

Bachelorarbeit

Sergej Bertram

Entwicklung eines Audio-Algorithmus
zur echtzeitfähigen Berechnung
von Raumimpulsantworten

Sergej Bertram

Entwicklung eines Audio-Algorithmus
zur echtzeitfähigen Berechnung
von Raumimpulsantworten

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Angewandte Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fohl
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel

Abgegeben am 6. Juni 2011

Sergej Bertram

Thema der Bachelorarbeit

Entwicklung eines Audio-Algorithmus zur echtzeitfähigen Berechnung von Raumimpulsantworten

Stichworte

Digitale Audiosignalverarbeitung, 3D-Audio, Entfernungshören, RIR, FIR-Filter

Kurzzusammenfassung

Das menschliche Gehör ist in der Lage, die Entfernung zu einer Schallquelle zu bestimmen. Der Schall trifft nicht nur auf direktem Wege am Ohr ein. Auch der von den Wänden reflektierte Schall wird von den Ohren aufgenommen. Der Gehörsinn bestimmt die Distanz dann anhand der Zeitabstände und der Pegelunterschiede zwischen dem Direktschall und dem reflektierten Schall. Diese Informationen sind in der Raumimpulsantwort (RIR) enthalten. Diese Arbeit beschäftigt sich deshalb mit der Auswertung und Simulation von Raumimpulsantworten.

Sergej Bertram

Title of the paper

Development of an Audio-Algorithm for a realtime capable computation of Room Impulse Responses

Keywords

Digital Audio Signal Processing, 3D audio, Sound localization, RIR, FIR-Filter

Abstract

Human hearing sense is able to determine the distance to a sound source. The sound reaches the ear not just directly. The sound that is reflected by the surfaces of a room is also sensed by the ear. The hearing sense determines the distance to the sound source by the time differences and level differences between the direct and the reflected sound. The room impulse response (RIR) contains this information. Therefore this thesis is focused on the analysis and simulation of room impulse responses.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meines Studiums und der Erstellung dieser Arbeit begleitet haben.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fohl für die moralische und fachliche Unterstützung während meiner Bachelor-Thesis. Er war stets in der Lage, meine Zweifel an meiner Arbeit zu beseitigen und mich psychisch aufzubauen. Außerdem danke ich ihm für die Durchsicht dieser Arbeit.

Zusätzlich möchte ich mich bei allen meinen Freunden, Verwandten und Kommilitonen bedanken, die auch in schwierigen Zeiten für mich da waren und zum Teil auch als Testpersonen in dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Vor allem möchte ich mich aber bei meiner Mutter, Tatjana Bertram, und meiner Exfreundin, Anna Stepanov, dafür bedanken, dass sie mich immer moralisch unterstützten und stets an mich geglaubt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	- 1 -
2	Distanzerkennung des menschlichen Gehörs	- 3 -
2.1	Schallintensität	- 3 -
2.2	Spektrum	- 4 -
2.3	Verhältnis vom direkten zum reflektierten Schall	- 5 -
2.4	Binaurales Hören	- 7 -
2.5	Erfahrung	- 8 -
3	Raumimpulsantworten	- 9 -
3.1	Messung	- 10 -
3.2	Analyse	- 11 -
3.2.1	Länge der Raumimpulsantwort	- 13 -
3.2.2	Direktschall und Frühe Reflexionen	- 14 -
3.2.3	Hallfahne	- 15 -
4	Synthese der Raumimpulsantwort	- 18 -
4.1	Frühe Reflexionen	- 18 -
4.1.1	Berechnung der frühen Reflexionen	- 18 -
4.1.2	Stereofonie	- 22 -
4.1.3	Interpolation	- 23 -
4.2	Hallfahne	- 25 -
4.3	Künstliche Raumimpulsantwort	- 28 -
5	Test	- 29 -
5.1	Testaufbau und Durchführung	- 29 -
5.2	Testauswertung	- 31 -
6	Ausblick	- 39 -
	Literaturverzeichnis	- 40 -
	Abbildungsverzeichnis	- 42 -
	Tabellenverzeichnis	- 44 -
	Appendix	- 45 -

1 Einleitung

Seit einigen Jahren wird zunehmend 3D-Video entwickelt. Inzwischen gibt es das 3D-Video-Erlebnis nicht nur im Kino, sondern auch zu Hause auf dem Fernseher oder auf portablen Geräten wie dem NINTENDO 3DS. Die 3D-Audio-Entwicklung hinkt dem leider etwas hinterher. Aber durch das Erleben von 3D-Video wächst zunehmend der Wunsch auch den wiedergegebenen Schall in 3D zu hören, um ein noch realer wirkendes 3D zu erleben. Mit 3D-Sound lässt sich gar eine virtuelle Realität erzeugen, die den Menschen in eine von der Realität kaum unterscheidbare Welt eintauchen lässt, da es dem Menschen damit möglich wäre, die simulierte Welt nicht nur zu sehen, sondern gar zu spüren. Somit hat 3D-Audio unter anderem im Unterhaltungssektor sehr viel Potenzial.

Stellen Sie sich vor, Sie setzten sich eine Brille auf, die virtuelle Gegenstände und Subjekte auf den realen Raum projiziert. Zusätzlich setzten Sie sich Kopfhörer auf, die Ihnen durch die realitätsnahe Simulation des von den virtuellen Gegenständen und Subjekten erzeugten Schalls tatsächlich vermitteln, dass Sie in diesem Raum nicht mehr alleine sind. Beispielsweise ist das laute Atmen eines großen Monsters zu hören. So gut wie in der Realität spüren Sie dann, wie weit das Monster sich noch von Ihnen befindet und aus welcher Richtung es auf Sie zuläuft ohne es überhaupt schon gesehen zu haben. Oder Sie tauchen in eine vollständig virtuelle Welt ein und bekommen dann durch den von den Kopfhörern simulierten Schall einen solch realen Eindruck von dem Raum in dem Sie sich angeblich befinden, dass sich selbst Blinde problemlos in diesem Raum orientieren könnten.

Diese Arbeit befasst sich mit der Erarbeitung eines Algorithmus, der es ermöglichen soll, einen solchen Raumeindruck und die Distanz zu den virtuellen Objekten zu simulieren. Einige vorhergehende Arbeiten im Rahmen des Projektes des 3D-Audio-Systems von Professor Dr.-Ing. Wolfgang Fohl beschäftigten sich bereits mit der Simulation der Richtung von virtuellen Schallquellen. Diese Arbeit befasst sich mit der Erweiterung der bereits implementierten Richtungssimulation um die Simulation der Distanz zu einer virtuellen Schallquelle.

Obwohl sich die Wissenschaft schon länger damit beschäftigt, ist noch nicht eindeutig untersucht, auf welche Weise das menschliche Gehör die Distanz zu einer Schallquelle erkennt. Viele auch aktuelle Untersuchungen versuchen die dafür verantwortlichen Faktoren

einzugrenzen. Jedoch scheint es selbst dann noch schwierig genug zu sein, da es immer noch kaum Produkte auf dem Markt gibt, die 3D-Audio bereitstellen, während 3D-Video langsam zum Selbstverständnis wird. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den vermutlich für die Distanzerkennung des menschlichen Gehörs verantwortlichen Faktoren. Aus den daraus resultierenden Schlussfolgerungen und Vermutungen wird ein Algorithmus zur Berechnung von künstlichen Raumimpulsantworten entwickelt. Diese Raumimpulsantworten bilden einen Filter, mit dessen Hilfe Audioaufnahmen bearbeitet werden und Hörern über Kopfhörer präsentiert werden.

Für Distanzen unter einem Meter zwischen Schallquelle und Zuhörer tragen andere Faktoren zur menschlichen Distanzerkennung bei, als es bei Abständen über einem Meter der Fall ist. Diese Faktoren sind größtenteils keine Bestandteile der Raumimpulsantwort. Deshalb widmet sich diese Thesis ausschließlich den Distanzen von über einem Meter zwischen Schallquelle und Zuhörer.

Zum Verstehen dieser Arbeit ist es hilfreich, Kenntnisse über die Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung und der Modellierung von digitalen Filtern zu besitzen. Außerdem ist es von Vorteil, sich in die Grundlagen von Schall und Akustik hineinzuarbeiten. Dazu sind unter anderem einige in dieser Arbeit angegebenen Quellen geeignet.

2 Distanzerkennung des menschlichen Gehörs

Dieses Kapitel behandelt die für das menschliche Gehör, nach den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, wichtigen Eigenschaften des Schalls und des menschlichen Körpers zur Distanzerkennung zu einer Schallquelle. Außer der in Kapitel 2.1 bis Kapitel 2.4 aufgeführten Eigenschaften des Schalls, sind nicht zuletzt auch Erfahrungswerte und visuelle Eindrücke des Menschen von großer Bedeutung für die Distanzerkennung. Da sich diese Arbeit ausschließlich mit der akustischen Simulation des Zuhörers beschäftigt, können in diesem Fall zumindest die Erfahrungswerte des Zuhörers eine Rolle im Entfernungsempfinden einnehmen. Kapitel 2.5 widmet sich daher diesem Thema.

2.1 Schallintensität

In der Regel nimmt ein Mensch die Lautstärke eines Geräusches mit wachsendem Abstand zur Schallquelle als leiser wahr bzw. mit kleiner werdendem Abstand als lauter. Dafür ist u.a. der vom menschlichen Ohr wahrgenommene Schalldruckpegel L_p verantwortlich.

Unter idealen Bedingungen lässt sich die Abnahme der Schallfeldgröße Schalldruckpegel im Verhältnis zur Distanzzunahme zur Schallquelle anhand des reziproken Abstandsgesetzes vorhersagen:

$$p \propto 1/r$$

Dabei stellt r den Abstand zur Schallquelle und p den Schalldruck dar [9]. Die Schallintensität ist der Teil der Schalleistung einer Schallquelle, der den Empfänger erreicht. Sie gibt die pro Zeit durch eine Fläche hindurchtretende Schallenergie an [15]. Die Schallenergiegröße Schallintensität (I) und die Schallfeldgröße Schalldruck stehen im folgenden Verhältnis:

$$I \propto p^2$$

Dadurch lässt sich für die Schallenergiegröße Schallintensität das reziproke Quadratgesetz (das quadratische Abstandsgesetz) herleiten:

$$I \propto 1/r^2$$

Bei Entfernungsverdoppelung fallen die Werte also bei dem Schalldruck auf die Hälfte bzw. bei der Schallintensität auf ein Viertel des Anfangswertes. Für die Änderung des Schalldruckpegels in dB gilt allgemein:

$$\Delta L = 10 * \log \frac{r_2^2}{r_1^2} = 20 * \log \frac{r_2}{r_1}$$

Dieses entspricht einer Abnahme des Schalldruckpegels von 6 dB pro Abstandsverdoppelung [10]. Einen Unterschied von 10 dB nimmt ein Mensch etwa als doppelt bzw. halb so laut wahr.

Jedoch funktioniert das Abstandsgesetz nur im freien Feld bzw. zeigt Abweichungen vom Abstandsgesetz in Schall reflektierender Umgebung und in einer Entfernung von wenigen Wellenlängen von der Schallquelle. Außerdem kann die Änderung der akustischen Stärke einer Schallquelle ebenfalls zur Zerstörung des Schallintensität-Distanzverhältnisses führen. Dennoch kann die Schallintensität, wie viele Studien gezeigt haben, ein wichtiger Faktor bei der Distanzerkennung des menschlichen Gehörs sein [18]. Jedoch unterscheidet das menschliche Gehör, ob sich die Lautstärke eines Geräusches auf Grund von Distanzveränderung zur Schallquelle oder der Verstärkung der Schallquelle selbst ändert, womit sich die Distanzsimulation wohl schwieriger gestalten lässt, als nur durch das Modifizieren der Lautstärke des Geräusches [18]. Dass die Lautstärke des Geräusches dennoch der simulierten Distanz der Schallquelle entsprechen sollte, versteht sich von selbst.

2.2 Spektrum

Ab einer Distanz von etwa 15 Metern nimmt die Absorption durch die Luft signifikanten Einfluss auf das Spektrum des Schalls [1]. Besonders betroffen sind von dieser Absorption die hohen Frequenzbereiche. Je höher eine Frequenz ist, desto stärker wird diese absorbiert [18]. Dieser Effekt wird Dissipation genannt. Abbildung 1 zeigt die Wirkung der Dissipation bei einer vom Schall zurückgelegten Distanz von 30 m bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit.

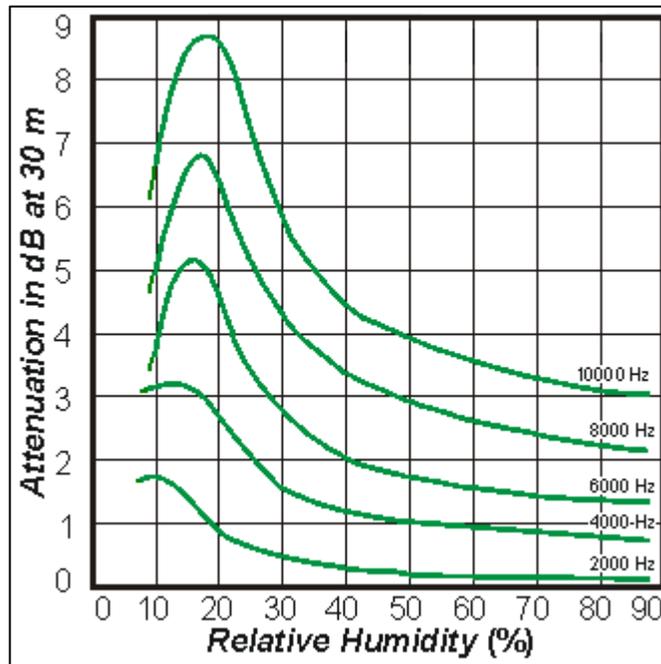


Abbildung 1: Frequenzabhängige Luftdämpfung (dB) in 30 m Abstand bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit (Prozent) [11]

Die Dissipation führt dazu, dass tiefe Frequenzen noch aus mehreren Kilometern Entfernung wahrgenommen werden, während hohe Frequenzen schon aus einigen Hundert Metern nicht mehr empfangen werden können, weshalb z. B. fernes Donnern oder ferne Musikkapellen dumpf klingen [1]. Doch ist dieser Effekt mit drei bis vier dB pro Hundert Meter bei vier kHz relativ schwach [18] und scheint daher für das Ziel dieser Arbeit, die Simulation innerhalb von Räumen in Wohnzimmergröße vorzubereiten, vernachlässigbar zu sein.

2.3 Verhältnis vom direkten zum reflektierten Schall

In Umgebungen mit Schall reflektierenden Flächen entstehen Echos bzw. frühe Reflexionen und Nachhall.

Von einer Schallquelle ausgesandter Schall wird von Flächen in Abhängigkeit ihrer Beschaffenheit reflektiert. Glatte, harte Flächen werfen den Schall ähnlich zurück, wie ein Spiegel das Licht. Dabei ist der Einfallswinkel einer Reflexion gleich dem Ausfallswinkel [3]. Ist die Fläche aber rau, wird der Schall diffus zurückgeworfen. Weiche Materialien absorbieren Schall stärker als harte. Deshalb lässt sich in großen Räumen ohne Absorpti-

onsflächen, wie etwa Kirchen, Schwimmhallen oder großen Höhlen, der Nachhall gut beobachten.

Nachhall entsteht als Folge wiederholter Schallreflexionen, die mit der Zeit, zum einen durch den Luftwiderstand (siehe Dissipation) und zum anderen durch die beschaffenheitsabhängige Absorptionsstärke der Reflexionsflächen, schwächer werden. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen beispielhaft, wie sich der gesamte Hall nach einem Schallereignis aufbaut.

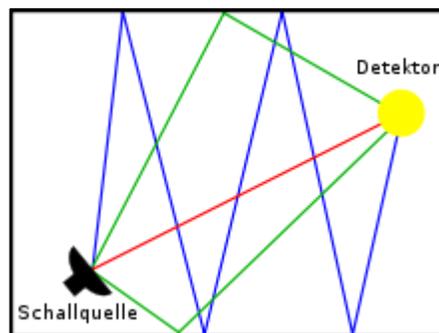


Abbildung 2: Darstellung des Zustandekommens der verschiedenen Halltypen. – rot: Direktschall; grün: frühe Reflexionen (Raumschall); blau: Nachhall [16]

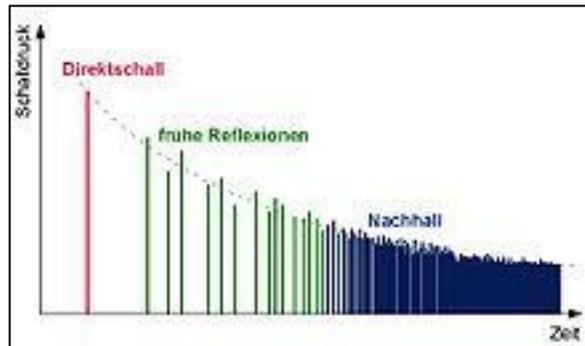


Abbildung 3: Beispiel einer Raumimpulsantwort [16]

Daher entsteht ein Verhältnis zwischen der Schallenergie, die den Zuhörer auf direktem Wege erfasst und der Schallenergie, die erst über eine oder mehrere reflektierende Flächen auf den Zuhörer trifft.

Dieses Verhältnis lässt sich anhand des quadratischen Abstandsgesetzes, das bereits in Kapitel 2.1 behandelt wurde, erklären: Je größer der relative Längenunterschied zwischen

der Strecke, die der reflektierte Schall und der direkte Schall zurückgelegt haben, desto größer ist auch der relative Unterschied des Schalldruckpegels (L_p) bzw. der Schallintensität (I) zwischen dem reflektierten Schall und dem Direktschall und umgekehrt.

Überdies ist auch der Zeitunterschied zwischen dem Eintreffen des Direktschalls und dem ersten Echo, die so genannte Anfangszeitlücke (ITDG = Initial Time Delay Gap), gut in Abbildung 3 zu erkennen, für die Distanzerkennung und den Raumeindruck bedeutend. Allgemein ist die Anfangszeitlücke in kleinen Räumen kurz, und somit auch der Pegel der frühen Reflexionen verhältnismäßig hoch. In großen Sälen verhält sich das umgekehrt. Doch genau genommen ist die Anfangszeitlücke von der Entfernung des Zuhörers zur Schallquelle abhängig. Je weiter sich der Zuhörer von der Schallquelle befindet, desto geringer ist der relative Distanzunterschied, und somit die absolute Zeitdifferenz zwischen dem Direktschall und den frühen Echos und umgekehrt. Eine längere Anfangszeitlücke ergibt den Eindruck, dass sich die Schallquelle in der Nähe befindet. Wohingegen eine kürzere Anfangszeitlücke den Eindruck vermittelt, dass sich die Schallquelle weit entfernt befindet [12].

Untersuchungen zeigten, dass dieses Verhalten von Schall in großem Maße zur Distanzerkennung des menschlichen Gehörs beiträgt [6,13]. Es wurde in empirischen Versuchen festgestellt, dass Menschen die Entfernung einer Schallquelle innerhalb eines hallenden Raumes deutlich genauer schätzten, als in einer anechoischen Umgebung. Außerdem wurde festgestellt, dass diese Eigenschaft unter nahezu allen Bedingungen eine Verbesserung der Distanzerkennung ermöglicht. Alleine Schallereignisse ohne tiefe Frequenzen können hier Probleme bereiten [6]. Es liegt daher nahe, dass dies die wichtigste Eigenschaft zur Distanzerkennung ist.

2.4 Binaurales Hören

Durch den Rumpf, den Kopf und die Außenohren (Pinna) eines Menschen erfährt der Schall eine Filterung, bevor er in den Gehörgang eintritt. Diesen Filterprozess beschreiben die so genannten kopfbezogenen Übertragungsfunktionen (engl.: Head Related Transfer Function (HRTF)) [2]. Jeder Mensch hat seine individuellen HRTFs, da jeder Mensch einen individuellen Körperbau und eine individuelle Form der Außenohren besitzt. Der von einer seitlich zum Zuhörer befindlichen Schallquelle ausgesandte Schall kommt beim weiter entfernten Ohr später und schwächer an, als beim sich näher befindlichen

Ohr. Dies führt zur Laufzeitdifferenz (engl.: Interaural Time Difference (ITD)) und zur Pegeldifferenz (engl.: Interaural Level Difference (ILD)), die von dem jeweiligen Winkel des Zuhörers zur Schallquelle abhängen. Diese Informationen sind Bestandteil der HRTF und stellen einen großen Nutzen zur Richtungserkennung dar.

Mehrere theoretische Studien legten nahe, dass Menschen in der Lage sein könnten, die Laufzeitdifferenz und die Pegeldifferenz auch zur Distanzerkennung zu nutzen. Jedoch ist zweifelhaft, ob dies auch für große Distanzen zwischen Schallquelle und Zuhörer möglich ist, da die Laufzeitdifferenz und die Pegeldifferenz ab einer Distanz von über einem Meter nahezu unabhängig von der Distanz sind [18].

Während das binaurale Hören also in der Richtungserkennung eine wesentliche Rolle spielt, scheint es für die Entfernungserkennung nur unter einer Distanz von weniger als einem Meter zur Schallquelle eine Bedeutung zu haben [18]. Es ist erst dann wirklich hilfreich, wenn der Raum anechoischen Charakters ist, wo das menschliche Gehör keine reverberante Information erhalten kann, und die Schallquelle sehr nah ist. Aber auch in reflektierenden Räumen scheint das binaurale Hören die Distanzschätzung zumindest zu verfeinern [6]. Daher sollte das binaurale Hören zumindest für Schallereignisse aus geringsten Distanzen zu einem natürlicheren Höreindruck führen.

2.5 Erfahrung

Ein Zuhörer schätzt die Distanz eines völlig unbekanntes Geräusches in einer unvertrauten Umgebung deutlich schlechter ein, als bei einer ihm vertrauten Umgebung und eines bekannten Geräusches. Jedoch verbessert sich die Fähigkeit der Distanzeinschätzung mit jedem weiterem Hören dieses Geräusches unter diesen Bedingungen aus verschiedenen Distanzen. Das menschliche Gehör ist also trainierbar [18]. Oder andersherum, schätzt das menschliche Gehör die Distanz bei einem ihm bekannten Geräusch deutlich besser ein. Was nahelegt bei Simulationen den Versuchspersonen bekannte Alltagsgeräusche, wie z.B. Sprache [18], anzuwenden. Es ist aber auch möglich, dass die Zuhörer sich an neue Umgebungen adaptieren. So haben verschiedene Experimente auch gezeigt, dass Menschen während der Durchführung der Versuche angefangen haben die Distanzen selbst in künstlichen, durch Kopfhörer simulierten, Räumen besser einzuschätzen [6]. Distanzerkennung ist also auch ein Lernprozess für das menschliche Gehör und sollte zumindest bei dem Testen der Simulation berücksichtigt werden.

3 Raumimpulsantworten

Wird ein Raum mit einem infinitesimal kurzen Impuls (Dirac-Stoß) beschallt und der daraus resultierende Schall aufgenommen, so wird als Antwortsignal die Impulsantwort (siehe Abbildung 3) dieses Raumes empfangen. Die Abbildung 4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau zur Messung einer Impulsantwort.

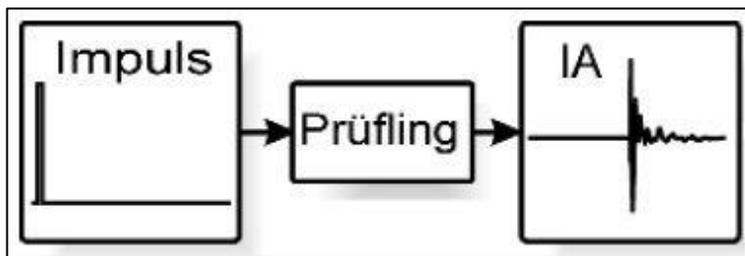


Abbildung 4: Grundsätzlicher Aufbau zur Messung der Impulsantwort [7]

Da das Erzeugen eines Dirac-Stoßes real nicht möglich ist, wird die Raumimpulsantwort aus dem Antwortsignal auf weißes Rauschen durch die Kreuzkorrelation zwischen dem Anregungssignal (weißes Rauschen) und dem Antwortsignal gewonnen [8].

Die Impulsantwort eines Systems (in diesem Fall ein Raum) lässt auch auf die Veränderungen des ursprünglichen Signals durch das System und damit auf die Übertragungsfunktion schließen.

Ist die Impulsantwort des Raumes bekannt, so ist es möglich z. B. mit Hilfe der mathematischen Faltung vorzuberechnen, wie sich ein beliebiges Schallereignis, in diesen Raum ausgestrahlt, anhören bzw. aussehen würde. Die Hörperspektive entspricht dabei der Mikrofonposition bei der Aufnahme der Impulsantwort.

Um eine gute Simulation eines Raumes zu erreichen, wird ein Raum so beschallt, dass, so gut es möglich ist, der gesamte Raum und damit die meisten seiner Einflüsse in die Raumimpulsantwort eingehen. Dazu ist es notwendig, die optimale Position für das Aufnahmegerät und die Signalquelle zu finden.

Die Absicht dieser Arbeit ist es nun gerade die Unterschiede der Impulsantworten in Abhängigkeit von den verschiedenen Positionen der Schallquelle und des Aufnahmegerätes

zu untersuchen. Da die Impulsantworten auf die Information schließen lassen, wie sich der Hall aufbaut, ist es möglich daraus rückzuschließen, wie sich der Hall abhängig von den Positionen verhält, um daraus letztendlich auf die nötigen Parameter in der Übertragungsfunktion zu gelangen. Wünschenswert wäre es dann, wenn mit diesen Übertragungsfunktionen nicht nur den Raumeindruck simuliert werden könnte, wie dies u.a. in der Musikindustrie durch Faltung eines Klanges mit der Raumimpulsantwort schon seit Langem gängige Praxis ist, sondern mit den Parametern auch die einzelnen Geräusche mit den jeweils erwünschten Distanzinformationen versetzen könnte.

3.1 Messung

Um Raumimpulsantworten zu messen, ist es möglich sich unterschiedlicher kompletter Messsysteme zu bedienen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Messung von Raumimpulsantworten das Messsystem MLSSA (Maximum-Length Sequence System Analyser) benutzt, welches zum Zweck der Messung aus dem Tonlabor der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg entliehen wurde. Abbildung 5 zeigt den Aufbau der Messung.

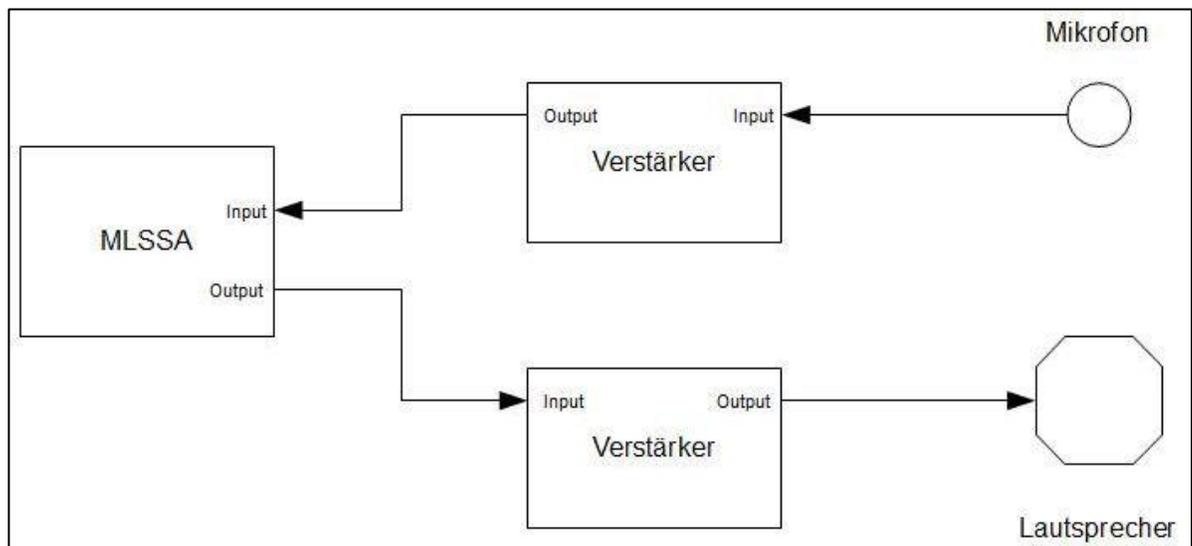


Abbildung 5: Aufbau des Messsystems

Die Messung fand in einem durchschnittlich ausgestatteten Lehrraum der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg statt. Abbildung 6 ist eine Fotoaufnahme des Raumes, in dem die Raumimpulsantworten aufgenommen wurden. Außerdem sind auf der

Fotoaufnahme mittig im Raum ein Lautsprecher in Form eines Dodekaeders und ein Mikrofon zu erkennen. Diese gehören zur Messausrüstung für die Raumimpulsantworten.



Abbildung 6: Aufnahmeaum der Impulsantworten

Es wurden Raumimpulsantworten aus unterschiedlichen Positionen der Schallquelle, also des Lautsprechers in Form eines Dodekaeders und des Mikrofons aufgenommen. Dazu wurden der Lautsprecher und das Mikrofon an unterschiedliche Positionen im Raum und in Abständen von einem, zwei, drei oder vier Metern zueinander aufgestellt. Der Lautsprecher und das Mikrofon standen stets etwa auf einer Höhe von 1,60 Meter.

3.2 Analyse

Die Messung der Raumimpulsantworten ist hilfreich, um die Entstehung der Raumimpulsantwort innerhalb des zu simulierenden Raumes zu verfolgen und notwendig, um die synthetische Raumimpulsantwort damit vergleichen zu können.

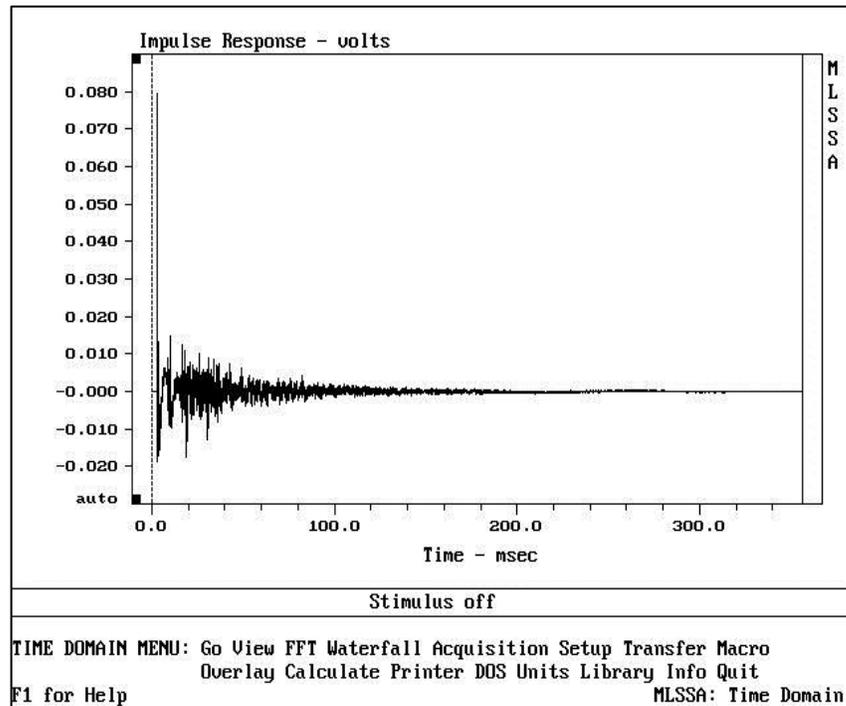


Abbildung 7: Eine mit dem MLSSA-System gemessene Raumimpulsantwort für einen Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle

Deshalb wurden zunächst die gemessenen Raumimpulsantworten optisch auf ihren Verlauf verglichen, um die Auswirkungen der Distanzen zwischen dem Messmikrofon und der Schallquelle auf die Raumimpulsantwort zu untersuchen. Eine der dazu verwendeten Raumimpulsantworten zeigt die Abbildung 7. Diese Abbildung ist vom MLSSA-System erstellt worden. Es sind dort der charakteristische erste Peak des Direktschalls, einige frühe Reflexionen und der Nachhall zu erkennen. Bei dieser Abbildung ist die Analyse aber problematisch, wenn z. B. die Abstände zwischen den einzelnen frühen Reflexionen untersucht werden sollen. Daher wurden die Messwerte der Raumimpulsantworten in das Programm MATLAB geladen und damit geplottet. Die in MATLAB erstellte Abbildung 8 zeigt die gleiche Raumimpulsantwort wie die Abbildung 7.

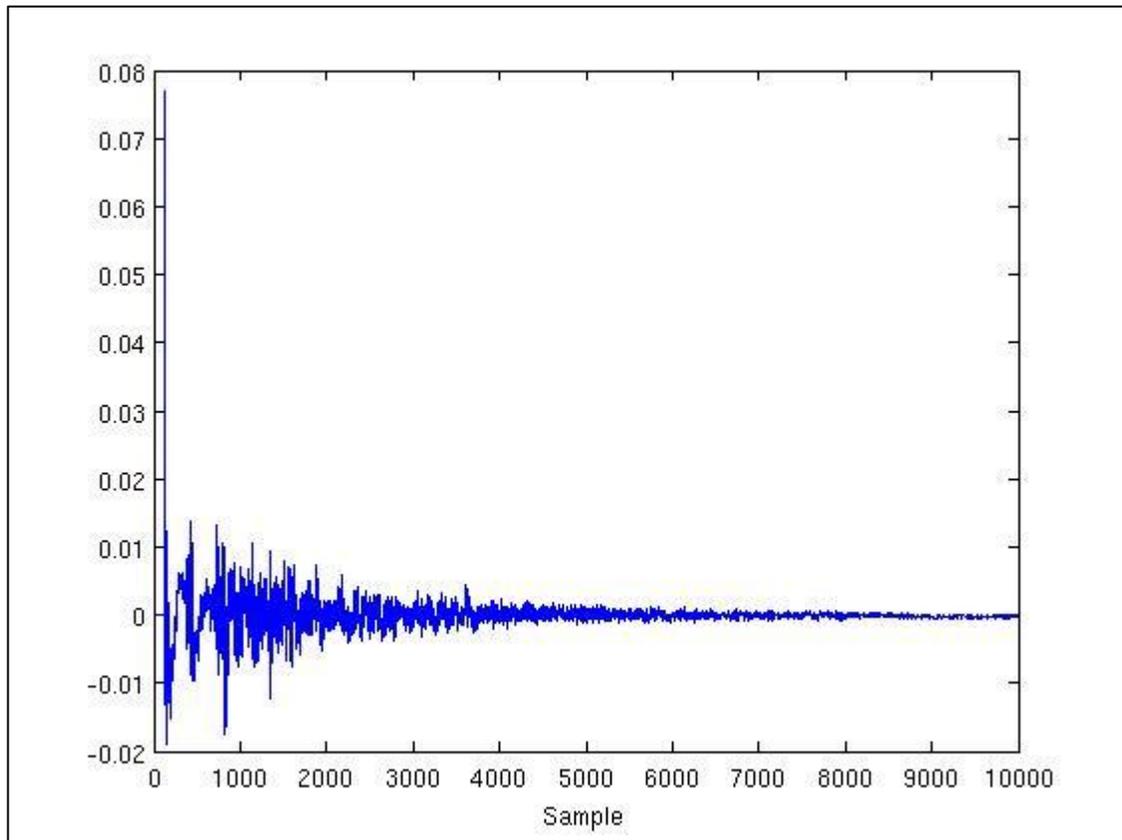


Abbildung 8: Eine mit dem MLSSA-System gemessene und in MATLAB geladene Raumimpulsantwort für einen Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle

3.2.1 Länge der Raumimpulsantwort

Es werden nur die ersten 10000 Samples der gemessenen Raumimpulsantworten berücksichtigt, da, wie in Abbildung 7 schon zu erkennen ist, die Schallenergie schon bei ca. 200 Millisekunden vollständig abnimmt. Das entspricht bei einer Sampling-Frequenz von 44100 Hz etwa den ersten 226,757 Millisekunden der jeweiligen Raumimpulsantwort.

Da bei allen gemessenen Raumimpulsantworten nach diesem Zeitpunkt keine wesentliche Schallenergie aufgezeichnet ist, ist entschieden worden, die Raumimpulsantworten an diesem Punkt abzuschneiden und die künstlichen Raumimpulsantworten von einer Länge von 10000 Samples zu erstellen.

Die restlichen Samples haben kaum eine Relevanz und würden nur den Rechenaufwand während der Analyse und der Entwicklung und Anwendung des Algorithmus zur Berech-

nung von synthetischen Raumimpulsantworten wesentlich erhöhen. Dies fällt vor allem bei der Faltung der Raumimpulsantworten mit Geräuschaufnahmen deutlich ins Gewicht.

3.2.2 Direktschall und Frühe Reflexionen

Im zweiten Schritt sind die Amplituden des Direktschalls und der frühen Reflexionen unter Berücksichtigung der Abstände zu den Wänden des Raumes untersucht worden.

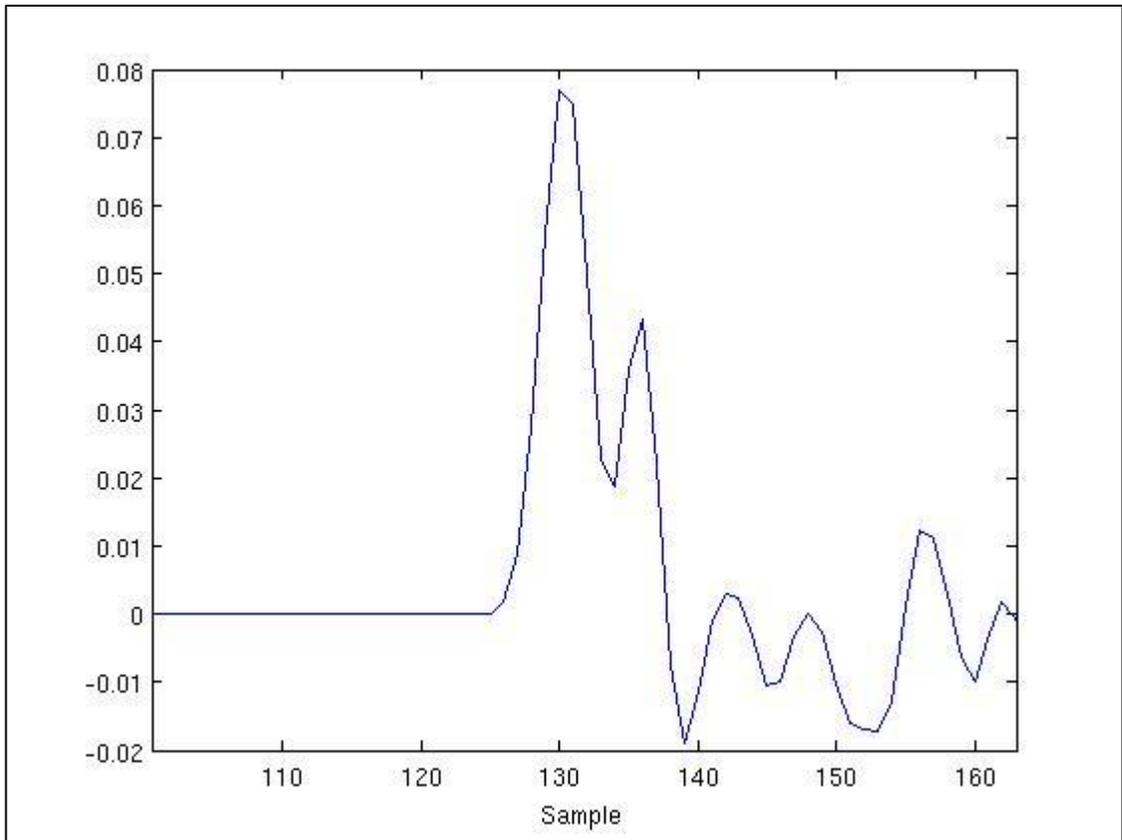


Abbildung 9: Direktschall bei einem Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle

Es ist die jeweilige Strecke, die der Schall von der Schallquelle bis zum Mikrofon zurückzulegen hatte, berechnet, und die benötigte Zeit anhand der Schallgeschwindigkeit bestimmt worden (siehe dazu Kapitel 4.1.1). Diese Zeitpunkte ließen sich dann in etwa in den Amplituden des Direktschalls und der frühen Reflexionen wiederfinden. Auf diese Weise konnte die jeweilige Reflexion zu einer bestimmten Reflexionsfläche bzw. Wand des gemessenen Raumes zugeordnet werden. Die Untersuchung des Direktschalls, die in Abbildung 9 zu sehen ist, ist das einfachste Beispiel dafür, da die zurückzulegende Stre-

cke bereits bekannt ist. In diesem Fall beträgt die Strecke einen Meter, wofür der Schall bei einer Schallgeschwindigkeit von 340 m/s ca. 2,941 Millisekunden benötigt. Mit

$$t * f = \text{Sample}$$

ergibt das bei einer Sampling-Frequenz f von 44100 Hz ungefähr das Sample 130, was genau auf die Amplitude des Direktschalls in Abbildung 9 passt.

Auch die Anwendung des reziproken Abstandsgesetzes (siehe Kapitel 2.1) auf die berechneten Strecken und der darauffolgende Vergleich mit den Amplitudenwerten des Direktschalls und der frühen Reflexionen führte zu einer ungefähren Übereinstimmung. Die relativen Unterschiede zwischen den Amplituden spiegeln das reziproke Abstandsgesetz ungefähr wider.

Diese beiden Erkenntnisse haben großen Einfluss auf die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Berechnung der frühen Reflexionen.

3.2.3 Hallfahne

Im Anschluss wurde untersucht, ob die Hallfahne sich von Raumimpulsantwort zu Raumimpulsantwort wesentlich unterscheidet. Unterscheidet sich die Hallfahne nicht sonderlich, kann sie zur Vereinfachung des Algorithmus zur Berechnung der Raumimpulsantworten konstant bleiben und muss dann nicht für jede Raumimpulsantwort neu berechnet werden. Dazu ist es aber zunächst einmal wichtig festzustellen, wann die frühen Reflexionen enden, und die Hallfahne beginnt. Die Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen Ausschnitte von zwei gemessenen Raumimpulsantworten mit einigen identifizierten frühen Reflexionen des ersten Grades und dem Direktschall.

Sowohl in Abbildung 10 als auch in Abbildung 11 ist erkennbar, dass der Wert der Amplitude der Reflexion von der Decke deutlich kleiner ist als der des Bodens, obwohl diese früher eintrifft. Dies liegt an der gelochten Oberfläche der Decke des Raumes in dem die Messung durchgeführt worden ist, sodass nur ein kleiner Teil der Schallenergie reflektiert wird. Der restliche Schall gelangt in einen Hohlraum, der sich dahinter befindet.

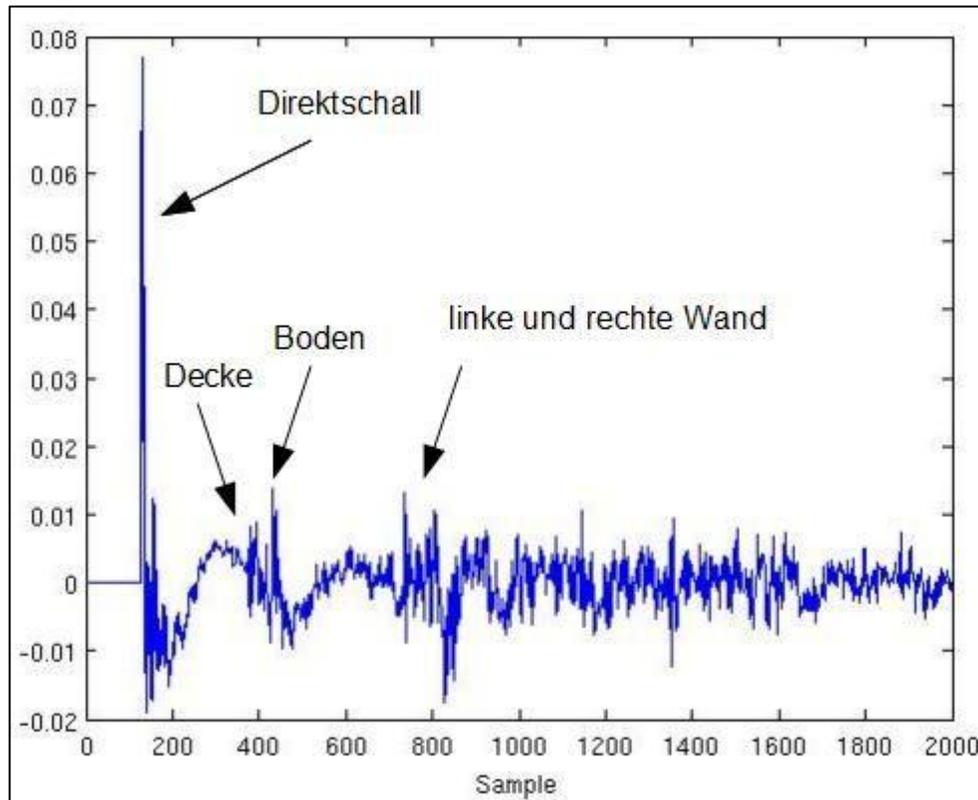


Abbildung 10: Identifizierung der frühen Reflexionen für einen Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle

Während sich in der Raumimpulsantwort für einen Meter Abstand zwischen Schallquelle und Messmikrofon die einzelnen frühen Reflexionen noch mit bloßem Auge erkennen lassen, gelingt das bei der Raumimpulsantwort für drei Meter Abstand nur noch mit einem Vergleich der berechneten Zeitpunkte (siehe dazu Kapiteln 3.2.2 und 4.1.1).

Je später die Reflexionen am Messmikrofon eintreffen, desto schwieriger wird es diese zu identifizieren, da sich immer mehr Reflexionen in die Raumimpulsantwort mischen und so die Hallfahne bilden. Zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. nach dem Zurücklegen einer bestimmten Strecke wird die Schallenergie einer Reflexion unter anderem auf Grund des reziproken Abstandsgesetzes (siehe dazu Kapitel 2.1) so schwach, dass der Wert der Amplitude dieser Reflexion sich nicht von den sie umgebenden Werten abhebt. Dieser Zeitpunkt wurde in dieser Arbeit als Anfang der Hallfahne gewählt. Die einzelne Reflexion spielt ab diesem Zeitpunkt keine Rolle mehr, da sie in der Hallfahne verschwimmt. In dem im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Raum tritt dieser Zeitpunkt in etwa bei Sample 900 bzw. bei ca. 20,408 Millisekunden ein.

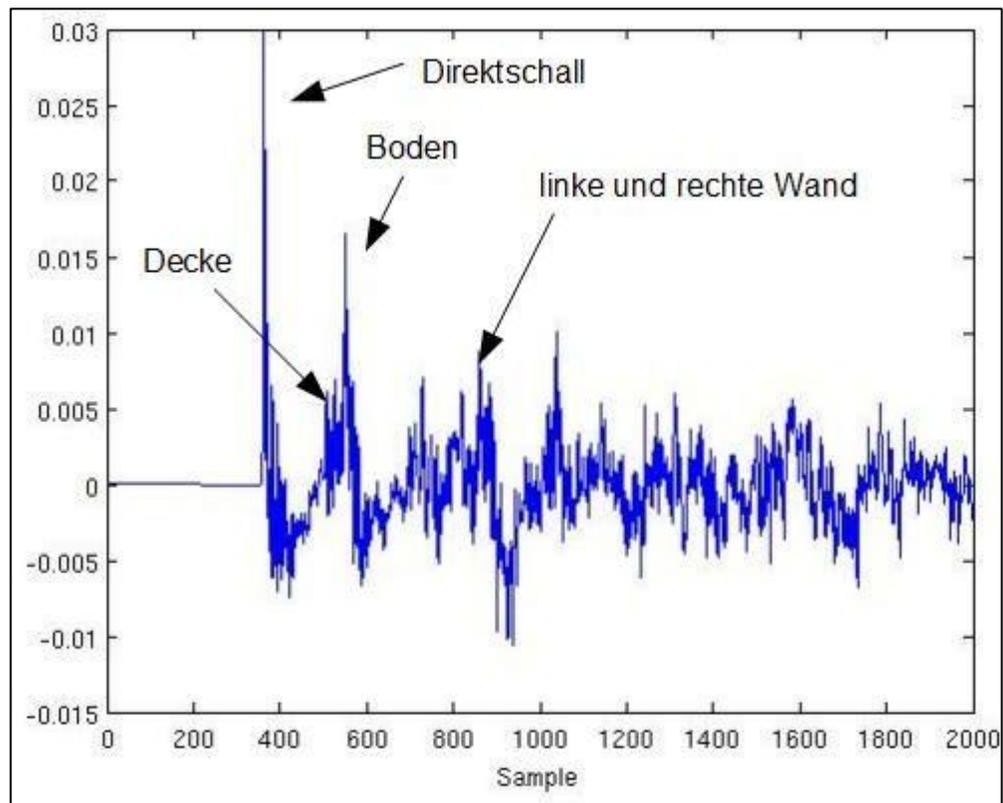


Abbildung 11: Identifizierung der frühen Reflexionen für drei Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle

Ab Sample 900 sieht der Verlauf der Raumimpulsantwort bei allen gemessenen Raumimpulsantworten ähnlich aus. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb eine gemeinsame Hallfahne für alle künstlich erstellten Raumimpulsantworten generiert. Dadurch sollen der Algorithmus zur Berechnung der Raumimpulsantworten deutlich vereinfacht und dennoch zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

4 Synthese der Raumimpulsantwort

Dieses Kapitel beschreibt das System für das Erstellen der künstlichen Raumimpulsantworten, welches mithilfe der Daten und Erkenntnisse aus der Analyse (siehe Kapitel 3.2) der natürlichen Raumimpulsantworten entwickelt wurde. Das System ist vollständig in MATLAB implementiert und besteht aus mehreren digitalen Filtern.

Die Entwicklung der künstlichen Raumimpulsantworten ist in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt, der in Kapitel 4.1 beschrieben ist, wird die Erstellung der frühen Reflexionen behandelt. Der zweite Teil, dem sich Kapitel 4.2 widmet, beschreibt die Synthese der Hallfahne.

4.1 Frühe Reflexionen

Die Raumimpulsantworten sind von den Positionen der Schallquelle und des Mikrofons bzw. Zuhörers abhängig. Zur Simulation der Distanz ist es deshalb notwendig, einen Algorithmus zu entwickeln, der in der Lage ist, die frühen Reflexionen für jede Position der Schallquelle und des Zuhörers in der Ebene zu berechnen. Es werden nur der Direktschall und die Reflexionen des ersten Grades, also Schall, der nur einmal reflektiert worden ist, berechnet, da der Rechenaufwand für weitere Reflexionen deutlich steigen würde und diese eh durch die Hallfahne verschluckt werden und daher unwesentlich oder gar nicht zur Distanzerkennung beitragen.

4.1.1 Berechnung der frühen Reflexionen

In der Nähe der üblichen Raumtemperatur ist die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c annähernd linear, und es gilt näherungsweise

$$c \approx 331,6 + 0,6 * \theta$$

mit der Schallgeschwindigkeit in ms^{-1} und der Temperatur θ in $^{\circ}\text{C}$, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% [15]. Somit lässt sich das Eintreffen der frühen Reflexionen auf einen Zuhörer mit Hilfe der bekannten Schallgeschwindigkeit in Luft von etwa 343 m/s bei normalen Raumbedingungen berechnen.

Wenn nun die vom Schall zurückzulegende Distanz d bekannt ist, lässt sich die dafür benötigte Zeit t mit

$$t = \frac{d}{c}$$

und damit das entsprechende Sample s in der Raumimpulsantwort mit der Samplingfrequenz f durch

$$s = t * f$$

bestimmen.

Der Wert der Amplitude der eintreffenden Schallwelle ist dann größtenteils von der zurückgelegten Strecke (siehe Kapitel 2.1 zum reziproken Abstandsgesetz) und von der Absorptionsstärke des Materials an der reflektierenden Fläche abhängig. Da die Messungen der Raumimpulsantworten in einem relativ schwach gedämpften Raum gemessen wurden, hat die Beschaffenheit der reflektierenden Flächen kaum einen Einfluss auf die frühen Reflexionen, sodass dies auch nicht in die Berechnung der künstlichen Reflexionen einfließt. Der Amplitudenwert $Ampl$ wird daher einfach mit

$$Ampl = \frac{p}{d}$$

berechnet. Hierbei ist p ein beliebiger konstanter Referenzwert, der für den Direktschall und die Reflexionen einschließlich der Hallfahne gilt, da er der Berechnung der relativen Pegelunterschiede dient.

Sowohl für die Berechnung des Eintreffens der Reflexionen, als auch für deren Amplituden wird die Länge der Strecke benötigt, die der Schall von der Schallquelle bis zum Zuhörer zurückzulegen hat. Die Länge lässt sich durch geometrische Berechnungen ermitteln. Voraussetzung dafür ist, dass die Abstände zwischen der Schallquelle und dem Zuhörer und die Abstände beider zu den reflektierenden Flächen bekannt sind.

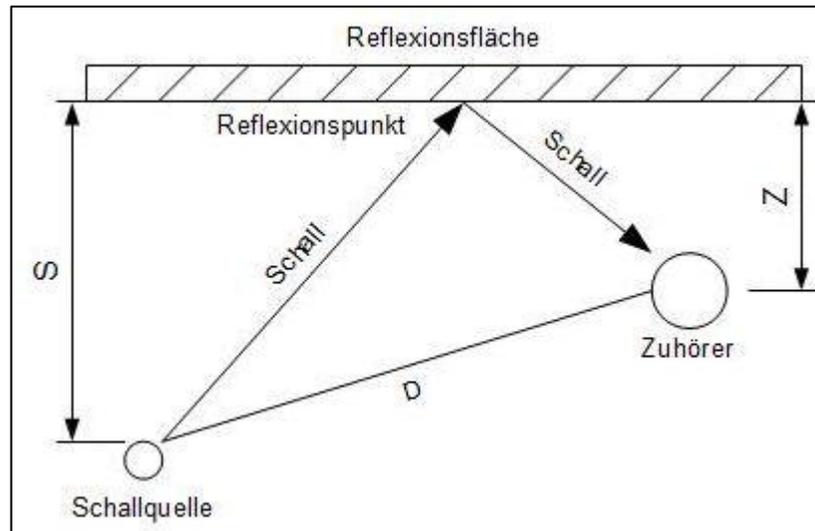


Abbildung 12: Benötigte Maße D , S und Z für die Berechnung des Reflexionspunktes und der vom Schall zurückzulegenden Strecke

Sind S , Z und D bekannt, muss zunächst berechnet werden, wo sich der Reflexionspunkt befindet bzw. wo der Schall, der auf den Zuhörer zusteuert, auf die Wand trifft.

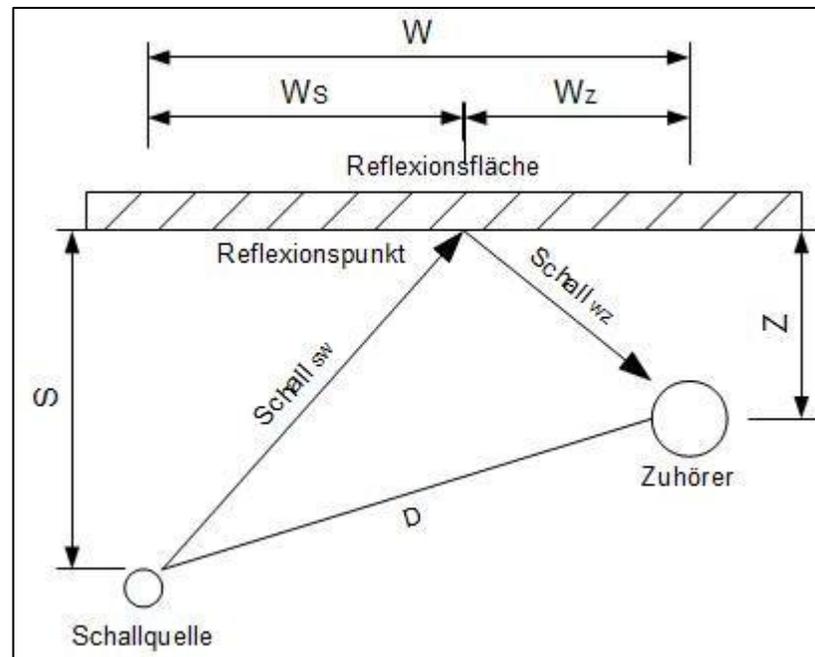


Abbildung 13: Für die Reflexion relevante Wandstrecke W und die für deren Berechnung benötigten Maße D , S und Z

Dazu wird zunächst die Wandstrecke W (siehe Abbildung 13), die zwischen der Schallquelle und dem Zuhörer verläuft, wie folgt nach dem Satz des Pythagoras berechnen:

$$W = \sqrt{D^2 - (S - Z)^2}$$

Bei einer Schallreflexion ist der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel [3].

Deshalb lässt sich die Strecke W_S , die den Abschnitt zwischen der Schallquelle und dem Reflexionspunkt markiert, mit Hilfe des Verhältnisses der Abstände S und Z wie folgt berechnen.

$$W_S = S * \left(\frac{W}{S + Z}\right)$$

Die Strecke, die der Schall von der Schallquelle bis zum Reflexionspunkt zurücklegt, kann nun ebenfalls mit dem Satz des Pythagoras wie folgt bestimmt werden.

$$Schall_{SW} = \sqrt{S^2 + W_S^2}$$

Analog dazu lässt sich auch W_Z mit

$$W_Z = Z * \left(\frac{W}{S + Z}\right)$$

bestimmen, um dadurch die Strecke $Schall_{WZ}$ mit dem Satz des Pythagoras zu berechnen. Aber da der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist, ist es möglich diese Strecke einfach mithilfe des Verhältnisses zwischen S und Z durch

$$Schall_{WZ} = Schall_{SW} * \frac{Z}{S}$$

zu bestimmen.

Durch die Summe von $\text{Schall}_{\text{SW}}$ und $\text{Schall}_{\text{WZ}}$ ergibt sich die gesamte Strecke, die der Schall von der Schallquelle über die Wand zum Zuhörer zurücklegt. Damit lassen sich nun die benötigte Zeit und der Pegel der Schallwelle dieser Reflexion berechnen.

4.1.2 Stereophonie

Da der Kopf des Zuhörers den Schall abschirmt, kommt vor allem der Schall von den Seiten am jeweils gegenüberliegenden Ohr in Abhängigkeit des Einfallswinkels auf den Zuhörer abgeschwächt an. Zusätzlich dazu führt der Abstand zwischen den Ohren dazu, dass der Schall am jeweils gegenüber liegenden Ohr zeitversetzt eintrifft. Somit ergibt sich für jedes Ohr, zumindest aufgrund der Reflexionen von den seitlichen Wänden, eine eigene Raumimpulsantwort und damit Stereo-Signale. Dies führt zu einer Verbesserung des räumlichen Schalleindrucks [17].

Um dies zu bewerkstelligen, wird für die jeweils benötigte Position des Zuhörers und der Schallquelle der Einfallswinkel α der Reflexion der Seitenwände auf den Zuhörer berechnet.

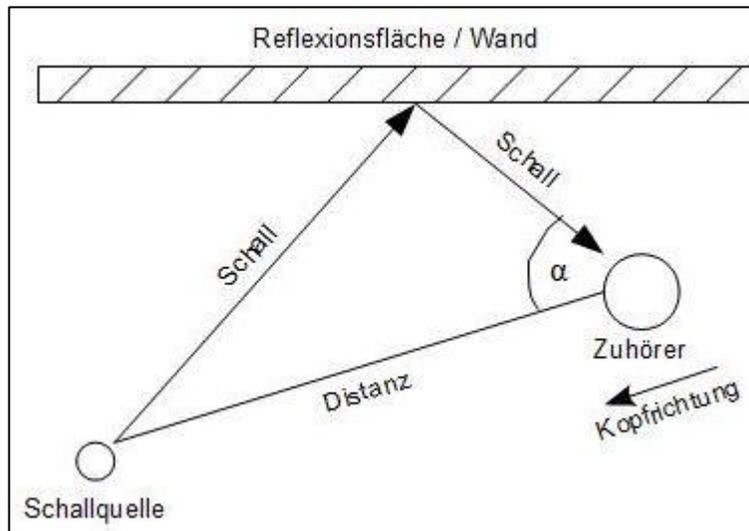


Abbildung 14: Beispiel einer Reflexion an einer seitlichen Wand mit dem Schalleinfallswinkel α

Mit dem Winkel α lässt sich die Pegeldifferenz (ILD) in dB, die durch die Abschirmung des Kopfes zustande kommt, für Sprache annähernd mit

$$\Delta p = 0,14 * \alpha$$

wenn $\alpha < 50^\circ$ und

$$\Delta p = 7$$

wenn $50^\circ < \alpha \leq 90^\circ$

berechnen, wobei α in Grad einzusetzen ist, und die Werte ab 90° gespiegelt werden können [4].

Die Laufzeitdifferenz (ITD), die durch den Abstand der beiden Ohren entsteht, lässt sich mit

$$\Delta t = 0,63 * \sin \alpha$$

berechnen [5].

4.1.3 Interpolation

Um mit den durch die Verfahren aus Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 erhaltenen Werten die Schallwellen des Direktschalls und der frühen Reflexionen nachzubilden, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. In dieser Arbeit werden dazu Polynome des dritten Grades verwendet, weil die Werte dieser Polynome einen wellenförmigen Verlauf abbilden. Für jede zu simulierende Schallwelle wird jeweils ein Polynom des dritten Grades berechnet. Dazu werden pro Schallwelle vier Punkte benötigt. Diese Punkte werden erhalten indem in bestimmten Abständen vor dem berechneten Sample ein Nullpunkt, nach dem berechneten Sample ein Tiefpunkt und nach dem Tiefpunkt erneut ein Nullpunkt gesetzt wird. Mithilfe einer Interpolation durch diese vier Punkte entsteht ein Polynom, welches eine wellenförmige Kurve abbildet, die die jeweilige Schallwelle simuliert. Abbildung 15 zeigt eine solche Kurve.

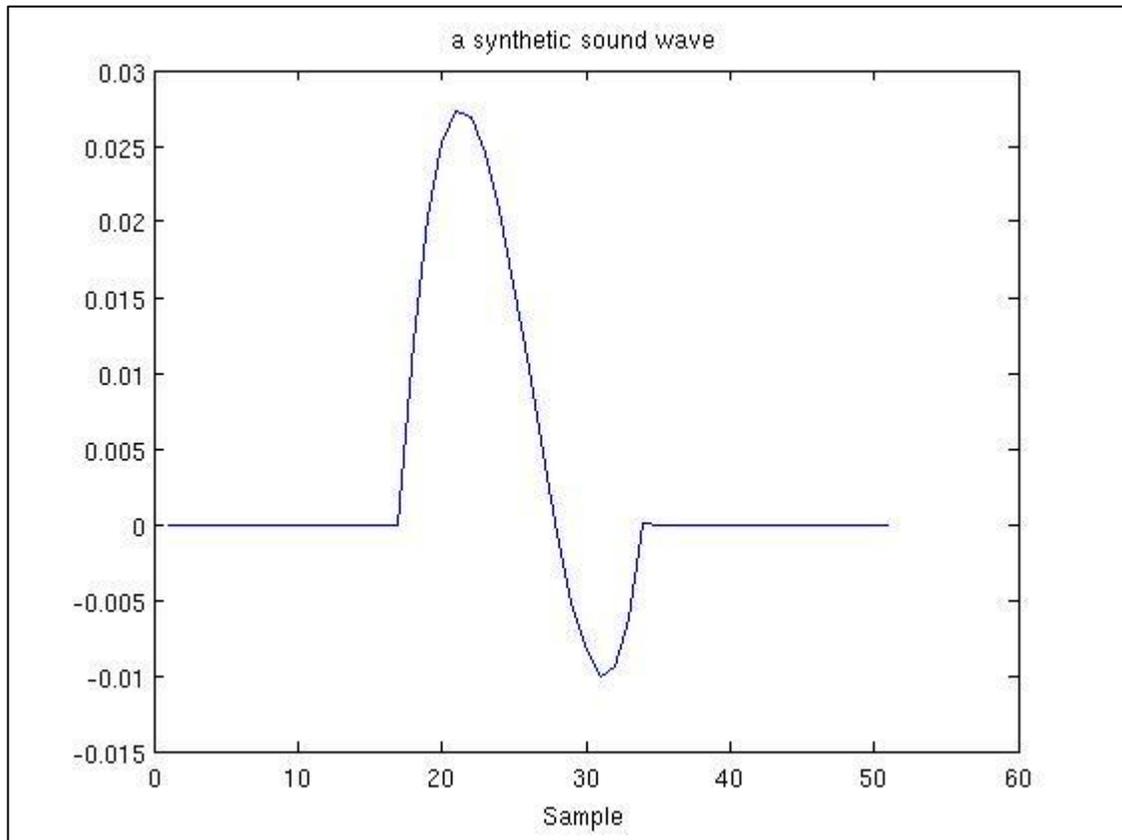


Abbildung 15: Beispiel einer synthetischen Schallwelle

Die so erhaltenen Wellen bilden den Direktschall und die frühen Reflexionen der künstlichen Raumimpulsantwort, wie in Abbildung 16 zu sehen ist.

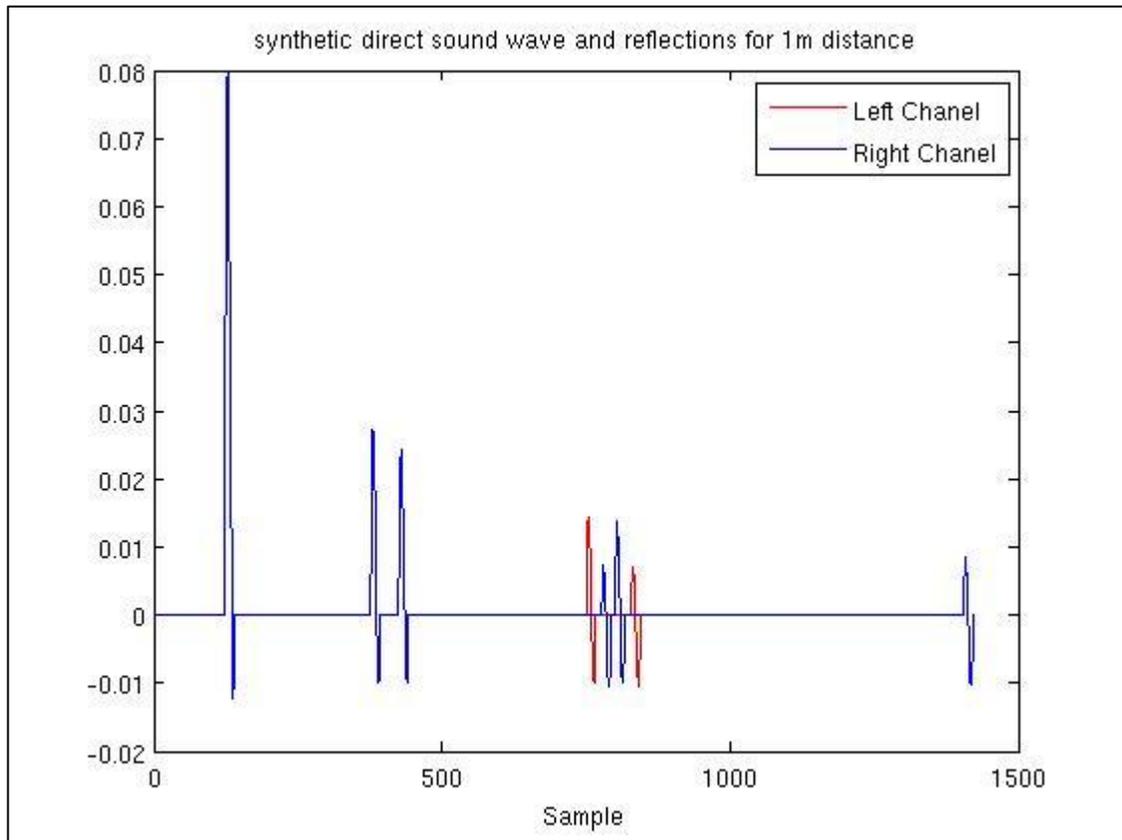


Abbildung 16: Synthetischer Direktschall und Reflexionen ersten Grades für linkes und rechtes Ohr aus einem Meter Abstand zur Schallquelle

4.2 Hallfahne

Die Hallfahne verhält sich unter allen Abständen innerhalb eines Raumes ähnlich, da sich unabhängig von der Position der Quelle und des Zuhörers der Schall durch die Reflexionen nach einer bestimmten Zeit gleichmäßig im gesamten Raum verteilt.

Auf die Hallfahne wirken sich die Beschaffenheit des Raumes, also Materialien der Wände, Gegenstände innerhalb des Raumes, die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit jedoch deutlich stärker aus, als auf die frühen Reflexionen, da der Schall nun deutlich mehr Reflexionen erfahren hat und eine größere Strecke durch die Luft zurückgelegt hat. Deshalb ist es bei der Synthese der Hallfahne notwendig, die Wirkung des Raumes auf das Frequenzspektrum des Schalls nachzubilden.

Dazu wurde die Verteilung der Energie auf die Frequenzen, also die spektrale Leistungsdichte in den gemessenen Raumimpulsantworten analysiert, und ein FIR-Filter entwickelt, der diese Verteilung nachbildet.

Dieser Filter wird auf eine Zufallsfolge angewandt, die den oszillierenden Verlauf der Hallfahne nachbilden soll. Die spektrale Leistungsdichte der künstlichen Hallfahne im Vergleich zur spektralen Leistungsdichte der natürlichen Hallfahne ist in Abbildung 17 dargestellt.

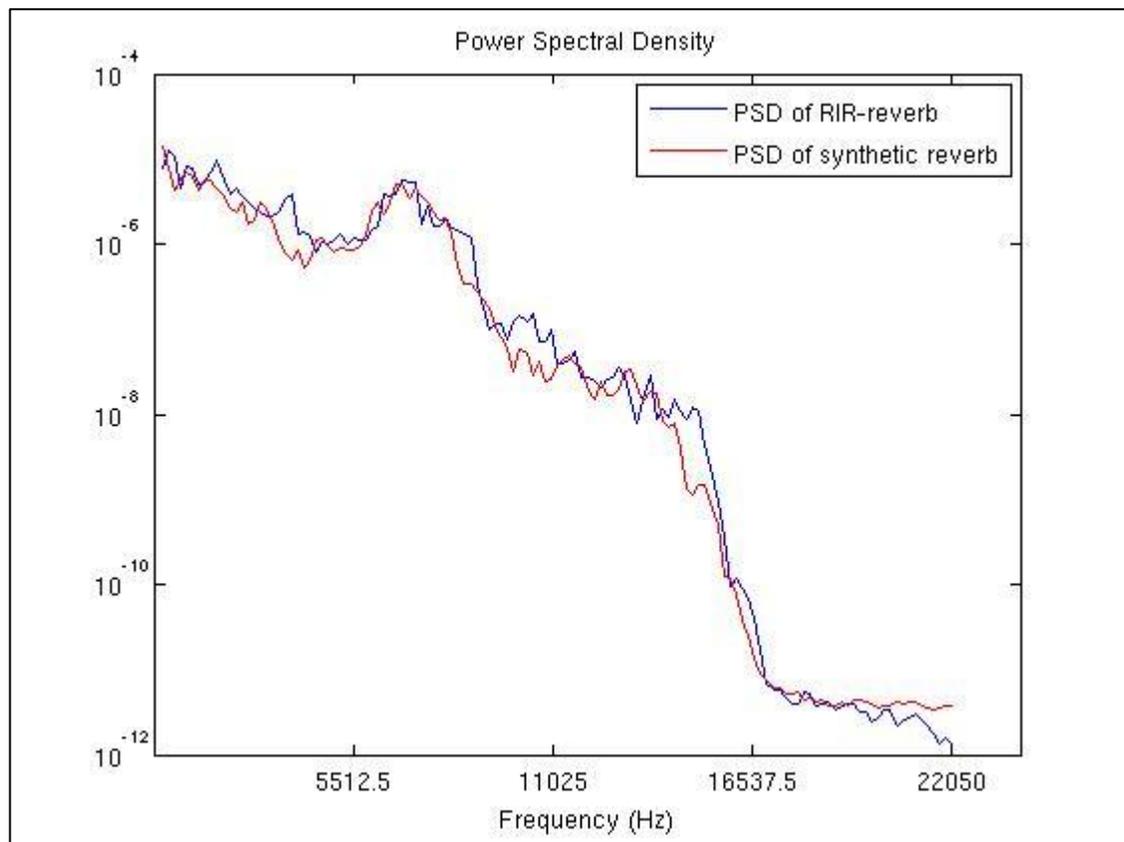


Abbildung 17: Spektrale Leistungsdichte der natürlichen Hallfahne (blau) und der mit einem FIR-Filter erzeugten künstlichen Hallfahne (rot)

Um das Abklingen des Schalls nachzubilden, wird zudem das reziproke Abstandsgesetz (siehe Kapitel 2.1) auf die künstliche Hallfahne angewandt. Abbildung 19 zeigt die fertige künstliche Hallfahne. Auf Abbildung 18 ist zum Vergleich die Hallfahne einer im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Raumimpulsantwort dargestellt.

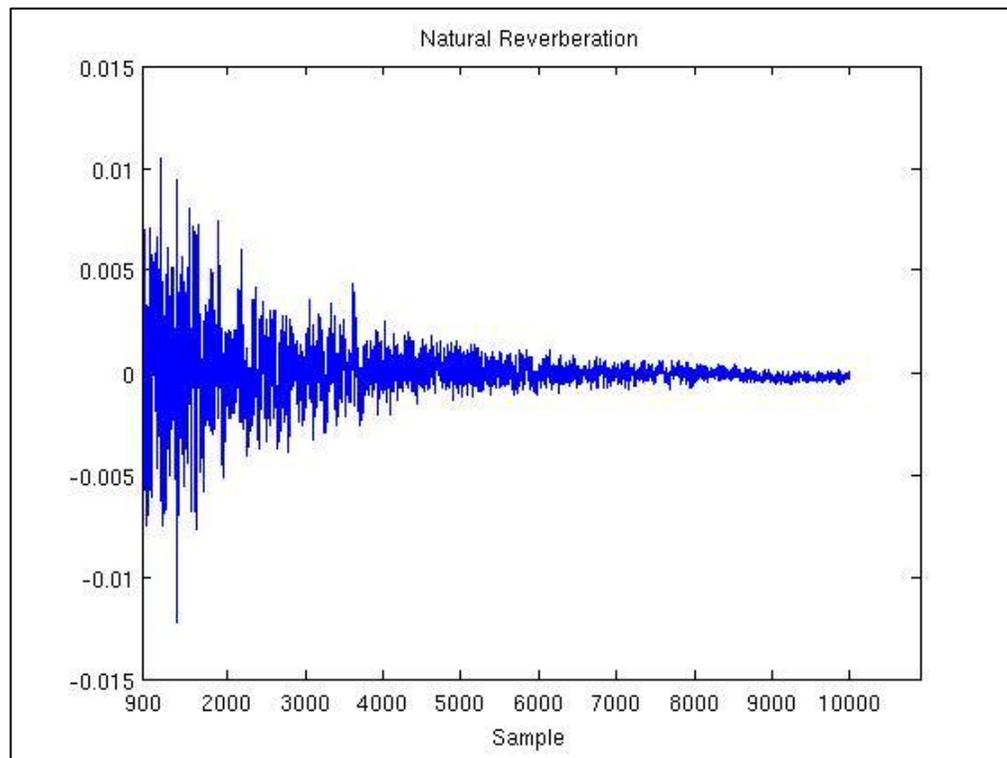


Abbildung 18: Hallfahne einer gemessenen Raumimpulsantwort (gekürzt)

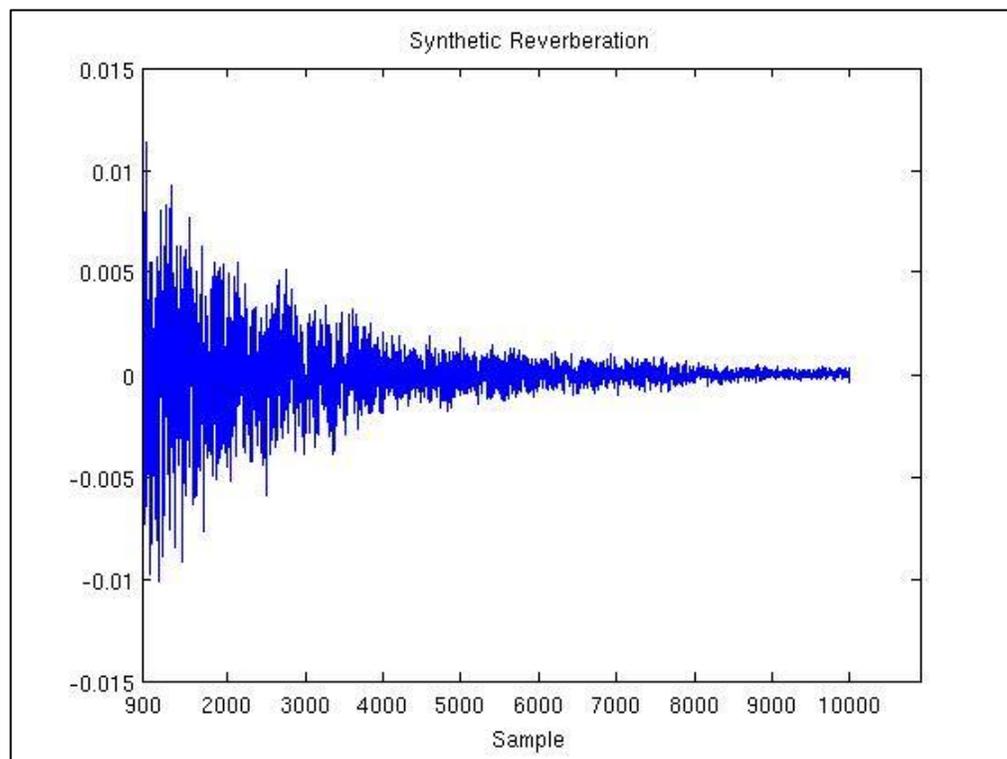


Abbildung 19: Künstliche Hallfahne

Um bei der Faltung Zeit zu sparen, ist die Hallfahne nur so lang, wie sie in der Lage ist, einen hörbaren Effekt zu bewirken.

4.3 Künstliche Raumimpulsantwort

Um die künstliche RIR (Raumimpulsantwort) zu bekommen, wird die künstliche Hallfahne den künstlichen frühen Reflexionen angefügt. In der Analyse der gemessenen Raumimpulsantworten in Kapitel 3.2.3 ist dafür das Sample 900 als günstige Stelle bestimmt worden, da die Wellen der frühen Reflexionen ab dieser Stelle nicht mehr von der Hallfahne unterscheidbar sind bzw. aufgrund ihres späten Eintreffens bereits einen Teil der Hallfahne bilden. Daher beeinträchtigt ein einfaches Anhängen der Hallfahne an dieser Stelle nicht die Wirkung der frühen Reflexionen. Abbildung 20 stellt eine vollständige, auf diese Weise erstellte Raumimpulsantwort dar.

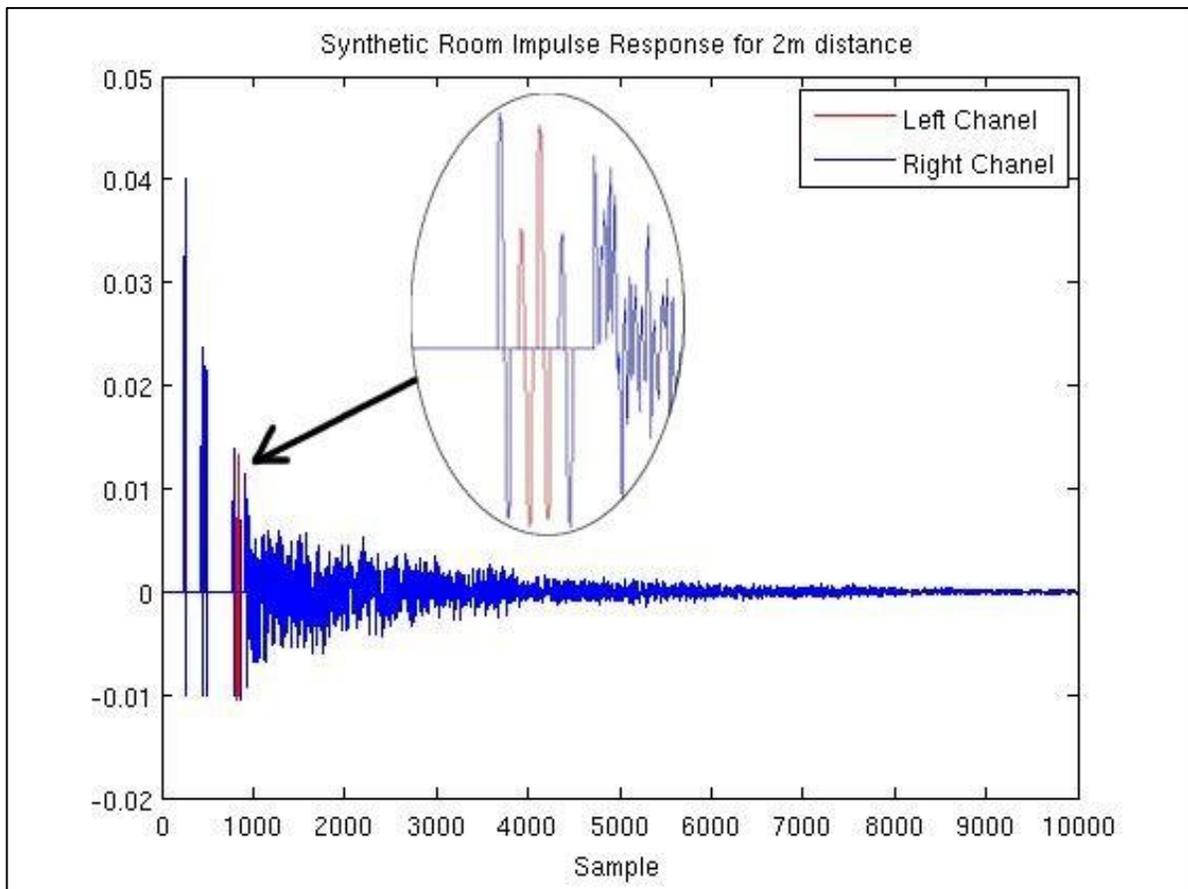


Abbildung 20: Künstliche RIR (Raumimpulsantwort) für zwei Meter Abstand zur Schallquelle

5 Test

Der Test ist notwendig, um das implementierte System zu validieren. Es soll untersucht werden, ob und in welchem Maße das System eine Distanzsimulation ermöglicht. Zu diesem Zweck wird ein Hörtest durchgeführt.

5.1 Testaufbau und Durchführung

Der Test wurde in unterschiedlichen Räumlichkeiten durchgeführt. Es wurden Stimmaufnahmen für die Distanzen ein bis fünf Meter jeweils mit und ohne HRTF-Filterung generiert. HRTFs (Head Related Transfer Function) werden benutzt, um monaurale Aufnahmen in binaurale zu übersetzen, sodass sich die Aufnahmen anhören, als kämen sie aus der gewünschten Richtung [14]. Dazu wurde das von Sylvia Sima während ihrer Bachelor-Thesis im Rahmen des 3D-Audio-Projekts von Professor Dr.-Ing. Wolfgang Fohl entwickelte MATLAB-Programm benutzt. Die Aufnahmen wurden stets mit einer HRTF-Filterung mit 0° in der horizontalen Ebene generiert, sodass die Geräusche direkt geradeaus zu hören sein sollten. Durch die mittels der HRTF-Filterung entstandenen binauralen Aufnahmen sollte das natürliche Hören unterstützt, und so die Distanzerkennung für die Testpersonen erleichtert werden. Im Anschluss darauf wurde der Test ohne HRTF-Filterung wiederholt, um festzustellen, in welchem Umfang die HRTF-Filterung Einfluss auf die Distanzerkennung nimmt. Es wurden die Aufnahmen einer menschlichen Stimme benutzt, da es, wie schon in Kapitel 2.5 beschrieben, den Menschen vertraut ist und so leichter lokalisierbar ist.

Zunächst wurden die Testpersonen auf ihre Fähigkeit der Distanzerkennung über das Gehör innerhalb der natürlichen Umgebung getestet. Dazu positionierte sich eine Person innerhalb des Raumes auf unterschiedliche Distanzen zur Testperson, ohne dass sich Hindernisse für den Direktschall ergaben, und sprach von diesen Punkten aus. Währenddessen musste die Testperson die Augen zu halten. Alle Personen konnten die Distanzen in etwa richtig schätzen.

Da es den Testpersonen nicht möglich war, zur Universität zu kommen und den Test im zu simulierenden Raum durchzuführen, wurde den Testpersonen Fotoaufnahmen (z. B. Abbildung 6) des Raumes gezeigt, und dessen Abmessungen genannt.

Danach folgte ein dreistufiger Test. Die Testpersonen bekamen ein Blatt Papier, auf dem sie die von ihnen geschätzte Distanz zur simulierten Schallquelle in der jeweiligen Aufnahme aufschreiben sollten.

Um zu verhindern, dass logische Rückschlüsse der einzelnen Testpersonen in ihre Schätzungen der Distanzen miteinfließen, wurde den Testpersonen weder gesagt, aus welchen Distanzen der Schall kommen könnte, noch wie viele Aufnahmen sie im jeweiligen Testlauf hören werden. Die Testpersonen sollten sich so weit wie möglich nur auf ihren Gehörsinn verlassen. Es wurde auch nicht gesagt, aus welcher Richtung der Sprecher spricht und ob er seine Richtung ändert.

Um die Personen zunächst zu adaptieren, wurden im ersten Testlauf die Aufnahmen in der Reihenfolge von der kürzesten bis zur weitesten Distanz abgespielt. Im zweiten Testlauf wurde die Reihenfolge umgekehrt.

Im dritten Testlauf, dem eigentlichen Test, wurden dann die Aufnahmen in einer sprunghaften Abfolge abgespielt, um herauszufinden, wie genau die jeweilige Person die unterschiedlichen Distanzen abschätzt.

Die Abfolge der abgespielten Aufnahmen zeigt die

Tabelle 1.

Testlaufnummer	Abspielfolge der Aufnahmen in Distanz zur simulierten Schallquelle
1	1m, 1.5m, 2m, 3m, 4m, 5m
2	5m, 4m, 3m, 2m, 1.5m, 1m
3	3m, 2m, 5m, 4m, 1m, 1.5m, 4m, 5m, 3m, 2m, 1.5m, 1m

Tabelle 1: Abspielfolge der Aufnahmen im Test

Zwischen jeder Teststufe wurde eine etwa halbminütige Pause gemacht. Konnte die Testperson der jeweiligen Aufnahme keine Distanz zuordnen, wurde die Aufnahme sofort wiederholt.

Dieser Test wurde zunächst mit HRTF-gefilterten Stimmaufnahmen und nach einer etwa dreiminütigen Pause nochmal ohne HRTF-Filterung durchgeführt.

Im Anschluss darauf wurden die Testpersonen interviewt. Sie sollten sagen, welche Schwierigkeiten sie bei der Distanzerkennung hatten, ob sich die Aufnahmen mit und ohne HRTF-Filterung bei der Distanzerkennung unterschieden, und ob sie stets das Gefühl hatten, sich in einem Raum zu befinden.

5.2 Testauswertung

Der Test wurde mit insgesamt zehn Testpersonen durchgeführt. Die Personen waren zwischen 21 und 58 Jahren alt. Das Durchschnittsalter lag bei 29,4 Jahren. Die Geschlechter waren gleich verteilt.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die beim Test teilgenommenen Personen.

Nr.	Geschlecht	Alter	Testdatum
1	w	58	23.04.2011
2	w	25	24.04.2011
3	m	29	24.04.2011
4	m	25	25.04.2011
5	w	21	25.04.2011
6	m	38	30.04.2011
7	m	26	01.05.2011
8	w	27	01.05.2011
9	m	22	01.05.2011
10	w	23	01.05.2011

Tabelle 2: Übersicht über die Testteilnehmer, m = männlich, w = weiblich

In der ersten Teststufe haben die Testpersonen, wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, die simulierten Distanzen in der Reihenfolge vom einen bis fünf Metern gehört. Nur einige Testpersonen erwähnten bereits zu diesem Zeitpunkt, dass der Sprecher sich zu entfernen scheint. Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Ergebnisse der ersten Teststufe.

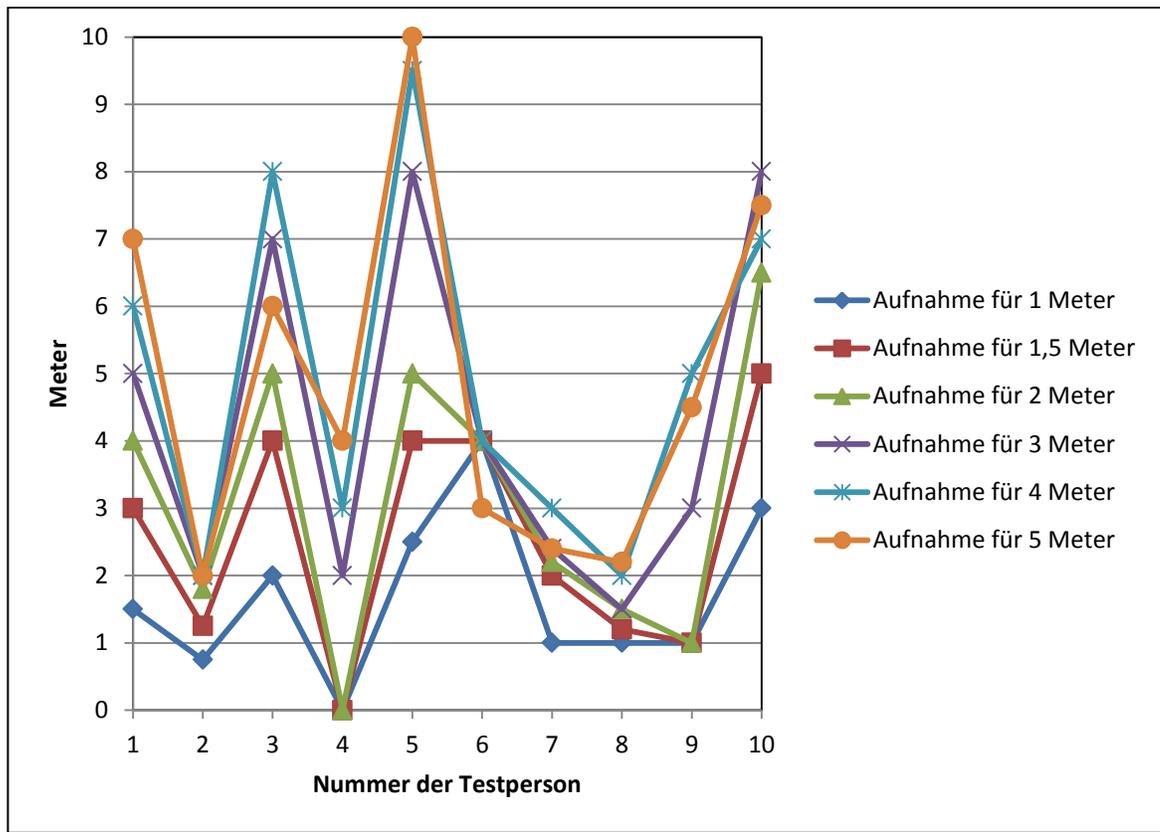


Abbildung 21: Schätzungen für Testlauf Eins mit HRTF-Filterung

Einige Personen schätzten, dass die virtuelle Schallquelle sich kontinuierlich immer weiter entfernt. Manche, wie die Personen Zwei und Vier, hörten in einigen Aufnahmen keinen Distanzunterschied heraus. Manchmal wurden auch die als weiter entfernt simulierte Distanz als näher empfunden, als die vorherige Aufnahme. Dennoch ist tendenziell ein Wachsen der Distanz geschätzt worden. Es erscheinen jedoch oft große Abweichungen von den simulierten Distanzen.

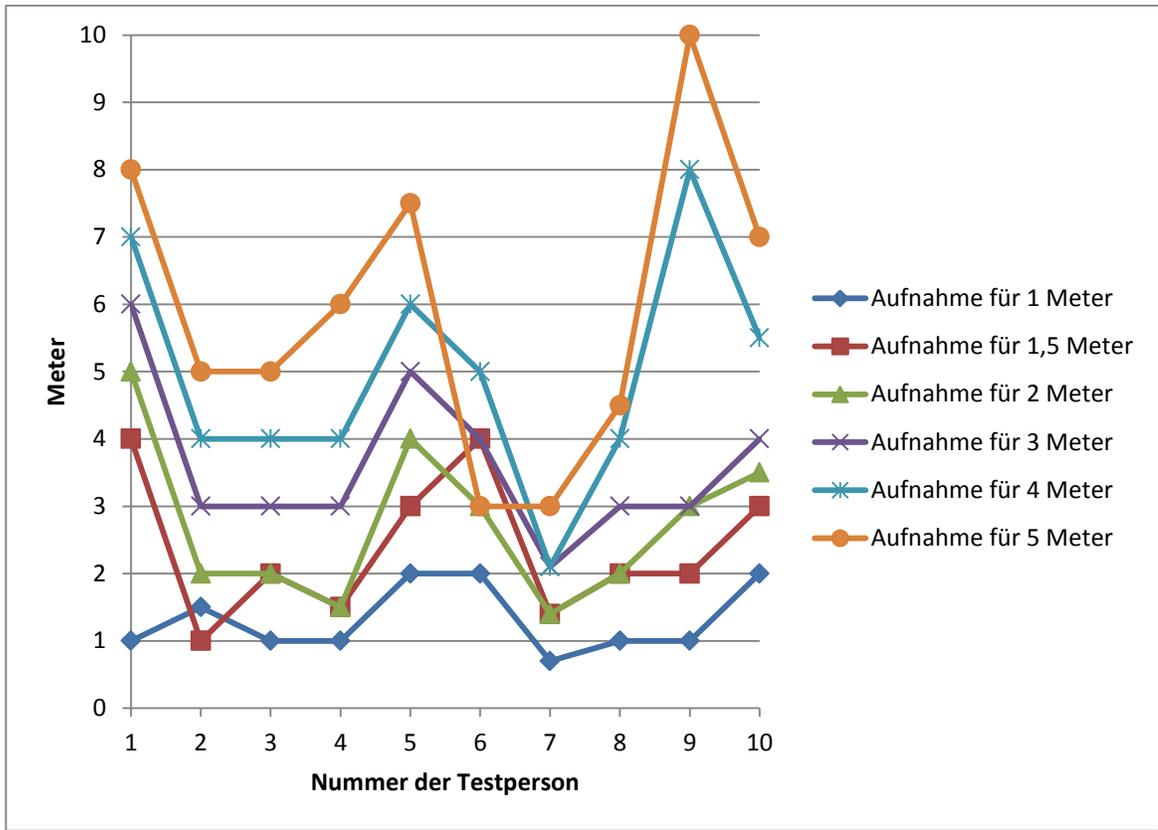


Abbildung 22: Schätzungen für Testlauf Eins ohne HRTF-Filterung

In den Aufnahmen ohne HRTF-Filterung fiel die Streuung bei der Distanzschätzung geringer aus. Während in den HRTF-gefilterten Aufnahmen die Distanzschätzungen der einzelnen Personen teilweise sehr unterschiedlich ausfielen, schätzten in den HRTF-losen Aufnahmen mehr Personen bei ein und derselben Aufnahme die gleiche oder eine ähnliche Distanz. Das lässt sich vor allem bei den Personen Zwei, Drei und Vier beobachten. Außerdem wurden die Unterschiede zwischen den Aufnahmen etwas besser wahrgenommen. Dies könnte aber daran liegen, dass der Test mit den Aufnahmen ohne HRTF-Filterung nach dem Test mit den HRTF-gefilterten Aufnahmen durchgeführt wurde, und die Testpersonen schon etwas eingewöhnt waren.

In der zweiten Teststufe wurden die Aufnahmen in umgekehrter Reihenfolge abgespielt. Die Abbildung 23 und die Abbildung 24 zeigen die Distanzschätzungen des zweiten Testlaufs.

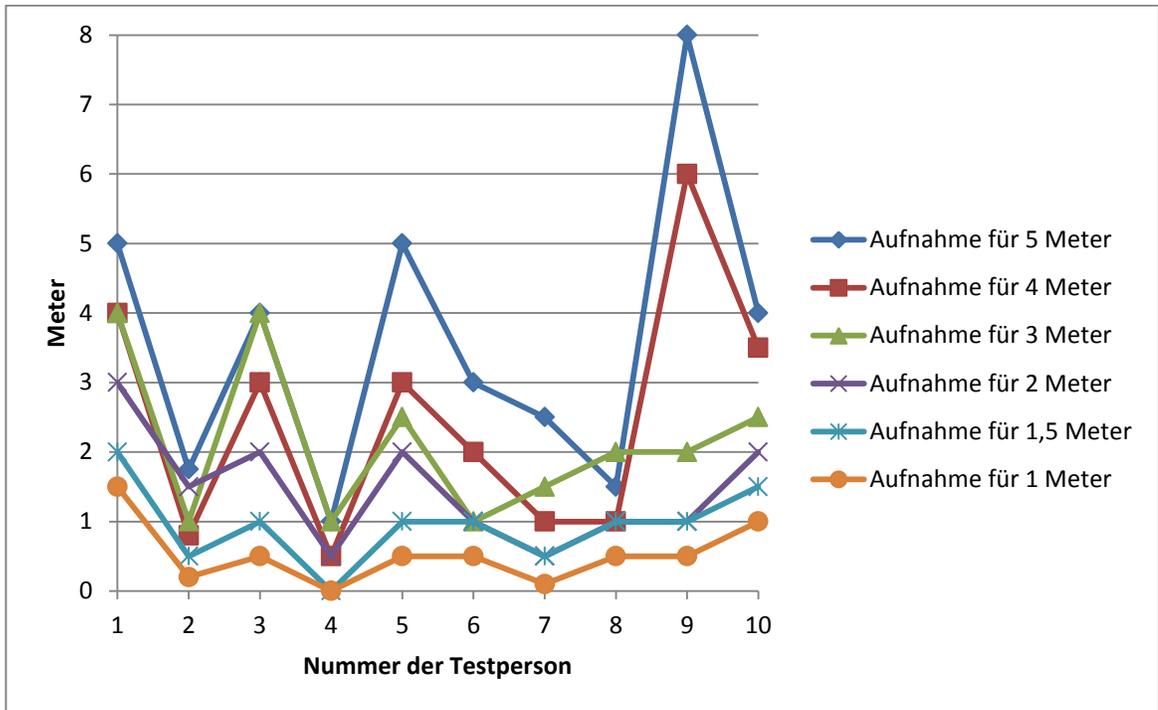


Abbildung 23: Schätzungen für Testlauf Zwei mit HRTF-Filterung

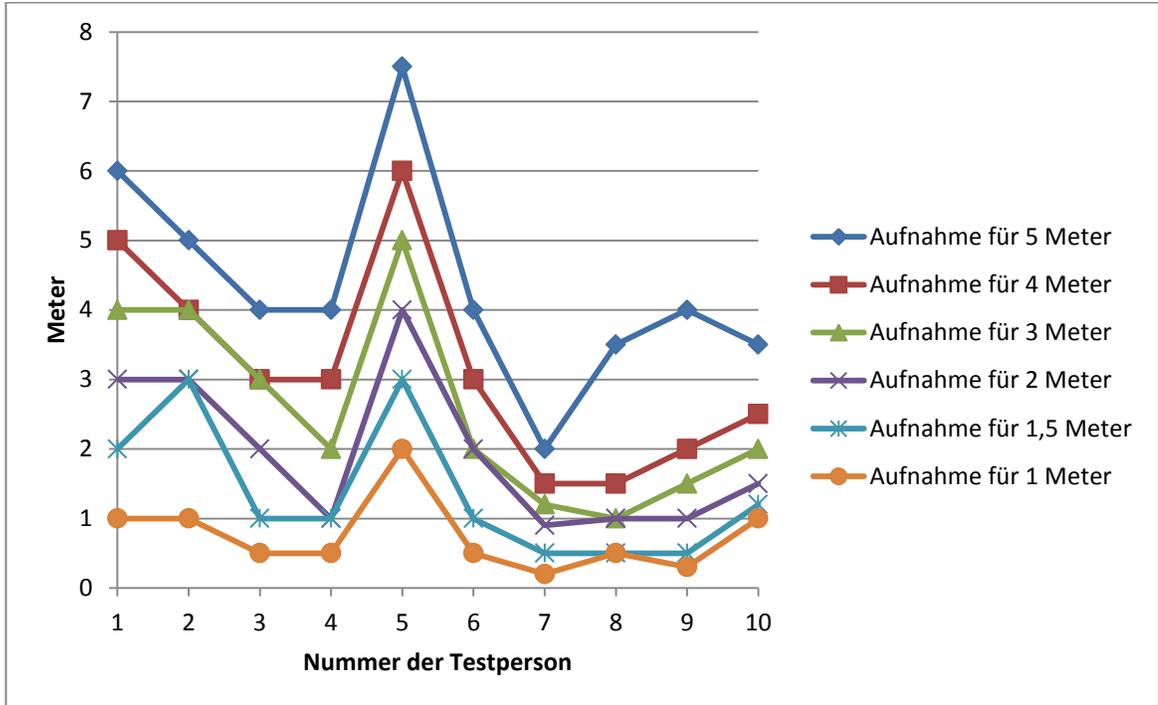


Abbildung 24: Schätzungen für Testlauf Zwei ohne HRTF-Filterung

In diesem Testlauf verhält es sich ähnlich zu Testlauf Eins. Auch hier hörten die Testpersonen manchmal keine Distanzunterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmen heraus, und es gibt teilweise große Abweichungen von den simulierten Distanzen. Aber tendenziell ist ein Schrumpfen der Distanz bzw. das näher Zukommen des virtuellen Sprechers geschätzt worden.

Auch hier fiel die Streuung der Distanzschätzungen bei den Aufnahmen ohne HRTF-Filterung leicht geringer aus. Die Unterschiede zwischen den Aufnahmen wurden auch im zweiten Testlauf bei den HRTF-losen Aufnahmen besser wahrgenommen, was sich vor allem bei den Personen Zwei und Vier bemerkbar macht.

Die Schätzungen der genauen Distanzen zum Sprecher haben sich zumindest bei den HRTF-gefilterten Aufnahmen im Vergleich zum ersten Testlauf insgesamt verbessert. Die Testpersonen haben sich scheinbar etwas eingewöhnt.

Die dritte Teststufe sollte nun untersuchen, ob die Testpersonen nur relative Unterschiede hinaushören und die Distanz nur im Vergleich zum vorher gehörten schätzen, oder ob sie die Distanzen auch absolut einschätzen können. Zu diesem Zweck wurden die Aufnahmen, wie die

Tabelle 1 zeigt, nicht in der Reihenfolge der Distanzen, sondern durcheinander abgespielt. Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die Ergebnisse.

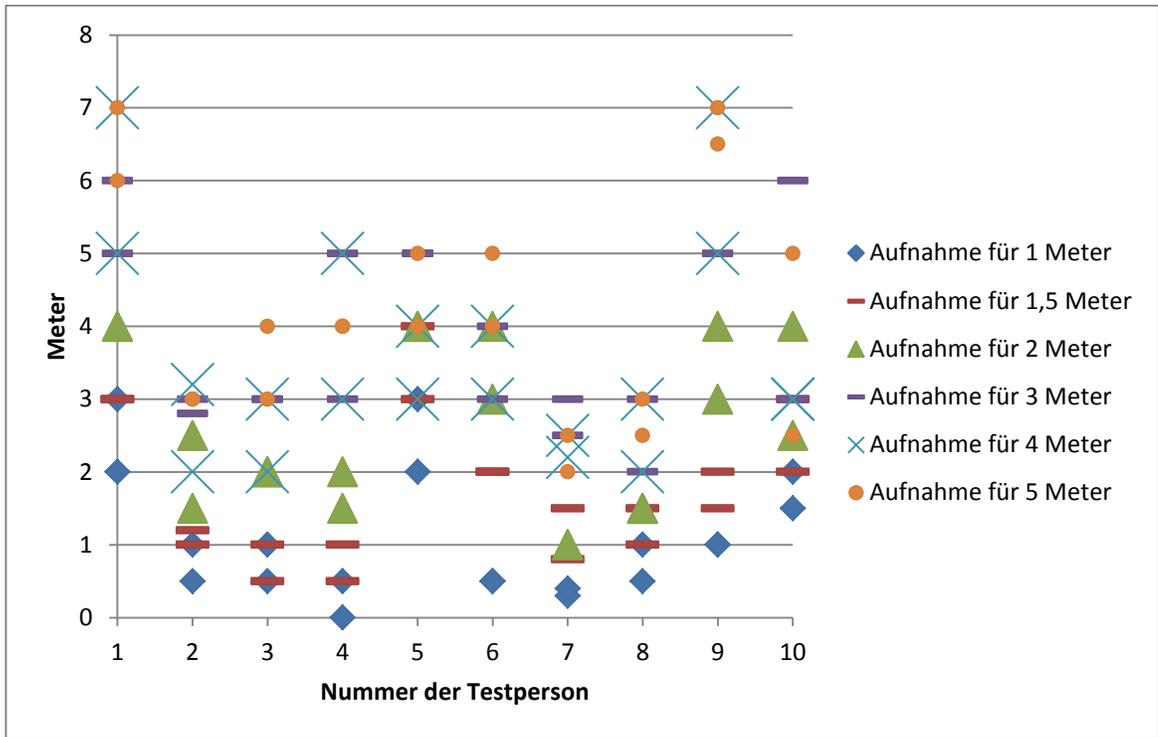


Abbildung 25: Schätzungen für Testlauf Drei mit HRTF-Filterung

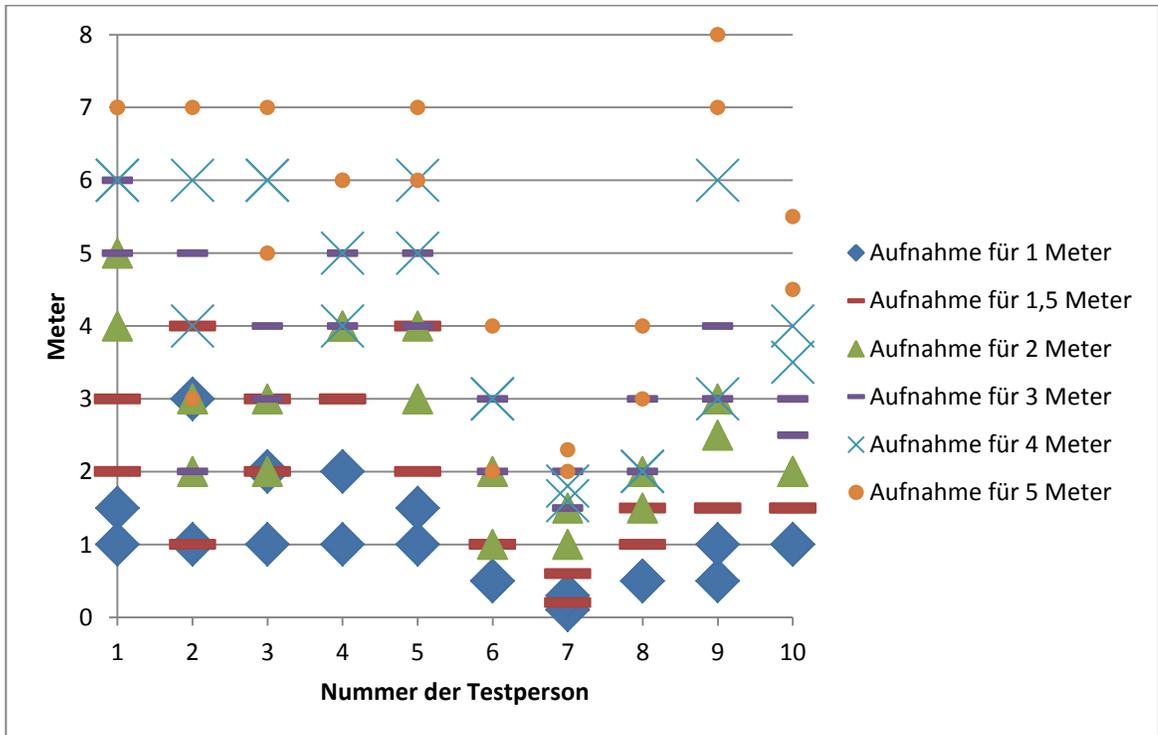


Abbildung 26: Schätzungen für Testlauf Drei ohne HRTF-Filterung

Insgesamt wurde jede Aufnahme zweimal abgespielt. Ist also im Diagramm über einer Person nur einmal die Marke für eine bestimmte Distanz sichtbar, so befindet sich die zweite auf denselben Koordinaten und bedeutet somit, dass die Testperson dieselbe Aufnahme zweimal derselben Distanz zugeordnet hat. Dies ist auch wünschenswert und traf einige Male ein, oder es wurden zumindest ähnliche Distanzen angegeben. Manchmal unterschieden sich aber auch die angegebenen Distanzen für ein und dieselbe simulierte Distanz um zwei oder mehr Meter voneinander. Zudem schätzen die Testpersonen nicht überwiegend die tatsächlich simulierte Distanz. Die Testpersonen scheinen die Distanzen also hauptsächlich eher zu raten, als tatsächlich zu hören, zumal die Personen im Interview angaben, sich an der unterschiedlichen Lautstärke des Sprechers zur vorher gehörten Aufnahme zu orientieren. Die Schätzungen befinden sich aber zumindest in einer Entfernung von null bis sieben Metern, was sich nicht völlig abseits der simulierten Distanzen von einem bis fünf Metern bewegt.

Außerdem ist auch in der dritten Teststufe zu erkennen, dass die Streuung der angegebenen Distanzen bei den HRTF-losen Aufnahmen geringer ausfällt. Die Angaben der Testpersonen stimmen dort eher miteinander überein. Statt, wie angenommen, die Testpersonen bei der Distanzerkennung zu unterstützen, scheint sich also die HRTF-Filterung zumindest bei einigen Testpersonen gar negativ auf die Distanzerkennung auszuwirken. Dies sollte bei der weiteren Entwicklung des 3D-Audio-Systems bedacht werden.

Im Interview gaben alle Testpersonen an, dass sie das Gefühl hatten, sich in einem Raum zu befinden, was unter anderem ein Ziel der Simulation darstellt. Einige Testpersonen sagten während des Anhörens der Aufnahmen für Distanzen von einem bis zwei Metern, dass sie das Gefühl hatten, der Sprecher würde direkt vor Ihnen stehen.

Die Testpersonen gaben an, dass die HRTF-gefilterten Aufnahmen sich für die Distanzerkennung nicht von den HRTF-losen Aufnahmen unterschieden. Die HRTF-losen Aufnahmen hörten sich für die Testpersonen lediglich dumpfer an. Die Testpersonen beklagten aber, dass sich die Aufnahmen synthetisch anhörten, oder so, als ob der Sprecher durch Lautsprecher zu sprechen schien, und meinten, dass dies sie bei der Distanzerkennung beeinträchtigen würde. Dies liegt wohl hauptsächlich an der künstlichen Hallfahne, da sie die meiste Energie der Raumimpulsantwort abbildet und somit hauptsächlich für den Klang

verantwortlich ist. Deshalb lassen sich vielleicht bessere Ergebnisse mit einer künstlichen Hallfahne erzielen, die die reale Hallfahne noch besser nachbildet.

Obwohl den Testpersonen nicht gesagt wurde, aus welcher Richtung der Sprecher während des Tests sprechen wird und ob er seine Richtung ändern wird, haben alle Testpersonen angegeben, dass der Sprecher sich stets geradeaus oder leicht rechts vor ihnen befand. Keine der Testpersonen sagte, dass sich der Sprecher jemals hinter ihr, links oder rechts von ihr befand. Dies ist bei den HRTF-gefilterten Aufnahmen ja auch mit der dazu entsprechenden Simulation der Richtung erwünscht. Allerdings gab es in den HRTF-losen Aufnahmen keine beabsichtigte Simulation der Richtung.

Die Testergebnisse zeigen, dass zwei von drei Anforderungen der Simulation erfüllt sind. Die Simulation ist in der Lage, einen virtuellen Raum zu simulieren. Auch ist es den Zuhörern, zumindest nach einer kurzen Eingewöhnungszeit, möglich Distanzunterschiede zu erkennen. Aber die Simulation kann keine absoluten Distanzen vermitteln oder klingt so unnatürlich, dass die Zuhörer große Schwierigkeiten haben, eine absolute Distanz zu erkennen.

Alle Distanzschätzungen aller Testpersonen können im Appendix eingesehen werden.

6 Ausblick

Das Ziel dieser Thesis war es, einen Audio-Algorithmus zur echtzeitfähigen Berechnung von Raumimpulsantworten zu entwickeln. Mit diesen Raumimpulsantworten gefaltete Audioaufnahmen sollten den Zuhörern einen Raumeindruck und eine wahrnehmbare und abschätzbare Entfernung zur Schallquelle vermitteln. Wie die Testergebnisse zeigen, gelingt dem entwickelten Algorithmus die Vermittlung von Distanzen zur Schallquelle nicht besonders gut, so dass der Zuhörer die Distanzen nur schlecht abschätzen kann. An dieser Stelle besteht noch Handlungsbedarf. Aber der Algorithmus ist in der Lage Raumeindruck und hörbar unterschiedliche Distanzen zu vermitteln.

Zur weiteren Validierung dieses Algorithmus sollte eine bewegliche Schallquelle simuliert werden. Dazu könnte z.B. eine anechoische Audioaufnahme in Abschnitte geteilt werden und die jeweiligen Abschnitte dann mit unterschiedlichen, durch den Algorithmus berechneten Raumimpulsantworten, gefaltet werden. Die Raumimpulsantworten und die Größe der Abschnitte der Audioaufnahme sollten so gewählt werden, dass eine Bewegung der Schallquelle leicht wahrgenommen werden kann. Die Bewegung sollte also nicht allzu schnell aber auch nicht zu langsam ablaufen. Die halbe Schrittgeschwindigkeit ist dazu wahrscheinlich gut geeignet. Eventuell qualifiziert das Ergebnis den Algorithmus als fähig zur Simulation einer beweglichen Schallquelle. Anderenfalls sollte an der Verbesserung der Distanzsimulation geforscht werden.

Zur Weiterentwicklung des Algorithmus sollte die Simulation von nahen Schallquellen, also Schallquellen mit unter einem Meter Abstand zum Zuhörer, ins Auge gefasst werden. Für Schallquellen unter einem Meter Abstand tragen andere Faktoren zur menschlichen Distanzerkennung von Schallquellen bei, als es bei Abständen über einem Meter der Fall ist. Deshalb ist die Simulation solcher Distanzen nicht mit dem in dieser Thesis entwickelten Algorithmus möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] **Blauert, Jens/Braasch, Jonas:** *Räumliches Hören*, in: Weinzierl, Stefan(Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Berlin/Heidelberg 2008
- [2] **Breder, Eli/McInyde, David:** *Csound-based Auditory Localization*, in: Boulanger, Richard(Hrsg.): The Csound book: perspectives in software synthesis, sound design, signal processing, and programming, Massachusetts 2000
- [3] **FAIRAUDIO:** *Reflexion (Raumakustik)*,
<http://www.fairaudio.de/hifi-lexikon-begriffe/reflexion-raumakustik.html>,
Abrufdatum: 07.04.2011
- [4] **Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik:**
<http://www.sengpielaudio.com/PegeldifferenzenBeimNatuerlichenHoeren.pdf>,
Abrufdatum: 31.03.2011
- [5] **Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik:**
<http://www.sengpielaudio.com/LaufzeitdifferenzenBeimNatuerlichenHoeren.pdf>,
Abrufdatum: 31.03.2011
- [6] **Kopčo, Norbert, et al.:** *Simulating distance cues in virtual reverberant environments*,
http://cns.bu.edu/~shinn/pages/pdf/ICA2007_Kopco.pdf, Abrufdatum: 02.12.2010
- [7] **Müller, Swen:** *Messtechnik*, in: Weinzierl, Stefan(Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Berlin/Heidelberg 2008
- [8] **Scheithauter, Rainer:** *Signale und Systeme - Leitfaden der Elektrotechnik*, Stuttgart 1998
- [9] **Sengpiel, Eberhard:** *Schalldruck p und das reziproke Abstandsgesetz $1/r$* ,
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-abstandsgesetz.htm>, Abrufdatum: 06.02.2011
- [10] **Sengpiel, Eberhard:** *Schallintensität I und das reziproke Quadratgesetz $1/r^2$* ,
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-quadratgesetz.htm>, Abrufdatum: 06.02.2011
- [11] **Sengpiel, Eberhard:** *Dämpfung der Luft bei hohen Frequenzen (Dissipation)*,
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-luft.htm>, Abrufdatum: 15.02.2011

- [12] **Sengpiel, Eberhard:** *Die Anfangszeitlücke (Initial Time Delay Gap ITDG) und der Näheindruck*,
<http://www.sengpielaudio.com/DieAnfangszeitlueckeNaeheeindruck.pdf>,
Abrufdatum: 13.05.2011
- [13] **Shinn-Cunningham, B. G.:** *Distance cues for virtual auditory space*,
http://cns.bu.edu/~shinn/pages/pdf/IEEE_distance.pdf, Abrufdatum: 02.12.2010
- [14] **Sima, Sylvia:** *HRTF Measurements and Filter Design for a Headphone-Based 3D-Audio System*, Hamburg 2008
- [15] **Weinzierl, Stefan:** *Grundlagen*, in: Weinzierl, Stefan(Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Berlin/Heidelberg 2008
- [16] **WIKIPEDIA:** *Nachhall*, <http://de.wikipedia.org/wiki/Nachhall>, Abrufdatum: 18.01.2011
- [17] **WIKIPEDIA:** *Stereofonie*, <http://de.wikipedia.org/wiki/Stereofonie>,
Abrufdatum: 28.03.2011
- [18] **Zahorik, Pavel/Brungart, Douglas S./Bronkhorst, Adelbert W.:** *Auditory Distance Perception in Humans: A Summary of Past and Present Research*, in: *Acta Acustica united with Acustica*, Jg. 91, 3/2005, S. 409-420

Abbildungsverzeichnis

1	Frequenzabhängige Luftdämpfung (dB) in 30 m Abstand bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit (Prozent) [11]	- 5 -
2	Darstellung des Zustandekommens der verschiedenen Halltypen. – rot: Direktschall; grün: frühe Reflexionen (Raumschall); blau: Nachhall [16].....	- 6 -
3	Beispiel einer Raumimpulsantwort [16]	- 6 -
4	Grundsätzlicher Aufbau zur Messung der Impulsantwort [7]	- 9 -
5	Aufbau des Messsystems	- 10 -
6	Aufnahmeraum der Impulsantworten	- 11 -
7	Eine mit dem MLSSA-System gemessene Raumimpulsantwort für einen Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle.....	- 12 -
8	Eine mit dem MLSSA-System gemessene und in MATLAB geladene Raumimpulsantwort für einen Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle	- 13 -
9	Direktschall bei einem Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle	- 14 -
10	Identifizierung der frühen Reflexionen für einen Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle	- 16 -
11	Identifizierung der frühen Reflexionen für drei Meter Entfernung zwischen Messmikrofon und Schallquelle	- 17 -
12	Benötigte Maße D, S und Z für die Berechnung des Reflexionspunktes und der vom Schall zurückzulegenden Strecke	- 20 -
13	Für die Reflexion relevante Wandstrecke W und die für deren Berechnung benötigten Maße D, S und Z	- 20 -
14	Beispiel einer Reflexion an einer seitlichen Wand mit dem Schalleinfallswinkel α	- 22 -
15	Beispiel einer synthetischen Schallwelle	- 24 -
16	Synthetischer Direktschall und Reflexionen ersten Grades für linkes und rechtes Ohr aus einem Meter Abstand zur Schallquelle	- 25 -

17	Spektrale Leistungsdichte der natürlichen Hallfahne (blau) und der mit einem FIR-Filter erzeugten künstlichen Hallfahne (rot).....	- 26 -
18	Hallfahne einer gemessenen Raumimpulsantwort (gekürzt)	- 27 -
19	Künstliche Hallfahne	- 27 -
20	Künstliche RIR (Raumimpulsantwort) für zwei Meter Abstand zur Schallquelle....	- 28 -
21	Schätzungen für Testlauf Eins mit HRTF-Filterung	- 32 -
22	Schätzungen für Testlauf Eins ohne HRTF-Filterung	- 33 -
23	Schätzungen für Testlauf Zwei mit HRTF-Filterung.....	- 34 -
24	Schätzungen für Testlauf Zwei ohne HRTF-Filterung.....	- 34 -
25	Schätzungen für Testlauf Drei mit HRTF-Filterung.....	- 36 -
26	Schätzungen für Testlauf Drei ohne HRTF-Filterung.....	- 36 -

Tabellenverzeichnis

1	Abspielfolge der Aufnahmen im Test	- 30 -
2	Übersicht über die Testteilnehmer, m = männlich, w = weiblich	- 31 -
3	Testergebnisse für Testlauf Eins mit HRTF	- 45 -
4	Testergebnisse für Testlauf Zwei mit HRTF	- 45 -
5	Testergebnisse für Testlauf Drei mit HRTF	- 45 -
6	Testergebnisse für Testlauf Eins ohne HRTF	- 46 -
7	Testergebnisse für Testlauf Zwei ohne HRTF	- 46 -
8	Testergebnisse für Testlauf Drei ohne HRTF	- 46 -

Appendix

Distanz	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10
1	1,5	0,75	2	0	2,5	4	1	1	1	3
1,5	3	1,25	4	0	4	4	2	1,2	1	5
2	4	1,8	5	0	5	4	2,2	1,5	1	6,5
3	5	2	7	2	8	4	2,4	1,5	3	8
4	6	2	8	3	9,5	4	3	2	5	7
5	7	2	6	4	10	3	2,4	2,2	4,5	7,5

Tabelle 3: Testergebnisse für Testlauf Eins mit HRTF

Distanz	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10
5	5	1,75	4	1	5	3	2,5	1,5	8	4
4	4	0,8	3	0,5	3	2	1	1	6	3,5
3	4	1	4	1	2,5	1	1,5	2	2	2,5
2	3	1,5	2	0,5	2	1	0,5	1	1	2
1,5	2	0,5	1	0	1	1	0,5	1	1	1,5
1	1,5	0,2	0,5	0	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	1

Tabelle 4: Testergebnisse für Testlauf Zwei mit HRTF

Distanz	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10
3	6	3	3	3	5	4	3	2	5	3
2	4	2,5	2	1,5	4	3	1	1,5	4	2,5
5	7	3	3	4	4	5	2	2,5	7	2,5
4	5	2	2	5	3	4	2,5	3	7	3
1	3	0,5	1	0,5	2	0,5	0,3	1	1	2
1,5	3	1	0,5	0,5	3	2	0,8	1,5	1,5	2
4	7	3,2	3	3	4	3	2,2	2	5	3
5	6	3	4	4	5	4	2,5	3	6,5	5
3	5	2,8	3	5	5	3	2,5	3	9	6
2	4	1,5	2	2	4	4	1	1,5	3	4
1,5	3	1,2	1	1	4	2	1,5	1	2	3
1	2	1	0,5	0	3	0,5	0,4	0,5	1	1,5

Tabelle 5: Testergebnisse für Testlauf Drei mit HRTF

Distanz	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10
1	1	1,5	1	1	2	2	0,7	1	1	2
1,5	4	1	2	1,5	3	4	1,4	2	2	3
2	5	2	2	1,5	4	3	1,4	2	3	3,5
3	6	3	3	3	5	4	2,1	3	3	4
4	7	4	4	4	6	5	2,1	4	8	5,5
5	8	5	5	6	7,5	3	3	4,5	10	7

Tabelle 6: Testergebnisse für Testlauf Eins ohne HRTF

Distanz	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10
5	6	5	4	4	7,5	4	2	3,5	4	3,5
4	5	4	3	3	6	3	1,5	1,5	2	2,5
3	4	4	3	2	5	2	1,2	1	1,5	2
2	3	3	2	1	4	2	0,9	1	1	1,5
1,5	2	3	1	1	3	1	0,5	0,5	0,5	1,2
1	1	1	0,5	0,5	2	0,5	0,2	0,5	0,3	1

Tabelle 7: Testergebnisse für Testlauf Zwei ohne HRTF

Distanz	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10
3	6	5	3	4	4	2	2	2	3	2,5
2	5	3	2	4	3	2	1,5	1,5	3	2
5	7	7	5	6	6	2	2,3	3	7	4,5
4	6	6	6	5	5	3	1,8	2	6	3,5
1	1,5	3	2	2	1	0,5	0,1	0,5	0,5	1
1,5	3	4	3	3	2	1	0,2	1	1,5	1,5
4	6	4	6	4	6	3	1,6	2	3	4
5	7	3	7	6	7	4	2	4	8	5,5
3	5	2	4	5	5	3	1,5	3	4	3
2	4	2	3	4	4	1	1	2	2,5	2
1,5	2	1	2	3	4	1	0,6	1,5	1,5	1,5
1	1	1	1	1	1,5	0,5	0,3	0,5	1	1

Tabelle 8: Testergebnisse für Testlauf Drei ohne HRTF

Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §22(4) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 6. Juni 2011

Ort, Datum

Unterschrift