	0,525	0
-150	0	0	0,714	0,286	0	0	0	0,956	0,292	0	0	0	0,837	0,547	0
-153	0	0	0,693	0,307	0	0	0	0,944	0,329	0	0	0	0,824	0,566	0
-156	0	0	0,671	0,329	0	0	0	0,930	0,368	0	0	0	0,811	0,585	0
-159	0	0	0,65	0,35	0	0	0	0,913	0,409	0	0	0	0,798	0,602	0
-162	0	0	0,629	0,371	0	0	0	0,893	0,451	0	0	0	0,785	0,619	0
-165	0	0	0,607	0,393	0	0	0	0,869	0,494	0	0	0	0,772	0,635	0
-168	0	0	0,586	0,414	0	0	0	0,843	0,538	0	0	0	0,760	0,650	0
-171	0	0	0,564	0,436	0	0	0	0,814	0,581	0	0	0	0,747	0,665	0
-174	0	0	0,543	0,457	0	0	0	0,781	0,625	0	0	0	0,734	0,680	0
-177	0	0	0,521	0,479	0	0	0	0,745	0,667	0	0	0	0,720	0,693	0
-180	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0,707	0,707	0	0	0	0,707	0,707	0

A.2 Hörtest-Lokalisationstabelle

Tab. A.3: Wertetabellen Lokalisationstest alle Probanden.

Test 1	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-3	-3	-6	-3
12	15	15	24	12
-15	-24	-30	-21	-24
24	27	27	24	27
45	33	33	36	27
-57	-36	-45	-33	-33
75	93	90	45	96
-90	-108	-114	-117	-114
-120	-153	-114	-120	-111
-147	-156	-147	-171	-111

Test 2	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	0	-3	-3	-3
12	15	15	15	15
-15	-18	-18	-21	-18
24	30	36	33	36
45	45	39	45	30
-57	-42	-48	-51	-42
75	90	105	90	93
-90	-90	-90	-90	-90
-120	-108	-90	-108	-108
-147	-147	-132	-147	-105

Test 3	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-9	-6	-3	-6
12	15	15	15	12
-15	-18	-24	-21	-21
24	27	30	30	30
45	51	36	33	24
-57	-51	-42	-42	-39
75	48	45	60	57
-90	-117	-120	-126	-90
-120	-96	-105	-129	-111
-147	-180	-159	-165	-102

Test 4	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-6	-3	0	6
12	12	18	21	12
-15	-15	-18	-21	-9
24	30	33	27	24
45	48	39	51	33
-57	-66	-51	-54	-42
75	105	93	99	99
-90	-96	-105	-90	-126
-120	-159	-102	-147	-99
-147	-180	-162	-180	-108

Test 5	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	0	0	0	-3
12	15	18	21	18
-15	-15	-27	-21	-21
24	30	30	30	33
45	36	36	36	27
-57	-36	-36	-36	-30
75	84	96	75	90
-90	-105	-111	-105	-111
-120	-117	-111	-123	-111
-147	-162	-141	-171	-108

Test 6	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	0	0	0	0
12	18	15	18	18
-15	-18	-21	-30	-30
24	27	30	30	30
45	30	30	42	30
-57	-45	-48	-48	-30
75	84	99	90	96
-90	-108	-111	-111	-111
-120	-126	-111	-129	-111
-147	-135	-120	-141	-111

Test 7	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-6	0	-6	3
12	24	30	15	18
-15	-18	-30	-33	-33
24	24	27	33	24
45	27	39	33	33
-57	-36	-39	-27	-30
75	39	33	33	51
-90	-135	-114	-114	-117
-120	-111	-123	-126	-111
-147	-171	-117	-162	-126

Test 8	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-3	-3	-3	-6
12	18	18	21	21
-15	-21	-21	-24	-21
24	30	33	27	33
45	33	33	45	30
-57	-39	-30	-42	-36
75	96	96	96	93
-90	-102	-96	-93	-96
-120	-117	-105	-120	-99
-147	-159	-150	-165	-99

Test 9	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	0	-3	0	-9
12	18	18	18	27
-15	-30	-27	-21	-24
24	33	27	30	39
45	33	33	33	30
-57	-48	-42	-45	-36
75	84	96	96	105
-90	-99	-114	-105	-105
-120	-126	-99	-126	-105
-147	-180	-150	-165	-114

Test 10	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	0	0	-6	0
12	18	15	12	9
-15	-21	-24	-15	-21
24	24	24	27	30
45	30	30	33	30
-57	-39	-39	-39	-36
75	36	99	57	87
-90	-120	-111	-126	-108
-120	-126	-111	-141	-105
-147	-171	-156	-174	-108

Test 11	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-6	-3	-9	-6
12	18	18	18	15
-15	-21	-24	-24	-21
24	27	42	33	24
45	36	33	33	39
-57	-45	-27	-63	-42
75	93	87	96	99
-90	-105	-93	-90	-102
-120	-126	-129	-135	-129
-147	-156	-147	-150	-108

Test 12	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	0	0	0	0
12	21	15	15	21
-15	-24	-21	-27	-18
24	30	30	30	36
45	36	30	39	30
-57	-39	-42	-45	-39
75	60	99	75	69
-90	-117	-102	-96	-111
-120	-111	-111	-111	-111
-147	-180	-111	-174	-111

Test 13	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-9	0	0	-9
12	18	15	15	18
-15	-30	-27	-24	-24
24	30	21	24	30
45	24	24	27	30
-57	-63	-63	-60	-30
75	102	102	105	105
-90	-114	-126	-114	-120
-120	-132	-108	-126	-120
-147	-150	-126	-162	-114

Test 14	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-3	-6	-6	-12
12	24	15	18	18
-15	-18	-27	-24	-18
24	27	36	24	36
45	36	27	33	33
-57	-69	-57	-60	-42
75	96	105	96	96
-90	-102	-102	-105	-108
-120	-108	-111	-117	-105
-147	-141	-153	-171	-114

Test 15	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-3	-3	-6	-15
12	21	15	15	12
-15	-24	-18	-18	-21
24	24	24	21	21
45	21	30	32	42
-57	-32	-42	-30	-30
75	66	63	102	90
-90	-108	-108	-99	-90
-120	-123	-105	-120	-93
-147	-171	-129	-171	-120

Test 16	WFS	Lin	Tan	Außen
-3	-12	-12	-15	-15
12	12	15	12	9
-15	-36	-39	-21	-40
24	21	42	21	39
45	36	39	45	21
-57	-90	-39	-45	-39
75	100	100	99	93
-90	-100	-102	-100	-99
-120	-102	-105	-99	-100
-147	-130	-130	-135	-100

A.3 CD Inhalt

- Masterarbeit im PDF-Format
- Hörtestauswertungen
- Klangbeispiele
- Internetseiten als PDF
- Email mit WDR

Kurzfassung

Aktuelle räumliche Audiowiedergabetechniken wie die Wellenfeldsynthese (WFS) ermöglichen die physikalisch korrekte Nachbildung eines Schallfeldes. Hierzu wird für jeden Lautsprecher des den Hörraum umgebenden Lautsprecherarrays, ein individuelles Signal berechnet, so dass die Überlagerung der Lautsprechersignale die Wellenfront einer virtuellen Schallquelle ergibt. Durch die so erzeugten Wellenfronten, ausgehend von der Positionierung von Sound-Objekten, kann eine virtuelle akustische Umgebung realitätsnah rekonstruiert werden. In diesem Bereich können virtuellen Schallquellen unabhängig vom Hörerstandort stabil lokalisiert werden. Aufgrund des hohen Hardwareaufwands und Platzbedarfs ist man bestrebt die Lautsprecheranzahl zu verringern. Dabei kann es bei Setups mit geringer Lautsprecheranzahl zu unstabilen virtuellen Schallquellenpositionen kommen. Gerade Lautsprechersysteme mit einer geringen Anzahl von Lautsprechern sind sehr interessant für Tontechniker, die meist in kleinen Räumen wie Übertragungswagen von Rundfunkanstalten oder Tonstudios arbeiten.

In der vorliegenden Masterarbeit wird ein vom Fraunhofer - Institut für Digitale Medientechnologie IDMT entwickelter räumlicher Tonwiedergabealgorithmus analysiert, um virtuelle Audioszenen mit einer geringen Anzahl von Lautsprechern wiederzugeben. Ziel ist es die Lokalisationsgenauigkeit und Klangqualität für die Wiedergabe von virtuellen Schallquellen auf einem standardisierten 5.1 Lautsprechersystems zu untersuchen.

Für die Untersuchung des Algorithmus wurden verschiedene objektbasierte Audio-Renderer implementiert und miteinander verglichen. Zur Evaluierung wurde ein Hörtest mit 16 Probanden auf einem Surround Sound 5.1 Lautsprechersetup durchgeführt, welches die Aufstellungsnorm ITU-R BS berücksichtigt.

Abstract

Current spatial audio reproduction techniques such as wave field synthesis (WFS) allow the physically correct simulation of a sound field. For this purpose, an individual signal for each loudspeaker of the listening area surrounding the speaker array, is calculated, so that the overlapping of the loudspeaker signals provides the wave front of a virtual sound source. Because of these generated wave fronts, starting from the positioning of sound objects, a virtual acoustic environment can be reconstructed realistically. In this area, the virtual sound sources can be localized stable regardless of the listener position. Due to the high amount of hardware and space requirements, the aim is to reduce the number of speakers. This can lead to unstable virtual sound source positions in setups with a low number of speakers. Especially loudspeaker systems with a small number of speakers are very interesting for sound engineers who work mostly in small spaces such as OB vans of broadcasting or recording studios.

In this master thesis the spatial audio reproduction algorithm developed by Fraunhofer Institute for Digital Media Technology IDMT is analysed to reproduce virtual audio scenes with a small number of speakers. The aim of this work is to investigate the localization accuracy and sound quality for reproducing virtual sound sources on a standard 5.1 speaker system.

For the study of the algorithm, various object-based audio renderers have been implemented and compared. For the evaluation a hearing test with 16 subjects has been performed on a 5.1 surround sound speaker setup which takes installation standard ITU-R BS into account.

Lebenslauf

Claudia Jenny

Bürgerspitalgasse 28/11

A-1060 Wien

Email: a0902964@unet.univie.ac.at

PERSÖNLICHE DATEN

geboren am: 15.04.1989 in Feldkirch

Staatsbürgerschaft: Österreich

AUSBILDUNG

10/2012 -	Universität Wien - MA Musikwissenschaft
10/2010 -	TU Wien - BA Elektrotechnik
10/2009 - 09/2012	Universität Wien - BA Musikwissenschaft
09/1999 - 06/2007	Bundesrealgymnasium Rebberggasse, Feldkirch/Levis
09/1995 - 07/1999	Volksschule Montfort, Rankweil

PRAKTIKA

07/2014 - 08/2014	Bregenzer Festspiele Zauberflöte; Tontechnik
03/2014 -	Fraunhofer IDMT Ilmenau, Deutschland
07/2013 - 08/2013	Bregenzer Festspiele Zauberflöte; Tontechnik
07/2012 - 08/2012	Bregenzer Festspiele André Chénier; Akustik und Multimedia
07/2011 - 09/2011	Bregenzer Festspiele André Chénier; Akustik und Multimedia
07/2010 - 08/2010	Bregenzer Festspiele AIDA; Akustik
08/2007 - 12/2008	Bachmann Elektronik, Feldkirch/Tosters

AUSLANDSERFAHRUNG

08/2012 - 02/2013 Erasmus-Semester in Barcelona, Spanien
01/2009 - 04/2009 Freiwilligenarbeit im Nationalpark Grupo Jaragua, Dom. Rep.
08/2005 - 07/2006 High School Year in New York, USA; AFS Österreich

SPRACHEN

Deutsch: Muttersprache

Englisch: fließend, in Wort und Schrift

Spanisch: sehr gute Kenntnisse

Französisch: gute Kenntnisse

SONSTIGES

PC-/EDV-Kenntnisse: Pro Tools, Logic Pro, Final Cut, Matlab, Python, CATIA

Interessen: Reisen, Musik, Technik

Hobbys: Segeln, Skifahren, Geige und Klavier spielen