

Interaktive Visualisierung und Abhörung zur
Klangabstrahlung von Musikinstrumenten –
Interpolation und Filterung mehrkanaliger
Aufnahmen unter Verwendung der
geometrischen Relationen

Holger Struchholz

Diplomarbeit

Fachhochschule Düsseldorf

Fachbereich Medien

Betreuer:

Prof. Dr. Eng. / Univ. of Tsukuba Jens Herder

Prof. Dr.-Ing. Dieter Leckschat

8. Mai 2005

Abstract

This project aims at developing a virtual environment allowing the characteristic sound radiation patterns of a musical instrument to be experienced in real-time. A virtual environment will be created within which the user may freely move around a musical instrument, thereby receiving acoustic and visual feedback in real-time. Both the experience and the perception of auditory and visual effects are intensified by the combination of acoustic and visual elements, as well as the option of user interaction.

The simulation of characteristic sound radiation pattern is based on interpolating the volume of a multi-channel recording, rather than a computationally intensive sound synthesis, as, for example, Physical Modeling. In contrast to computationally intensive sound synthesis, the use of real recordings offers a near-natural mapping of the sound radiation patterns in real-time. Additionally, a simple filter has been developed enabling the qualitative simulation of an instrument's characteristic sound radiation patterns to be easily implemented within real-time 3D-applications.

Both methods of simulating sound radiation patterns have been evaluated with respect to their functionality and validity by means of a spectral analysis and an auditory experiment.

Kurzfassung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer virtuellen Umgebung, die das charakteristische Klangabstrahlverhalten eines Musikinstruments in Echtzeit erfahrbar macht. Es wird eine virtuelle Umgebung geschaffen, in der sich der Benutzer frei um ein Musikinstrument bewegen kann und in Echtzeit ein akustisches und visuelles Feedback erhält. Durch die Verbindung der auditiven und visuellen Elemente und die Möglichkeit der Interaktion, wird das Erleben und die Wahrnehmung der Effekte intensiviert.

Die Simulation des charakteristischen Klangabstrahlverhaltens erfolgt nicht durch eine rechenaufwändige Klangsynthese wie z.B. Physical Modeling, sondern basiert auf der Lautstärkeinterpolation einer Mehrkanalaufnahme. Die Verwendung der realen Aufnahmen ermöglicht eine annähernd naturgetreue Abbildung des Klangabstrahlverhaltens und ist, im Gegensatz zu rechenaufwändigen Klangsyntheseverfahren, echtzeitfähig. Zusätzlich wurde ein einfacher Filter entwickelt, der das charakteristische Klangabstrahlverhalten des Instruments eher qualitativ simuliert und sich problemlos in Echtzeit 3D-Anwendungen implementieren lässt. Die beiden entwickelten Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens wurden mittels Spektralanalyse und anhand eines durchgeführten Hörtests auf ihre Funktionalität und ihre Gültigkeit überprüft.

Danksagung

Mein Dank gilt als erstes meinen Eltern für ihr Vertrauen und ihre Unterstützung. Bedanken möchte ich mich auch bei M. Astrain, S. Boyano und S. Francia, die die in dieser Arbeit verwendeten Audiodateien im Rahmen ihrer Diplomarbeiten aufgenommen haben. Zusätzlich möchte ich mich bei dem Saxophonspieler Arnol Behl bedanken.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei Herrn Dipl.-Ing. Wilhelm Schaffrath für seine Unterstützung während des durchgeführten Hörversuchs und bei Herrn Prof. Dr. phil. Dipl.-Ing. Dieter Braun für sein Interesse und seinen Anmerkungen zum durchgeführten Hörversuch.

Für die Möglichkeit, die entwickelte Anwendung auf dem TGS User Meeting 2004 präsentieren zu dürfen, möchte ich mich bei der Firma Mercury Computer Systems bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinen betreuenden Professoren Prof. Dr. Eng. / Univ. of Tsukuba Jens Herder und Prof. Dr.-Ing. Dieter Leckschat.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorgelegte Diplomarbeit selbständig angefertigt und keine andere als im Schrifttumsverzeichnis angegebene Literatur benutzt habe.

Düsseldorf, den 29 April 2005.

Holger Struchholz

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Kurzfassung	ii
Danksagung	iii
Eidesstattliche Erklärung	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Anforderungen und Anwendungsfelder	2
1.3 Bisherige Arbeiten	4
1.4 Gliederung	5
2 Theoretische Voraussetzungen	7
2.1 Abstrahlcharakteristiken von Musikinstrumenten	7
2.1.1 Blasinstrumente	7
2.1.2 Streichinstrumente	9
2.2 Klangsyntheseverfahren	11
2.2.1 Simulation des klanglichen Ergebnisses	11
2.2.2 Simulation der mechanischen Eigenschaften	12
2.2.3 Einordnung der entwickelten Methoden	13
2.3 Interpolation von Audio	14
3 Aufnahme der Audiodateien	16
3.1 Aufnahme	16

3.1.1	Verwendete Mikrophone	17
3.1.2	Reflexionsarmer Raum	18
3.1.3	Position der Mikrophone	20
3.1.4	Position des Instruments	21
3.1.5	Verwendete Audiosoftware	22
3.1.6	Aufnahmeprozess	22
3.2	Nachbearbeitung der Audiodateien	23
4	Umsetzung	27
4.1	Entwicklungsumgebung	27
4.2	Das Saxophonmodell	28
4.3	Audio	29
4.3.1	Anforderungen	29
4.3.2	FMOD	31
4.3.3	Simulation durch Interpolation	31
4.3.4	Simulation durch Filter	35
4.4	Grafik	43
4.4.1	Anforderungen	43
4.4.2	Open Inventor	44
4.4.3	Umsetzung in Visual C++	45
5	Validierung	47
5.1	Hörversuche	47
5.1.1	Einführung	47
5.1.2	Probleme bei Messungen	48
5.1.3	Auswertung	50
5.2	Versuchsdurchführung	50
5.2.1	Fragestellung	50
5.2.2	Testanwendung und Versuchsanordnung	56
5.2.3	Versuchsablauf	58
5.2.4	Testergebnisse	58
5.3	Vergleich der Frequenzverläufe der unterschiedlichen Methoden	63
5.3.1	Reale Hörbeispiele	63

5.3.2	Simulierte Hörbeispiele (Interpolation)	65
5.3.3	Simulierte Hörbeispiele (Filter)	66
5.3.4	Vergleich der Frequenzverläufe für positive und negative Winkel	69
5.4	Auswertung und Ergebnis	71
5.4.1	Testteil 1: Wahrnehmung von Klangabstrahlverhalten . . .	72
5.4.2	Testteil 2: Bewertung der Hörbeispiele	81
6	Fazit und Ausblick	85
6.1	Fazit	85
6.2	Ausblick	86
	Literaturverzeichnis	88
A	Mikrophone	91
A.1	Wandlerprinzipien	91
A.1.1	Kondensatormikrophone	91
A.1.2	Elektrodynamische Mikrophone	92
A.2	Richtcharakteristiken	93
A.2.1	Druckempfänger	94
A.2.2	Druckgradientenempfänger	94
B	Spektralanalyse	97
C	Quellcode Interpolation	103
D	Quellcode Filter	113
E	Testinstruktionen	126
F	Numerische Testergebnisse	129
F.1	Testteil 1: Wahrnehmung von Klangabstrahlverhalten	129
F.2	Testteil 2: Bewertung der Hörbeispiele	132

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abstrahlcharakteristik von Klarinette und Oboe. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]	8
2.2	Abstrahlcharakteristik einer Trompete. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]	9
2.3	Abstrahlcharakteristik einer Violine. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]	10
2.4	Abstrahlcharakteristik eines Violoncellos. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]	11
3.1	Sennheiser MKH 40 P48. [Sen05]	17
3.2	Frequenzgang des Mikrophons Sennheiser MKH 40 P48. [Sen05]	18
3.3	Reflexionsarmer Raum der Fachhochschule Düsseldorf. [Boy03] .	19
3.4	Ergebnis der Testmessung im reflexionsarmen Raum. [Boy03] . .	20
3.5	Schematische Anordnung der Mikrophone während der Aufnahme. [Boy03]	21
3.6	Anordnung der Mikrophone während der Aufnahme im reflexionsarmen Raum der Fachhochschule Düsseldorf. [Boy03]	23
3.7	Saxophonspieler während der Aufnahme. [Boy03]	24
3.8	Schema der Signalwege während der Aufnahme.	25
3.9	Cool Edit Pro. [Boy03]	26
4.1	Microsoft Visual C++ 6.0.	28

4.2	3D Studio Max.	29
4.3	WaveLab 4.0.	36
4.4	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 3. und 4. Mikrophons. Die durch den Filter bearbeiteten Frequenzbereiche sind markiert und die Mittenfrequenz (Center) angegeben.	38
4.5	Vergleich der Frequenzverläufe der Aufnahmen des 3. Mikrophons (Filter) und des 3. Mikrophons (Real).	42
4.6	Vergleich der Frequenzverläufe der Aufnahmen des 2. Mikrophons (Filter) und des 2. Mikrophons (Real).	43
4.7	Vergleich der Frequenzverläufe der Aufnahmen des 4. Mikrophons (Filter) und des 4. Mikrophons (Real).	44
4.8	Open Inventor Viewer.	46
5.1	Schema für eine Versuchsperson im Hörversuch. [Bla74]	48
5.2	Testperson als psychophysikalisches Messgerät. [Bla74]	49
5.3	Bewegungsachse, Aufsicht.	51
5.4	Bewegungsachse, Seitenansicht.	52
5.5	Benutzeroberfläche der Testanwendung für den ersten Testteil.	56
5.6	Benutzeroberfläche der Testanwendung für den zweiten Testteil.	57
5.7	Versuchsanordnung.	58
5.8	Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele.	59
5.9	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation).	60
5.10	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter).	61
5.11	Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	62
5.12	Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	63
5.13	Frequenzspektrum der realen Hörbeispiele für 0° , 72° und 144°	64
5.14	Frequenzspektrum der realen Hörbeispiele für 0° , -72° und -144°	65
5.15	Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für 0° , 72° und 144°	66

5.16	Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für 0°, -72° und -144°	67
5.17	Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Filter) für 0°, 72° und 144°	68
5.18	Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Filter) für 0°, -72° und -144°	68
5.19	Vergleich des Frequenzspektrums der realen Hörbeispiele für 72° und -72°	70
5.20	Vergleich des Frequenzspektrums der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für 72° und -72°	70
5.21	Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden.	74
5.22	Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz.	75
5.23	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden.	77
5.24	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz.	78
5.25	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden.	79
5.26	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz.	80
A.1	Prinzipieller Aufbau eines Kondensatormikrophons. [Hen01]	92
A.2	Prinzip eines Tauchspulenmikrophons. [Hen01]	93
A.3	Prinzip eines Druckempfängers. [Hen01]	94
A.4	Prinzip eines Druckgradientenmikrophons mit Achtercharakteristik. [Hen01]	95
B.1	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 1. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	97

B.2	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 2. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	98
B.3	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 4. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	98
B.4	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 5. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	99
B.5	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 6. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	99
B.6	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 7. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	100
B.7	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 8. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	100
B.8	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 9. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	101
B.9	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 10. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	101
B.10	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 11. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	102
B.11	Frequenzverläufe der Aufnahmen des 12. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).	102
E.1	Testteil 1: Zum Bewegen des Mikrophons bitte die "links" und "rechts" Tasten am Computer verwenden.	127
E.2	Testteil 2: Zum Bewegen der Markierung bitte die "links" und "rechts" Tasten am Computer verwenden.	128

Tabellenverzeichnis

3.1	Koordinaten der Mikrofonpositionen. [Boy03]	22
4.1	Ergebnis der Frequenzdifferenzanalyse. C: Center, B: Bandwidth, G: Gain.	39
5.1	Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	59
5.2	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	60
5.3	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	61
5.4	Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	62
5.5	Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	63
5.6	Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil 1. G: Anzahl der gleich bewerteten Hörversuche, A: Anzahl der Probanden, AP: Anzahl der Probanden in Prozent, B: Binomialverteilung in Prozent.	72
5.7	Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil 1 mit 36° Antworttoleranz. G: Anzahl der gleich bewerteten Hörversuche, A: Anzahl der Probanden, AP: Anzahl der Probanden in Prozent, B: Binomialverteilung in Prozent.	72
5.8	Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiel unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	74

5.9	Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz. W: akustisch dargestellter (beabsichtigter) Winkel, Ü: Anzahl der übereinstimmenden Antworten in Prozent.	75
5.10	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	76
5.11	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz. W: akustisch dargestellter (beabsichtigter) Winkel, Ü: Anzahl der übereinstimmenden Antworten in Prozent.	77
5.12	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	78
5.13	Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz. W: akustisch dargestellter (beabsichtigter) Winkel, Ü: Anzahl der übereinstimmenden Antworten in Prozent.	79
5.14	Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil . G: Anzahl der gleich bewerteten Hörversuche, A: Anzahl der Probanden, AP: Anzahl der Probanden in Prozent, B: Binomialverteilung in Prozent.	82
5.15	Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	83
5.16	Summierte Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F). S: Summe der Antworten in Prozent.	83
5.17	Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	84
5.18	Summierte Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Filter) (F) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Interpolation) (I). S: Summe der Antworten in Prozent.	84

F.1	Testergebnisse für reale Hörbeispiele. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	129
F.2	Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Interpolation). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	130
F.3	Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Filter). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	130
F.4	Testergebnisse für reale Hörbeispiel unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	130
F.5	Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	131
F.6	Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.	131
F.7	Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	132
F.8	Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).	132

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist es, eine virtuelle Umgebung zu schaffen, die es dem Anwender erlaubt, das Klangabstrahlverhalten eines Instruments in Echtzeit zu erfahren. Der Anwender kann sich frei um das Instrument bewegen, während sich der Klangeindruck des Instruments, je nach Position des Anwenders, kontinuierlich verändert. Um das Klangabstrahlverhalten zu simulieren, werden zwei Methoden angewendet und abschließend in einem Hörversuch miteinander verglichen.

Die erste Methode basiert auf einer zwölfspurigen Mehrkanalaufnahme. Die Mehrkanalaufnahme entstand durch zwölf Mikrophone, die gleichmäßig um das Instrument verteilt waren. Das charakteristische Klangabstrahlverhalten des Instruments konnte so vollständig erfasst werden. Die Aufnahmen wurden von M. Astrain [Vil03], S. Boyano [Boy03] und S. Francia [GC03] im Rahmen ihrer Diplomarbeiten angefertigt. Unter Verwendung der zwölf einzelnen Spuren kann so durch dynamische Lautstärkeänderungen mit Hilfe des entwickelten Interpolationsalgorithmus jede beliebige Position um das Instrument akustisch abgebildet werden. Die qualitativ hochwertigen Aufnahmen garantieren eine naturgetreue und annähernd realistische akustische Darstellung des Abstrahlverhaltens.

Die zweite Methode verwendet einen einfachen Filter, der das charakteristische Klangabstrahlverhalten simuliert. Die einzelnen Spuren der Mehrkanalauf-

nahme des Instruments wurden spektral analysiert und anhand der Ergebnisse ein Filter entwickelt. Hierbei ging es in erster Linie um eine qualitative Abbildung des Klangabstrahlverhaltens, nicht um eine naturgetreue Simulation.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Anwendung beinhaltet neben der Programmierung des Interpolationsalgorithmus und des Filters zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens auch den Aufbau einer virtuellen Umgebung, mit der der Anwender interagieren kann. Der Anwender kann sich virtuell frei um das Instrument bewegen und bekommt in Echtzeit das entsprechende akustische Feedback, d.h. er hört das Audiosignal, welches ein Mikrofon in dieser Position aufnehmen würde. Der Anwender bewegt also mit einer virtuellen Kamera, die den Blickwinkel auf die Szene festlegt, ein virtuelles Mikrofon.

1.2 Anforderungen und Anwendungsfelder

Die beiden entwickelten Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens von Musikinstrumenten finden vor allem dort Verwendung, wo neben qualitativ hochwertiger 3D-Grafik auch ein realistisches Audioverhalten der Klangquellen erwünscht ist. Beide Methoden sind weniger rechenintensiv als Simulationen, die auf den physikalischen Eigenschaften einer Klangquelle basieren und die z.B. Musikinstrumente unter Verwendung komplexer physikalischer Modelle synthetisieren. Dadurch stehen bei Echtzeitanwendungen mehr Ressourcen zur Berechnung der 3D-Grafik zur Verfügung. Der Unterschied der beiden Methoden besteht im Wesentlichen darin, dass Methode 1, die Interpolation von Mehrkanalaufnahmen, das charakteristische Klangabstrahlverhalten eines Instruments sehr realistisch abbildet; Methode 2, das einfache Filtermodell, simuliert das Klangabstrahlverhalten eher qualitativ. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Anwendungsfelder für die beiden Methoden.

Methode 1 eignet sich beispielsweise für eine interaktive Lernsoftware für Toningenieure. Die Mikrofonposition bestimmt bei der Aufnahme eines Instruments entscheidend die Klangcharakteristik des Instruments. Eine entsprechende

Anwendung könnte Toningenieuren helfen, die physikalischen Eigenschaften eines Instruments zu erlernen. In Echtzeit kann das Mikrofon virtuell bewegt werden und der Klang ändert sich entsprechend der Position des Mikrophons. Das akustische Erleben der Klangabstrahlcharakteristik wird durch das gleichzeitige visuelle Erleben verstärkt.

Ein Nachteil von Methode 1 ist der sehr aufwändige Aufnahmeprozess, der zum Erstellen der benötigten Mehrkanalaufnahme notwendig ist. Der Aufnahmeprozess wird in Kapitel 3 genauer erläutert. Ein weiterer kritischer Punkt ist, dass Verdeckungseffekte, die durch den spielenden Musiker entstehen, auftreten und dadurch in den verdeckten Bereichen abrupte und nicht vorhersehbare Klangänderungen auftreten können. Das Klangabstrahlverhalten kann in diesen Bereichen also nicht natürlich abgebildet werden und muss immer im Zusammenhang mit dem Aufnahmeprozess betrachtet werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die in Kapitel 2.3 beschriebenen Kammfiltereffekte, die durch Summierung mehrerer Audiosignale entstehen, nicht wahrnehmbar sind und der Klangcharakter der Simulation nicht beeinträchtigt wird.

Ein Vorteil dieser Methode ist, mit den eben erwähnten Einschränkungen, die zu erwartende hohe Natürlichkeit der Abbildung des Klangabstrahlverhaltens sowie die hohe Audioqualität. Ist die entsprechende Mehrkanalaufnahme eines Instruments vorhanden und sind die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Anforderungen erfüllt, kann diese Methode problemlos und echtzeitfähig in eine virtuelle Umgebung implementiert werden. Insbesondere, da der entwickelte Algorithmus prinzipiell auf beliebige Schallquellen übertragbar und daher sehr flexibel einsetzbar ist.

Da Methode 2 das Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten bzw. Klangquellen allgemein eher qualitativ simuliert, eignet sich der entwickelte Filter nicht für Anwendungen, die eine möglichst realistische Darstellung des Klangabstrahlverhaltens benötigen. Die Anwendungsfelder liegen eher im Bereich Unterhaltungssoftware (z.B. 3D-Computerspiele). Der Filter kann das akustische Erleben der virtuellen Realität ergänzen, bildet sie jedoch nicht naturgetreu ab.

Der wesentliche Nachteil von Methode 2 ist die fehlende Natürlichkeit der Abbildung des Klangabstrahlverhaltens einer Schallquelle. Durch die in Kapitel 4.3.4 beschriebene Filterentwicklung kann das Klangabstrahlverhalten nur qualitativ dargestellt werden und ist insbesondere jeweils nur für eine Schallquelle gültig. Da auch hier zur Spektralanalyse des Klangabstrahlverhaltens eine Mehrkanalaufnahme notwendig ist, ist zur Umsetzung dieser Methode ebenfalls ein aufwändiger Aufnahmeprozess durchzuführen.

Ist der Filter, d.h. das Frequenzverhalten für eine Schallquelle bestimmt, ist er auf beliebige Monoaufnahmen dieser Schallquelle anwendbar. Der Vorteil im Vergleich zu Methode 1 besteht also darin, dass der aufwändige Aufnahmeprozess nur einmal durchgeführt werden muss. Aufgrund der einfachen Umsetzung des Filters ist diese Methode unter den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Anforderungen problemlos in eine virtuelle Umgebung zu implementieren.

1.3 Bisherige Arbeiten

Die im Rahmen der Diplomarbeit entstandene Anwendung und die entwickelte Methode, das charakteristische Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten durch die Interpolation hochwertiger Mehrkanalaufnahmen zu simulieren, baut auf den Diplomarbeiten von M. Astrain [Vil03], S. Boyano [Boy03] und S. Francia [GC03] auf. Die Arbeiten von M. Astrain, S. Boyano und S. Francia beschreiben den Aufbau einer interaktiven Lernsoftware, die das charakteristische Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten verständlich darstellt und in Echtzeit akustisch abbilden kann. Die Lernsoftware wurde mit Macromedia Director 7.0 erstellt und verwendet einen, zum hier vorgestellten Algorithmus ähnlichen Interpolationsalgorithmus zur Simulation des Abstrahlverhaltens. Wie S. Francia [GC03] ausführlich darstellt, treten bei der Lernsoftware hörbare Artefakte auf, die sich als Schwebungen und Echoeffekte beschreiben lassen. Dies ist weitgehend auf die begrenzten Möglichkeiten der Autorensoftware Director zurückzuführen, die es nicht erlaubt, zwölf Audiodateien gleichzeitig zu verwalten und abzuspielen. Aus diesem Grund müssen zur Laufzeit des Programms Audiodateien

nachgeladen und gestartet werden. Dies führt zu hörbaren Verschiebungen zwischen den einzelnen Audiodateien und ein synchrones Abspielen ist, insbesondere bei schnellen Bewegungen im virtuellen Raum, nicht möglich. Das asynchrone Abspielen der Audiodateien führt zu den oben beschriebenen hörbaren Artefakten.

Eine ähnliche Zielsetzung wie die vorliegende Diplomarbeit, verfolgen auch die Diplomarbeiten "Mikrofonisierung bei Holzblasinstrumenten" [Zeh00] und "Aufnahmepraxis bei Streichinstrumenten" [KS98]. Auch dort wurden Anwendungen erstellt, die das Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten darstellen und erfahrbar machen. Der Hauptunterschied zur vorliegenden Arbeit besteht im Wesentlichen darin, dass es keinen Anspruch auf eine lückenlose Darstellung des Klangabstrahlverhaltens gab. Der Anwender kann sich in den erstellten Anwendungen also nicht frei in einem virtuellen Raum bewegen, sondern ist an vorgegebene Hörpositionen gebunden, zwischen denen er wechseln kann. Wechselt der Anwender die Hörposition, wird die Audiodatei angehalten, das gezeigte Bild wechselt die Perspektive und die neue Audiodatei beginnt zu spielen.

1.4 Gliederung

Im 2. Kapitel der Diplomarbeit werden die theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis der vorliegenden Arbeit benötigt werden, erläutert. Die Abstrahlcharakteristiken von Holzblasinstrumenten und Saiteninstrumenten werden dargestellt und erklärt. Des Weiteren wird ein Überblick über artverwandte Methoden zur Audiosimulation gegeben, so dass eine entsprechende Einordnung dieser Arbeit stattfinden kann. Das 3. Kapitel beschreibt den Aufnahmeprozess der hier verwendeten Audiodateien. Die verwendeten Mikrophone, die Position der Mikrophone während der Aufnahme, der Aufnahmeraum und die Klangnachbearbeitung der Audiodateien werden erläutert. Im 4. Kapitel wird die Entwicklung der entstandenen Anwendung erläutert. Zunächst werden die verwendete Entwicklungsumgebung und die Entstehung des 3D-Modells beschrieben. Der Abschnitt 4.3 beschreibt die beiden entwickelten Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens von Musikinstrumenten und erklärt die Umsetzung durch die Au-

dioengine FMOD. Der Abschnitt 4.4 beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Programmierung der virtuellen Umgebung und der Benutzerschnittstelle mit Hilfe des 3D-Toolkits Open Inventor. Das 5. Kapitel beschäftigt sich zunächst allgemein mit dem Thema Hörversuch. Anschließend wird der im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführte Hörversuch beschrieben und die Ergebnisse ausgewertet. Im 6. Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit kurz zusammengefasst und weitere Entwicklungsmöglichkeiten erläutert.

Kapitel 2

Theoretische Voraussetzungen

2.1 Abstrahlcharakteristiken von Musikinstrumenten

Die Klangabstrahlcharakteristik eines Instruments ist nicht gleichförmig. Schallquellen, die klein gegenüber den Wellenlängen des abgestrahlten Schalls sind, strahlen den Schall weitgehend ungerichtet ab; gegenüber den Wellenlängen große Schallquellen bündeln den Schall und strahlen ihn damit in eine oder mehrere Richtungen ab. Da die Wellenlängen der Spektralkomponenten musikalischer Klänge zwischen etwa 10 m und 2 cm liegen können, bündeln die Instrumente den Schall frequenzabhängig, dabei teilweise auch in sehr komplexer Form. Als grobe Faustregel kann gelten, dass Frequenzen im Bassbereich im Allgemeinen kugelförmig ungerichtet, Frequenzen darüber zunehmend gerichtet abgestrahlt werden. Zusätzlich beeinflussen Effekte, wie beispielsweise das Öffnen einer Klappe bei einem Saxophon, das Abstrahlverhalten von Instrumenten (siehe hierzu auch [Her99]). Ein Toningenieur kann also bei der Aufnahme eines Instruments durch unterschiedliche Positionierung des Mikrophons den Klangcharakter der Aufnahme entscheidend mitbestimmen. [Dic97]

2.1.1 Blasinstrumente

Holzblasinstrumente wie z.B. Flöte, Klarinette und Saxophon strahlen den Schall bis ca. 1000 Hz bevorzugt aus den Grifflöchern ab. Mit ansteigender Frequenz

wandert der Abstrahlbereich zunehmend zur Schallstürze. Die höheren Schallanteile werden schließlich fast vollständig aus der Schallstürze abgestrahlt. Bei Blechblasinstrumenten wie z.B. Trompete, Horn und Posaune wird der Schall fast ausschließlich aus der Stürze abgestrahlt. Dies ist auf die fehlenden Grifflöcher zwischen Mundstück und Stürze und auf die wesentlich größere Schallstürze zurückzuführen. Auch bei tieferen Frequenzen ist der Schall dadurch gebündelt und bereits bei Frequenzen um 500 Hz ist eine Richtwirkung deutlich feststellbar. Die Abstrahlbereiche der Klangkomponenten bei Holzblasinstrumenten sind so ausgeprägt, dass die Positionierung des Mikrophons bei einer Aufnahme weit wichtiger ist als die Wahl des Mikrophontyps. So kann durch unterschiedliche Positionierung entweder ein warmer weicher Klang oder ein scharfer präserter Klang erzielt werden. In den Abbildungen 2.1 und 2.2 sind die Klangabstrahlbereiche von Blasinstrumenten anhand zweier Beispiele veranschaulicht. [Dic97]

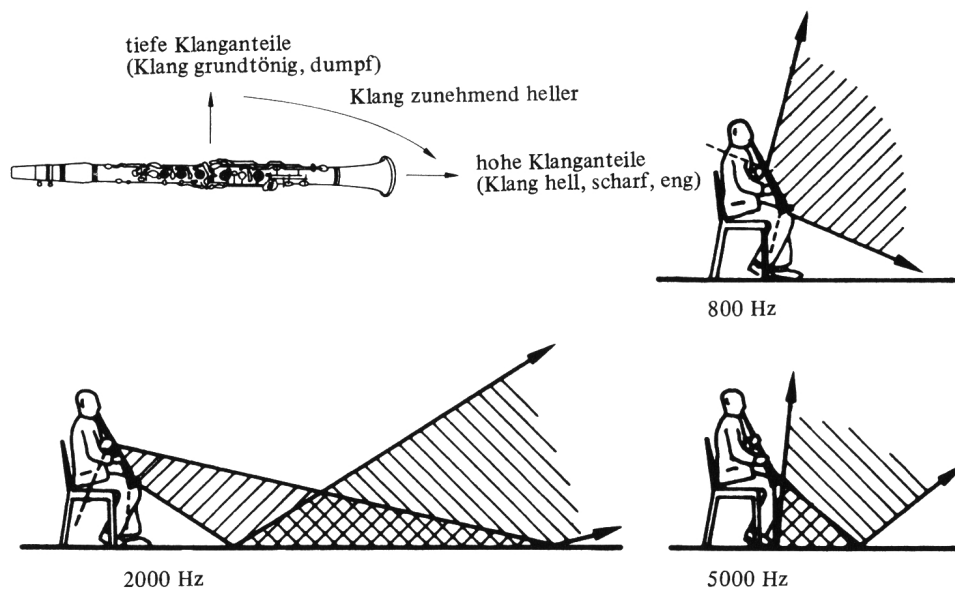


Abbildung 2.1: Abstrahlcharakteristik von Klarinette und Oboe. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]

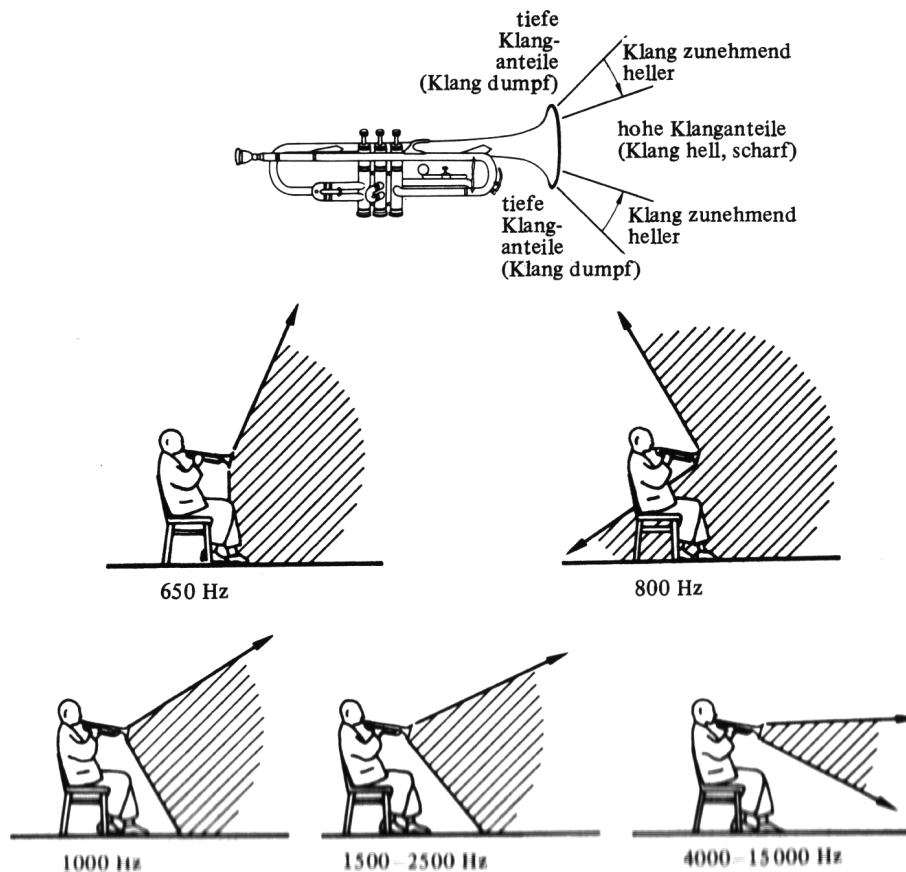


Abbildung 2.2: Abstrahlcharakteristik einer Trompete. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]

2.1.2 Streichinstrumente

Die Abstrahlcharakteristiken von Streichinstrumenten kommen dadurch zustande, dass die schwingenden Teile, also besonders Decke und Boden, in einzelnen Zonen mit unterschiedlicher Amplitude und Phase schwingen. Zusätzlich spielt die Abstrahlung des im Resonanzkörpers eingeschlossenen Luftvolumens eine Rolle. Also sind individuelle Merkmale der Instrumente wie Holzstruktur und Formgebung für das Schallabstrahlverhalten wesentlich bestimmend. Allgemein kann man sagen, dass die Richtwirkung bei den Streichinstrumenten nicht so ausge-

prägt ist wie bei den Blasinstrumenten. Sie ist komplexer und stärker vom Einzelinstrument abhängig. Kleine Änderungen der Mikrofonpositionen bei einer Aufnahme wirken sich also nicht so deutlich auf den Klang aus.

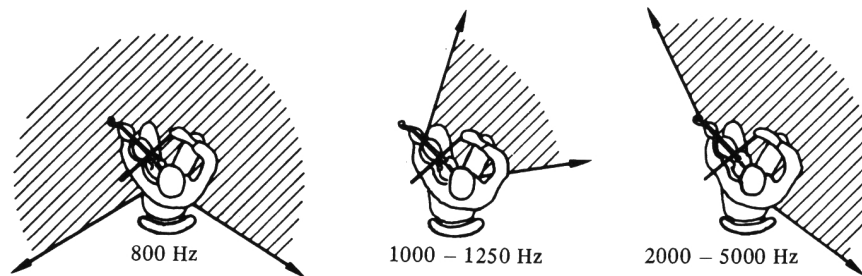


Abbildung 2.3: Abstrahlcharakteristik einer Violine. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]

Eine Violine beispielsweise (siehe Abbildung 2.3), strahlt den Schall bis ca. 500 Hz weitgehend kugelförmig ab. Mit ansteigender Frequenz verengt sich die Schallabstrahlung zunehmend, um zwischen 1000 Hz und 1200 Hz senkrecht zur Decke des Resonanzkörpers eine deutliche Bündelung zu erfahren. Über 1200 Hz wird der Abstrahlbereich wieder weiter, spaltet sich aber wechselnd in Abstrahlbereiche auf, zwischen denen Zonen geringerer Abstrahlung liegen. Welchen Einfluss die Formgebung und Größe eines Instruments auf das Abstrahlverhalten hat, wird deutlich, wenn man zum Vergleich die Charakteristik eines Violoncellos betrachtet (siehe Abbildung 2.4). Ungerichtete Abstrahlung hat das Violoncello wegen der größeren schallabstrahlenden Instrumententeile nur bis etwa 200 Hz. Um 1000 Hz wird der Schall weitgehend nach oben abgestrahlt und für Frequenzen zwischen 2000 und 5000 Hz teilt sich die Abstrahlungsrichtung in zwei Zonen, eine zum Boden, eine senkrecht nach oben gerichtet. [Dic97]

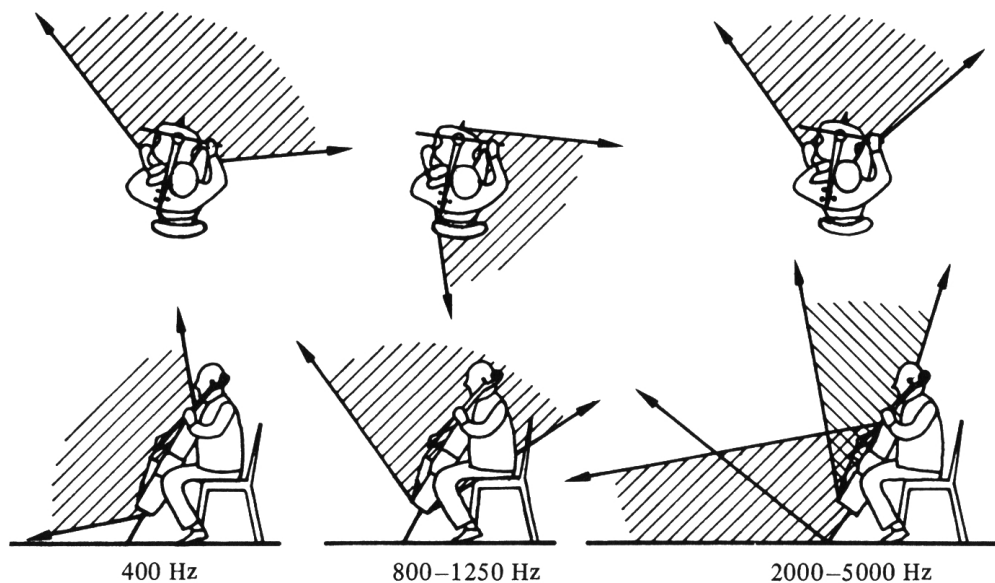


Abbildung 2.4: Abstrahlcharakteristik eines Violoncellos. Gekennzeichnet sind die Bereiche, innerhalb derer der Pegel um nicht mehr als 3 dB unter dem Maximalwert abfällt. [Dic97]

2.2 Klangsyntheseverfahren

Um den Klang von Musikinstrumenten zu simulieren, sind grundsätzlich zwei Verfahren denkbar:

- Simulation des klanglichen Ergebnisses
- Simulation der mechanischen Eigenschaften

Die beiden Methoden unterscheiden sich grundlegend voneinander. [Dut94]

2.2.1 Simulation des klanglichen Ergebnisses

Die Simulation des klanglichen Ergebnisses basiert entweder auf Sampling, d.h. Audioaufnahmen des Instruments, oder auf einer Syntheseform, mit deren Hilfe das Frequenzspektrum des Instruments nachempfunden wird. [Dut94]

Die Simulation durch Sampling ermöglicht eine naturgetreue Abbildung des Instruments. Allerdings hat man keinen Zugriff auf die instrument-typischen Parameter, um dem simulierten Instrument beim Spielen Ausdruck zu verleihen. Die veränderbaren Parameter sind also nicht instrument-spezifisch, basieren also nicht auf den durch Bauart oder Spielweise gegebenen mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Instruments, sondern sind abstrakte Parameter wie z.B. Tiefpassfilter oder Lautstärkepegel. [Dut94][Leh96]

Bei der Simulation durch eine Synthese wird ein Klang zunächst spektral analysiert und anschließend durch eine Synthese reproduziert. Mögliche Syntheseformen, wie sie in vielen Synthesizern zum Einsatz kommen, sind z.B. FM-Synthese oder Additive Synthese. Auch bei dieser Methode den Klang eines Musikinstruments zu simulieren, tritt das Problem auf, dass die veränderbaren Parameter abstrakte Parameter sind, die von der verwendeten Syntheseform abhängen. Eine gezielte realistische Klangformung im musikalischen Sinne, z.B. die Änderung eines typischen Spielparameters wie Luftdruck, Bogengeschwindigkeit oder Anschlagstelle ist demnach kaum möglich. [Leh96][Spi97]

2.2.2 Simulation der mechanischen Eigenschaften

Den Klangcharakter eines Musikinstruments durch die Simulation der mechanischen und physikalischen Eigenschaften zu simulieren wird Physical Modeling genannt. Die Tonerzeugung eines mechanischen Musikinstruments wird hierbei abstrahiert und per Rechner nachvollzogen. Der Klang der Simulation kann also durch die Änderung der Parameter des mechanischen Modells, z.B. die Länge der Saiten, deren Spannung oder der Rohrdurchmesser eines Blasinstrumentes, beeinflusst werden. Die Parameter, die zur Klangbearbeitung zur Verfügung stehen, haben also immer einen realen Bezug zum jeweiligen Instrument und sind instrument-spezifisch. Diese Form der Klangersimulation strebt also eine möglichst reales Klangabbildung an, bei der insbesondere auch die veränderbaren Parameter zur Klangformung einen direkten Bezug zum simulierten Musikinstrument haben. [Spe00][Dut94]

2.2.3 Einordnung der entwickelten Methoden

Die in dieser Arbeit beschriebenen Methoden zur Simulation des charakteristischen Klangabstrahlverhaltens von Musikinstrumenten basieren beide auf Sampling. Die im Vorfeld aufgezeichneten Audiodateien werden durch einen entwickelten Algorithmus abgespielt bzw. manipuliert.

Insbesondere die erste beschriebene Methode, Simulation durch Lautstärkeinterpolation einer Mehrkanalaufnahme, weist eine sehr natürliche Klangcharakteristik auf. Dies ist dadurch gegeben, dass der veränderliche Parameter, die Position relativ zum Instrument, durch die einzelnen Audiodateien der Mehrkanalaufnahme und deren Interpolation simuliert wird. Abgesehen von der Lautstärke der einzelnen Audiodateien wird kein anderer Klangparameter manipuliert.

Die zweite Methode, Simulation durch einen Filter, verwendet nur eine Audiodatei, die durch den entwickelten Filter manipuliert wird. Um den Filter zu entwickeln, wurden die einzelnen Audiodateien der Mehrkanalaufnahme spektral analysiert und die Analyseergebnisse auf den Filter übertragen. Der Filter verändert die Klangcharakteristik der Audiodatei also durch eine gezielte Veränderung des Frequenzspektrums und weist nur bedingt eine naturgetreue Abbildung des Klangabstrahlverhaltens auf.

Prinzipiell wäre auch die Umsetzung durch Physical Modeling eine geeignete Alternative zu den oben genannten Möglichkeiten. Der Nachteil von Physical Modeling ist allerdings der große Rechenaufwand, der zum Berechnen der physikalischen Eigenschaften des Instrumentenmodells notwendig ist. Dies ist insbesondere dann gegeben, wenn das verwendete Rechenmodell die physikalischen Eigenschaften und damit die klanglichen Eigenschaften des Instruments nicht nur qualitativ, sondern möglichst realistisch darstellen will. Da die Simulation des Klangabstrahlverhaltens in eine virtuelle Umgebung implementiert und in Echtzeit dargestellt werden soll, wäre eine Simulation durch Physical Modeling unter Umständen problematisch.

2.3 Interpolation von Audio

Interpolation im Zusammenhang mit Audio meint das gleichmäßige Überblenden zwischen zwei oder mehreren Audiodateien, wobei während der Überblendung ein Mischsignal entsteht. Hierbei muss unterschieden werden, ob das entstandene Mischsignal die Summe der ursprünglichen Audiodateien ist oder ob ein neuer Zwischenklang entsteht, der charakteristische Elemente aller ursprünglichen Audiodateien besitzt. [Str03]

Entsteht ein neuer Zwischenklang, muss dieser durch entsprechende Algorithmen synthetisiert werden. Die Anwendungsfelder sind in diesem Falle sehr vielseitig. Im einfachsten Fall kann durch so genanntes Audiomorphing ein kontinuierlicher Übergang zwischen zwei Audiodateien geschaffen werden. Funktionen dieser Art sind unter anderem in vielen Soft- und Hardware-Synthesizern implementiert. Mit Hilfe des in [RR03] beschriebenen Audio Interpolationsalgorithmus kann aus den Aufnahmen zweier im Raum verteilten Mikrophone das Signal berechnet werden, welches an einem beliebigen Punkt auf der Verbindungslinie zwischen den beiden Mikrophen durch ein Mikrophon aufgezeichnet worden wäre.

Ist das Mischsignal der Audiointerpolation die Summe der ursprünglichen Audiodateien, kann von einem Crossfade gesprochen werden. Während ein erstes Audiosignal ausgefadet, d.h. der Pegel kontinuierlich verringert wird, wird ein zweites Audiosignal eingefadet. Dieses Verfahren ist prinzipiell auch mit mehreren Audiosignalen möglich. In der Tonstudioteknik wird diese Funktion verwendet, um einen gleichmäßigen Übergang zwischen zwei Audiodateien zu schaffen und ist in nahezu alle Audiobearbeitungsprogramme implementiert. Verfügen Soft- oder Hardware-Sampler über die Möglichkeit, Multi-Layer Samples, d.h. mehrere Samples liegen in Ebenen übereinander und werden bei Tastendruck gleichzeitig angesprochen, abzuspielen, so ist häufig auch eine so genannte Velocity XFade Funktion implementiert. Durch die Anschlagstärke der gespielten Taste (Velocity) kann dann bestimmt werden, welche der Sample-Ebenen abge-

spielt wird. Durch die Definition von Übergangsbereichen der Velocity können die einzelnen Sampleebenen kontinuierlich ineinander überblendet werden. Diese Funktion kann dazu genutzt werden, um schwer zu synthetisierende veränderliche Parameter wie z.B. das charakteristische Anschlagverhalten eines realen Instruments, zu simulieren. Um z.B. einen gesampelten Klavierklang beim Spielen realistisch klingen zu lassen, wird das Klavier mit verschiedenen Anschlagstärken aufgenommen und die Aufnahmen in unterschiedliche Layer gelegt. Durch das Überblenden der einzelnen Layer kann so ein realistisches Anschlagverhalten des Klaviers simuliert werden. Eine ähnliche Methode, die charakteristische Eigenschaft eines Instruments zu simulieren wird in dieser Diplomarbeit vorgestellt. Der veränderliche charakteristische Parameter, der durch die Interpolation mehrerer Audiodateien simuliert werden soll, ist das Klangabstrahlverhalten eines Saxophons. Der hierfür entwickelte Interpolationsalgorithmus ist in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

Probleme bei der Interpolation von Audiosignalen durch Crossfades können dann auftreten, wenn die summierten Audiosignale gleich oder zumindest in einigen Frequenzbereichen gleich sind. Durch Phasenverschiebungen zwischen den summierten Signalen entstehen Kammfiltereffekte, die sich in regelmäßigen Auslöschungen und Verstärkungen im Frequenzspektrum äußern und zu wahrnehmbaren Klangfarbenänderungen führen. Solche Effekte treten insbesondere dann auf, wenn gleichzeitig entstandene Mehrkanalaufnahmen, üblicherweise Stereoaufnahmen, zu einem Monosignal aufsummiert werden. [Dic97]

Da der entwickelte Interpolationsalgorithmus prinzipiell genau diese Technik verwendet, d.h. einzelne Spuren einer Mehrkanalaufnahme durch Interpolation zu einem Monosignal aufsummiert, musste bei der Entwicklung der Anwendung darauf geachtet werden, dass die beschriebenen Effekte nicht wahrnehmbar sind.

Kapitel 3

Aufnahme der Audiodateien

Da in der entstandenen Anwendung das Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten durch Interpolation von Einzelaufnahmen dargestellt werden soll, bilden qualitativ hochwertige Mehrkanalaufnahmen des Instruments die Grundlage für die Realisation des Projekts. Zum präzisen Erfassen und späteren natürlichen Reproduzieren des Klangabstrahlverhaltens sind neben der Wahl der Mikrophone und deren Positionierung um das Instrument auch der Aufnahmeort von entscheidender Wichtigkeit. Die Aufnahmen, die in diesem Projekt verwendet werden, wurden von M. Astrain [Vil03], S. Boyano [Boy03] und S. Francia [GC03] im Rahmen ihrer Diplomarbeiten 2003 an der Fachhochschule Düsseldorf aufgenommen. Als Instrument wurde ein Saxophon gewählt.

3.1 Aufnahme

Um die Klangabstrahlcharakteristik des Instruments in der entwickelten Anwendung möglichst präzise abbilden zu können, ist es nötig, die Aufnahmen ohne wahrnehmbare Reflexionen möglichst "trocken" aufzunehmen. Dies ermöglicht dem Anwender, das Klangabstrahlverhalten ohne diffuse Hallanteile zu hören, er bekommt einen klareren und deutlicheren Eindruck der Klangabstrahlcharakteristik. Eine Möglichkeit wäre, die Mikrophone sehr nahe am Instrument zu positionieren. Da aber die Klangabstrahlcharakteristik von Instrumenten frequenzabhängig ist (siehe Kapitel 2.1), wären die Aufnahmen hauptsächlich durch die-

sen Effekt geprägt. Es würde kein homogener und realistischer Eindruck von der Klangabstrahlcharakteristik im Raum um das Instrument vermittelt. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, die Mikrophone in einigem Abstand zum Instrument zu positionieren. Um Reflexionen, die in nicht speziell isolierten Räumen auftreten zu vermeiden, wurde als geeigneter Aufnahmeort der reflexionsarme Raum der Fachhochschule Düsseldorf gewählt.

3.1.1 Verwendete Mikrophone

Da das Klangabstrahlverhalten des Instruments möglichst präzise aufgezeichnet werden muss, um später einen realistischen Eindruck der Simulation zu garantieren, waren für die Aufnahme qualitativ hochwertige Mikrophone mit einem breitem Frequenzspektrum und einem möglichst linearem Frequenzgang erforderlich. Aufgrund der gewählten Anordnung der Mikrophone (siehe Abbildung 3.5), wurden zwölf baugleiche Mikrophone benötigt. Da die Fachhochschule Düsseldorf nicht über zwölf hochwertige Mikrophone mit gleicher Charakteristik verfügt, wurde von Prof. Dr.-Ing. Dieter Leckschat der Kontakt zur Firma Sennheiser hergestellt, die freundlicherweise zwölf Mikrophone des Modells MKH 40 P48 3.1 für die Aufnahmen zur Verfügung stellten. In Abbildung 3.2 ist der Frequenzgang des Mikrophons dargestellt.



Abbildung 3.1: Sennheiser MKH 40 P48. [Sen05]

Das Nierenmikrofon MKH 40 ist vielseitig einsetzbar, z.B. als Hauptmikrofon, besonders in leicht halligen oder akustisch weniger per-

fekten Räumen, oder zur Aufnahme von Instrumentengruppen, Solisten und Sprechern. Die in einem weiten Winkelbereich neutrale Richtcharakteristik und hohe Rückwärtsdämpfung sorgen für eine gute klangliche Balance.

Merkmale und technische Daten:

Studio-Richtmikrofon mit Nierencharakteristik, schaltbarer Naheffektkompensation und schaltbarer Vordämpfung. Übertragungsbereich 40 Hz - 20.000 Hz, Freifeldleerlauf-Übertragungsfaktor 25 (8) mV/Pa \pm 1 dB bei 1 kHz, Nennimpedanz 150 Ω , min. Abschlussimpedanz 1000 Ω , Ersatzgerauschpegel A-bewertet 12 (18) dB, CCIR-bewertet 21 (27) dB, Grenzschalldruckpegel 134 (142) dB bei 1 kHz, Phantomspeisung 48 \pm 4 V, Speisestrom 2 mA, Abmessungen \varnothing 25 x 153 mm, Gewicht ca. 100 g. Die Klammerwerte gelten bei geschalteter Vordämpfung (-10 dB). [Sen05]

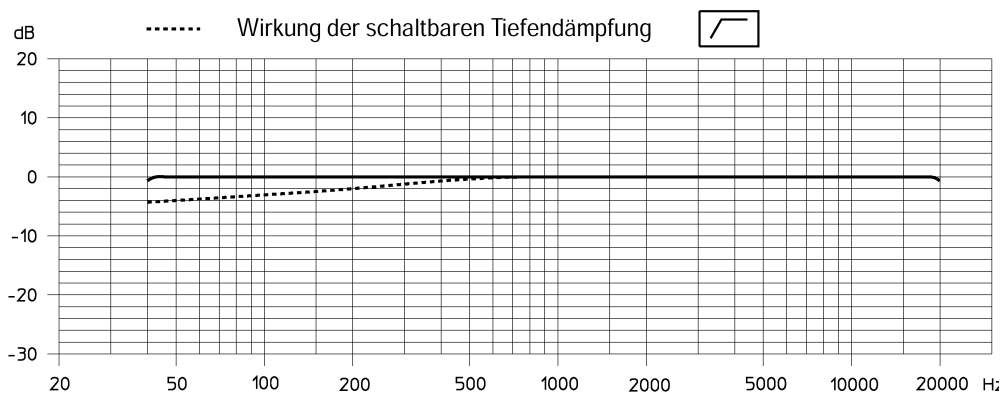


Abbildung 3.2: Frequenzgang des Mikrophons Sennheiser MKH 40 P48. [Sen05]

3.1.2 Reflexionsarmer Raum

Der reflexionsarme Raum der Fachhochschule Düsseldorf, siehe Abbildung 3.3 ist vollständig mit Dämmmaterial (ASONAD-S) ausgekleidet, welches den Schall

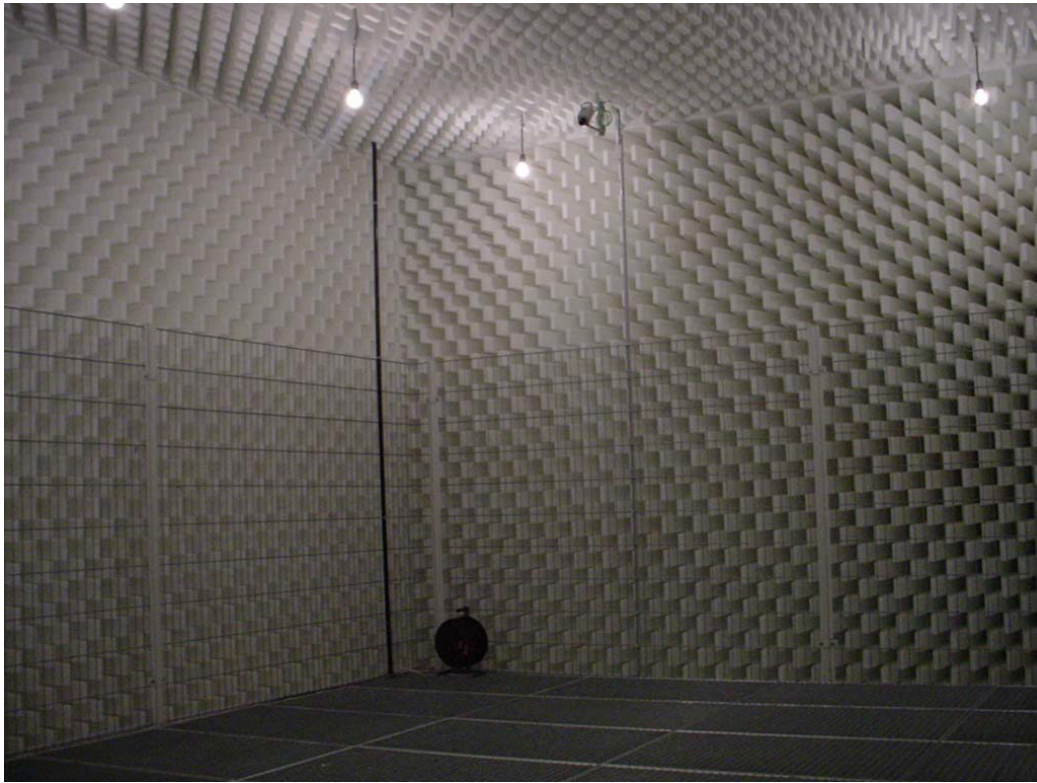


Abbildung 3.3: Reflexionsarmer Raum der Fachhochschule Düsseldorf. [Boy03]

absorbiert und die Reflexionen im Raum auf ein Minimum reduziert. Die Innenmaße des Raums betragen 7200 x 4800 x 3700 cm (Länge x Breite x Höhe). Die Abbildung 3.4 zeigt das Ergebnis einer Messung, die im reflexionsarmen Raum durchgeführt wurde um zu überprüfen, wie viel Reflexionen bei den gegebenen Testfrequenzen auftreten. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, treten bei Frequenzen über 100 Hz keine oder nur unerhebliche Reflexionen auf. Lediglich bei Frequenzen unter 100 Hz sind störende Reflexionen festzustellen. Um ein möglichst reflexionsarmes Signal zu erhalten, müssen diese Frequenzanteile während der Aufnahmen oder nachträglich durch einen Hochpassfilter herausgefiltert werden. [Boy03]

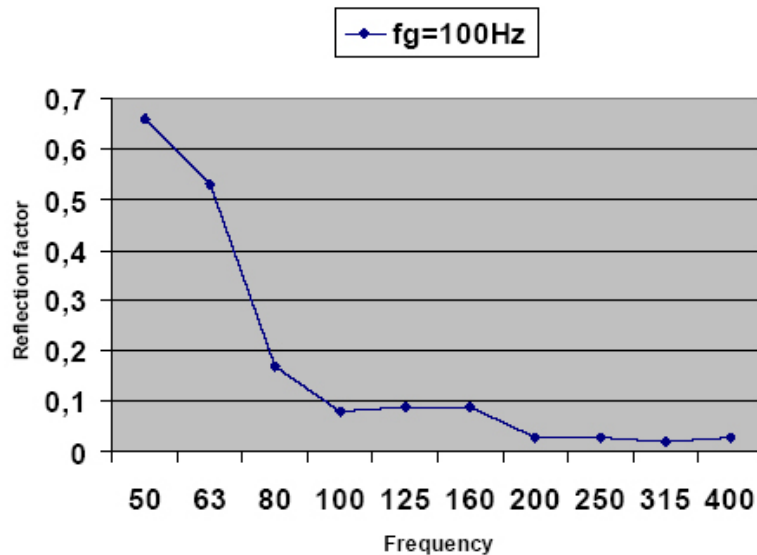


Abbildung 3.4: Ergebnis der Testmessung im reflexionsarmen Raum. [Boy03]

3.1.3 Position der Mikrophone

Um sich später in der interaktiven, virtuellen Anwendung frei um das Instrument bewegen zu können, ist es notwendig, die Audiodateien aller Positionen gleichzeitig aufzunehmen. Um später durch Interpolation der Einzelaufnahmen für jede Position rund um das Saxophon ein Signal zu generieren, ist es zusätzlich wichtig, dass die Mikrophone alle den gleichen Abstand zueinander haben. Infolgedessen wurden die Mikrophone gleichmäßig, in der Form eines Ikosaeders, auf einer gedachten Kugel mit einem Radius von 140 cm um das Instrument verteilt. Ein Ikosaeder ist eine räumliche geometrische Figur mit zwölf Ecken und 20 Flächen. Abbildung 3.5 zeigt schematisch die Anordnung der Mikrophone. In Tabelle 3.1 sind die einzelnen Koordinaten der Mikrophone aufgeführt. Der Nullpunkt (0, 0, 0) befindet sich im Mittelpunkt des Ikosaeders. Abbildung 3.6 zeigt die Mikrophanordnung im reflexionsarmen Raum der Fachhochschule Düsseldorf während der Aufnahme.[Boy03]

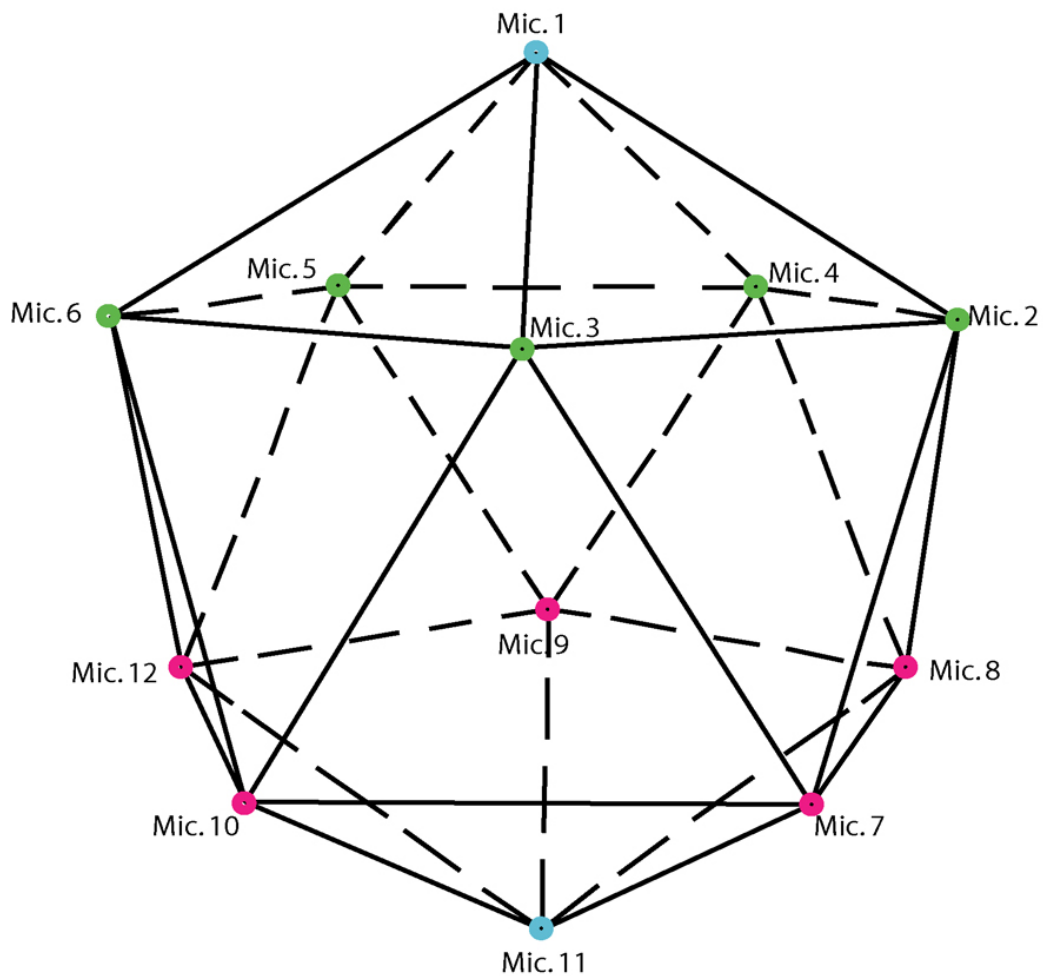


Abbildung 3.5: Schematische Anordnung der Mikrophone während der Aufnahme. [Boy03]

3.1.4 Position des Instruments

Um eine möglichst gleichmäßige und reale Abbildung des Klangabstrahlverhaltens aufnehmen zu können, ist es wichtig, dass die Abstände zwischen den Mikrophenen und dem Instrument möglichst gleich sind. Das Instrument muss also im Mittelpunkt des Ikosaeders platziert werden. Wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, musste der Saxophonspieler Arnol Behl während der Aufnahme auf einer Leiter stehen. [Boy03]

MIK	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	0	140	0
2	38,7	62,6	-114
3	125,3	62,6	0
4	-101,3	62,6	-73,6
5	-101,3	62,6	73,6
6	38,7	62,6	114
7	101,3	-62,6	-73,6
8	-38,7	-62,6	114
9	-125,3	-62,6	0
10	101,3	-62,6	73,6
11	0	-140	0
12	-38,7	-62,6	114

Tabelle 3.1: Koordinaten der Mikrofonpositionen. [Boy03]

3.1.5 Verwendete Audiosoftware

Da die Signale der zwölf Mikrophone gleichzeitig aufgezeichnet wurden, waren zwölf Audiospuren notwendig. Für die Aufnahme wurde das digitale Mischpult Sony DMXR100 mit dem computerbasierten Harddiscrecording-System Pro Tools von Digidesign verwendet. [Boy03]

3.1.6 Aufnahmeprozess

Um zu gewährleisten, dass die Signale der einzelnen Mikrophone gleichwertig sind, müssen die Mikrophone vor der eigentlichen Aufnahme kalibriert werden. Eine andere, hier gewählte Methode ist, mit allen zwölf Mikrophen ein Testsignal aufzuzeichnen und die Aufnahmen anhand der Testsignale nachträglich zu bearbeiten. Hierzu wurde im Mittelpunkt des Ikosaeders ein Lautsprecher aufgestellt, der ein Testsignal (Rosa Rauschen) abstrahlt. Da der Lautsprecher nicht kugelförmig abstrahlt, mussten zwei Aufnahmevorgänge für jeweils sechs Mikrophone durchgeführt werden. [Boy03]

In Abbildung 3.8 ist schematisch die Verkabelung der Mikrophone im reflexionsarmen Raum mit dem Mischpult und Pro Tools während der Aufnahme dar-



Abbildung 3.6: Anordnung der Mikrophone während der Aufnahme im reflexionsarmen Raum der Fachhochschule Düsseldorf. [Boy03]

gestellt. Die analogen Signale der Mikrophone werden durch die Patchbay an das digitale Mischpult gesendet und dort in digitale Signale umgewandelt. Diese digitalen Signale werden zurück zur Patchbay gesendet und von dort aus an Pro Tools weitergeleitet.

Aufgenommen wurden neben einzelnen Tönen und gebrochenen Akkorden auch Melodien und Fragmente aus längeren Musikstücken, um später eine Auswahl an Audiomaterial zur Verfügung zu haben.

3.2 Nachbearbeitung der Audiodateien

Die nachträgliche Klangbearbeitung und der Schnitt der Audiodateien wurde in Cool Edit Pro durchgeführt. Die Benutzeroberfläche von Cool Edit Pro ist in Abbildung 3.9 abgebildet. Cool Edit Pro ist ein flexibles, semi-professionelles Werk-



Abbildung 3.7: Saxophonspieler während der Aufnahme. [Boy03]

zeug zum Bearbeiten von Audiodateien. Es bietet die Möglichkeit, Mehrkanalaufnahmen in verschiedenen Spuren darzustellen, zu bearbeiten und zu verwalten. Des Weiteren können Audiodaten mit Filtern und Effekten bearbeitet werden. Beim Schneiden der Audiodateien muss beachtet werden, dass jeweils alle zwölf Kanäle der Aufnahme gleichzeitig geschnitten werden. Das parallele Schneiden aller Spuren gewährleistet, dass alle geschnittenen Audioclips die exakt gleiche Länge haben. Da in der entstandenen Anwendung alle zwölf Audiodateien gleichzeitig gestartet werden und lediglich die Lautstärken der einzelnen Spuren, je nach Hörerposition, variiert wird, würde nach wiederholtem Loopen keine problemlose Überblendung der einzelnen Audioclips möglich sein. Es würden hörbare Echoeffekte und Schwebungen auftreten.

Da vor der Aufnahme entschieden wurde, die Mikrophone nicht zu kalibrieren und die Eingangssignale nicht durch einen Filter zu bearbeiten, mussten die Audiodaten nachträglich bearbeitet werden. Unter der Annahme, dass sich der für

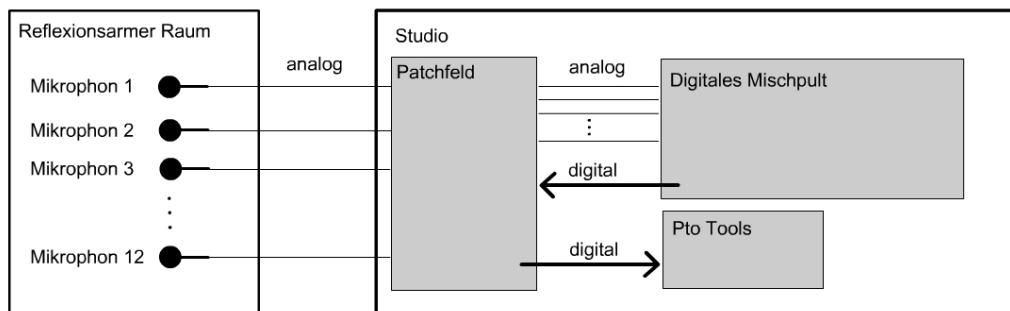


Abbildung 3.8: Schema der Signalwege während der Aufnahme.

die Testaufnahmen mit Rosa Rauschen verwendete Lautsprecher bei tiefen Frequenzen wie eine Punktschallquelle verhält, d.h. in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlt, müssten die Pegel der Testaufnahmen aller zwölf Mikrophone für tiefe Frequenzen gleich sein. Wie in Kapitel 3.1.2 angemerkt, treten im reflexionsarmen Raum bei Frequenzen kleiner 100 Hz störende Reflexionen auf. Tiefe Frequenzen müssen deshalb mit einem Hochpassfilter herausgefiltert werden. Es wurde ein Hochpassfilter mit der Eckfrequenz 200 Hz und der Flankensteilheit 12 dB/Oktave verwendet. Da sich die kugelförmige Abstrahlcharakteristik nur auf tiefe Frequenzen beschränkt, muss der obere Frequenzbereich der Testsignale mit Hilfe eines Tiefpassfilters gefiltert werden. Es wurde ein Tiefpassfilter mit der Eckfrequenz 500 Hz und der Flankensteilheit 12 dB/Oktave verwendet. Nun wurden die Testaufnahmen hinsichtlich ihres Pegels analysiert. Die auftretenden Abweichungen sind auf die unterschiedliche Kalibrierung bzw. Empfindlichkeit der Mikrophone während der Aufnahme zurückzuführen. Die Pegel der einzelnen Aufnahmen wurden durch Senkung oder Anhebung des Pegels ausgeglichen. Der Referenzpegel war hierbei der Durchschnittspegel aller Testaufnahmen. Die Pegeländerungen der einzelnen Spuren wurden nun auf die Saxophonspuren übertragen. [Boy03]



Abbildung 3.9: Cool Edit Pro. [Boy03]

Kapitel 4

Umsetzung

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte virtuelle Umgebung soll es dem Benutzer ermöglichen, die Klangabstrahlcharakteristik eines Instruments in Echtzeit zu erfahren. Durch die virtuellen Umgebung, die visuelle und auditive Elemente miteinander verbindet und die Möglichkeit der Interaktion, kann das Erleben und die Wahrnehmung der Effekte verstärkt werden. Der Anwender kann sich in Echtzeit um das 3D-Modell des Instruments bewegen und bekommt in jeder Position ein akustisches und visuelles Feedback.

4.1 Entwicklungsumgebung

Die Entwicklungsumgebung hat die Aufgabe, die einzelnen Elemente der Anwendung, also echtzeitfähige 3D-Grafik, in Echtzeit berechnete Audiosignale und die Interaktionsmöglichkeiten des Anwenders zu verbinden. Aufgrund der beschränkten Möglichkeiten von Autorensoftware (z.B. Macromedia Director) und der in [GC03] beschriebenen negativen Erfahrungen hinsichtlich der Präzision und Flexibilität solcher Programme wurde entschieden, die Anwendung mittels einer flexiblen Programmiersprache aufzubauen. Als Entwicklungsumgebung wurde Microsoft Visual C++ 6.0 gewählt. Die Benutzeroberfläche von Microsoft Visual C++ 6.0 ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

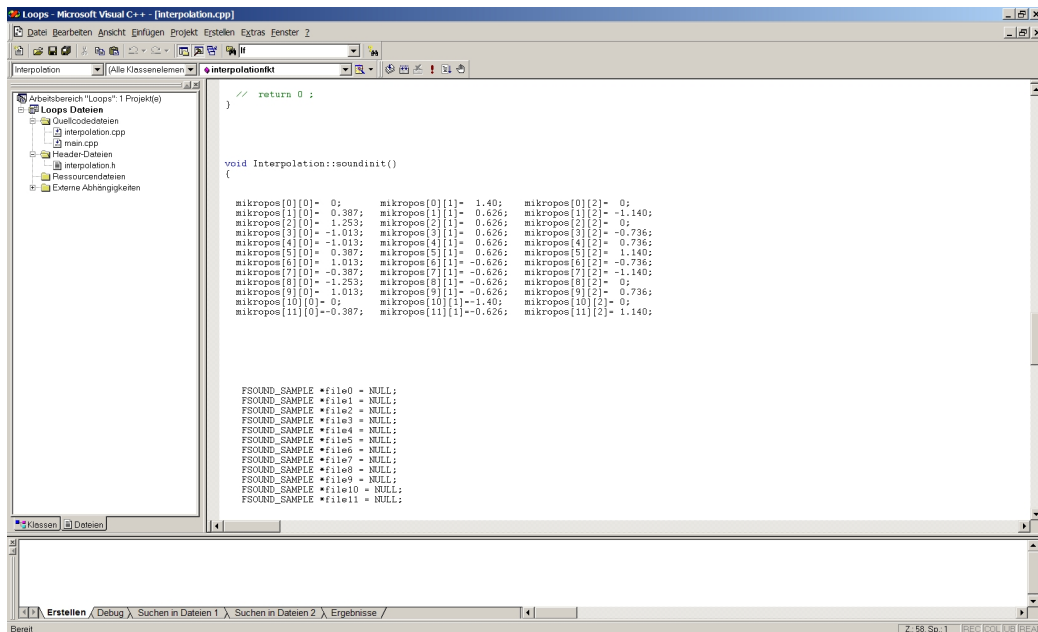


Abbildung 4.1: Microsoft Visual C++ 6.0.

Visual C++ 6.0 is a member of the Microsoft Visual Studio development tools suite, and enables Visual Studio developers to create the highest performance applications and components. Visual Studio is a complete development tools suite that provides corporations with easy-to-use tools for building solutions. Visual Studio, Professional Edition enables developers to take full advantage of Microsoft Windows® operating system and Web development. Visual Studio, Enterprise Edition is the complete suite for rapidly building data-centric enterprise solutions. [Mic05]

4.2 Das Saxophonmodell

Zum Erstellen des Saxophonmodells wurde eine 3D Studio Max Datei aus dem Internet verwendet. Die Datei wird unter [Tho03] frei zum Download angeboten. Um das 3D-Modell des Instruments in der Anwendung verwenden zu können, musste die 3D Studio Max Datei in eine VRML-Datei (.wrl) umgewandelt werden.

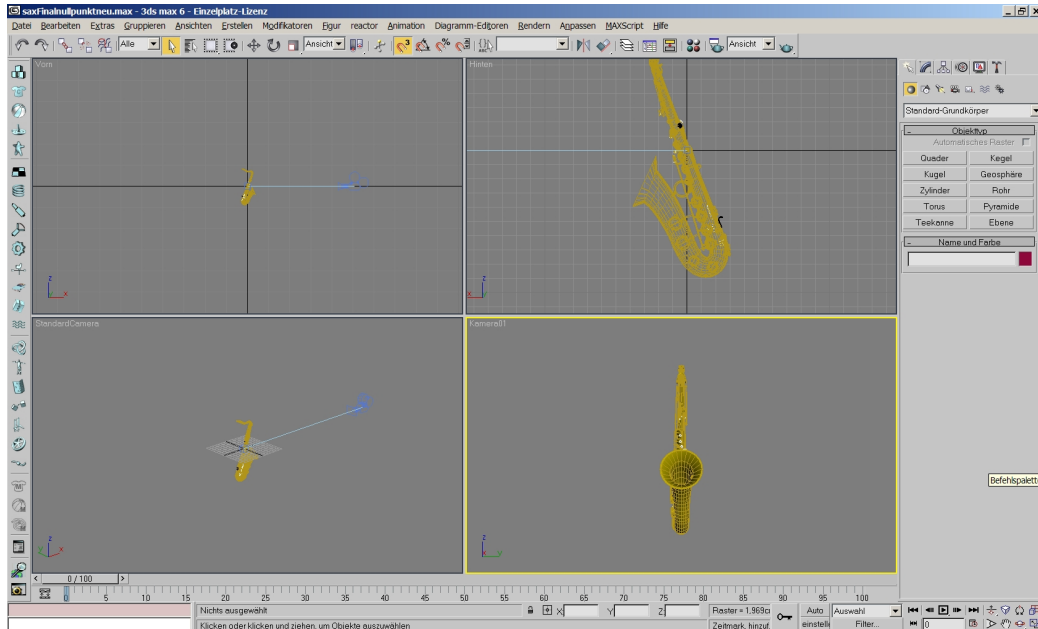


Abbildung 4.2: 3D Studio Max.

Bevor das 3D-Modell als VRML-Datei exportiert werden konnte, mussten Skalierung und Position des Modells angepasst werden. Das Modell wurde auf die Größe eines realen Saxophons (Höhe ca. 65 cm) skaliert und der Mittelpunkt des Instruments in den Ursprung des Koordinatensystems verschoben. Diese Anpassung der Abmessungen und der Position ermöglichen später eine problemlose Integration des Modells in die Anwendung. Anschließend konnte das Modell des Instruments als VRML-Datei exportiert werden. Abbildung 4.2 zeigt das Saxophonmodell in 3D Studio Max.

4.3 Audio

4.3.1 Anforderungen

Da im Rahmen dieser Diplomarbeit zwei Methoden zur Simulation des Klangabstrahlungsverhaltens von Musikinstrumenten entwickelt wurden, sind auch die Anforderungen an die verwendete Audioschnittstelle unterschiedlich.

Die erste, in Kapitel 4.3.3 beschriebene Methode nutzt zwölf gleichzeitig entstandene Audioaufnahmen. Um das Klangabstrahlverhalten vollständig zu erfassen, waren die Mikrophone während der Aufnahme gleichmäßig um das Instrument verteilt. Mit Hilfe des entwickelten Interpolationsalgorithmus, der auf der Lautstärkeinterpolation der Einzelaufnahmen basiert, können so alle Positionen um das Instrument akustisch dargestellt werden.

Die zweite, in Kapitel 4.3.4 beschriebene, Methode nutzt ein einfaches Filtermodell, um das Klangabstrahlverhalten zu simulieren. Hierzu wurden die zwölf Einzelaufnahmen des Instruments spektral analysiert. Anhand der Ergebnisse wurde ein einfacher Filter entwickelt, der aus einer Ursprungsaudiodatei alle anderen Positionen errechnet.

Im Folgenden sind die Anforderungen für die beiden Methoden aufgeführt.

Simulation durch Interpolation

- Alle zwölf Audiodateien müssen gleichzeitig gestartet und abgespielt werden. Auch wenn maximal drei Audiodateien gleichzeitig zu hören sind, ist dies notwendig um Timig-Probleme zu verhindern und ein gleichmäßiges Überblenden zwischen den einzelnen Audiodateien zu gewährleisten.
- Auf alle zwölf Audiodateien muss getrennt zugegriffen werden können. Insbesondere die Lautstärke jeder einzelnen Audiodateien muss dynamisch veränderbar sein.
- Die Audiodateien müssen präzise im Loop, d.h. in Schleife, abgespielt werden können. Auch nach mehreren Durchgängen ist es notwendig, dass alle Audiodateien samplegenau parallel abgespielt werden. Ist dies nicht der Fall, können Schwebungseffekte und hörbare Artefakte auftreten.

Simulation durch Filter

- Die Audioschnittstelle muss über programmierbare Filter und Equalizer verfügen. Die Audiodatei muss in Echtzeit durch Filter und Equalizer dynamisch bearbeitet werden können.
- Eine Audiodatei muss abgespielt werden können.
- Eine Audiodatei muss im Loop abgespielt werden können.

4.3.2 FMOD

Der Audioanteil der Anwendung wurde in der Entwicklungsumgebung Visual C++ 6.0 unter der Verwendung der Audioengine FMOD durchgeführt. FMOD ist im Internet unter [Fir05], für nicht kommerzielle Zwecke, frei erhältlich und ohne Einschränkung verwendbar. Mittels FMOD können parallel mehrere Audiodateien in ein Programm eingelesen, abgespielt, geloopt und in Echtzeit verändert werden. Insbesondere verfügt FMOD über die erforderlichen Equalizer-Effektalgorithmen, die eine problemlose Umsetzung des Filters ermöglichen.

FMOD ist die schnellste, leistungsstärkste und anwenderfreundlichste Audioengine für Windows, Linux und Windows CE und mittlerweile auch für Macintosh, GameCube, PS2 und XBox! [Fir05]

4.3.3 Simulation durch Interpolation

Um das Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten durch die Interpolation der einzelnen Spuren einer Mehrkanalaufnahme zu simulieren, wurde ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, jede beliebige Position um das Instrument abzubilden. Da der entwickelte Algorithmus keinen direkten Einfluss auf den Klangcharakter der einzelnen Aufnahmen der Mehrkanalaufnahme hat, sondern lediglich die Lautstärke der einzelnen Spuren in Abhängigkeit der Hörerposition verändert, ist der Algorithmus prinzipiell auf beliebige Instrumente übertragbar. Haben die Mikrophone bei der Aufnahme alle den gleichen Abstand zum

Instrument, ist der Algorithmus prinzipiell auch für beliebige Mikrofonpositionen anwendbar. Die entsprechenden Koordinatenangaben sind in diesem Fall in den Quelltext zu integrieren.

Umsetzung in Visual C++

Der Ursprung (0,0,0) der virtuellen Umgebung liegt im Mittelpunkt des verwendeten 3D-Instrumentenmodells. Die Positionen der Audioquellen, die sich aus den Mikrofonpositionen während der Aufnahme (siehe Tabelle 3.1) ergeben, liegen also auf einer gedachten Kugel mit dem Radius $R = 140$ cm, in Form eines Icosaeders, gleichmäßig um das Instrumentenmodell verteilt. Der Mittelpunkt der gedachten Kugel ist also ebenfalls der Ursprung der virtuellen Umgebung.

Zunächst werden die Koordinaten der Audioquellen, d.h. der einzelnen Audiodateien, in der virtuellen Umgebung angegeben und in Feldern gespeichert. Die einzelnen Audiodateien werden geladen, gleichzeitig gestartet und im Loop abgespielt. Die Lautstärke wird anfangs für alle Quellen auf Null gesetzt.

Aus den Positionsdaten der virtuellen Kamera, die der Hörerposition bzw. der Position des virtuellen Mikrophons entspricht, wird mit Gleichung 4.1 nun die Länge L des Positionsvektors $P(px, py, pz)$, d.h. der Abstand zwischen dem Ursprung der virtuellen Umgebung und der Hörerposition berechnet.

$$L = \sqrt{px^2 + py^2 + pz^2} \quad (4.1)$$

Aus der Länge des Positionsvektors wird die Gesamtlautstärke V des Audiosignals bestimmt. Die Lautstärke, die an dieser Stelle bestimmt wird, ist die Summe der Teillautstärken der Quellen, aus denen das Audiosignal später zusammengesetzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Lautstärke genau auf der gedachten Kugel, also im Abstand 140 cm, 100% beträgt. Pro Entfernungsverdoppelung von der Schallquelle halbiert sich der Schallpegel bzw. die Lautstärke [Bla74].

Zur Berechnung der Lautstärke muss also, wie in Gleichung 4.2 gezeigt, der Kugelradius R durch die Vektorlänge L dividiert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Implementierung der Lautstärkeänderung bei Abstandsvergrößerung eher qualitativer Natur ist. In einer realen Umgebung würde zwar der Pegel in ähnlicher Weise abnehmen, allerdings wird in dieser Anwendung darauf verzichtet, die in realen Umgebungen mit wachsender Entfernung immer deutlicher auftretenden diffusen Hallanteile zu simulieren.

$$V = \frac{R}{L} \quad (4.2)$$

Um den Schnittpunkt $KP(kpx, kpy, kpz)$ des Positionsvektors mit der gedachten Kugel um das Instrument zu berechnen, wird der Positionsvektor zunächst normalisiert und anschließend mit dem Radius R der Kugel multipliziert (siehe Gleichung 4.3). Anhand der Lage des Schnittpunktes auf der Kugel wird anschließend bestimmt, aus welchen Audioquellen sich das Audiosignal zusammensetzt.

$$\begin{aligned} kpx &= R * \frac{px}{L} \\ kpy &= R * \frac{py}{L} \\ kpz &= R * \frac{pz}{L} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Der Schnittpunkt des Positionsvektors mit der Kugel ist der Mittelpunkt eines Kleinkreises auf der Kugel mit dem sphärischen Radius von 140 cm. Nun wird überprüft, welche der Audioquellen innerhalb des Kleinkreises liegen und damit für diese Hörerposition aktiv sind. Ist der sphärische Abstand a_i zwischen Schnittpunkt und Quelle Q_i kleiner als der sphärische Radius RK des Kleinkreises, ist

die Quelle Q_i aktiv (siehe Gleichung 4.4), also die Lautstärke ungleich Null.

$$\forall a_i < RK; \quad Q_i = \text{aktiv} \quad (4.4)$$

Die Lautstärke jeder Quelle ist abhängig von ihrem Abstand zum Mittelpunkt des Kleinkreises. Je näher die Quelle am Mittelpunkt liegt, d.h. je kleiner der sphärische Abstand zwischen Quelle und Mittelpunkt ist, desto höher ist die Lautstärke der Quelle. Der Kleinkreis kann hierbei als Gewichtungsfunktion verstanden werden. Im Mittelpunkt ist die Lautstärkegewichtung maximal, am äußeren Rand des Kleinkreises Null.

Die Lautstärken der einzelnen Quellen können jedoch nicht direkt aus den Abständen zum Mittelpunkt generiert werden; die Lautstärkensumme, also die Gesamtlautstärke, wäre nicht konstant.

Damit die, durch die Entfernung zum Ursprung der virtuellen Umgebung, berechnete Gesamtlautstärke des Audiosignals nicht variiert, müssen zunächst, wie in Gleichung 4.5 gezeigt, die sphärischen Abstände a_i der einzelnen aktiven Audioquellen zum Mittelpunkt des Kleinkreises aufsummiert werden. Zum Berechnen der Lautstärke v_i einer einzelnen Quelle wird nun der Abstand a_i der Quelle durch die Summe der Abstände A dividiert und anschließend mit der Gesamtlautstärke V multipliziert (siehe Gleichung 4.6). Die Summe der Lautstärken entspricht nun immer konstant der errechneten Gesamtlautstärke des Audiosignals.

$$A = \sum_{i, \text{ mit } Q_i=\text{aktiv}} a_i \quad (4.5)$$

$$v_i = V * \frac{a_i}{A} \quad (4.6)$$

Die Lautstärken für die Audioquellen, aus denen sich das Audiosignal für die aktuelle Hörerposition zusammensetzt, können nun eingestellt werden. Das Audiosignal für die aktuelle Hörerposition ist zu hören.

4.3.4 Simulation durch Filter

Um den Filter zu entwickeln wurden zunächst die zwölf einzelnen Aufnahmen der Mehrkanalaufnahme spektral analysiert. Anhand der Analyse wurden markante Frequenzunterschiede zwischen den einzelnen Aufnahmen herausgearbeitet und auf deren Grundlage der Filter programmiert. Da das charakteristische Klangabstrahlverhalten des Instruments durch den Filter selbst simuliert wird, ist die im Folgenden beschriebene Filterentwicklung nur für das gewählte Beispielinstrument, das Saxophon, gültig. Lediglich die verwendete Methode und der Vorgang der Filterentwicklung ist auf andere Instrumente übertragbar.

Spektralanalyse der Einzelaufnahmen

Zur Analyse des Klangabstrahlverhaltens des Saxophons wurde eine kurze, ca. 5 Sekunden lange, charakteristische Phrase, ein gebrochener Dreiklang, ausgewählt. Die Spektralanalyse wurde mit der Audiosoftware WaveLab 4.0 (Siehe Abbildung 4.3) der Firma Steinberg durchgeführt. WaveLab ist eine semi-professionelle Anwendung zum Bearbeiten von Audiodateien. Insbesondere können Audiodateien mittels FFT (Fast Fourier Transformation) spektral analysiert werden. Die Analysedaten können als Schaubild und als Tabelle ausgegeben und abgespeichert werden.

Die zwölf Einzelaufnahmen der Mehrkanalaufnahme wurden separat spektral analysiert und die Frequenzverläufe als Schaubilder und Wertetabellen gespeichert.

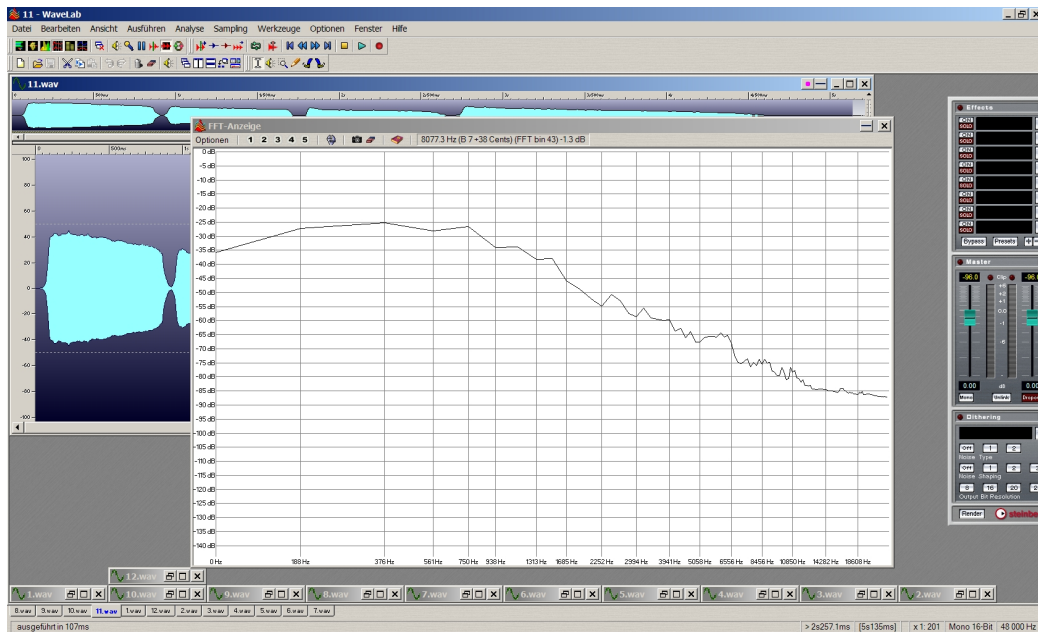


Abbildung 4.3: WaveLab 4.0.

Filterfunktionen in FMOD

Das Filterdesign mit der Audioengine FMOD wurde mit Hilfe des in FMOD implementierten Equalizer-Effektalgorithmus durchgeführt.

Folgende Parameter können verändert werden:

- Center: Die Mittenfrequenz des Equalizer-Effekts in Hertz. Der Wertebereich ist 80 Hz bis 1600 Hz.
- Bandwidth: Die Bandbreite des Equalizer-Effekts in Halbtönen. Der Wertebereich ist 1 bis 36.
- Gain: Die Verstärkung des Equalizer-Effekts in dB. Der Wertebereich ist -15 dB bis +15 dB.

Auswertung der Analysedaten

Als Ursprungsaudiodatei, d.h. die Audiodatei, aus der durch Filterung alle anderen Abbildungspositionen errechnet werden, wurde die Audiodatei, die mit dem drit-

ten Mikrofon (siehe Abbildung 3.5) aufgenommen wurde, gewählt. Das dritte Mikrofon war während der Aufnahme leicht erhöht, direkt vor dem Instrument positioniert und konnte so ein sehr präsent und lautes Audiosignal aufzeichnen und das gesamte Frequenzspektrum des Instrumentes erfassen.

Da alle Abbildungspositionen um das Instrument aus der Ursprungsaudiodatei erzeugt werden, müssen nun die Frequenzunterschiede zwischen der Ursprungsaudiodatei und den Audiodateien aller anderen Mikrofonpositionen bestimmt werden. Nach einem ersten Vergleich der Frequenzverläufe wurde festgestellt, dass es sinnvoll ist, den Filter aus vier einzelnen Equalizer-Effektalgorithmen zusammensetzen: Ein Equalizer für Änderungen im tieferen Frequenzbereich (< 1000 Hz), zwei Equalizer für Änderungen im mittleren Frequenzbereich (1000 Hz - 8000 Hz) und ein Equalizer für Änderungen im höheren Frequenzbereich (> 8000 Hz). Die Schaubilder des Frequenzspektrums der Aufnahme des dritten Mikrofons im Vergleich mit den Frequenzspektren aller anderen Mikrophone sind im Anhang B abgebildet.

Um die Differenzwerte zwischen den Frequenzverläufen zweier Audiodateien zu erhalten, wurde zunächst anhand der Schaubilder bestimmt, in welchen Frequenzbereichen die markantesten Unterschiede liegen. Als Richtlinie dienten hierbei die oben beschriebenen Frequenzbereiche. Anschließend wurden die Pegelunterschiede in den gewählten Frequenzbereichen anhand der Wertetabellen abgelesen. Abbildung 4.4 zeigt das Vorgehen anhand eines Beispiels. Hier wird der Frequenzverlauf der Aufnahme des 4. Mikrofons mit dem Frequenzverlauf der Ursprungsaudiodatei verglichen. In den markierten Bereichen wurde aus den Wertetabellen der Pegelunterschied abgelesen.

Es ist zu erkennen, dass vier veränderbare Frequenzbereiche kaum ausreichen können, um das charakteristische Klangabstrahlverhalten eines Instruments in allen Einzelheiten zu simulieren. Die Equalizer haben jeweils auf einen relativ großen Frequenzbereich Einfluss. Die bestimmten Pegelunterschiede sind also keine Pegelunterschiede einer bestimmten Frequenz, sondern müssen als Mittelwerte der durch die Bandbreite gewählten Frequenzbereiche verstanden werden.

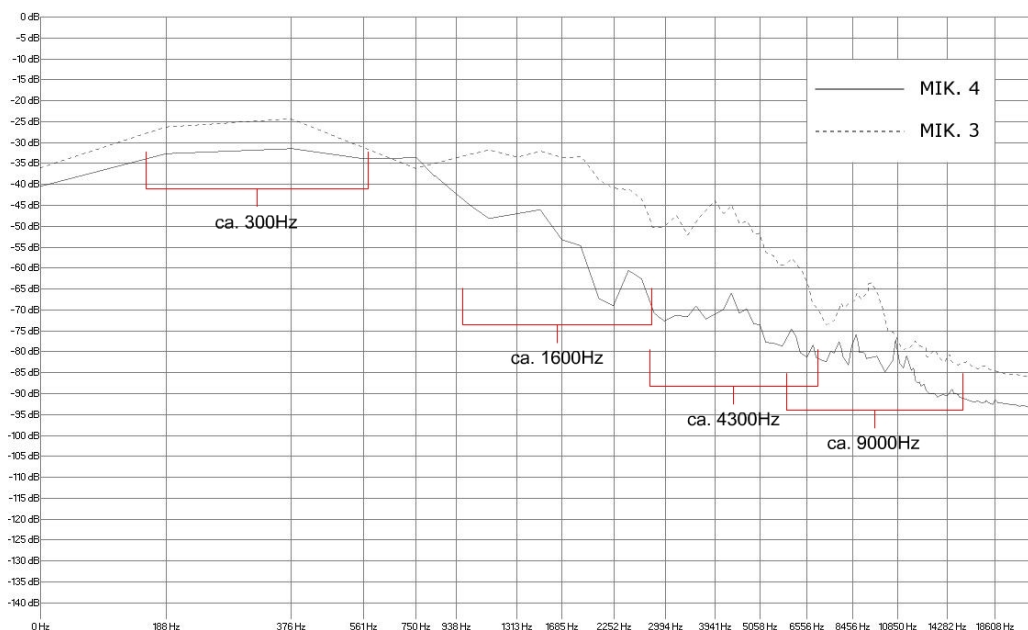


Abbildung 4.4: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 3. und 4. Mikrophons. Die durch den Filter bearbeiteten Frequenzbereiche sind markiert und die Mittenfrequenz (Center) angegeben.

Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse der Differenzanalyse der Frequenzspektren. Anhand dieser Daten wurde der Filter mit der Hilfe der in FMOD implementierten Equalizer-Funktion aufgebaut.

Umsetzung in Visual C++

Da für alle Audiodateien die Frequenzdifferenzen zur Ursprungsaudiodatei bestimmt wurden, kann durch die Übertragung der Ergebnisse der Differenzanalyse auf die vier Equalizer-Effekte in FMOD jede der zwölf Audiodateien aus der Ursprungsaudiodatei simuliert werden. So kann also jede der zwölf, durch die Mikrofonpositionen während der Aufnahme vorgegebenen, Positionen durch den Filter abgebildet werden. Anstatt, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, das Klangabstrahlverhalten durch die Lautstärkeinterpolation der einzelnen Audiodateien zu simulieren, können bei der Programmierung des Filters die veränderbaren Einstellungsparameter des Equalizer-Effektes interpoliert werden. Mit dieser Methode kann jede beliebige Position um das Instrument abgebildet werden.

MIK	C1	B1	G1	C2	B2	G2	C3	B3	G3	C4	B4	G4
1	600	12	3	1600	20	-5	5000	15	-12	9000	6	-10
2	750	20	-4	1800	28	-7	3800	10	-14	9000	8	-8
3	560	24	0	1600	24	0	4000	24	0	9000	24	0
4	300	20	-6	1600	22	-13	4300	16	-15	9000	18	-12
5	300	20	-4	2200	28	-12	3800	24	-15	9000	10	-10
6	300	20	-2	1700	20	-13	4000	18	-14	9000	12	-8
7	560	10	2	1600	24	-8	4000	16	-12	9000	18	-6
8	300	20	-5	1400	12	-13	3800	24	-15	9000	10	-8
9	300	16	-5	1700	24	-12	4000	26	-15	9000	24	-11
10	560	16	3	1600	24	-10	4000	16	-14	9000	10	-11
11	750	12	-7	1800	20	-9	3900	14	-13	9000	8	-10
12	300	8	-3	1900	20	-10	4100	12	-15	9000	10	-10

Tabelle 4.1: Ergebnis der Frequenzdifferenzanalyse. C: Center, B: Bandwidth, G: Gain.

Der Ursprung des Koordinatensystems der virtuellen Umgebung liegt im Mittelpunkt des verwendeten 3D-Instrumentenmodells. Als Modell kann hier davon ausgegangen werden, dass um das Instrument herum zwölf virtuelle Audioquellen in Form eines Ikosaeders gleichmäßig verteilt sind. Die virtuellen Audioquellen sind jedoch nicht, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, mit einer Audiodatei verknüpft, sondern mit der Rechenanweisung, wie aus der Ursprungsaudiodatei die jeweilige Position errechnet und abgebildet werden kann. Die Positionen der virtuellen Audioquellen liegen auf einer gedachten Kugel mit dem Radius 140 cm um das Instrumentenmodell herum. Der Mittelpunkt der gedachten Kugel ist der Ursprung der virtuellen Umgebung.

Zunächst werden die Koordinaten der virtuellen Audioquellen in der virtuellen Umgebung angegeben und in Feldern gespeichert. Diese Positionen werden mit den entsprechenden Rechenanweisungen verknüpft. Die Rechenanweisungen sind die Ergebnisse der Frequenzdifferenzanalyse (siehe Abbildung 4.1), also die Parameteränderungen, die notwendig sind, um die jeweilige Position durch die verwendeten Equalizer abzubilden. Die Parameteränderungen für die vier Equalizer werden ebenfalls in Feldern gespeichert. Die Ursprungsaudiodatei wird gela-

den und die vier Equalizer werden initialisiert. Anschließend wird die Audiodatei gestartet und im Loop abgespielt. Die Lautstärke wird anfangs auf Null gesetzt.

Aus den Positionsdaten der virtuellen Kamera $P(px, py, pz)$, die der Hörerposition bzw. der Position des virtuellen Mikrophons entspricht, wird nun, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, die Länge L des Positionsvektors (siehe Gleichung 4.1), die Lautstärke V des Audiosignals (siehe Gleichung 4.2) und der Schnittpunkt $KP(kpx, kpy, kpz)$ des Positionsvektors mit der gedachten Kugel um das Instrument (siehe Gleichung 4.3) berechnet. Anhand der Lage des Schnittpunktes auf der Kugel wird anschließend bestimmt, aus welchen Equalizer-Einstellungsparametern das Audiosignal erzeugt wird.

Der Schnittpunkt KP des Positionsvektors mit der Kugel ist der Mittelpunkt eines Kleinkreises auf der Kugel. Der Kleinkreis mit dem sphärischen Radius RK von 140 cm kann als Gewichtungsfunktion verstanden werden. Je kleiner der Abstand a_i einer virtuellen Audioquelle VQ_i , d.h. die mit dieser Position verknüpften Einstellungsparameter für die Equalizer, zum Mittelpunkt des Kleinkreises ist, desto höher ist der Einfluss der Einstellungsparameter auf das Ursprungsaudiosignal. Liegt eine virtuelle Audioquelle innerhalb des Kleinkreises, so ist sie aktiv (siehe Gleichung 4.7). Liegt eine virtuelle Audioquelle außerhalb des Kleinkreises, so hat sie keinen Einfluss auf das Audiosignal.

$$\forall a_i < RK; \quad VQ_i = \text{aktiv} \quad (4.7)$$

Um die für eine beliebige Position gültigen Einstellungsparameter zu gewinnen, muss zunächst der anteilige Einfluss jeder einzelnen, innerhalb des Kleinkreises liegenden virtuellen Audioquelle, bestimmt werden. Hierzu wird die Differenz zwischen Radius RK des Kleinkreises und dem Abstand a_i der virtuellen Audioquelle zum Mittelpunkt des Kleinkreises durch den Radius RK des Kleinkreises dividiert (siehe Gleichung 4.8). Das Ergebnis ist der Gewichtungsfaktor F_i für den Parametersatz vq_i mit den Parametern vqn_k dieser virtuellen Audioquelle VQ_i

(siehe Tabelle 4.1). Alle Einstellungsparameter vqn_k dieser Audioquelle werden nun mit dem Gewichtungsfaktor F_i multipliziert. Nachdem die Einstellungsparameter aller innerhalb des Kleinkreises liegenden virtuellen Audioquellen mit dem jeweiligen, aus dem Abstand zum Mittelpunkt des Kleinkreises resultierenden Gewichtungsfaktor multipliziert wurden, können diese aufsummiert werden (siehe Gleichung 4.9). Das Ergebnis ist der resultierende Einstellungsparameter rp für die vier Equalizer-Effekte durch die, aus der Ursprungsaudiodatei, das der Hörerposition entsprechende Audiosignal erzeugt wird.

$$F_i = \frac{(RK - a_i)}{RK} \quad (4.8)$$

$$rp = \sum_{i, \text{ mit } vQ_i = \text{aktiv}} (vq_i * F_i) \quad (4.9)$$

Die Parameter rp für die vier Equalizer-Effekte werden gesetzt und das Audiosignal für die aktuelle Hörerposition ist zu hören.

Überprüfung des Filters mit WaveLab

Um die Funktion des entwickelten Filters zu überprüfen, wurden einige Positionen, die sich direkt mit den realen Audiodateien vergleichen lassen, also die Positionen der Mikrophone während der Aufnahme, abgebildet und anschließend aufgezeichnet. Die entstandenen Aufnahmen wurden in WaveLab spektral analysiert. Abbildung 4.5 zeigt die Kurven der Spektralanalyse der realen und simulierten Audiodatei für die Position des dritten Mikrophons. Die Kurven verlaufen weitgehend parallel. Da die Aufnahme des dritten Mikrophons als Ursprungsaudiodatei gewählt wurde, also alle anderen Abbildungspositionen durch Filterung aus dieser Audiodatei erzeugt wurden, ist der sehr ähnliche Verlauf der Kurven dadurch gegeben, dass der Filter an dieser Position nur einen sehr geringen Einfluss hat. Im Frequenzbereich über ca. 6500 Hz sind Pegelunterschiede von etwa 5 dB zu beobachten.

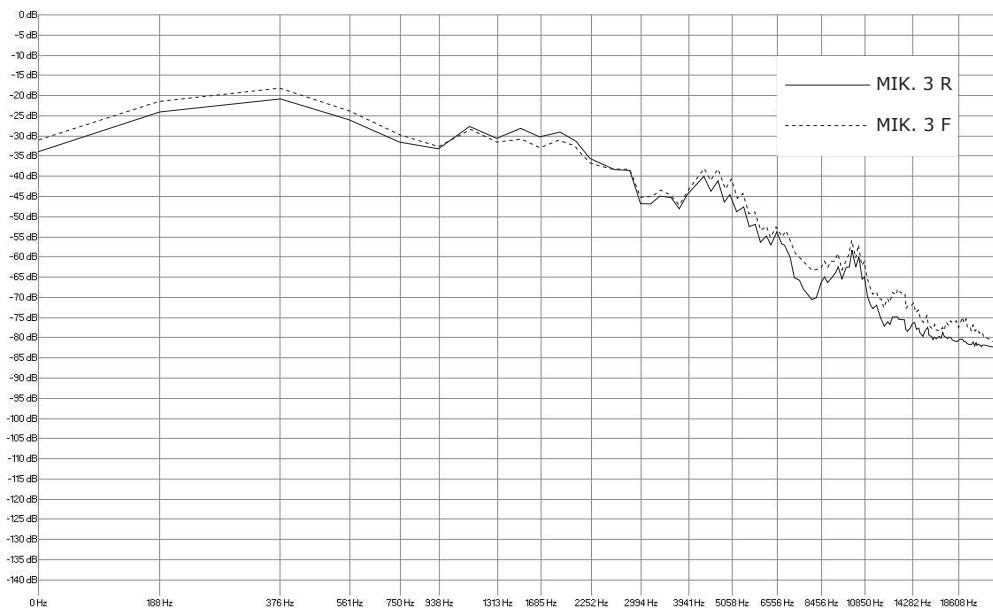


Abbildung 4.5: Vergleich der Frequenzverläufe der Aufnahmen des 3. Mikrophons (Filter) und des 3. Mikrophons (Real).

Abbildung 4.6 zeigt die Kurven der Spektralanalyse der realen und simulierten Audiodatei für die Position des zweiten Mikrophons. Die Kurven sind sich weitgehend ähnlich, allerdings treten in einigen Frequenzbereichen Pegelunterschiede auf. Bei ca. 1500 Hz beträgt der Pegelunterschied etwa 5 dB, bei 4000 Hz etwa 10 dB und bei ca. 10000 Hz etwa 10 dB.

Abbildung 4.7 zeigt die Kurven der Spektralanalyse der realen und simulierten Audiodatei für die Position des vierten Mikrophons. Auch hier verlaufen die Kurven weitgehend ähnlich. Markant sind vor allem Pegelunterschiede bei ca. 700 Hz (7 dB), ca. 2100 Hz (10 dB) und Pegelunterschiede zwischen 3 dB und 10 dB im Frequenzbereich größer 5000 Hz.

Insgesamt betrachtet verlaufen die Kurven weitgehend ähnlich. Dennoch sind in einigen Frequenzbereichen deutliche Unterschiede feststellbar. Es fällt auf, dass eine naturgetreue Simulation des charakteristischen Klangabstrahlverhaltens des Instruments durch den entwickelten Filter nicht möglich ist. Der Filter si-

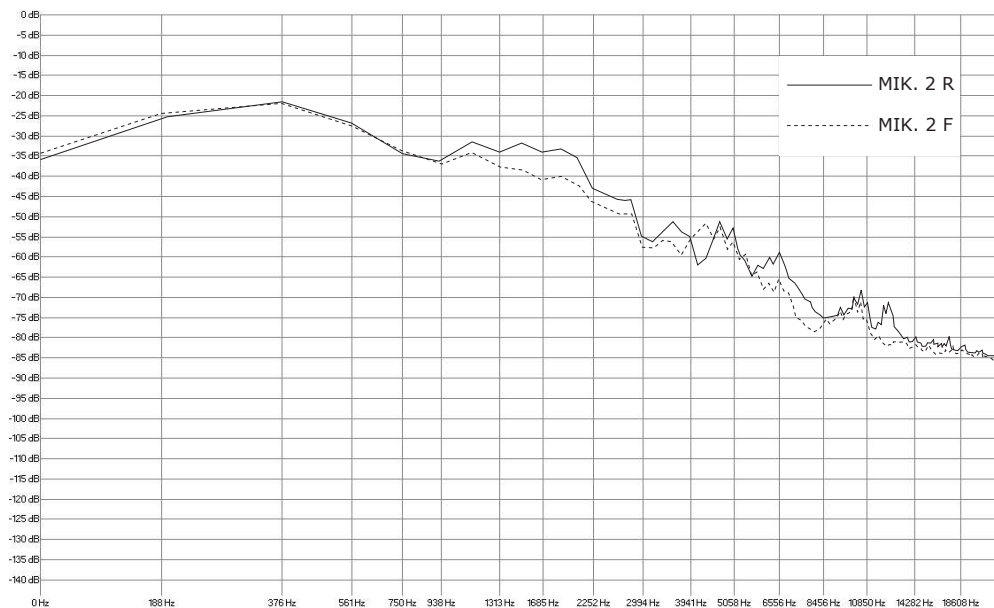


Abbildung 4.6: Vergleich der Frequenzverläufe der Aufnahmen des 2. Mikrophons (Filter) und des 2. Mikrophons (Real).

muliert das Klangabstrahlverhalten also eher qualitativ und eignet sich nicht für Anwendungen, in denen eine möglichst naturgetreue Simulation und Abbildung des Klangabstrahlverhaltens benötigt wird. Außerdem ist deutlich der Tiefpasscharakter des Filters zu erkennen.

4.4 Grafik

4.4.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die in der Anwendung verwendete Grafik ergeben sich aus dem Anspruch, dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, das Klangabstrahlverhalten eines Musikinstruments innerhalb einer virtuellen Umgebung in Echtzeit zu erfahren.

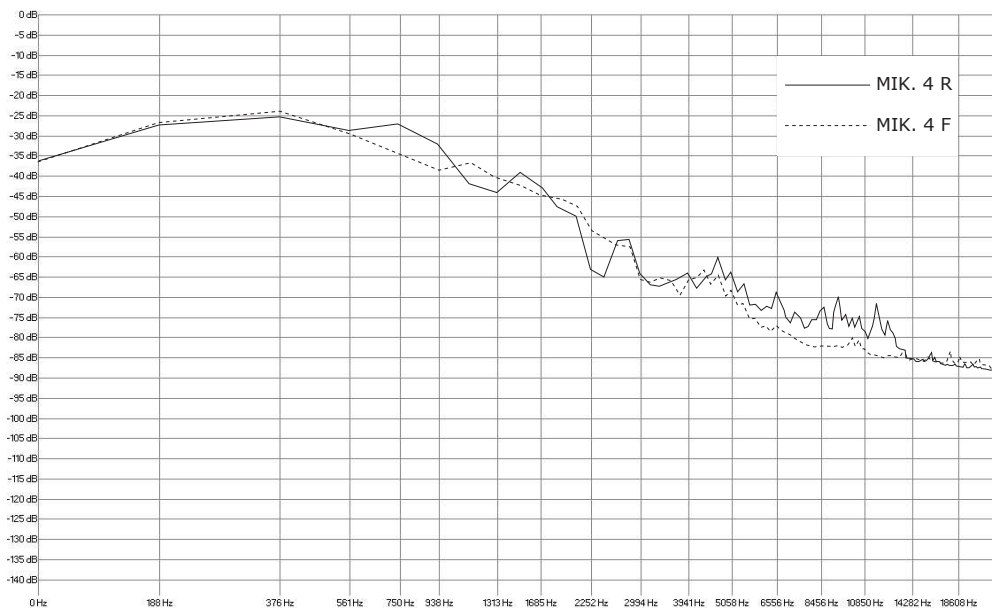


Abbildung 4.7: Vergleich der Frequenzverläufe der Aufnahmen des 4. Mikrophons (Filter) und des 4. Mikrophons (Real).

Im Folgenden sind die Anforderungen an die Grafik kurz dargestellt.

- Das verwendete 3D-Werkzeug muss Echtzeit 3D-Grafik in hoher Qualität darstellen können.
- Der Anwender muss mit der 3D-Grafik interagieren können und sich frei im virtuellen Raum bewegen können.
- VRML-Dateien müssen in die Anwendung integriert werden können.

4.4.2 Open Inventor

Der Grafikanteil der Anwendung wurde in der Entwicklungsumgebung Visual C++ 6.0 unter der Verwendung des 3D-Toolkits Open Inventor der Firma Mercury durchgeführt.

Open Inventor[®] from Mercury is the most widely used object-oriented, cross-platform 3D graphics API for C++ and Java developers. The

new Open Inventor takes advantage of technological advances to better meet the needs of our customers. With a full compliment of robust components for rapid application development, Open Inventor has become an even more powerful graphic display system for real-time 3D visualization. Open Inventor allows developers to increase productivity by reducing time to market and optimizing their development costs and resources. [Mer05]

Mittels Open Inventor kann eine 3D-Szene, also eine virtuelle Umgebung, in Echtzeit dargestellt werden. Insbesondere können VRML-Dateien geladen und verarbeitet werden. Die Möglichkeit Open Inventor innerhalb der Entwicklungsumgebung Visual C++ 6.0 zu verwenden, garantiert außerdem einen problemlosen Datenaustausch mit der verwendeten Audioengine FMOD. Der in Open Inventor integrierte Viewer, mit dem eine 3D-Szene betrachtet werden kann, erlaubt es dem Benutzer, mit der virtuellen Umgebung zu interagieren und sich frei darin zu bewegen. [Wer94]

4.4.3 Umsetzung in Visual C++

Zunächst wird der in Open Inventor integrierte Viewer initialisiert und die virtuelle Umgebung, das Saxophonmodell als VRML-Datei, geladen. Die Position der virtuellen Kamera, durch die die 3D-Szene betrachtet wird, entspricht der Position des virtuellen Mikrophons, welches durch die virtuelle Umgebung bewegt werden kann. Zur Berechnung des Audiosignals wird also die aktuelle Kameraposition an die programmierte Audiointerpolationsfunktion, bzw. die programmierte Filterfunktion übergeben. Um hörbare Sprünge zu vermeiden und gleichmäßige Änderungen des Audiosignals zu ermöglichen, geschieht dies mit einer Frequenz von 25 Hz. Abbildung 4.8 zeigt den Viewer mit der geladenen 3D-Szene. Der Benutzer kann sich, bzw. das virtuelle Mikrophon, mit Hilfe der seitlich und am unteren Rand angebrachten Navigationstools frei in der virtuellen Umgebung bewegen.

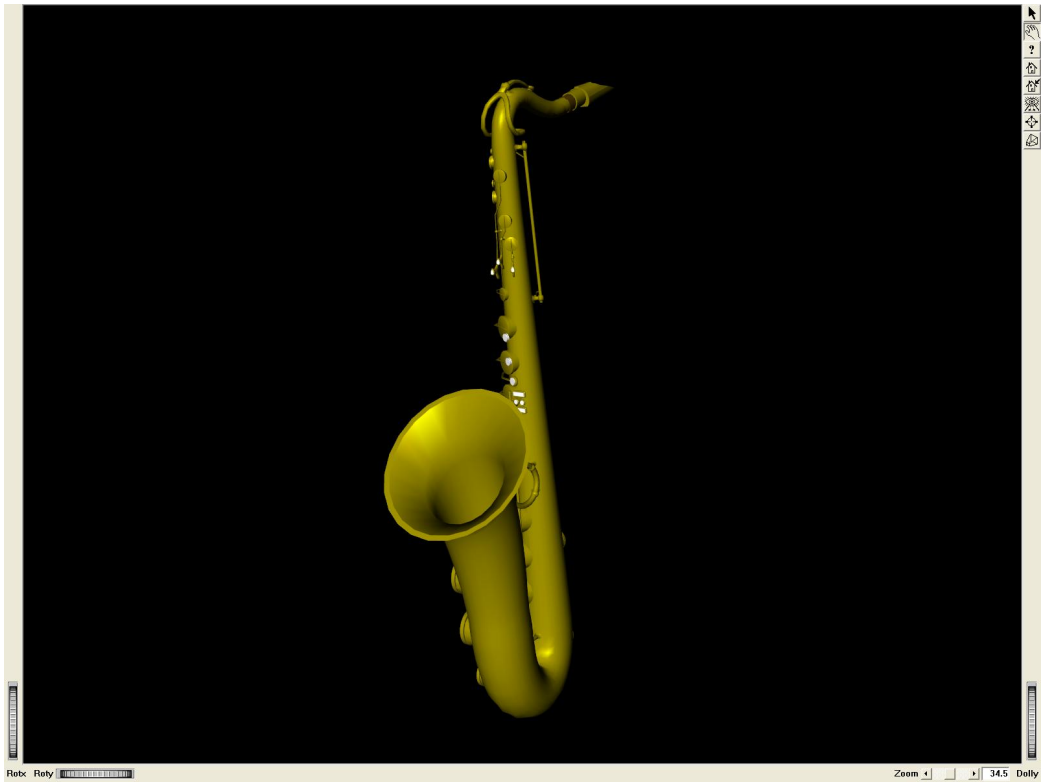


Abbildung 4.8: Open Inventor Viewer.

Kapitel 5

Validierung

5.1 Hörversuche

Hörversuche sind Experimente, bei denen unter definierten Bedingungen akustische Wahrnehmungen untersucht werden. [Bla74]

5.1.1 Einführung

Bei einem Hörversuch wird die Versuchsperson einem Schallereignis mit bekannten Parametern und Eigenschaften ausgesetzt und beschreibt dann die von ihr wahrgenommenen Hörereignisse bezüglich der interessierenden Merkmale. Als Beschreibung gelten neben Sprache auch Ausdrucksaktionen wie Handzeichen, Druck auf Signalbuttons oder Notizen. Die Beschreibung sollte aber einen quantitativen Rückschluss auf die Hörereignismerkmale zulassen. Zur Voruntersuchung und dem Testen der Versuchsanordnung kann ein Selbstversuch durchgeführt werden. In diesem Fall sind Versuchsperson und Beobachter identisch. Der eigentliche Versuch wird dann als Fremdversuch durchgeführt, d.h. Versuchsperson und Beobachter stimmen nicht überein. Der Versuchsleiter nimmt nun das Hörereignis als Beschreibung oder Reaktion der Versuchsperson wahr. Da der Versuchsleiter das Hörereignis der Versuchsperson nicht selber wahrnehmen kann, ist die Versuchssituation symbolisch mit einer "black box" zu beschreiben (siehe Abbildung 5.1), die im einfachsten Fall eine Eingangsgröße (das Schallereignis s_0) und zwei Ausgangsgrößen (das Hörereignis h_0 und die Beschreibung des Hörereignisses

durch den Probanden b_0) hat. Werden nun mehrere Hörversuche mit unterschiedlichen Testpersonen durchgeführt, so kann man Erkenntnisse über die Beziehungen zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen des Systems gewinnen. Mögliche Beziehungen sind:

- Hörereignismerkmale als Funktion der Schallereignismerkmale
- Beschreibungsmerkmale als Funktion der Hörereignismerkmale
- Beschreibungsmerkmale als Funktion der Schallereignismerkmale

Um quantitative Aussagen über Beziehungen zwischen Merkmalen eines Hörversuchs zu gewinnen, müssen Messungen durchgeführt werden. [Bla74]

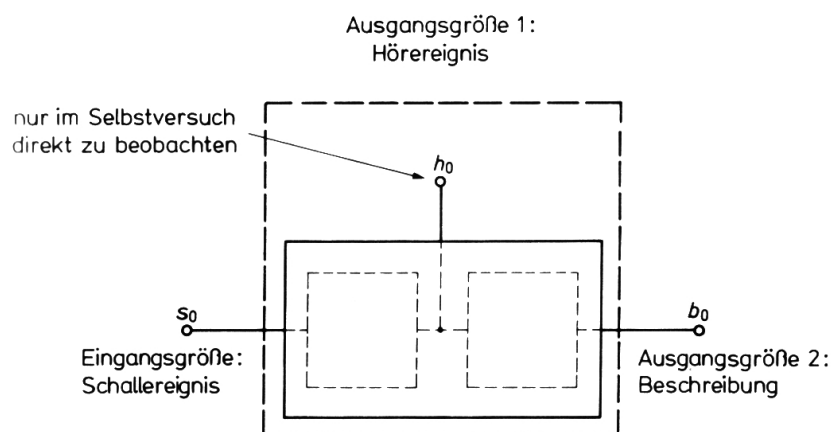


Abbildung 5.1: Schema für eine Versuchsperson im Hörversuch. [Bla74]

5.1.2 Probleme bei Messungen

Praktische Messungen haben nur eine endliche Genauigkeit, so dass z.B. die Wiederholung einer Messung unter gleichen Voraussetzungen unterschiedliche Ergebnisse liefern kann. Ein einzelnes Messergebnis kann also immer nur innerhalb bestimmter Grenzen angegeben werden. Bei Hörversuchen treten die Probleme der Messgenauigkeit mehrfach auf. Mit dem Versuchsaufbau von Bild 5.2 soll die Beziehung zwischen Schallereignismerkmal und Hörereignismerkmal

bestimmt werden. Die Messung des Schallereignismerkmal s_0 am Eingang des Versuchsaufbaus kann mit einem physikalischen Messgerät durchgeführt werden. Das Hörereignismerkmal h_0 kann jedoch nicht direkt gemessen werden, da es subjektiv von der Versuchsperson wahrgenommen wird. Nach vorher vereinbarten Regeln wird das wahrgenommene Hörereignis nun von der Testperson beschrieben, die Testperson wird zum psychophysikalischen Messgerät. Die nach vereinbarten Regeln von dem Probanden beschriebenen Beschreibungsmerkmale b_0 sind wieder direkt messbar. Messungenauigkeiten können bei dieser Versuchsanordnung zweimal auftreten. Erstens die Messungenauigkeiten des physikalischen Messgeräts und zweitens die Messungenauigkeiten des psychophysikalischen Messgeräts, also der Testperson. In der Praxis werden jedoch die Reproduzierbarkeit der Schallereignisse und die Genauigkeit ihrer Messung, sowie die Beschreibung der Hörereignisse durch die Versuchspersonen als nahezu konstant angenommen, so dass Schwankungen nur als Veränderung der Wahrnehmung der Versuchsperson erklärbar sind. Schwankungen sind also, da sie auf der unterschiedlichen Wahrnehmung der Testpersonen basieren, im Einzelfall nicht vorausberechenbar und nicht durch die Versuchsbedingungen kontrollierbar. Die Messergebnisse sind also von einer Zufallsgröße überlagert und müssen mit Mitteln aus der Statistik bearbeitet werden. [Bla74]

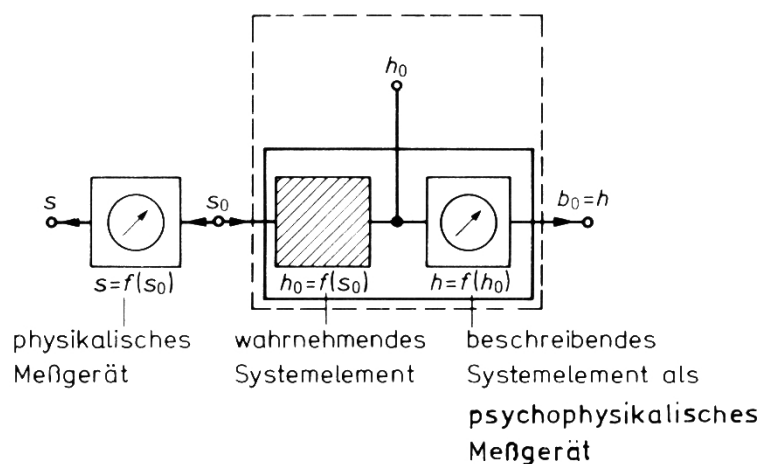


Abbildung 5.2: Testperson als psychophysikalisches Messgerät. [Bla74]

5.1.3 Auswertung

Statistische Verfahren gehen davon aus, dass die Messergebnisse Stichproben aus einer Grundgesamtheit sind, die zufällig und unabhängig aus ihr entnommen wurden. Bei Hörversuchen sollte daher als Testpersonen eine Zufallsauswahl aus einer nicht homogenen Personengruppe zur Verfügung stehen. In der Praxis ist dies jedoch oft nicht realisierbar. Somit sind Testergebnisse aufgrund von nicht erfüllten Voraussetzungen nicht immer als allgemein gültig anzusehen.[Bla74]

5.2 Versuchsdurchführung

Der im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführte Hörtest versucht, Erkenntnisse über die Qualität der beiden entwickelten Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens zu erhalten. Zur Durchführung des Hörtests wurde eine Testanwendung erstellt, so dass die Probanden den Test selbständig am Computer durchführen konnten.

5.2.1 Fragestellung

Um eine Aussage über die Qualität der entwickelten Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens treffen zu können, müssen beide Methoden mit realen Aufnahmen verglichen werden. Der Hörtest besteht aus zwei Testteilen.

Testteil 1

Der erste Testteil beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit charakteristisches Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten wahrnehmbar ist bzw. ob aus einem Klangunterschied zweier Hörbeispiele auf einen Winkelunterschied der Hörerposition geschlossen werden kann. Diese Frage wird jeweils für reale Hörbeispiele und für Hörbeispiele, die mit den beiden entwickelten Methoden hergestellt wurden, gestellt. Nach mehreren Gesprächen mit Prof. Dr. Eng. /Univ. of Tsukuba Jens Herder und Prof. Dr. -Ing. Dieter Leckschat wurde entschieden, die möglichen Winkel auf eine Bewegungsachse zu beschränken. Die Abbildungen 5.3 und

5.4 zeigen die gewählte Bewegungsachse um das Instrument. Die Hörbeispiele wurden dem Probanden in der Form ABAB vorgespielt. Hörbeispiel A bildet jeweils die 0° Position ab, Hörbeispiel B bildet einen Winkel auf der Bewegungsachse ab. Hörbeispiel A und B wurden unter Verwendung der gleichen Methode hergestellt. Der Proband muss nun anhand des Klangunterschieds die Abbildungsposition des zweiten Hörbeispiels bestimmen.

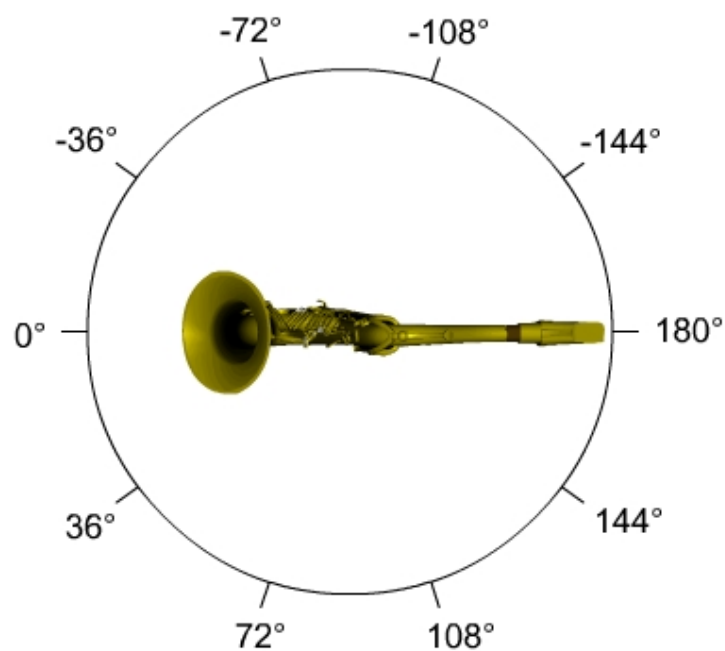


Abbildung 5.3: Bewegungsachse, Aufsicht.

Als Grundlage für die Hörbeispiele wurden zwei kurze, charakteristische Phrasen mit der Dauer von ca. 5 Sekunden aus den Aufnahmen ausgewählt und ausgeschnitten. Phrase 1 ist ein gebrochener Dreiklang, Phrase 2 eine kurze Melodie. Aus diesen beiden Phrasen wurden nun, unter Verwendung der beiden Methoden, die Hörbeispiele für den Hörtest generiert. Die realen Hörbeispiele sind die Aufnahmen der Mikrophone.

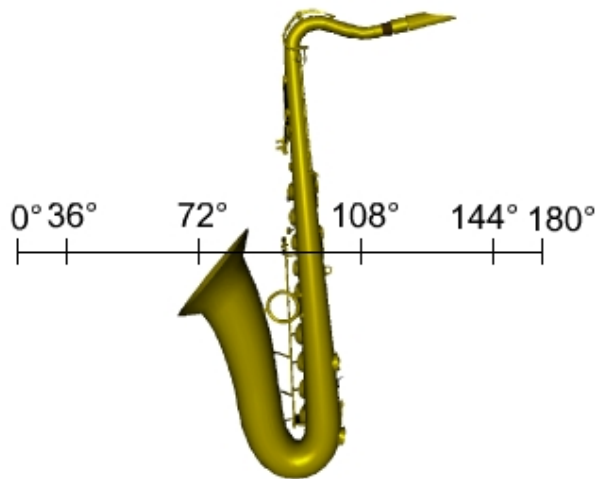


Abbildung 5.4: Bewegungsachse, Seitenansicht.

Für die realen Hörbeispiele stehen, bedingt durch die Mikrofonpositionen, die Winkel 0° , 72° , 144° , -144° , und -72° zur Verfügung. Es ist anzumerken, dass die Mikrophone während der Aufnahme nicht genau auf, sondern etwas über der beschriebenen Bewegungsachse positioniert waren. Die genaue Position ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Es ergeben sich also folgende Kombinationsmöglichkeiten für die Hörbeispiele:

- 0° und 0°
- 0° und 72°
- 0° und 144°
- 0° und -144°
- 0° und -72°

Es ergeben sich also fünf Winkelkombinationen für jede Phrase. Insgesamt können so zehn Hörversuche für reale Hörbeispiele durchgeführt werden. Um später eine Aussage über die Antwortkonsistenz der einzelnen Probanden treffen zu

können (siehe Kapitel 5.4), wurden die Hörversuche der realen Hörbeispiele doppelt durchgeführt. Es ergeben sich also insgesamt 20 Hörversuche für die realen Hörbeispiele.

Für die simulierten Hörbeispiele wurden, unter der Verwendung der beiden Methoden, die Winkel 0° , 36° , 72° , 108° , 144° , 180° , -144° , -108° , -72° , -36° ausgewählt. Die Rasterung der Winkel ist also doppelt so hoch wie die der realen Hörbeispiele. Es ergeben sich für jede Methode folgende Kombinationsmöglichkeiten:

- 0° und 0°
- 0° und 36°
- 0° und 72°
- 0° und 108°
- 0° und 144°
- 0° und 180°
- 0° und -144°
- 0° und -108°
- 0° und -72°
- 0° und -36°

Es ergeben sich also zehn Winkelkombinationen für jede Phrase. Insgesamt können so für jede Methode 20 Hörversuche durchgeführt werden. Da die Antwortkonsistenz der Probanden bereits mit den realen Hörbeispielen überprüft wird, wurde darauf verzichtet, Hörversuche mit simulierten Hörbeispielen doppelt durchzuführen.

Insgesamt werden im ersten Testteil also 60 Hörversuche durchgeführt.

Testteil 2

Der zweite Testteil beschäftigt sich mit der Frage, ob die Testpersonen eine bestimmte Methode hinsichtlich ihres Klangcharakters bevorzugen. Die ursprüngliche Fragestellung *"Welches der Hörbeispiele klingt natürlicher?"* ist laut Prof. Dr. Braun [Bra04] problematisch und für den Probanden nicht lösbar. Die Fragestellung wurde anschließend in *"Welches der Hörbeispiele gefällt Ihnen besser?"* umgewandelt.

Um festzustellen, ob eine der Methoden hinsichtlich ihres Klangcharakters von den Probanden bevorzugt wird, wurden die Hörbeispiele der unterschiedlichen Methoden untereinander verglichen. Die Hörbeispiele wurden dem Probanden in der Form ABAB vorgespielt. Hörbeispiel A und B bilden jeweils den gleichen Winkel auf der Bewegungsachse (siehe Abbildungen 5.3 und 5.4) ab, wurden allerdings mit unterschiedlichen Methoden hergestellt. Die Hörbeispiele unterscheiden sich in der durch die angewandte Methode spezifischen Klangcharakteristik. Der Proband muss nun anhand des Klangunterschieds der beiden Hörbeispiele bestimmen welches der beiden Hörbeispiele er bevorzugt. Als Hörbeispiele wurden die für Testteil 1 angefertigten verwendet.

Da die Hörbeispiele, die unter Verwendung des Interpolationsalgorithmus hergestellt wurden, an den Positionen, an denen während der Aufnahme die Mikrophone positioniert waren, identisch mit den realen Hörbeispielen sind (vergleiche Kapitel 4.3.3), können diese Hörbeispiele nicht miteinander verglichen werden. Demzufolge sind folgende Vergleiche möglich:

- Reale Hörbeispiele verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter)
- Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter)

Für den ersten Vergleich (reale Hörbeispiele verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter)), sind folgende Kombinationen möglich:

- 0° (Real) und 0° (Filter)
- 72° (Real) und 72° (Filter)

- 144° (Real) und 144° (Filter)
- -144° (Real) und -144° (Filter)
- -72° (Real) und -72° (Filter)

Es ergeben sich also fünf Kombinationen für jede Phrase. Insgesamt können so zehn Hörversuche durchgeführt werden. Um später eine Aussage über die Antwortkonsistenz der einzelnen Probanden treffen zu können (siehe Kapitel 5.4), wurden die Hörversuche doppelt durchgeführt. Es ergeben sich also insgesamt 20 Hörversuche.

Für den zweiten Vergleich (simulierte Hörbeispiele (Interpolation) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter)), waren folgende Kombinationen möglich:

- 0° (Interpolation) und 0° (Filter)
- 36° (Interpolation) und 36° (Filter)
- 72° (Interpolation) und 72° (Filter)
- 108° (Interpolation) und 108° (Filter)
- 144° (Interpolation) und 144° (Filter)
- 180° (Interpolation) und 180° (Filter)
- -144° (Interpolation) und -144° (Filter)
- -108° (Interpolation) und -108° (Filter)
- -72° (Interpolation) und -72° (Filter)
- -36° (Interpolation) und -36° (Filter)

Es ergeben sich also zehn Kombinationen für jede Phrase. Insgesamt können so 20 Hörversuche durchgeführt werden. Da die Antwortkonsistenz der Probanden bereits mit dem ersten Vergleich überprüft wird, wurde darauf verzichtet, Hörversuche doppelt durchzuführen.

Insgesamt wurden im zweiten Testteil also 40 Hörversuche durchgeführt.

5.2.2 Testanwendung und Versuchsanordnung

Die entwickelte Testanwendung ermöglicht es dem Probanden, die Hörversuche selbständig an einem Computer durchzuführen. Wird die Testanwendung gestartet, muss der Proband zunächst seine Studienrichtung bzw. Ausbildung angeben. Später können so Rückschlüsse auf einschlägige Vorbildung von z.B. Studierenden des Studiengangs Ton- und Bildtechnik geschlossen werden. Sowohl im ersten wie auch zweiten Testteil werden die Hörversuche zufällig abgespielt. Es findet also keine Trennung in der Form: Hörversuch 1-20 reale Hörbeispiele; Hörversuch 21-40 simulierte Hörbeispiele (Filter); Hörversuch 41-60 simulierte Hörbeispiele (Interpolation), statt.

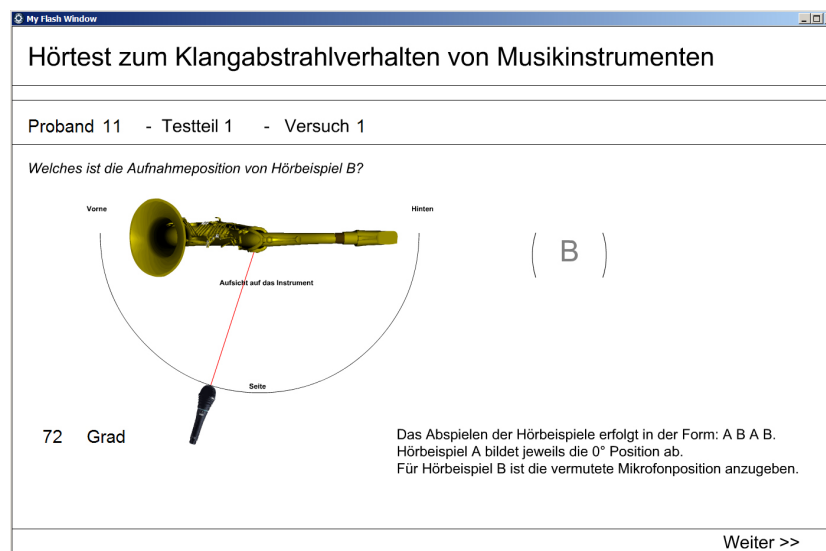


Abbildung 5.5: Benutzeroberfläche der Testanwendung für den ersten Testteil.

Abbildung 5.5 zeigt die Benutzeroberfläche der Testanwendung für den ersten Testteil. Die Hörbeispiele werden automatisch in der Form ABAB abgespielt. Anschließend hat der Proband die Möglichkeit, mit Hilfe der Pfeiltasten am Computer die geschätzte Position für Hörbeispiel B einzustellen. Bei Klick auf "weiter" am rechten unteren Rand der Anwendung startet der nächste Hörversuch. Alle eingestellten Werte werden in einer Tabelle gespeichert.

Abbildung 5.6 zeigt das User Interface für den zweiten Testteil. Die Hörbeispiele werden automatisch in der Form ABAB abgespielt. Anschließend hat der Proband die Möglichkeit, mit Hilfe der Pfeiltasten am Computer die rote Markierung zu bewegen und somit zu bestimmen, welches der Hörbeispiele ihm besser gefällt. Bei Klick auf "weiter" am rechten unteren Rand der Anwendung startet der nächste Hörversuch. Alle eingestellten Werte werden in einer Tabelle gespeichert.

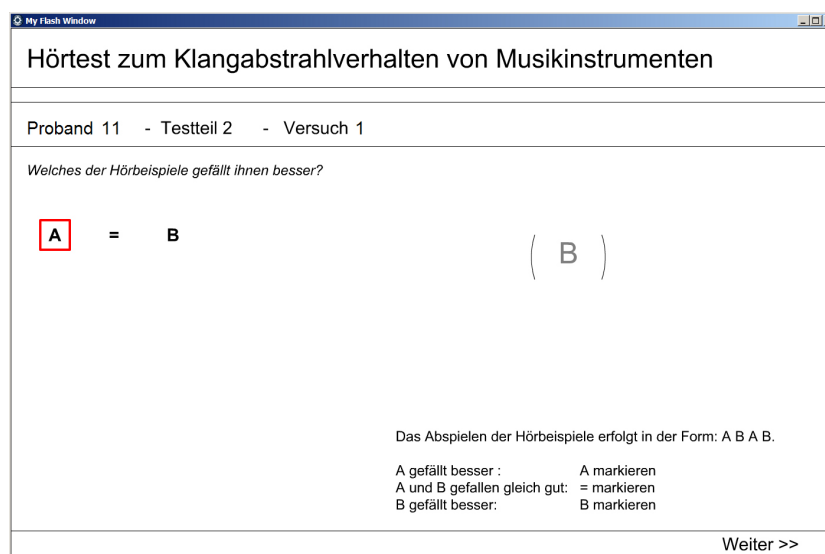


Abbildung 5.6: Benutzeroberfläche der Testanwendung für den zweiten Testteil.

Der Versuch wurde im Aufnahme-raum des Tonstudios der Fachhochschule Düsseldorf durchgeführt. Der Raum zeichnet sich durch eine gute Akustik aus, ist frei von störenden Nebengeräuschen und ist somit eine gute Abhörumgebung. Die Idee, den Hörtest im reflexionsarmen Raum durchzuführen, wurde wegen der unnatürlichen Akustik des Raums wieder verworfen. Abbildung 5.7 zeigt die Versuchsanordnung für den durchgeführten Hörtest. Der Lautsprecher steht in 140 cm Entfernung dem Probanden auf Kopfhöhe gegenüber. Vor dem Probanden steht der Computer, auf dem die Testanwendung ausgeführt wird. Der Abstand von 140 cm entspricht dem Abstand der Mikrophone bei der Aufnahme.

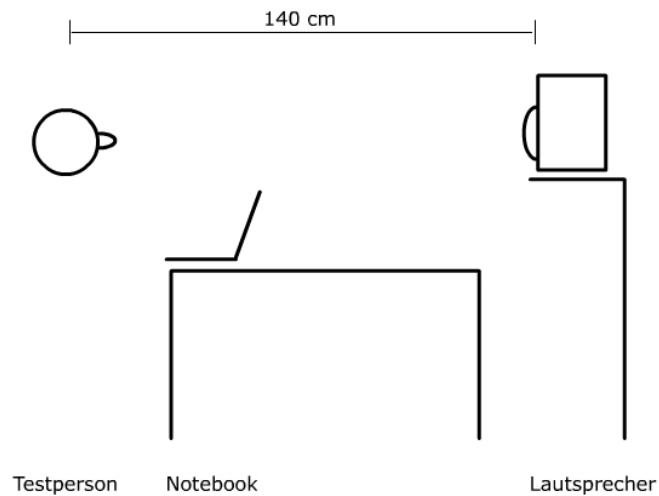


Abbildung 5.7: Versuchsanordnung.

5.2.3 Versuchsaufbau

Vor dem Versuch wurde jedem Probanden ein kurzer Informationstext mit einer kurzen Erklärung der Thematik, einer kurzen Versuchsbeschreibung, der Fragestellung des Versuchs, sowie einer Anleitung zur Testanwendung ausgehändigt (siehe Anhang E). Eventuell auftretende Fragen wurden mündlich beantwortet. Zum Instruieren der Probanden und um einen Eindruck vom möglichen Klangspektrum der Hörbeispiele zu bekommen, wurden in der Form ABAB anschließend zwei Hörbeispiele vorgespielt. Hörbeispiel A bildet die 0° Position ab, Hörbeispiel B bildet die 180° Position ab. Danach wurde die Testanwendung gestartet und der Proband konnte den Hörtest selbstständig durchführen. Die Dauer des Hörtests betrug pro Proband etwa 40 Minuten.

5.2.4 Testergebnisse

Insgesamt haben 20 Probanden am Hörtest teilgenommen. Im Folgenden sind die Testergebnisse von Testteil 1 und Testteil 2 aufgeführt. Die genau numerische Auszählung der Testergebnisse ist in Anhang F dargestellt.

Testteil 1

Die Tabelle 5.1 und das Schaubild 5.8 zeigen das Ergebnis der Hörversuche mit realen Hörbeispielen. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			3,75		81,25					
36	1,25		25		17,5		20			
72	6,25		17,5		1,25		28,75		3,75	
108	16,25		6,25				18,75		11,25	
144	31,25		13,75				18,75		37,5	
180	45		33,75				13,75		47,5	

Tabelle 5.1: Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

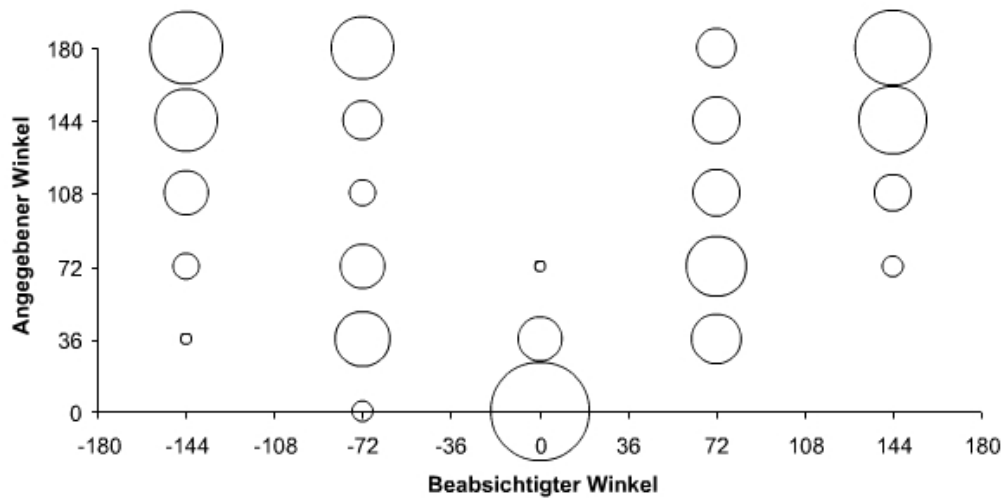


Abbildung 5.8: Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele.

Die Tabelle 5.2 und das Schaubild 5.9 zeigen das Ergebnis der Hörversuche mit simulierten Hörbeispielen, die unter Verwendung des entwickelten Interpolationsalgorithmus hergestellt wurden. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die

Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0	2,5			2,5	80	7,5	2,5			
36	2,5	7,5	7,5	40	17,5	22,5	45	2,5		5
72	7,5	10	15	40	2,5	55	35	35	7,5	5
108	37,5	40	47,5	17,5		10	17,5	32,5	12,5	17,5
144	45	32,5	15			5		30	55	35
180	5	10	15						25	37,5

Tabelle 5.2: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

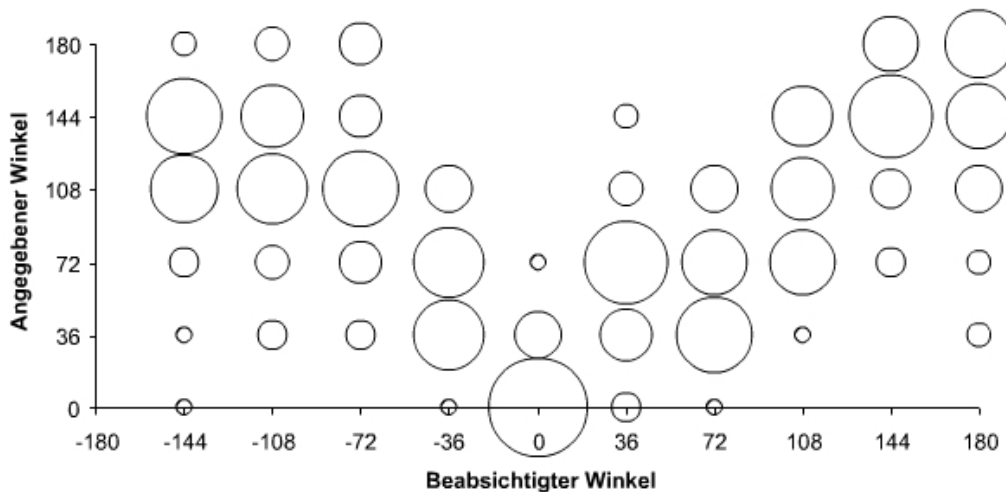


Abbildung 5.9: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation).

Die Tabelle 5.3 und das Schaubild 5.10 zeigen das Ergebnis der Hörversuche mit simulierten Hörbeispielen, die unter Verwendung des entwickelten Filters hergestellt wurden. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben.

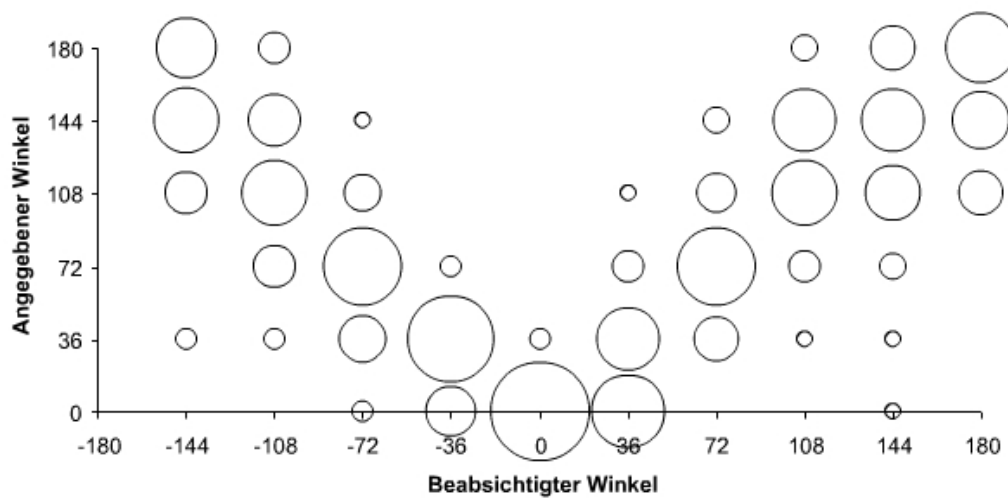


Abbildung 5.10: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter).

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			5	25	95	50			2,5	
36	5	5	22,5	70	5	37,5	20	2,5	2,5	
72		17,5	57,5	5		10	57,5	10	7,5	
108	17,5	40	12,5			2,5	15	42,5	30	20
144	42,5	27,5	2,5				7,5	37,5	37,5	32,5
180	35	10						7,5	20	47,5

Tabelle 5.3: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

Testteil 2

Die Tabelle 5.4 und das Schaubild 5.11 zeigen das Ergebnis der Hörversuche: Reale Hörbeispiele verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter). Angegeben ist die prozentuale Häufigkeit mit der eine Antwort von den Probanden gegeben wurde. Bei den entsprechenden abgebildeten Winkeln konnten die folgenden Antworten gegeben werden: durch Simulation (Filter) erzeugtes Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (F); das reale Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (R); keines der Hörbeispiele wird klanglich bevorzugt (=).

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
F	28,75		23,75		21,25		33,75		47,5	
=	36,25		26,25		27,5		20		23,75	
R	35		50		51,25		46,25		28,25	

Tabelle 5.4: Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

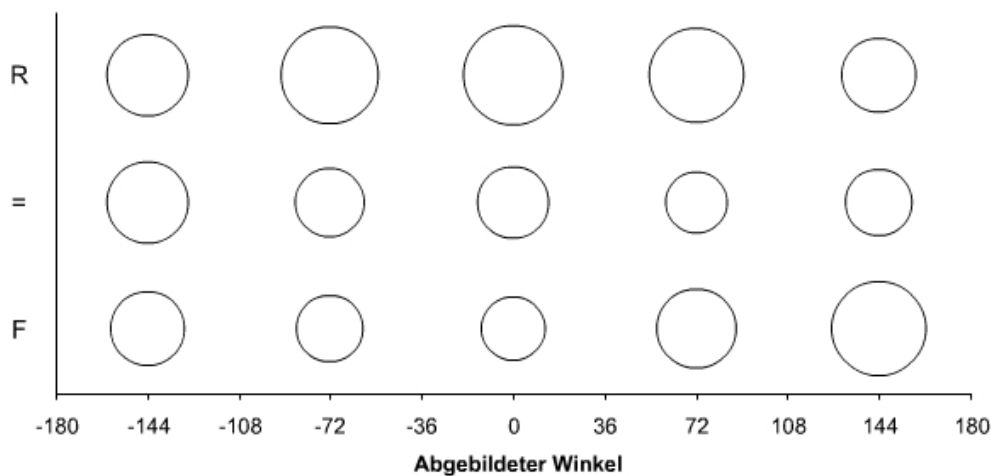


Abbildung 5.11: Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

Die Tabellen 5.5 und das Schaubild 5.12 zeigen das Ergebnis des Hörversuchs: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter). Angegeben ist die prozentuale Häufigkeit mit der eine Antwort von den Probanden gegeben wurde. Bei den entsprechenden abgebildeten Winkeln konnten die folgenden Antworten gegeben werden: durch Simulation (Filter) erzeugtes Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (F); durch Simulation (Interpolation) erzeugtes Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (I); keines der Hörbeispiele wird klanglich bevorzugt (=).

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
F	22,5	52,5	47,5	55	65	37,5	17,5	40	40	70
=	17,5	10	32,5	22,5	17,5	17,5	32,5	22,5	27,5	12,5
I	60	37,5	20	22,5	17,5	45	50	37,5	32,5	17,5

Tabelle 5.5: Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

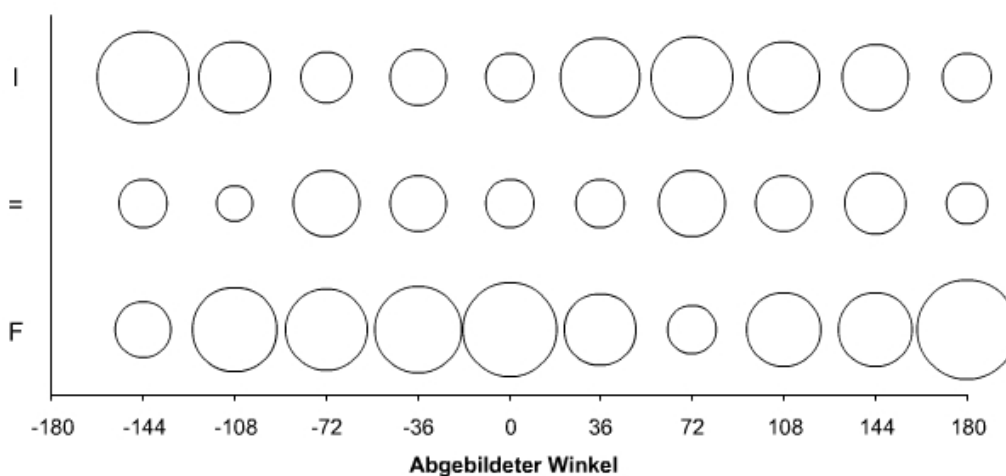


Abbildung 5.12: Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

5.3 Vergleich der Frequenzverläufe der unterschiedlichen Methoden

Um die Frequenzverläufe der realen und der simulierten Hörbeispiele vergleichen zu können, wurden die einzelnen Hörbeispiele mit Hilfe von WaveLab spektral analysiert. Es wurden für reale, simulierte (Interpolation) und simulierte (Filter) Hörbeispiele, jeweils die Positionen 0° , 72° , 144° , -72° und -144° analysiert.

5.3.1 Reale Hörbeispiele

Abbildung 5.13 zeigt das Frequenzspektrum für 0° , 72° und 144° . Die Kurven für 0° und 72° verlaufen weitgehend parallel, der Pegel der 72° Position liegt zwi-

schen 850 Hz und 9800 Hz, jedoch etwa 5 dB unter dem Pegel der 0° Position. Lediglich bei ca. 4000 Hz und 9000 Hz sind schmalbandig Unterschiede von ca. 15 dB (4000 Hz) und ca. 10 dB (9000 Hz) festzustellen. Die Frequenzspektren der 72° und 144° Position verlaufen zwischen ca. 1200 Hz und 7000 Hz weitgehend parallel. Der Pegel der 144° Position ist in diesem Bereich um etwa 10 dB tiefer als der der 72° Position. Auffallend ist, dass der Pegel von 144° bei ca. 700 Hz ca. 5 dB über dem Pegel der 72° Position liegt. Bei ca. 2100 Hz ist ein Pegelunterschied von ca. 15 dB feststellbar.

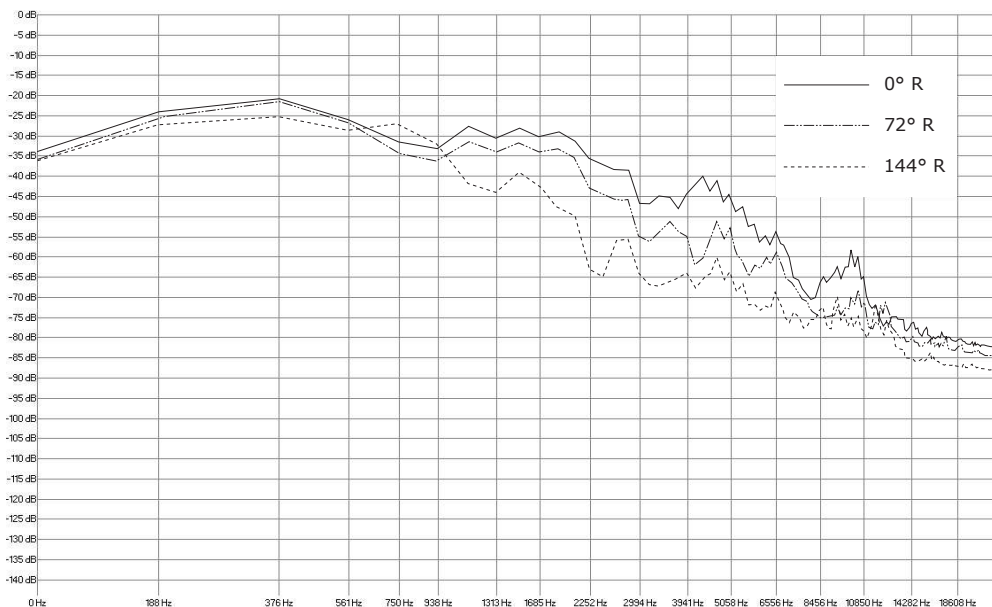


Abbildung 5.13: Frequenzspektrum der realen Hörbeispiele für 0°, 72° und 144°.

Abbildung 5.14 zeigt das Frequenzspektrum für 0°, -72° und -144°. Der Unterschied zwischen der 0° und der -72° Position besteht im Wesentlichen aus einem Pegelunterschied von etwa 15 dB im Bereich zwischen ca. 1000 Hz und 9000 Hz. Im Bereich um ca. 4000 Hz beträgt der Pegelunterschied ca. 25 dB. Die Frequenzspektren der -72° und -144° Position verlaufen weitgehend parallel. Bis ca. 2000 Hz liegt die Kurve der -144° Position etwa 5 dB über der -72° Kurve, ab 2000 Hz etwa 5 dB darunter.

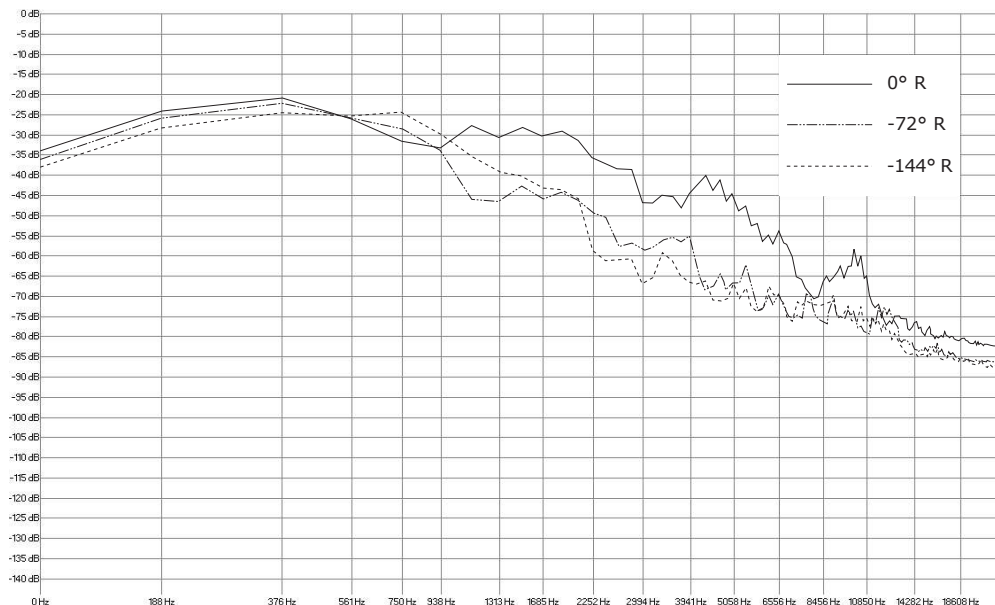


Abbildung 5.14: Frequenzspektrum der realen Hörbeispiele für 0° , -72° und -144° .

5.3.2 Simulierte Hörbeispiele (Interpolation)

In Abbildung 5.15 ist das Frequenzspektrum für 0° , 72° und 144° für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) dargestellt. Die Kurven für 0° und 72° verlaufen weitgehend parallel, der Pegel der 72° Position liegt zwischen 700 Hz und 9800 Hz, jedoch etwa 5 dB unter dem Pegel der 0° Position. Lediglich bei ca. 4000 Hz ist schmalbandig ein Unterschied von ca. 15 dB festzustellen. Die Frequenzspektren der 72° und 144° Position verlaufen zwischen ca. 1200 Hz und 7000 Hz weitgehend parallel. Der Pegel der 144° Position ist in diesem Bereich um etwa 5 dB bis 10 dB tiefer als der der 72° Position. Auffallend ist, dass der Pegel von 144° bei ca. 700 Hz ca. 5 dB über dem Pegel der 72° Position liegt.

Abbildung 5.16 zeigt das Frequenzspektrum für 0° , -72° und -144° . Der Unterschied zwischen der 0° und der -72° Position besteht im Wesentlichen aus einem Pegelunterschied von etwa 15 dB im Bereich zwischen ca. 1000 Hz und

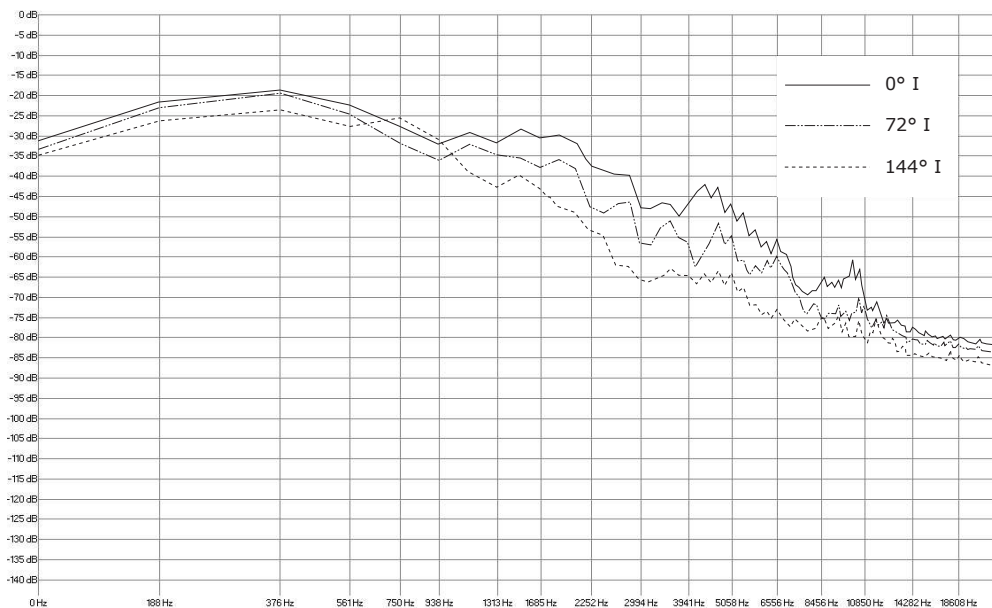


Abbildung 5.15: Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für 0° , 72° und 144° .

9000 Hz. Im Bereich um ca. 4000 Hz beträgt der Pegelunterschied ca. 25 dB. Die Frequenzspektren der -72° und -144° Position verlaufen weitgehend parallel. Bis ca. 2000 Hz liegt die Kurve der -144° Position etwa 5 dB über der -72° Kurve, ab 2000 Hz etwa 5 dB darunter.

5.3.3 Simulierte Hörbeispiele (Filter)

Abbildung 5.17 zeigt das Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Filter) für 0° , 72° und 144° . Die Kurven der 0° Position und der 72° Position verlaufen fast parallel. Der Pegelunterschied beträgt bei ca. 700 Hz etwa 5 dB und steigt dann kontinuierlich bis etwa 10000 Hz an. In diesem Bereich beträgt der Pegelunterschied etwa 10 dB. Ähnlich verhält es sich mit dem Unterschied zwischen den Kurven der 72° Position und der 144° Position. Bei ca. 700 Hz beträgt der Pegelunterschied etwa 3 dB, bei ca. 10000 Hz etwa 8 dB.

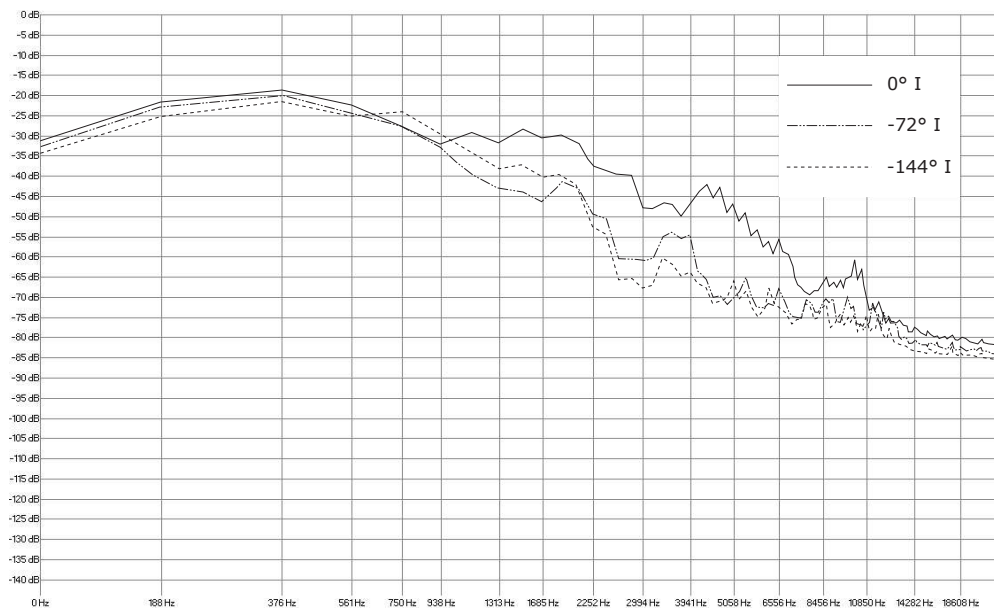


Abbildung 5.16: Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für 0° , -72° und -144° .

In Abbildung 5.18 ist das Frequenzspektrum für 0° , -72° und -144° für simulierte Hörbeispiele (Filter) dargestellt. Der Unterschied der Kurven der 0° Position und der -72° Position besteht aus einem kontinuierlich wachsenden Pegelunterschied. Bei ca. 700 Hz beträgt der Pegelunterschied etwa 5 dB, bei 10000 Hz etwa 15 dB. Die Kurven der -72° Position und der -144° Position verlaufen ebenfalls fast parallel. Der Pegelunterschied beträgt bei ca. 700 Hz etwa 2 dB, bei 10000 Hz etwa 5 dB.

Anhand der Schaubilder für simulierte Hörbeispiele (Filter) lässt sich deutlich der Tiefpasscharakter des entwickelten Filters ablesen. Obwohl der Filter durch die Analyse der realen Hörbeispiele entwickelt wurde, ist deutlich zu erkennen, dass die abgebildeten Positionen, ungleich 0° , durch Filterung der 0° Position entstanden. Die komplexe Abstrahlcharakteristik des Instruments wird durch den entwickelten Filter also nicht in allen Einzelheiten naturgetreu, sondern eher qualitativ abgebildet.

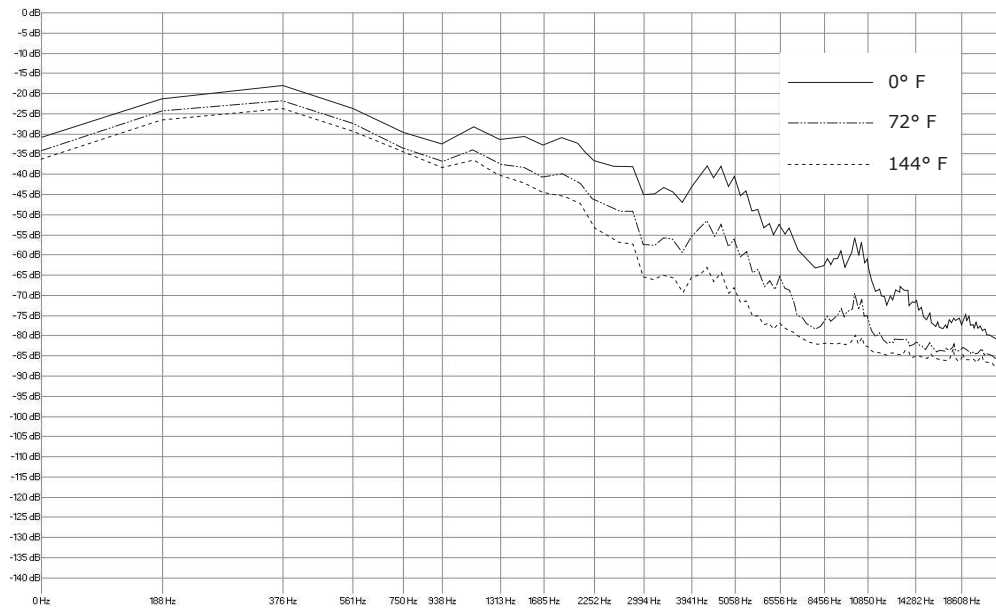


Abbildung 5.17: Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Filter) für 0°, 72° und 144°.

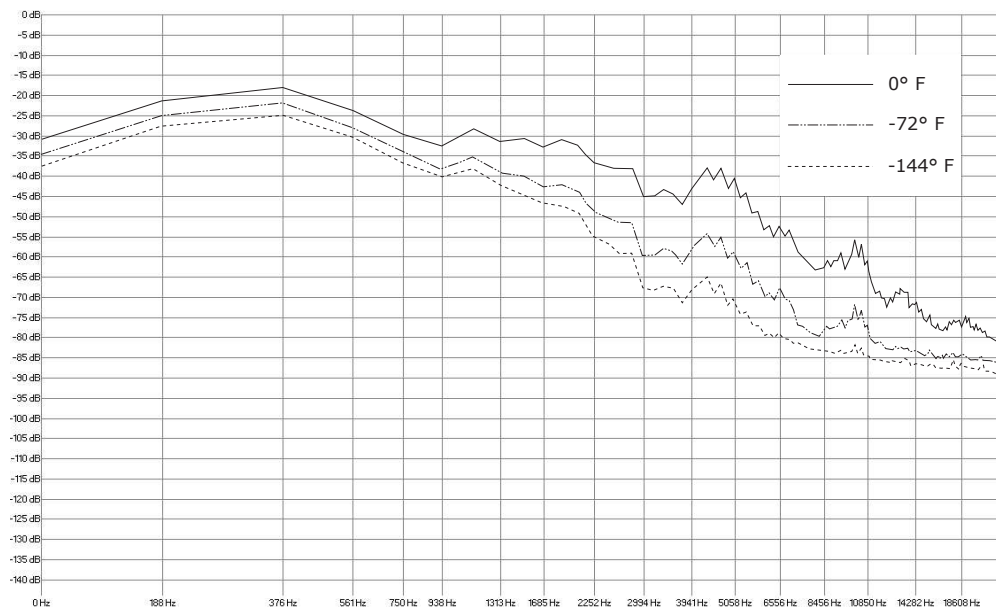


Abbildung 5.18: Frequenzspektrum der simulierten Hörbeispiele (Filter) für 0°, -72° und -144°.

5.3.4 Vergleich der Frequenzverläufe für positive und negative Winkel

Vergleicht man die Kurven der realen Hörbeispiele für die positiven Winkel (siehe Abbildung 5.13) mit den Kurven der negativen Winkel (siehe Abbildung 5.14), so fällt auf, dass bei dem direkten Vergleich zwischen 72° und -72° und dem Vergleich zwischen 144° und -144° Unterschiede feststellbar sind. Markant ist vor allem der Unterschied zwischen der 72° Kurve und der -72° Kurve, der in Abbildung 5.19 dargestellt ist. Die -72° Kurve ist im Bereich zwischen 900 Hz und 6000 Hz um bis zu 10 dB unter der Kurve der 72° Position. Der Klang der -72° Position lässt sich als deutlich dumpfer und hohler beschreiben. Das Klangabstrahlverhalten des Instruments ist also nicht symmetrisch. Die Unterschiede sind durch eventuelle Unregelmäßigkeiten während der Aufnahme, also z.B. die Verdeckung einiger Mikrophone durch den Saxophonspieler oder das Bewegen des Instruments während des Spielens, erklärbar. Zusätzlich ist das Klangabstrahlverhalten auch durch die Bauweise eines Instruments nicht vollständig symmetrisch, so strahlen beispielsweise auch die seitlich angebrachte Klappen und Öffnungen Klang ab.

Vergleicht man die Frequenzspektren der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für positive (siehe Abbildung 5.15) und negative (siehe Abbildung 5.16) Winkel, so sind, wie auch bei den realen Hörbeispielen, Unterschiede feststellbar. Da die simulierten Hörbeispiele (Interpolation) direkt aus den realen Hörbeispielen generiert wurden, sind auch die Unterschiede im Wesentlichen ähnlich. Der deutlichste Unterschied ist also zwischen dem Frequenzspektrum der 72° Kurve und dem Frequenzspektrum der -72° Kurve zu erkennen (siehe Abbildung 5.20).

Die Unterschiede der Frequenzspektren für positive (siehe Abbildung 5.17) und negative (siehe Abbildung 5.18) Winkel der simulierten Hörbeispiele (Filter), sind im Vergleich zu den Unterschieden bei den realen und simulierten Hörbeispielen (Interpolation) eher gering. Die Frequenzspektren der negativen Positionen haben im Vergleich mit den Frequenzspektren der positiven Positionen einen etwas niedrigeren Pegel. Der Pegelunterschied beträgt etwa 3 dB.

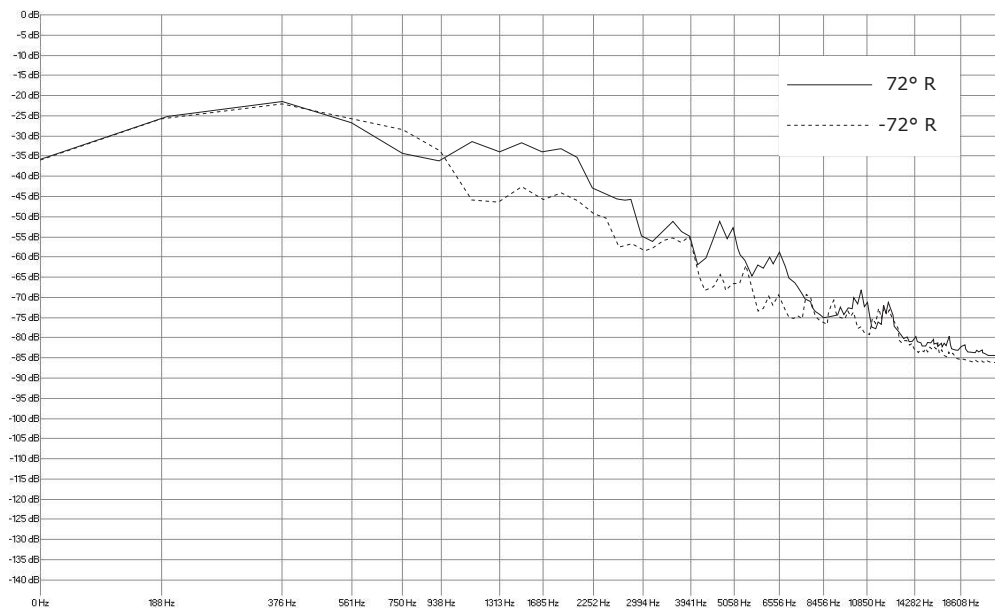


Abbildung 5.19: Vergleich des Frequenzspektrums der realen Hörbeispiele für 72° und -72° .

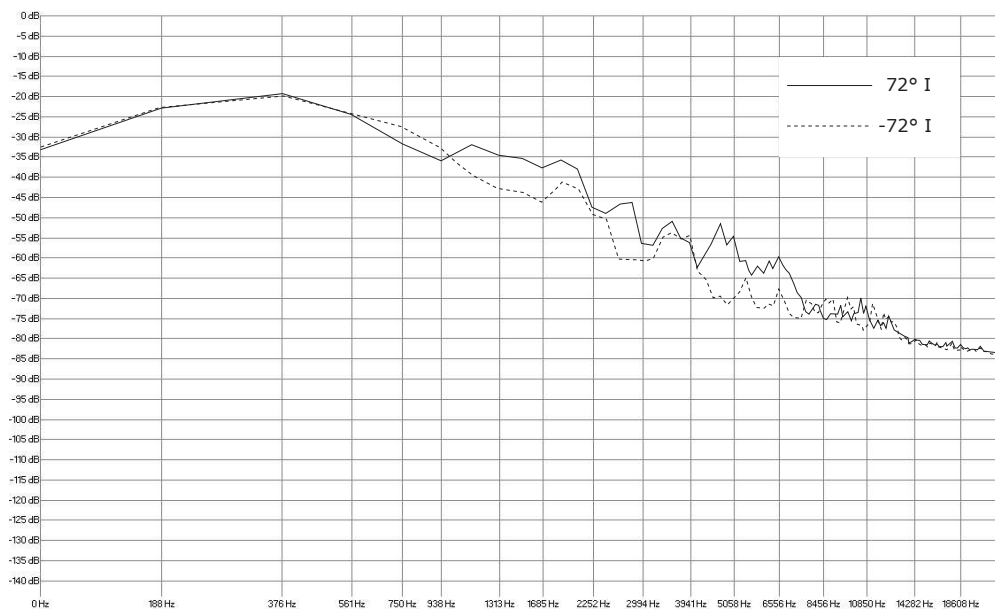


Abbildung 5.20: Vergleich des Frequenzspektrums der simulierten Hörbeispiele (Interpolation) für 72° und -72° .

5.4 Auswertung und Ergebnis

Um eine Aussage über die Ergebnisse des Hörtests treffen zu können, muss zunächst anhand der gewonnenen Daten die Antwortkonsistenz der Probanden überprüft werden. Hierzu wurden, ohne das Wissen der Probanden, für jeden Testteil jeweils zehn Hörversuche doppelt durchgeführt. Bei diesen zehn Hörversuchen waren die Hörbeispiele identisch. Die Anzahl der bei identischen Hörbeispielen gleich bewerteten Hörversuche kann als Maß für die Antwortkonsistenz der Probanden gelten. Hierbei spielt es keine Rolle, ob es bei einer Antwort eine Übereinstimmung zwischen durch Simulation beabsichtigter und angegebener Abbildungsposition gab. Entscheidend ist nur, ob ein identischer Hörversuch gleich bewertet wurde, also dem gleichen Hörereignis die gleiche Antwort zugeordnet wurde. Die Antwortkonsistenz lässt also keine Rückschlüsse auf die Qualität bezüglich der Übereinstimmung zwischen beabsichtigter und angegebener Abbildungsposition zu, vielmehr lässt sich die Anzahl der Probanden bestimmen, die ihre Antworten eher zufällig oder unstetig angaben.

Da die Wahrnehmung der Probanden, insbesondere bei den simulierten Hörbeispielen (Filter und Interpolation), nicht richtig oder falsch sein kann, kann in Bezug auf die Antworten der Probanden nicht von richtigen und falschen Antworten gesprochen werden. Deshalb werden zur Auswertung des Hörtests die Umschreibungen: Es gibt eine Übereinstimmung bzw. es gibt keine Übereinstimmung zwischen durch Simulation beabsichtigter Abbildungsposition des Hörbeispiels und durch den Probanden angegebener Abbildungsposition des Hörbeispiels, verwendet.

5.4.1 Testteil 1: Wahrnehmung von Klangabstrahlverhalten

Antwortkonsistenz der Probanden in Testteil 1

In Tabelle 5.6 ist das Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil 1 aufgeführt. Die Binomialverteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ergebnis erzielt worden wäre, hätte der Proband die Antworten zufällig gegeben. Es ist zu erkennen, dass 80% der Probanden 5 oder mehr der 10 identischen Hörversuche genau gleich bewertet haben.

G	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A		1	2	1	9	5	2			
AP		5	10	5	45	25	10			
B	32,2	29	15,5	5,4	1,3	0,2	<0,1			

Tabelle 5.6: Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil 1. G: Anzahl der gleich bewerteten Hörversuche, A: Anzahl der Probanden, AP: Anzahl der Probanden in Prozent, B: Binomialverteilung in Prozent.

Deutlicher wird das Ergebnis, wenn man den Probanden bei der Antwort eine Toleranz von 36° (entspricht einem Einstellschritt in der Testanwendung) zugesteht. In Tabelle 5.7 ist das Ergebnis der Konsistenzmessung unter Berücksichtigung dieser Toleranz aufgeführt.

G	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A						1	2	6	5	6
AP						5	10	30	25	30
B	2,2	8	17,5	24,1	23,1	15,4	7	2	0,4	<0,1

Tabelle 5.7: Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil 1 mit 36° Antworttoleranz. G: Anzahl der gleich bewerteten Hörversuche, A: Anzahl der Probanden, AP: Anzahl der Probanden in Prozent, B: Binomialverteilung in Prozent.

Wird eine Abweichung von 36° toleriert, so stellt man fest, dass die erzielten Ergebnisse deutlich höher liegen als ohne Antworttoleranz. 85% der Probanden haben 8 oder mehr der 10 identischen Hörversuche genau gleich bzw. innerhalb der Toleranzgrenzen ähnlich bewertet.

Die Ergebnisse der Konsistenzmessung inklusive und exklusive der Antworttoleranz müssen jedoch unter Berücksichtigung der Binomialverteilung für den jeweiligen Fall betrachtet werden. Die Unterschiede der Binomialverteilung für beide Fälle ist auf die unterschiedliche Trefferwahrscheinlichkeit zurückzuführen. Im ersten Fall (ohne Antworttoleranz) gelten nur genaue Übereinstimmungen als Treffer. Bei 6 Antwortmöglichkeiten ergeben sich 36 mögliche Antwortkombinationen, von denen 6 eine Übereinstimmung darstellen. Es ergibt sich also eine Trefferwahrscheinlichkeit von $1/6$, d.h. bei zufälligem Antworten, wären $1/6$ der Antworten eine genaue Übereinstimmung. Im zweiten Fall (mit Antworttoleranz) gelten auch Antworten mit einer Abweichung von 36° als Treffer. Aus den 36 möglichen Antworten sind also 16 als richtig zu bewerten. Die Trefferwahrscheinlichkeit für eine richtige Antwort liegt demnach bei $4/9$. Diese, im Vergleich zu Fall 1, erhöhte Trefferwahrscheinlichkeit, führt zur Verschiebung der Binomialverteilung nach "oben".

Betrachtet man nun die Ergebnisse der beiden Fälle unter Berücksichtigung der Binomialverteilung, so verhalten sie sich, relativ zur Binomialverteilung, ähnlich und sind aufgrund der geringen Abweichungen als gleichwertig anzusehen.

Da bei den Antworten eine Abweichung von 36° tolerierbar ist, weisen 85% der Probanden, d.h. alle Probanden, die 8 oder mehr der 10 identischen Hörversuche gleich bzw. ähnlich bewertet haben, eine hinreichend gute Antwortkonsistenz auf. Ein Zusammenhang zwischen, z.B. durch das Studienfach gegebene, einschlägige Vorbildung und der Antwortkonsistenz konnte nicht festgestellt werden. 85% der Probanden werden also bei der folgenden Auswertung und Darstellung der Testergebnisse berücksichtigt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass anhand der Antwortkonsistenz keine Aussage über die Sensibilität der Probanden bezüglich der abgefragten Klangeigenschaften getroffen werden kann. Die Sensibilität und Qualität der Probanden kann aus den Tabellen und Schaubildern der Auswertung abgelesen werden.

Auswertung für reale Hörbeispiele Testteil 1

Die Tabelle 5.8 und das Schaubild 5.21 zeigen die prozentualen Ergebnisse des ersten Hörtests für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			4,4		83,8					
36	1,5		25		14,7		19,1			
72	7,4		16		1,5		33,8		2,9	
108	14,7		5,9				11,8		10,3	
144	29,4		13,2				20,6		36,8	
180	47,1		35,3				14,7		50	

Tabelle 5.8: Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiel unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

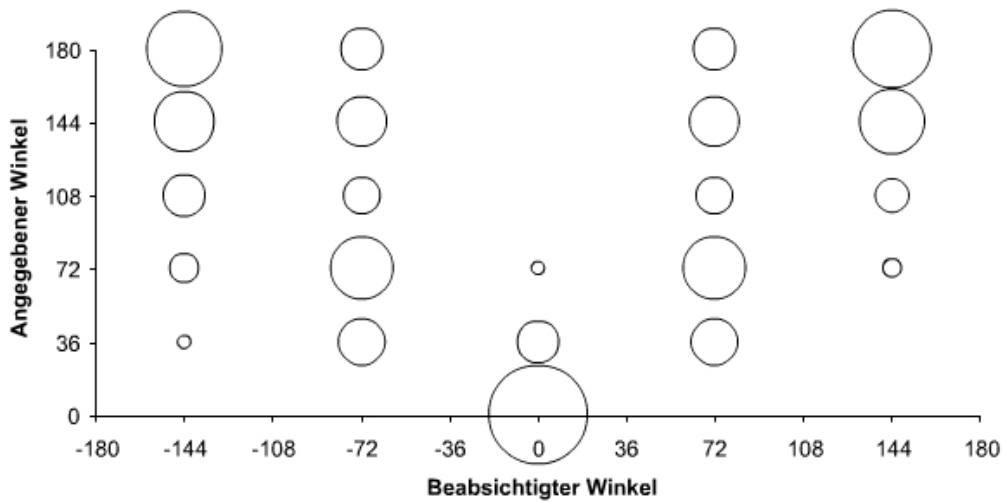


Abbildung 5.21: Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden.

Das Ergebnis des Hörtests unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit einer Antworttoleranz von 36° ist in Tabelle 5.9 und Schaubild 5.22 dargestellt. Angegeben ist die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel und dem durch die Probanden angegebenen Winkel. Auch Winkelangaben, die 36° über oder unter dem beabsichtigten Winkel lagen, wurden als Übereinstimmung gewertet.

W	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
Ü	91,2		46,9		98,5		64,7		97,1	

Tabelle 5.9: Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz. W: akustisch dargestellter (beabsichtigter) Winkel, Ü: Anzahl der übereinstimmenden Antworten in Prozent.

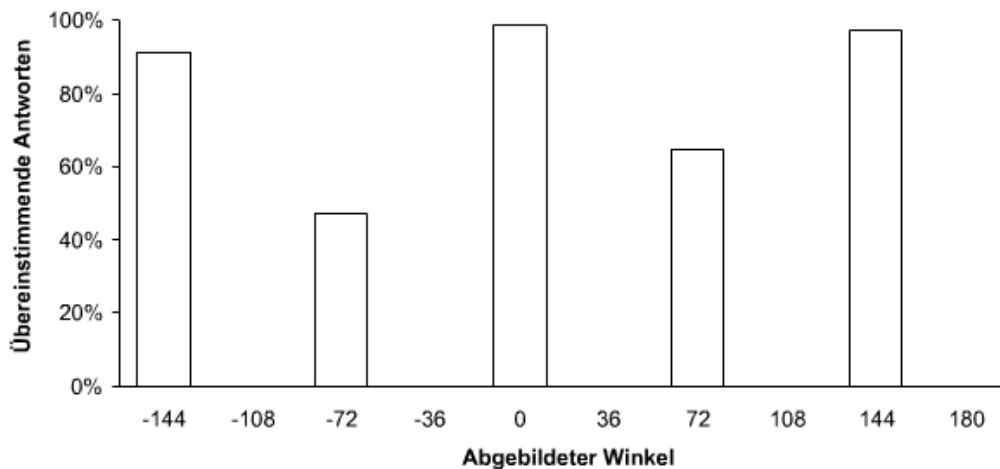


Abbildung 5.22: Testergebnisse in Prozent für reale Hörbeispiele unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz.

Betrachtet man das Ergebnis von Testteil 1 für reale Hörbeispiele, so stellt man fest, dass insbesondere bei 72° und -72° eine breite Antwortstreuung vorliegt. Auch wenn eine Antworttoleranz von 36° zugelassen wird, geben nur 64.7% (72°) bzw. 46.9% (-72°) der Probanden eine Antwort in der Form, dass die beabsichtigte Abbildungsposition mit der angegebenen Abbildungsposition übereinstimmend

angegeben wurde.

Bei 144° und -144° liegt die Antworthäufung bei 180°. Werden 36° Antworttoleranz zugelassen, geben 97.1% (144°) bzw. 91.2% (-144°) der Probanden eine Antwort, bei der die beabsichtigte Abbildungsposition mit der in der Antwort angegebenen übereinstimmt. Insgesamt kann gesagt werden, dass die angegebenen Winkel eher zu groß als zu klein waren.

Auswertung für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) Testteil 1

Die Tabelle 5.10 und das Schaubild 5.23 zeigen die prozentualen Ergebnisse des ersten Hörtests für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0	2,9				82,4	8,8	2,9			
36	2,9	8,8	8,8	38,2	14,7	20,6	41,1	2,9		5,9
72	2,9	5,9	11,8	41,1	2,9	55,9	38,2	29,4	5,9	2,9
108	35,3	41,1	47,1	20,6		8,8	17,6	35,3	11,8	11,8
144	50	32,4	17,6			5,9		32,4	58,8	35,3
180	5,9	11,8	14,7						23,5	44,1

Tabelle 5.10: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

Das Ergebnis des Hörtests unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit einer Toleranz von 36° ist in Tabelle 5.11 und Schaubild 5.24 dargestellt. Angegeben ist die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel und dem durch die Probanden angegebenen Winkel. Auch Winkelangaben, die 36° über oder unter dem beabsichtigten Winkel lagen, wurden als Übereinstimmung gewertet.

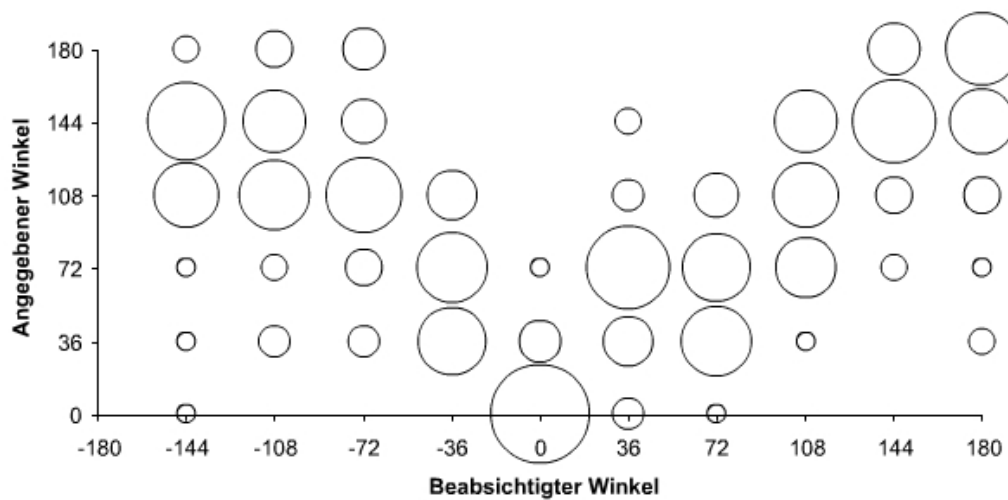


Abbildung 5.23: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden.

W	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
Ü	91,2	79,4	67,7	79,3	97,1	85,3	96,9	97,1	94,1	79,4

Tabelle 5.11: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz. W: akustisch dargestellter (beabsichtigter) Winkel, Ü: Anzahl der übereinstimmenden Antworten in Prozent.

Die größten Antwortstreuungen bei dem Ergebnis von Testteil 1 für simulierte Hörbeispiele (Interpolation), liegen bei 180° , -108° , -72° und -36° . Wird eine Antworttoleranz zugelassen, geben 79.4% (180°), 79.4% (-108°), 67.7% (-72°) und 79.3% (-36°) der Probanden eine Antwort, bei der die durch Simulation beabsichtigte und in der Antwort angegebene Abbildungsposition übereinstimmen.

Bei 36° , 72° , -144° , -72° und -36° gibt es bei der Mehrzahl der Antworten keine Übereinstimmung zwischen beabsichtigter und angegebener Abbildungsposition. Werden 36° Antworttoleranz zugelassen, sind die Ergebnisse für 36° , 72° und -144° dennoch als sehr gut anzusehen. Abgesehen von 72° , 180° und -144° waren die nicht übereinstimmend angegebenen Winkel eher zu groß als zu klein.

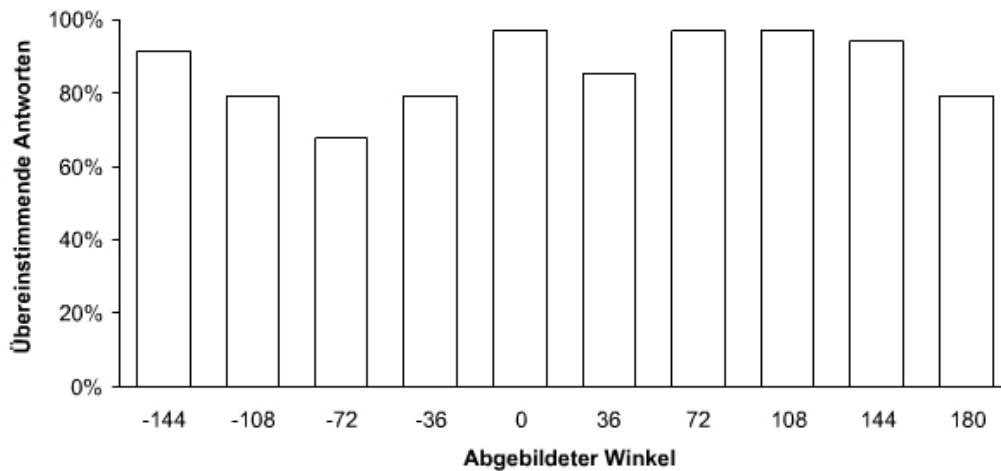


Abbildung 5.24: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz.

Auswertung für simulierte Hörbeispiele (Filter) Testteil 1

Die Tabelle 5.12 und das Schaubild 5.25 zeigen die prozentualen Ergebnisse des ersten Hörtests für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			5,9	26,5	94,1	50			2,9	
36	5,9	5,9	20,6	67,6	5,9	35,3	17,6	2,9	2,9	
72		14,7	55,9	5,9		11,8	61,8	8,8	2,9	
108		14,7	41,1	14,7		2,9	11,8	47,1	29,4	11,8
144	47,1	26,5	2,9				8,8	35,3	41,1	35,3
180	32,3	11,8						5,9	20,6	52,9

Tabelle 5.12: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

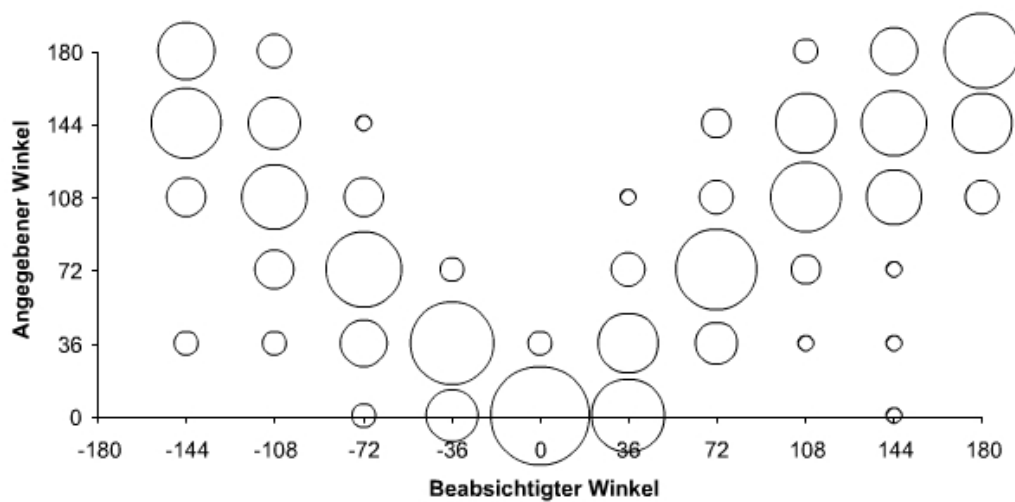


Abbildung 5.25: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden.

Das Ergebnis des Hörtests unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit einer Toleranz von 36° ist in 5.13 und Schaubild 5.26 dargestellt. Angegeben ist die Häufigkeit der Übereinstimmung zwischen einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel und dem durch die Probanden angegebenen Winkel. Auch Winkelangaben, die 36° über oder unter dem beabsichtigten Winkel lagen, wurden als Übereinstimmung gewertet.

W	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
Ü	94,1	82,3	91,2	100	100	97,1	91,2	91,2	91,2	88,2

Tabelle 5.13: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz. W: akustisch dargestellter (beabsichtigter) Winkel, Ü: Anzahl der übereinstimmenden Antworten in Prozent.

Das Ergebnis von Testteil 1 für simulierte Hörbeispiele (Filter) weist keine großen Antwortstreuungen auf. Lediglich bei 36° , 180° und -108° gibt es leichte Variationen bei den Antworten. Wird die Antworttoleranz von 36° zugelassen, geben in diesen Fällen 97.1% (36°), 88.2% (180°) und 82.3% (-108°) der Probanden eine Antwort, bei der die durch Simulation beabsichtigte und in der Antwort

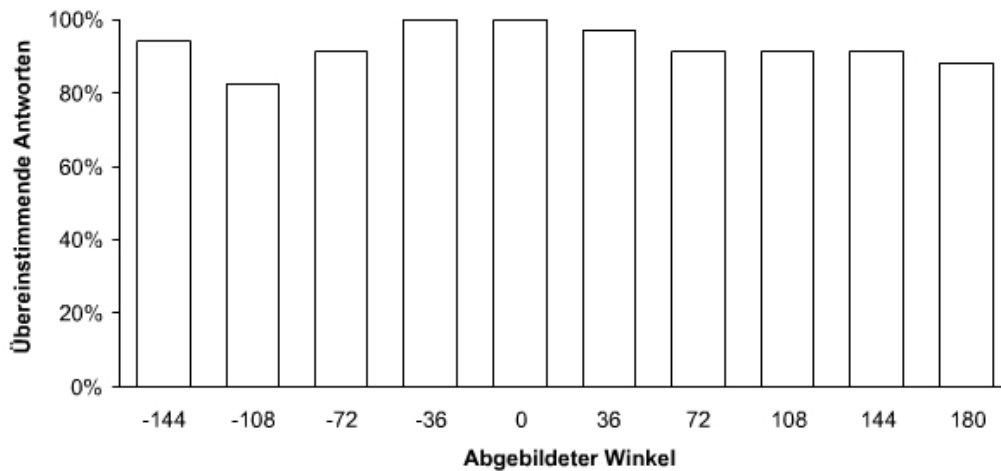


Abbildung 5.26: Testergebnisse in Prozent für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden mit 36° Antworttoleranz.

angegebene Abbildungsposition übereinstimmen. Bei 36° gibt die Mehrzahl der Probanden keine übereinstimmende Antwort bezüglich beabsichtigter und angegebener Abbildungsposition. In allen anderen Fällen wurde von mindestens 41.1% (144°) eine übereinstimmende Antwort angegeben. Werden 36° Antworttoleranz zugelassen, sind die Ergebnisse für alle Winkel gut. Bei 36° , 144° , 180° -72° und -36° wurden die nicht übereinstimmenden Winkelangaben vermehrt als zu klein angenommen, bei allen anderen Winkeln waren die nicht übereinstimmend angegebenen Winkel eher zu groß.

Ergebnis Testteil 1

Betrachtet man die Hörversuche aus Testteil 1, so kann gesagt werden, dass für reale Hörbeispiele und für durch Simulation entstandenen Hörbeispiele aus einem Klangunterschied Rückschlüsse auf einen unterschiedlichen Aufnahmewinkel möglich sind. Insbesondere wenn 36° Antworttoleranz zugelassen werden, wurden mit einer Ausnahme (-36° , reale Hörbeispiele) überwiegend deutlich mehr als 50% der Winkel bezüglich angenommener und angegebener Abbildungsposition übereinstimmend angegeben.

Die Ergebnisse für reale und simulierte (Interpolation) Hörbeispiele sind ähnlich ausgefallen, wobei die durch Interpolation entstandenen Hörbeispiele die etwas besseren Ergebnisse erzielen konnten. Die ähnlichen Ergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass die Klangspektren der Hörbeispiele ebenfalls ähnlich sind. Auffällig sind auch die breiten Antwortstreuungen und damit relativ schlechten Ergebnisse für negative Winkel. Dies ist eventuell auf die teilweise Verdeckung der Mikrophone durch den Saxophonspieler zurückzuführen. Während der Aufnahme wurde dadurch ein etwas dumpferes Signal aufgezeichnet.

Die Ergebnisse für die durch Filterung simulierten Hörbeispiele liefern im Vergleich mit den beiden anderen Hörversuchsreihen die besten Ergebnisse. Grund hierfür kann das insgesamt recht homogene Klangspektrum der Hörbeispiele sein. Die Änderungen zwischen den einzelnen Abbildungspositionen sind, obwohl sie auf der Analyse der realen Aufnahmen basieren, gleichmäßiger und damit für den Probanden leichter nachvollziehbar. Bei realen und simulierten (Interpolation) Hörbeispielen sind für den Hörer bzw. Probanden deutlichere und ungewöhnlichere Änderungen des Klangspektrums festzustellen.

Abschließend muss gesagt werden, dass die Ergebnisse des Hörtests aufgrund der geringen Anzahl an Versuchspersonen keine allgemein gültige Aussage darstellen kann. Die Ergebnisse müssen daher als Tendenz verstanden werden.

5.4.2 Testteil 2: Bewertung der Hörbeispiele

Antwortkonsistenz der Probanden in Testteil 2

Auch im zweiten Testteil wurden ohne das Wissen der Probanden 10 Hörversuche doppelt durchgeführt, um die Antwortkonsistenz der Probanden zu bestimmen. Es kann anhand der Antwortkonsistenz jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, welche Methode zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens die Probanden bevorzugen.

In Tabelle 5.14 ist das Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil 2 aufgeführt. Die Binomialverteilung gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ergebnis erzielt worden wäre, hätte der Proband die Antworten zufällig gegeben

G	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1	2	8	4	3	2				
AP	5	10	40	20	15	10				
B	8,7	19,5	26	22,8	13,7	5,7	1,6			

Tabelle 5.14: Ergebnis der Konsistenzmessung für Testteil . G: Anzahl der gleich bewerteten Hörversuche, A: Anzahl der Probanden, AP: Anzahl der Probanden in Prozent, B: Binomialverteilung in Prozent.

Lediglich 25% der Probanden haben 5 oder mehr identische Hörversuche gleich bewertet. Vergleicht man die Ergebnisse der Konsistenzmessung mit den Wahrscheinlichkeiten der Binomialverteilung, so ist festzustellen, dass die Ergebnisse nur wenig von der Binomialverteilung abweichen. Hätten die Probanden die Antworten also zufällig gegeben, hätte das Ergebnis eine ähnliche Antwortverteilung aufgewiesen. Deshalb kann zur Auswertung von Testteil 2 keine Trennung der Probanden hinsichtlich ihrer Antwortkonsistenz getroffen werden.

Auswertung für reale Hörbeispiele verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter)

Die Tabelle 5.15 zeigt das Ergebnis des Hörversuchs: Reale Hörbeispiele verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter). Angegeben ist die prozentuale Häufigkeit mit der eine Antwort von den Probanden gegeben wurde. Bei den entsprechenden abgebildeten Winkeln konnten die Antworten: durch Simulation (Filter) erzeugtes Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (F); das reale Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (R); keines der Hörbeispiele wird klanglich bevorzugt (=), gegeben werden.

Mit Hilfe des Testergebnisses kann keine eindeutige Bevorzugung einer Methode festgestellt werden. Bei 0° , 72° und -72° wird das reale Hörbeispiel leicht bevorzugt, bei 144° wird das durch den Filter simulierte Hörbeispiel bevorzugt, bei -144° gab es keine Bevorzugung.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
F	28,75		23,75		21,25		33,75		47,5	
=	36,25		26,25		27,5		20		23,75	
R	35		50		51,25		46,25		28,25	

Tabelle 5.15: Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

Summiert man die Antworten für die einzelnen Winkel auf, so ergibt sich Tabelle 5.16. Insgesamt kann also nur eine leichte Bevorzugung der realen Hörbeispiele festgestellt werden.

	S
F	31
=	26,8
R	42,2

Tabelle 5.16: Summierte Testergebnisse in Prozent: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F). S: Summe der Antworten in Prozent.

Auswertung für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter)

Die Tabelle 5.17 zeigt das Ergebnis des Hörversuchs: Simulierte Hörbeispiele (Interpoliert) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter). Angegeben ist die prozentuale Häufigkeit mit der eine Antwort von den Probanden gegeben wurde. Bei den entsprechenden abgebildeten Winkeln konnten die folgenden Antworten gegeben werden: durch Simulation (Filter) erzeugtes Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (F); durch Simulation (Interpolation) erzeugtes Hörbeispiel wird klanglich bevorzugt (I); keines der Hörbeispiele wird klanglich bevorzugt (=).

Auch hier kann aufgrund der Testergebnisse keine eindeutige Bevorzugung angegeben werden. Bei 0° , 108° , 144° , 180° , -108° , -72° und -36° wird das durch den Filter simulierte Hörbeispiel bevorzugt, bei 36° , 72° und -144° wird das durch Interpolation simulierte Hörbeispiel bevorzugt.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
F	22,5	52,5	47,5	55	65	37,5	17,5	40	40	70
=	17,5	10	32,5	22,5	17,5	17,5	32,5	22,5	27,5	12,5
I	60	37,5	20	22,5	17,5	45	50	37,5	32,5	17,5

Tabelle 5.17: Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

Werden die einzelnen Ergebnisse für jeden Winkel aufsummiert, so ergibt sich Tabelle 5.18. Wie bei den Einzelergebnissen kann auch hier eine leichte Bevorzugung der durch den Filter simulierten Hörbeispiele festgestellt werden.

	S
F	44,8
=	21,2
I	34

Tabelle 5.18: Summierte Testergebnisse in Prozent: Simulierte Hörbeispiele (Filter) (F) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Interpolation) (I). S: Summe der Antworten in Prozent.

Ergebnis Testteil 2

Unter der Voraussetzung, dass trotz des nicht konsistenten Antwortverhaltens der Probanden die Antworten nicht zufällig, sondern jeweils bewusst gegeben wurden, kann festgestellt werden, dass keine der Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens eindeutig bevorzugt wurde. Im direkten Vergleich zwischen realen Hörbeispielen und simulierten Hörbeispielen (Filter) ist eine leichte Bevorzugung der realen Hörbeispiele feststellbar. Ebenso verhält es sich mit dem Vergleich zwischen simulierten Hörbeispielen (Interpoliert) und den simulierten Hörbeispielen (Filter). Lediglich ein kleiner Prozentsatz bevorzugt hier die durch den entwickelten Filter simulierten Hörbeispiele.

Abschließend muss gesagt werden, dass die Ergebnisse des Hörtests aufgrund der geringen Anzahl an Versuchspersonen keine allgemein gültige Aussage darstellen kann. Die Ergebnisse müssen daher als Tendenz verstanden werden.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Ziel der Arbeit war es, eine virtuelle Umgebung zu schaffen, die das charakteristische Klangabstrahlverhalten eines Musikinstruments in Echtzeit erfahrbar macht.

Die entwickelte Anwendung ist echtzeitfähig und bietet dem Benutzer die Möglichkeit, mit der virtuellen Umgebung zu interagieren, indem er sich frei um das Instrument bewegen kann. Das generierte Audiosignal kann auch bei Bewegung des Benutzers im virtuellen Raum flüssig und ohne hörbare Aussetzer oder Artefakte dargestellt werden.

Um das Klangabstrahlverhalten in Echtzeit zu simulieren, wurden zwei Methoden entwickelt und in die Anwendung implementiert. Die erste Methode basiert auf einer zwölfspurigen Mehrkanalaufnahme, die, durch entsprechende Mikrofonpositionen, das gesamte Abstrahlverhalten des Beispielinstruments erfassen konnte. Durch die dynamische Lautstärkeinterpolation der einzelnen Spuren kann so das charakteristische Abstrahlverhalten in jeder beliebigen Position um das Instrument simuliert werden. Die zweite Methode simuliert das Klangabstrahlverhalten durch einen einfachen Filter. Um den Filter zu entwickeln, wurden die zwölf Einzelaufnahmen spektral analysiert und die Analyseergebnisse auf den Filteralgorithmus übertragen. Die Simulation durch den Filter verwendet nur eine Spur der Mehrkanalaufnahme. Durch Filterung dieser Audiodatei können alle Positionen um das Instrument akustisch dargestellt werden.

Die Qualität und Funktionalität der beiden entwickelten Methoden zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens wurden anhand eines Hörversuchs überprüft. Anhand des Ergebnisses von Testteil 1 kann gesagt werden, dass sowohl für reale Hörbeispiele wie auch für Hörbeispiele, die unter Verwendung einer der beiden Methoden entstanden, aus einem Klangunterschied zweier Hörbeispiele Rückschlüsse auf einen Winkelunterschied möglich sind. Aus den Testergebnissen von Testteil 2 kann gefolgert werden, dass keine der beiden entwickelten Methoden und insbesondere auch nicht die realen Aufnahmen, hinsichtlich ihres Klangs eindeutig bevorzugt werden.

6.2 Ausblick

Aufbauend auf dieser Arbeit wäre die Entwicklung einer Software denkbar, anhand derer, z.B. Studierende des Studiengangs Ton- und Bildtechnik das Klangabstrahlverhalten eines Instruments interaktiv erfahren können. Durch die Implementierung des entwickelten Interpolationsalgorithmus wäre eine annähernd naturgetreue Darstellung des Klangabstrahlverhaltens möglich. Denkbar bei einer solchen Anwendung wäre auch die zusätzliche Option virtuelle Mikrophone im Raum verteilen zu können, so dass ein direkter Vergleich zwischen verschiedenen Aufnahmepositionen möglich ist. Zusätzlich könnten weitere Instrumente in die Anwendung integriert werden. Wichtig wäre bei einer solchen Software, dass sie weitgehend plattformunabhängig und auf einem Standardrechner ohne spezielle Plugins anwendbar ist.

Um Extremwerte und abrupte Änderungen des Klangabstrahlverhaltens besser abbilden zu können, wäre auch eine Mehrkanalaufnahme, die unter Verwendung zusätzlicher Mikrophone hergestellt wird, denkbar. Das Klangabstrahlverhalten des jeweiligen Instruments könnte dadurch präziser und genauer abgebildet werden. Der Algorithmus zur Simulation des Klangabstrahlverhaltens durch Interpolation einer Mehrkanalaufnahme könnte zusätzlich so verändert werden, dass auch beliebige Mikrofonpositionen bei der Aufnahme möglich sind. Eventuell

auftretende komplexe Bereiche des Klangabstrahlverhaltens könnten so mit zusätzlichen Mikrofonen erfasst werden.

Interessant wäre auch die Entwicklung eines Filteralgorithmus, der das Abstrahlverhalten beliebiger Klangquellen in einer virtuellen Umgebung qualitativ simuliert. Da der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Filter weitgehend einen Tiefpasscharakter aufweist und die Funktionalität durch den Hörtest validiert wurde, ist es denkbar, einen einfachen Filter zu entwickeln, der sich auf beliebige Klangquellen anwenden lässt und die auditiven Elemente einer virtuellen Umgebung realistischer darstellt.

Literaturverzeichnis

- [Bla74] Jens Blauert. *Räumliches Hören*. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1974.
- [Boy03] Soraya Boyano. Sound recording of musical instruments for an interactive display, enabling the experience of sounds radiation. Diplomarbeit, 2003. Universidad Politécnica De Valencia. Die Diplomarbeit wurde an der Fachhochschule Düsseldorf durchgeführt.
- [Bra04] Dieter Braun, November, 2004. Persönliches Gespräch.
- [BSMM95] Ilja N. Bronstein, Konstantin A. Semendjajew, Gerhard Musiol, and Heiner Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch, 1995.
- [Dic97] Michael Dickreiter. *Handbuch der Tonstudioteknik*. K. G. Saur Verlag, 1997.
- [Dut94] Pierre Dutilleux. Physical modelling. Internet, ZKM Institut für Musik und Akustik, 1994. http://onl.zkm.de/zkm/Institute/Musik/ZKMusik/veroeffentlicht/PD_Physical_Modeling.
- [Fir05] Firelight Technologies. Internet, 2005. <http://www.fmod.org>.
- [Gar98] William G. Gardner. *3-D Audio using loudspeakers*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [GC03] Santiago Francia García-Calvo. Evaluation and implementation of an interactive acoustical display for listening of sound radiations for musical instruments. Diplomarbeit, 2003. Universidad Politécnica

De Valencia. Die Diplomarbeit wurde an der Fachhochschule Düsseldorf durchgeführt.

- [Hen01] Hubert Henle. *Das Tonstudio Handbuch*. GC Carstensen Verlag, 2001.
- [Her99] Jens Herder. *A Sound Spatialization Resource Management Framework*. PhD thesis, University of Tsukuba, July 1999.
- [KS98] Ekkehard Kruckenberg and Rolf-Michael Schmidt. Planung, Gestaltung und Erstellung einer multimedialen Software über die Aufnahmepraxis bei Streichinstrumenten. Diplomarbeit, 1998. Fachhochschule Düsseldorf.
- [Leh96] Scott Lehman. Physical modeling synthesis. Internet, 1996. http://www.harmony-central.com/Synth/Articles/Physical_Modeling.
- [Mer05] Mercury Systems. Internet, 2005. <http://www.tgs.com>.
- [Mic05] Microsoft. Internet, 2005. <http://www.microsoft.com>.
- [RR03] Richard Radke and Scott Rickard. Audio interpolation. Technical report, Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180, USA; Program in Applied and Computational Mathematics, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA, 2003.
- [Sen05] Sennheiser. Internet, 2005. <http://www.sennheiser.com>.
- [Spe00] Matthias Specht. Paralleler Software Synthesizer. Internet, Diplomarbeit, Institut für Elektronik der ETH Zürich, 2000. <http://home.btconnect.com/Corebounce/bericht/html/main.html>.
- [Spi97] Jörg Spix. Verfahren der physikalischen Modellierung von Musikinstrumenten ("Physical Modeling"), Diskrepanzen zwischen Modell

und Vorlage. Technical report, Department für Informatik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1997.

- [Str03] Michael Strauß. Audiomorphing. Internet, Institut für Elektronische Musik und Akustik, 2003. http://www.iem.at/projekte/dsp/audiomorphing/strauss_html.
- [Tho03] Brian Peter Thorsbro. An interactive 3d saxophone. Internet, 2003. <http://www.thorsbro.com>.
- [Vil03] M. Mercedes Astrain Villanueva. Computer graphics for listening of sound radiation of musical instruments. Diplomarbeit, 2003. Universidad Politécnica De Valencia. Die Diplomarbeit wurde an der Fachhochschule Düsseldorf durchgeführt.
- [Wer94] Josie Wernecke. *The Inventor Mentor*. Addison-Wesley, 1994.
- [Zeh00] Stefan Zeh. Planung, Gestaltung, und Erstellung einer Multimedia Software über Aufnahmepraxis bei Holzblasinstrumenten. Diplomarbeit, 2000. Fachhochschule Düsseldorf.

Anhang A

Mikrophone

Bei einem typischen Signalverlauf einer Aufnahme steht am Anfang in der Regel ein Mikrofon. Mikrophone wandeln Schallwellen in elektrische Schwingungen um. Durch eine Membran wird die Luftbewegung der Schallwellen in eine mechanische Schwingung übertragen (Empfänger). Diese wird mit Hilfe eines Wandler in eine elektrische Schwingung transformiert. Im folgenden Text werden die wichtigsten Wandler- und Empfängerprinzipien von Mikrofonen vorgestellt. [Hen01]

A.1 Wandlerprinzipien

Mikrophone unterscheiden sich durch die Art und Weise, wie Schallschwingungen zuerst in mechanische und dann in elektrische Schwingungen umgewandelt werden. Im Tonstudiobereich finden hauptsächlich zwei Wandlerprinzipien ihre Anwendung: elektrostatische Wandler in Kondensatormikrofonen und elektrodynamische Wandler in Tauchspulen- und Bändchenmikrofonen. [Hen01]

A.1.1 Kondensatormikrophone

Die Membran eines elektrostatischen Wandler ist eine elektrisch leitende, nur wenige μm dicke Folie, die als Elektrode vor einer zweiten Gegenelektrode angebracht ist. Die Schwingungen der Membran verändern die Kapazität zwischen den beiden Elektroden entsprechend der Auslenkung. Diese Anordnung kann als Kondensator mit veränderlicher Kapazität betrachtet werden. Der prinzipielle Aufbau eines Kondensatormikrophons ist in Abbildung A.1 dargestellt.

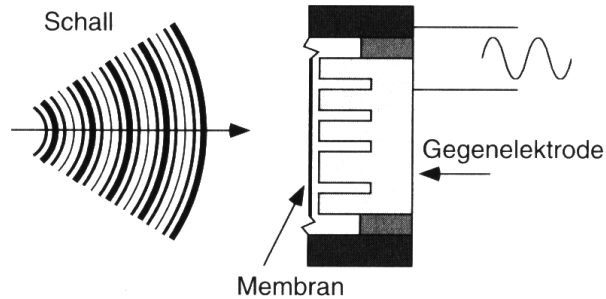


Abbildung A.1: Prinzipieller Aufbau eines Kondensatormikrophons. [Hen01]

Kondensatormikrophone sind die gebräuchlichsten Studiomikrophone. Sie besitzen eine natürliche und transparente Wiedergabe des gesamten Frequenzspektrums und werden für qualitativ hochwertige Aufnahmen benutzt. [Hen01]

A.1.2 Elektrodynamische Mikrophone

Grundsätzlich beruhen die elektrodynamischen Wandler in Tauchspulen- und Bändchenmikrophon auf dem Induktionsgesetz. In einem elektrischen Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, wird eine Spannung induziert.

Beim Bändchenmikrophon ist der Leiter im Magnetfeld gleichzeitig die Membran; ein zwischen einem Dauermagneten eingespannter Aluminiumstreifen, der nur um wenige μm schwingen kann. Das Bändchenmikrophon ist aufgrund des linearen Frequenzverhaltens und des guten Impulsverhaltens in der Klangqualität durchaus mit einem Kondensatormikrophon zu vergleichen, ist allerdings anfällig gegenüber Wind, Erschütterungen und schnellen Bewegungen.

Beim Tauchspulenmikrophon ist eine Schwingspule an der eigentlichen Membran befestigt, die beweglich in einem ringförmigen Spalt eines Magneten gelagert ist. Bewegt sich die Membran, so wird in der Schwingspule eine Spannung induziert. Das Prinzip des Tauchspulenmikrophons ist in Abbildung A.2 dargestellt.

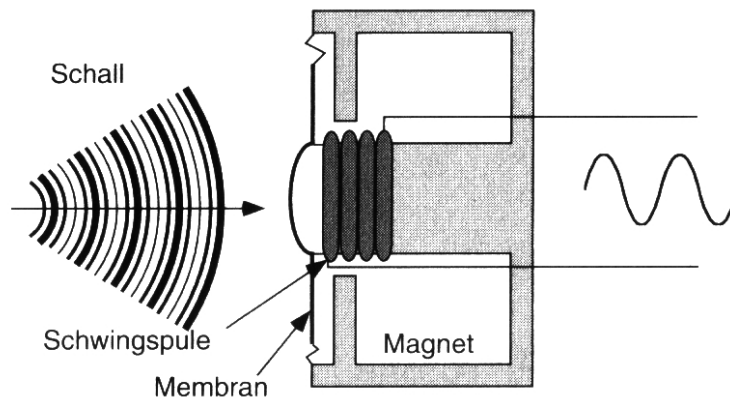


Abbildung A.2: Prinzip eines Tauchspulenmikrophons. [Hen01]

Tauchspulenmikrophone besitzen keinen linearen Frequenzgang und das Impulsverhalten ist aufgrund der vergleichsweise hohen Membranmasse nicht sehr gut. Aufgrund ihrer Robustheit und der geringen Anfälligkeit für Verzerrungen werden sie hauptsächlich für Außenaufnahmen und auf der Bühne verwendet. Im Studio finden hochwertige Tauchspulenmikrophone insbesondere als Spezialmikrophone, bei denen der Frequenzgang für einen bestimmten Anwendungsfall optimiert wurde, ihre Anwendung. [Hen01]

A.2 Richtcharakteristiken

Die Umwandlung der Schallschwingungen der Luft in die mechanische Schwingung der Membran ist das Empfängerprinzip des Mikrophons. Das Empfängerprinzip wird von der Konstruktion der Mikrophonkapsel und der Art des Einbaus der Membran bestimmt und bedingt die Richtcharakteristik und das Verhalten im Nahfeld. Die Empfängerprinzipien werden nach der Schallfeldgröße unterschieden, die die Membran antreibt. Beim Druckempfänger wirkt der Schalldruck, wodurch eine Kugelrichtcharakteristik entsteht. Beim Druckgradientenempfänger wirkt die Druckdifferenz. Es entstehen Nierenrichtcharakteristik, Achtrichtcharakteristik und deren Zwischenformen Superniere, Hyperniere und Keule. [Dic97]

A.2.1 Druckempfänger

Da bei einem Druckempfänger die Rückseite der Kapsel luftdicht abgeschlossen ist, ist lediglich eine Seite der Mikrofonmembran dem Schallfeld ausgesetzt. Der Schalldruck, der die Membran zum Schwingen anregt, ist eine ungerichtete Größe. Dadurch besitzt der Druckempfänger keine Richtwirkung und hat eine kugelförmige Richtcharakteristik. Das Prinzip eines Druckempfängers ist in Abbildung A.3 dargestellt.

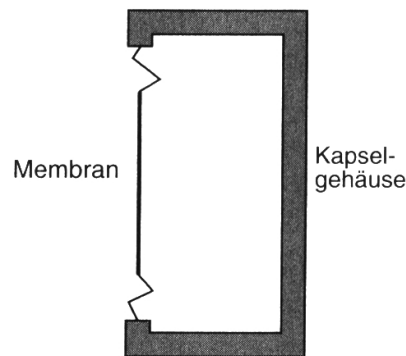


Abbildung A.3: Prinzip eines Druckempfängers. [Hen01]

Diese kugelförmige Richtcharakteristik ist in der Praxis allerdings nicht für alle Frequenzen gültig. Mit größer werdender Frequenz wirkt das Mikrofon mehr und mehr als Hindernis für den Schall. Schallwellen, die von der Seite oder von hinten auf das Mikrofon treffen, werden nur teilweise oder überhaupt nicht um das Mikrofon herum gebeugt und treffen somit nicht auf die Membran. Bei hohen Frequenzen wird die Richtcharakteristik eines Druckempfängers also zunehmend nierenförmig. [Hen01]

A.2.2 Druckgradientenempfänger

Bei einem Druckgradientenempfänger sind beide Seiten der Membran dem Schallfeld ausgesetzt. Die Auslenkung der Membran beruht also auf dem Unterschied

des Schalldrucks vor und hinter der Membran, dem Druckgradienten. Der Druckgradient ist von dem Umweg abhängig, den der Schall nehmen muss, um von hinten an die Membran zu gelangen. Dieser Umweg ist abhängig von der Einfallrichtung des Schalls.

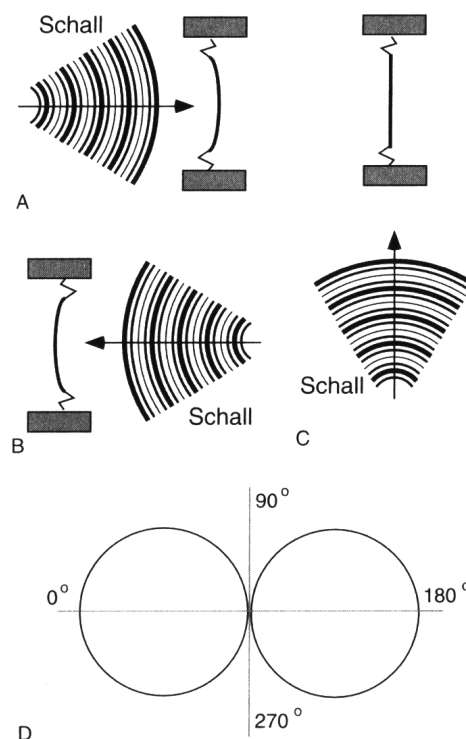


Abbildung A.4: Prinzip eines Druckgradientenmikrophons mit Achtercharakteristik. [Hen01]

Wie in Abbildung A.4 veranschaulicht, ist die Richtcharakteristik eines idealen Druckgradientenempfängers eine Acht. Schall aus einer Richtung von 0° oder 180° führt zu einer maximalen Druckdifferenz. Schall, der seitlich auf das Mikrofon trifft, erzeugt keine Druckdifferenz und folglich auch keine Auslenkung der Membran. Die Frequenz für den maximalen Druckgradienten liegt je nach Mikrofon bei 4-10 kHz. Um auch oberhalb dieser Frequenz gute Ergebnisse zu erzielen, werden Druckgradientenmikrophone so gebaut, dass sie im oberen Frequenzbereich als Druckempfänger arbeiten. Mittels Dämpfung der Membranaus-

lenkung kann ein linearer Frequenzgang des Mikrophons erreicht werden. Die Kraft zur Dämpfung, in der Regel eine Kombination aus der Masse der Membran selbst und eine Dämpfung durch Luftöffnungen, steigt mit der Frequenz an, um insgesamt einen gleichmäßigen Druckgradienten und damit einen linearen Frequenzgang zu erhalten. Für die Praxis von größerer Bedeutung sind allerdings Druckgradientenmikrophone, die mit einer Richtwirkung als Niere oder Superniere konstruiert werden. Um die Richtcharakteristik einer Niere zu erzielen, muss der Weg, den der Schall zu den beiden Membranseiten zurücklegen muss, so manipuliert werden, dass bei Schalleinfall von vorne der größte und bei Schalleinfall von hinten kein Druckunterschied entsteht. Die zusätzlichen Umwege, mit denen dieser Effekt erreicht wird, nennt man akustische Laufzeitglieder. Alle Mikrophone mit gerichteter Richtcharakteristik haben hierzu seitliche Schallöffnungen, die jedoch teilweise durch den Mikrophonkorb verdeckt sind. Die Richtcharakteristik des Nierenmikrophons nimmt mit tiefer werdenden Frequenzen immer mehr ab, so dass es zunehmend eine Kugelcharakteristik aufweist. [Hen01]

Anhang B

Spektralanalyse

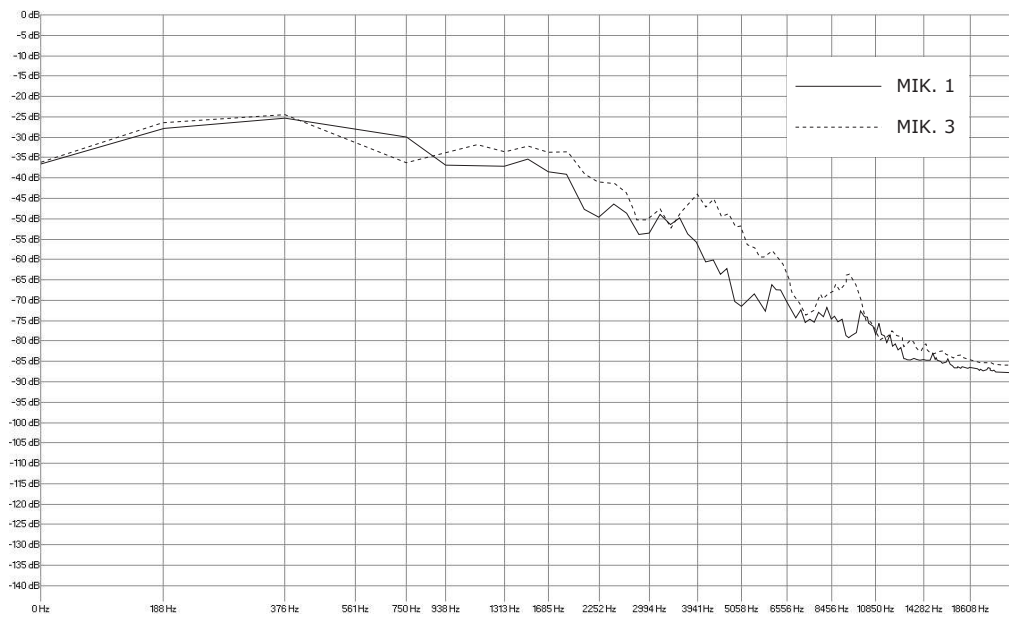


Abbildung B.1: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 1. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

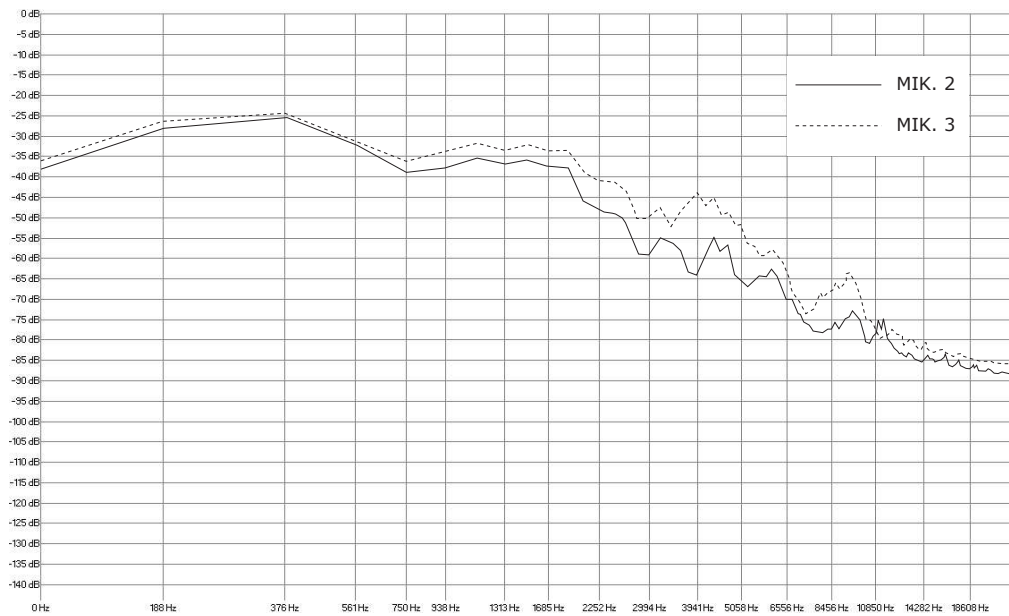


Abbildung B.2: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 2. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

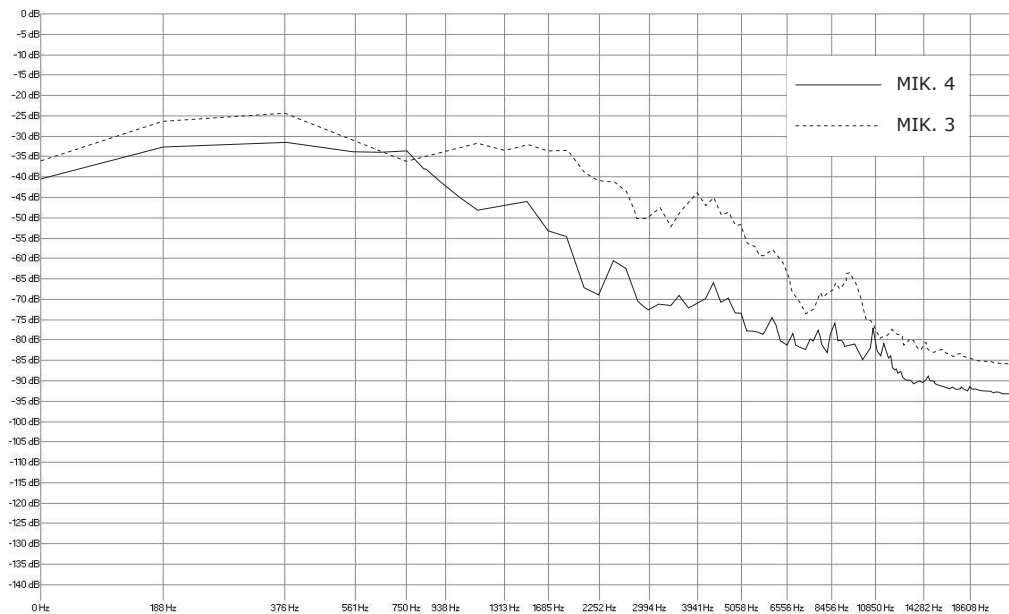


Abbildung B.3: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 4. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

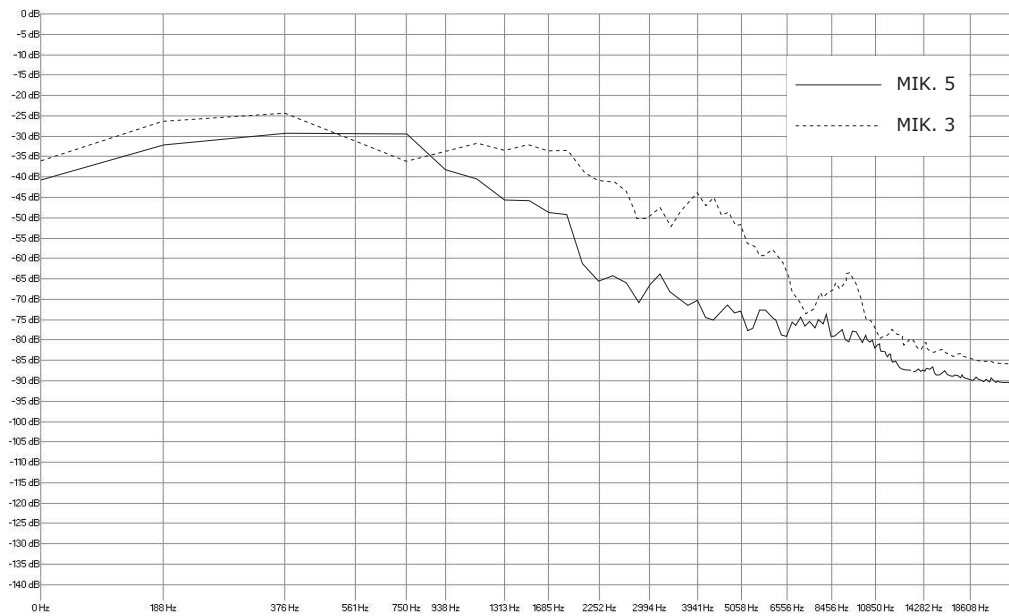


Abbildung B.4: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 5. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

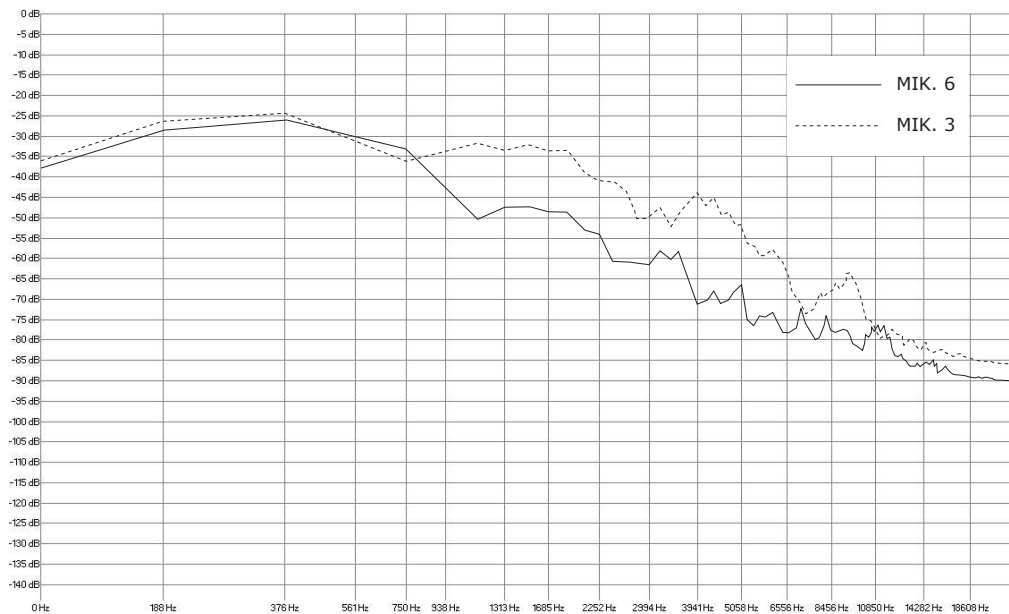


Abbildung B.5: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 6. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

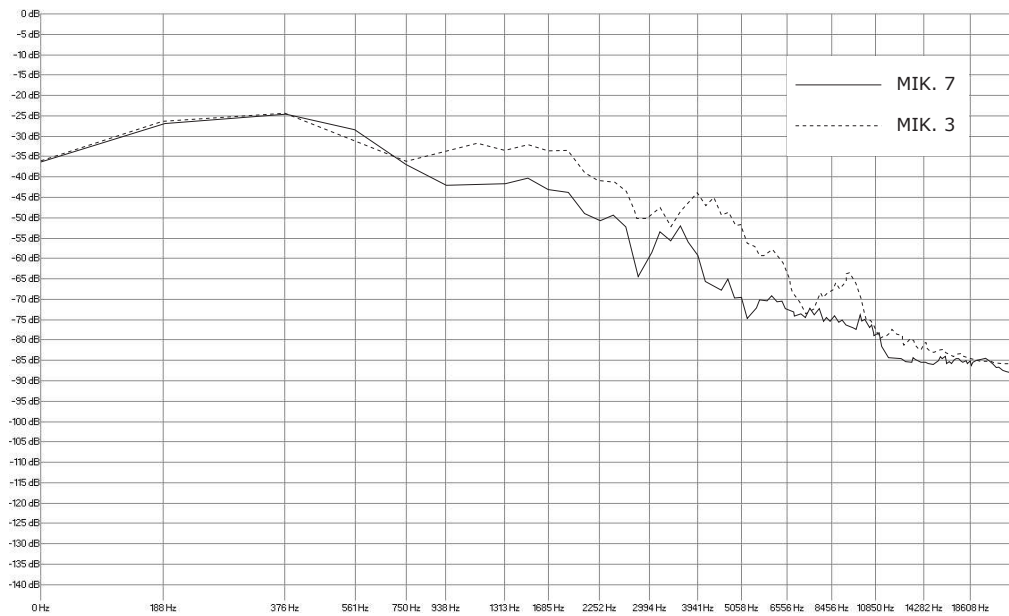


Abbildung B.6: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 7. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

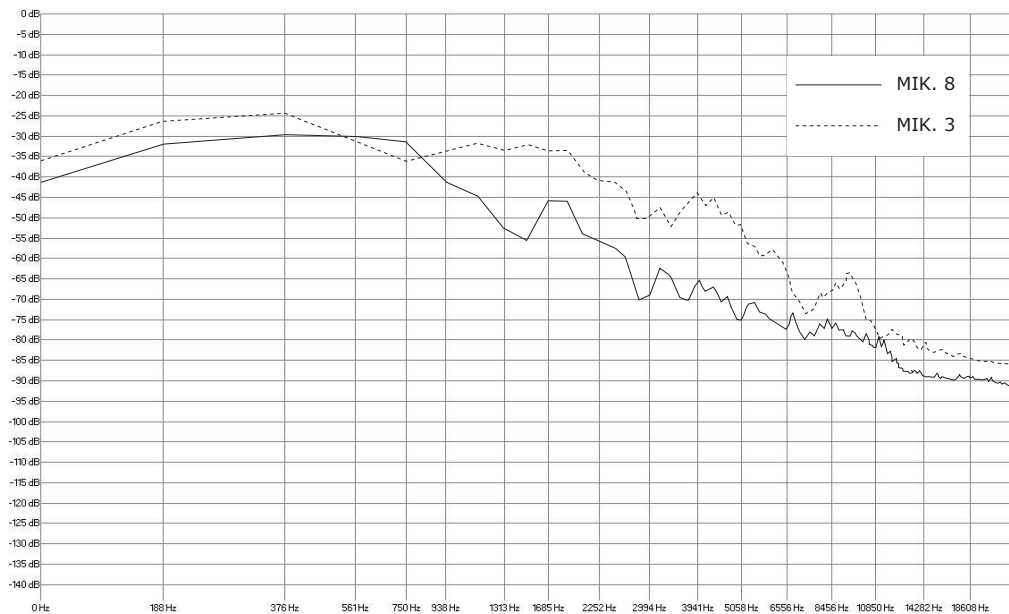


Abbildung B.7: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 8. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

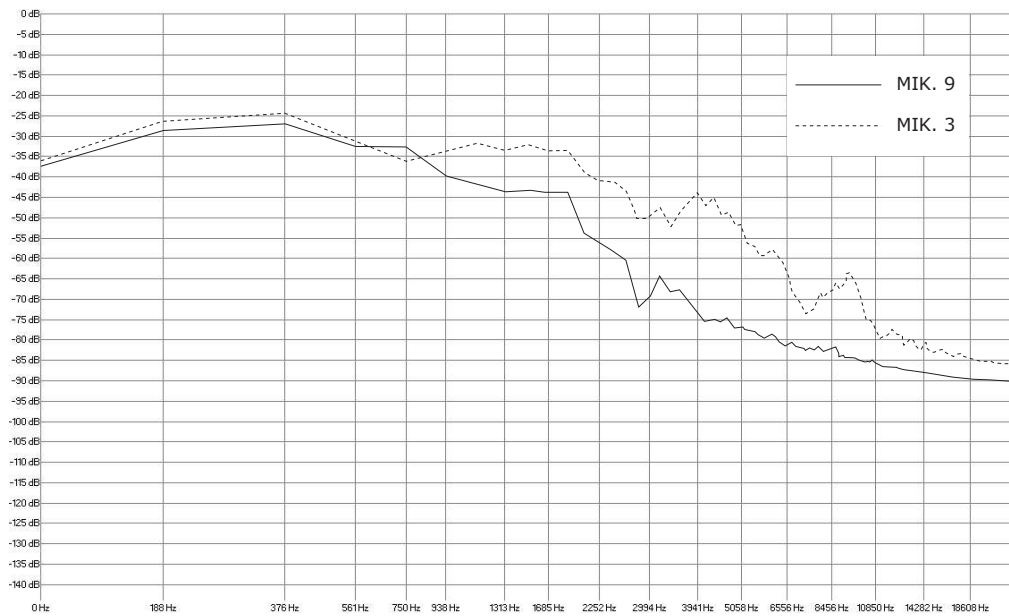


Abbildung B.8: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 9. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

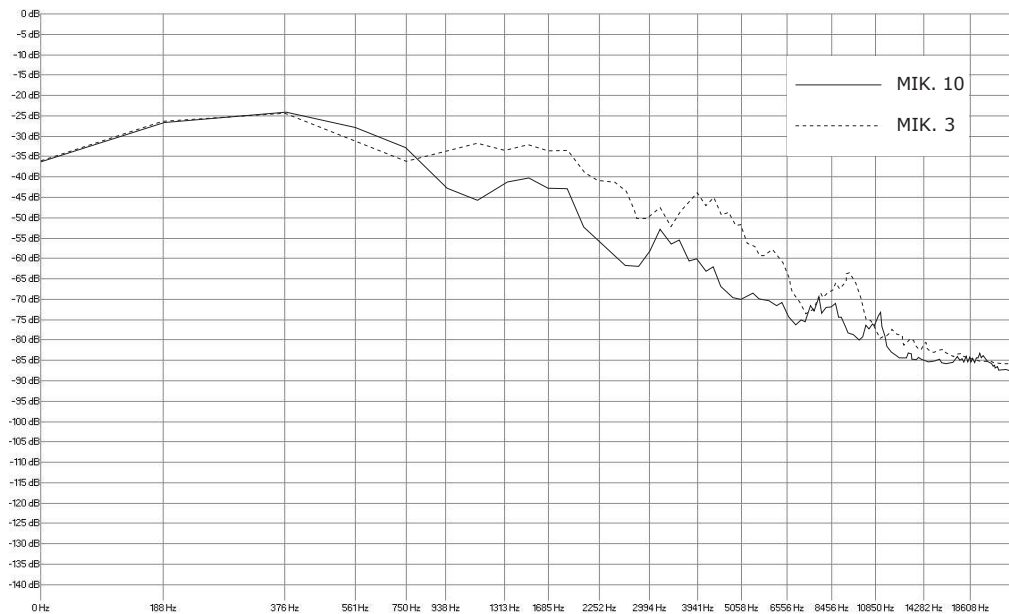


Abbildung B.9: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 10. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

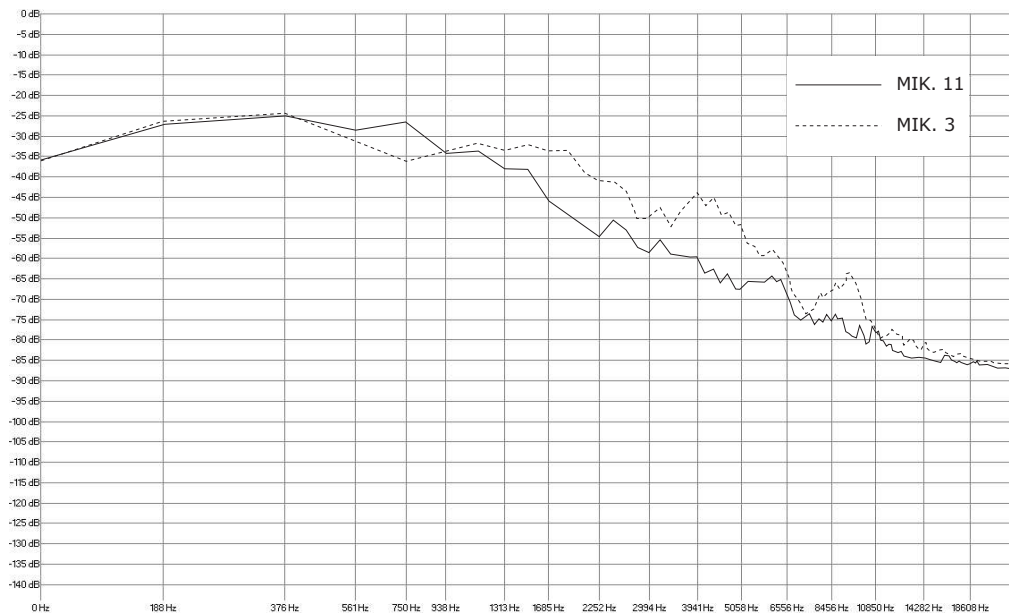


Abbildung B.10: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 11. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

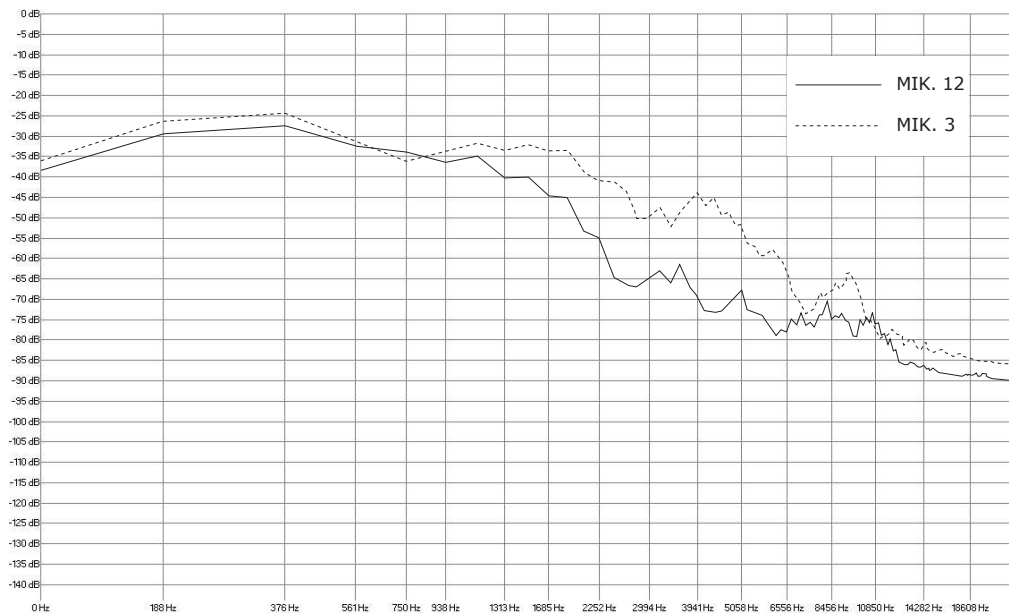


Abbildung B.11: Frequenzverläufe der Aufnahmen des 12. Mikrophons (Real) und des 3. Mikrophons (Real).

Anhang C

Quellcode Interpolation

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream.h>
#include <iomanip.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include "interpolation.h"
#ifdef WIN32
#include <windows.h>
#include <conio.h>
#else
    #include "../fmod/api/inc/wincompat.h"
#endif
#include "../../fmod/api/inc/fmod.h"
#include "../../fmod/api/inc/fmod_errors.h"

#define kugelr 140
#define klkr 140
```

```

void Interpolation::interpolationfkt(const float *pos)
{
    float kp[3];
    float vl;
    float w;
    float abst;
    int aqz= 0;
    int aqid[4];
    float aqabst[4];
    float aqabstsum= 0;
    float tlaut;
    float laut;
    float lautfak;

    //Berechnung der Vektorlänge

    vl = laenge (pos);

    //Berechnung des Schnittpunktes Kugel/Vektor

    for(int i = 0; i<=2; i++){
        kp[i]=normalisieren(pos[i],vl);
    }

    //Berechnung der Gesamtlautstärke

    lautfak = vl/kugelr;
    laut = 255 / lautfak;

    if(laut>255){

```

```

laut=255;
}

for(int k=0 ; k<=11; k++){

    //Berechnung des Abstandes Schnittpunktes
    //Kugel/Vektor - Quelle k

    w = acos((skalarprodukt(kp,mikropos[k])) /
              (laenge(kp) * laenge(mikropos[k])));

    abst = kugelr * w;

    if( abst <= klkr){

        //Berechnung der Summe der Abstände:
        //Schnittpunkt Kugel/Vektor
        // - aktive Quellen k

        aqid[aqz] = k;

        aqabst[aqz] = klkr - abst;

        aqabstsum = aqabstsum + aqabst[aqz];

        aqz++;

    }
    else {
        FSOUND_SetVolume(k,0);
    }
}

```



```

        }
    }

    for(int j=0 ; j<aqz ; j++){

        //Berechnung und setzen der Lautstärken
        //der aktiven Quellen

        tlaut = aqabst[j]/aqabstsum * laut;

        FSOUND_SetVolume(aqid[j],tlaut);

    }

}

```

```

void Interpolation::soundinit()
{

    //Positionen der virtuellen Quellen

    mikropos[0][0]= (float) 0;
    mikropos[0][1]= (float) 140;
    mikropos[0][2]= (float) 0;

    mikropos[1][0]= (float) 38.7;
    mikropos[1][1]= (float) 62.6;

```

```
mikropos[1][2]= (float)-114;

mikropos[2][0]= (float) 125.3;
mikropos[2][1]= (float) 62.6;
mikropos[2][2]= (float) 0;

mikropos[3][0]= (float)-101.3;
mikropos[3][1]= (float) 62.6;
mikropos[3][2]= (float) -73.6;

mikropos[4][0]= (float)-101.3;
mikropos[4][1]= (float) 62.6;
mikropos[4][2]= (float) 73.6;

mikropos[5][0]= (float) 38.7;
mikropos[5][1]= (float) 62.6;
mikropos[5][2]= (float) 114;

mikropos[6][0]= (float) 101.3;
mikropos[6][1]= (float) -62.6;
mikropos[6][2]= (float) -73.6;

mikropos[7][0]= (float)-038.7;
mikropos[7][1]= (float) -62.6;
mikropos[7][2]= (float)-114;

mikropos[8][0]= (float)-125.3;
mikropos[8][1]= (float) -62.6;
mikropos[8][2]= (float) 0;

mikropos[9][0]= (float) 101.3;
mikropos[9][1]= (float) -62.6;
mikropos[9][2]= (float) 73.6;
```

```
mikropos[10][0]=(float) 0;
mikropos[10][1]=(float)-140;
mikropos[10][2]=(float) 0;
```

```
mikropos[11][0]=(float)-38.7;
mikropos[11][1]=(float) -62.6;
mikropos[11][2]=(float) 114;
```

```
FSOUND_SAMPLE *file0 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file1 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file2 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file3 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file4 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file5 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file6 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file7 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file8 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file9 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file10 = NULL;
FSOUND_SAMPLE *file11 = NULL;
```

```
if (FSOUND_GetVersion() < FMOD_VERSION)
{
    printf("Error : You are using the wrong
    DLL version!
    You should be using FMOD %.02f\n",
    FMOD_VERSION);
    exit(1);
}
```

```

if (!FSOUND_Init
    (44100, 32, FSOUND_INIT_GLOBALFOCUS))
{
printf("%s\n", FMOD_ErrorString(FSOUND_GetError()));
exit(1);
}

//Laden und Abspielender der Audiodateien
//im Loop

file0 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/1.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file1 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/2.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file2 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/3.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file3 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/4.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file4 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/5.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file5 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/6.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file6 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/7.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file7 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/8.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file8 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/9.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file9 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/10.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);
file10 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,
    "wav/11.wav", FSOUND_NORMAL, 0, 0);

```

```
file11 = FSOUND_Sample_Load(FSOUND_UNMANAGED,  
    "wav/12.wav",FSOUND_NORMAL, 0,0);
```

```
FSOUND_PlaySound(0, file0);  
FSOUND_PlaySound(1, file1);  
FSOUND_PlaySound(2, file2);  
FSOUND_PlaySound(3, file3);  
FSOUND_PlaySound(4, file4);  
FSOUND_PlaySound(5, file5);  
FSOUND_PlaySound(6, file6);  
FSOUND_PlaySound(7, file7);  
FSOUND_PlaySound(8, file8);  
FSOUND_PlaySound(9, file9);  
FSOUND_PlaySound(10, file10);  
FSOUND_PlaySound(11, file11);
```

```
FSOUND_SetLoopMode(0,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(1,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(2,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(3,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(4,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(5,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(6,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(7,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(8,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(9,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(10,FSOUND_LOOP_NORMAL);  
FSOUND_SetLoopMode(11,FSOUND_LOOP_NORMAL);
```

```
FSOUND_SetVolume(0,0);  
FSOUND_SetVolume(1,0);  
FSOUND_SetVolume(2,0);  
FSOUND_SetVolume(3,0);
```

```

FSOUND_SetVolume(4,0);
FSOUND_SetVolume(5,0);
FSOUND_SetVolume(6,0);
FSOUND_SetVolume(7,0);
FSOUND_SetVolume(8,0);
FSOUND_SetVolume(9,0);
FSOUND_SetVolume(10,0);
FSOUND_SetVolume(11,0);
}

```

```

float Interpolation::normalisieren
    (float koord, float l)
{
    float kugelkoord;
    kugelkoord = kugelr * koord/l;

    return kugelkoord ;
}

```

```

float Interpolation::laenge(const float *koord)
{
    float l;
    l = sqrt(koord[0] * koord[0] + koord[1] *
            koord[1] + koord[2] * koord[2]);

    return l;
}

```

```

float Interpolation::skalarprodukt
    (float koord1[3], float koord2[3])

```

```
{  
    float skprod;  
    skprod = koord1[0] * koord2[0] + koord1[1] *  
             koord2[1] + koord1[2] * koord2[2];  
  
    return skprod;  
}
```

Anhang D

Quellcode Filter

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream.h>
#include <iomanip.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include"interpolation.h"
#ifdef WIN32 #include <windows.h>
#include <conio.h> #else
    #include "../fmod/api/inc/wincompat.h"
#endif
#include "../..fmod/api/inc/fmod.h"
#include"../..fmod/api/inc/fmod_errors.h"

#define kugelr 140
#define klkr 140

void Interpolation::interpolationfkt(const float *pos)
{
    float eqtemp[4][4][3];
    float kp[3];
```



```

float vl;
float w;
float abst;
int aqz =0;
int aqid[4];
float aqabst;
float aqabstsum = 0;
float tlaut;
float laut;
float lautfak;
float faktor;
float center[4];
float band[4];
float gain[4];

//Berechnen der Vektorlänge

vl = laenge (pos);

//Berechnung des Schnittpunktes Kugel/Vektor

for(int i = 0; i<=2; i++){
kp[i]=normalisieren(pos[i],vl);
}

//Berechnung der Lautstärke

lautfak = vl/kugelr;
laut = 255 / lautfak;
if(laut>255){

```

```

laut=255;
}

//Setzen der Lautstärke

FSOUND_SetVolume(channel,laut);

for(int k=0 ; k<=11; k++){

    //Berechnung des Abstandes Schnittpunktes
    //Kugel/Vektor - Quelle k

    w = acos((skalarprodukt(kp,mikropos[k])) /
        (laenge(kp) * laenge(mikropos[k])));

    abst = kugelr * w;

    if( abst <= klkr){

        //Berechnung der Teilwerte

        aqabst = klkr - abst;

        faktor = aqabst/klkr;

        eqtemp[aqz][0][0]=faktor * eqinit[k][0][0];
        eqtemp[aqz][0][1]=faktor * eqinit[k][0][1];
        eqtemp[aqz][0][2]=faktor * eqinit[k][0][2];

        eqtemp[aqz][1][0]=faktor * eqinit[k][1][0];

```

```

    eqtemp[aqz][1][1]=faktor * eqinit[k][1][1];
    eqtemp[aqz][1][2]=faktor * eqinit[k][1][2];

    eqtemp[aqz][2][0]=faktor * eqinit[k][2][0];
    eqtemp[aqz][2][1]=faktor * eqinit[k][2][1];
    eqtemp[aqz][2][2]=faktor * eqinit[k][2][2];

    eqtemp[aqz][3][0]=faktor * eqinit[k][3][0];
    eqtemp[aqz][3][1]=faktor * eqinit[k][3][1];
    eqtemp[aqz][3][2]=faktor * eqinit[k][3][2];

        aqz++;
    }
}

for (int t=0; t<4;t++){

    center[t]=0;
    band[t]=0;
    gain[t]=0;
}

for(int q=0 ; q<4 ; q++){

    for(int j=0 ; j<aqz ; j++){

        //Aufsummieren der Teilwerte

        center[q] = center[q] + eqtemp[j][q][0];
        band[q]   = band[q]   + eqtemp[j][q][1];
        gain[q]   = gain[q]   + eqtemp[j][q][2];
    }
}

```

```

    }
}

//Setzen der errechneten Parameter

FSOUND_FX_SetParamEQ(eq1,center[0],band[0],gain[0]);
FSOUND_FX_SetParamEQ(eq2,center[1],band[1],gain[1]);
FSOUND_FX_SetParamEQ(eq3,center[2],band[2],gain[2]);
FSOUND_FX_SetParamEQ(eq4,center[3],band[3],gain[3]);
}

void Interpolation::soundinit()
{
    //Positionen der virtuellen Quellen

    mikropos[0][0]= (float) 0;
    mikropos[0][1]= (float) 140;
    mikropos[0][2]= (float) 0;

    mikropos[1][0]= (float) 38.7;
    mikropos[1][1]= (float) 62.6;
    mikropos[1][2]= (float)-114;

    mikropos[2][0]= (float) 125.3;
    mikropos[2][1]= (float) 62.6;
    mikropos[2][2]= (float) 0;

    mikropos[3][0]= (float)-101.3;
    mikropos[3][1]= (float) 62.6;
    mikropos[3][2]= (float) -73.6;
}

```

mikropos[4][0]= (float)-101.3;
mikropos[4][1]= (float) 62.6;
mikropos[4][2]= (float) 73.6;

mikropos[5][0]= (float) 38.7;
mikropos[5][1]= (float) 62.6;
mikropos[5][2]= (float) 114;

mikropos[6][0]= (float) 101.3;
mikropos[6][1]= (float) -62.6;
mikropos[6][2]= (float) -73.6;

mikropos[7][0]= (float)-038.7;
mikropos[7][1]= (float) -62.6;
mikropos[7][2]= (float)-114;

mikropos[8][0]= (float)-125.3;
mikropos[8][1]= (float) -62.6;
mikropos[8][2]= (float) 0;

mikropos[9][0]= (float) 101.3;
mikropos[9][1]= (float) -62.6;
mikropos[9][2]= (float) 73.6;

mikropos[10][0]=(float) 0;
mikropos[10][1]=(float)-140;
mikropos[10][2]=(float) 0;

mikropos[11][0]=(float)-38.7;
mikropos[11][1]=(float) -62.6;
mikropos[11][2]=(float) 114;

```
//Parameter der virtuellen Quellen
```

```
//mik1
```

```
eqinit[0][0][0] = 600;  
eqinit[0][0][1] = 12;  
eqinit[0][0][2] = 3;  
eqinit[0][1][0] = 1600;  
eqinit[0][1][1] = 20;  
eqinit[0][1][2] = -5;  
eqinit[0][2][0] = 5000;  
eqinit[0][2][1] = 15;  
eqinit[0][2][2] = -12;  
eqinit[0][3][0] = 9000;  
eqinit[0][3][1] = 6;  
eqinit[0][3][2] = -10;
```

```
//mik2
```

```
eqinit[1][0][0] = 750;  
eqinit[1][0][1] = 20;  
eqinit[1][0][2] = -4;  
eqinit[1][1][0] = 1800;  
eqinit[1][1][1] = 28;  
eqinit[1][1][2] = -7;  
eqinit[1][2][0] = 3800;  
eqinit[1][2][1] = 10;  
eqinit[1][2][2] = -14;  
eqinit[1][3][0] = 9000;  
eqinit[1][3][1] = 8;  
eqinit[1][3][2] = -10;
```

```
//mik3
```

```
eqinit[2][0][0] = 560;  
eqinit[2][0][1] = 24;  
eqinit[2][0][2] = 0;  
eqinit[2][1][0] = 1600;
```

```
eqinit[2][1][1] = 24;
eqinit[2][1][2] = 0;
eqinit[2][2][0] = 4000;
eqinit[2][2][1] = 24;
eqinit[2][2][2] = 0;
eqinit[2][3][0] = 9000;
eqinit[2][3][1] = 24;
eqinit[2][3][2] = 0;
  //mik4
eqinit[3][0][0] = 300;
eqinit[3][0][1] = 20;
eqinit[3][0][2] = -6;
eqinit[3][1][0] = 1600;
eqinit[3][1][1] = 22;
eqinit[3][1][2] = -13;
eqinit[3][2][0] = 4300;
eqinit[3][2][1] = 16;
eqinit[3][2][2] = -15;
eqinit[3][3][0] = 9000;
eqinit[3][3][1] = 18;
eqinit[3][3][2] = -12;
  //mik5
eqinit[4][0][0] = 300;
eqinit[4][0][1] = 20;
eqinit[4][0][2] = -4;
eqinit[4][1][0] = 2200;
eqinit[4][1][1] = 28;
eqinit[4][1][2] = -12;
eqinit[4][2][0] = 3800;
eqinit[4][2][1] = 24;
eqinit[4][2][2] = -15;
eqinit[4][3][0] = 9000;
eqinit[4][3][1] = 10;
```

```
eqinit[4][3][2] = -10;
//mik6
eqinit[5][0][0] = 300;
eqinit[5][0][1] = 20;
eqinit[5][0][2] = -2;
eqinit[5][1][0] = 1600;
eqinit[5][1][1] = 20;
eqinit[5][1][2] = -13;
eqinit[5][2][0] = 4000;
eqinit[5][2][1] = 18;
eqinit[5][2][2] = -14;
eqinit[5][3][0] = 9000;
eqinit[5][3][1] = 12;
eqinit[5][3][2] = -10;
//mik7
eqinit[6][0][0] = 560;
eqinit[6][0][1] = 10;
eqinit[6][0][2] = 2;
eqinit[6][1][0] = 1600;
eqinit[6][1][1] = 24;
eqinit[6][1][2] = -8;
eqinit[6][2][0] = 4000;
eqinit[6][2][1] = 16;
eqinit[6][2][2] = -12;
eqinit[6][3][0] = 9000;
eqinit[6][3][1] = 18;
eqinit[6][3][2] = -6;
//mik8
eqinit[7][0][0] = 300;
eqinit[7][0][1] = 20;
eqinit[7][0][2] = -5;
eqinit[7][1][0] = 1400;
eqinit[7][1][1] = 12;
```



```
eqinit[7][1][2] = -13;
eqinit[7][2][0] = 3800;
eqinit[7][2][1] = 24;
eqinit[7][2][2] = -15;
eqinit[7][3][0] = 9000;
eqinit[7][3][1] = 10;
eqinit[7][3][2] = -8;
  //mik9
eqinit[8][0][0] = 300;
eqinit[8][0][1] = 16;
eqinit[8][0][2] = -5;
eqinit[8][1][0] = 1700;
eqinit[8][1][1] = 24;
eqinit[8][1][2] = -12;
eqinit[8][2][0] = 4000;
eqinit[8][2][1] = 26;
eqinit[8][2][2] = -15;
eqinit[8][3][0] = 9000;
eqinit[8][3][1] = 24;
eqinit[8][3][2] = -11;
  //mik10
eqinit[9][0][0] = 560;
eqinit[9][0][1] = 16 ;
eqinit[9][0][2] = 3;
eqinit[9][1][0] = 1600;
eqinit[9][1][1] = 24;
eqinit[9][1][2] = -10;
eqinit[9][2][0] = 4000;
eqinit[9][2][1] = 16;
eqinit[9][2][2] = -14;
eqinit[9][3][0] = 9000;
eqinit[9][3][1] = 10;
eqinit[9][3][2] = -11;
```

```

//mik11
eqinit[10][0][0] = 750;
eqinit[10][0][1] = 12;
eqinit[10][0][2] = -7;
eqinit[10][1][0] = 1800;
eqinit[10][1][1] = 20;
eqinit[10][1][2] = -9;
eqinit[10][2][0] = 3900;
eqinit[10][2][1] = 14;
eqinit[10][2][2] = -13;
eqinit[10][3][0] = 9000;
eqinit[10][3][1] = 8;
eqinit[10][3][2] = -10;
//mik12
eqinit[11][0][0] = 300;
eqinit[11][0][1] = 8 ;
eqinit[11][0][2] = -3;
eqinit[11][1][0] = 1900;
eqinit[11][1][1] = 20;
eqinit[11][1][2] = -10;
eqinit[11][2][0] = 4100;
eqinit[11][2][1] = 12;
eqinit[11][2][2] = -15;
eqinit[11][3][0] = 9000;
eqinit[11][3][1] = 10 ;
eqinit[11][3][2] = -10;

if (FSOUND_GetVersion() < FMOD_VERSION)
{
    printf("Error : You are using the wrong DLL
version!
You should be using FMOD %.02f\n",

```

```

        FMOD_VERSION);
        exit(1);
    }

    if (!FSOUND_Init(44100, 32,
        FSOUND_INIT_GLOBALFOCUS))
    {
        printf("%s\n", FMOD_ErrorString
            (FSOUND_GetError()));
        exit(1);
    }

    //Laden und Abspielen der Audiodatei
    //im Loop, Initialisieren der Equalizer

    FSOUND_SAMPLE *file1 = NULL;
    file1 = FSOUND_Sample_Load
        (FSOUND_HW2D, "wav/3.wav", FSOUND_ENABLEFX , 0, 0);

    channel=FSOUND_PlaySoundEx
        (FSOUND_FREE, file1, 0, TRUE);

    FSOUND_SetLoopMode(channel, FSOUND_LOOP_NORMAL );

    FSOUND_SetPaused(channel, true);

    eq1=FSOUND_FX_Enable(channel, FSOUND_FX_PARAMEQ);
    eq2=FSOUND_FX_Enable(channel, FSOUND_FX_PARAMEQ);
    eq3=FSOUND_FX_Enable(channel, FSOUND_FX_PARAMEQ);
    eq4=FSOUND_FX_Enable(channel, FSOUND_FX_PARAMEQ);

    FSOUND_SetPaused(channel, FALSE);

```

```

    FSOUND_SetVolume(channel,0);
}

float Interpolation::normalisieren
    (float koord, float l)
{
    float kugelkoord;
    kugelkoord = kugelr * koord/l;

    return kugelkoord ;
}

float Interpolation::laenge(const float *koord)
{
    float l;
    l = sqrt(koord[0] * koord[0] + koord[1] *
            koord[1] + koord[2] * koord[2]);

    return l;
}

float Interpolation::skalarprodukt
    (float koord1[3], float koord2[3])
{
    float skprod;
    skprod = koord1[0] * koord2[0] + koord1[1] *
            koord2[1] + koord1[2] * koord2[2];

    return skprod;
}

```

Anhang E

Testinstruktionen

Der folgende Hörtest beschäftigt sich mit dem Klangabstrahlverhalten von Musikinstrumenten.

Das Abstrahlverhalten wird im Test anhand eines Saxophons untersucht. Jedes Musikinstrument hat ein eigenes charakteristisches Abstrahlverhalten, d.h. steht der Hörer direkt vor dem Instrument, ist ein anderer Klangeindruck zu erwarten als direkt hinter dem Instrument.

Im Test werden zwei Methoden, die das Klangabstrahlverhalten simulieren, mit realen Aufnahmen verglichen.

Die erste angewandte Methode beruht auf der Interpolation von zwölf gleichzeitig entstandenen Aufnahmen des Saxophons. Mittels Interpolation der Lautstärken lässt sich jede Position um das Instrument abbilden.

Die zweite Methode verwendet einen einfachen Filter, um das Klangabstrahlverhalten zu simulieren.

Testteil 1:

Im ersten Teil des Hörtests wird untersucht, inwieweit der unterschiedliche Klangeindruck zweier Hörbeispiele einem Winkelunterschied zugeordnet werden kann. Nacheinander werden zwei Hörbeispiele vorgespielt und der vermutete Winkel ist anzugeben. Das Abspielen der Hörbeispiele erfolgt in der Form: A B A B.

Hörbeispiel A bildet jeweils die 0° Position ab. Für Hörbeispiel B ist die vermutete Mikrofonposition anzugeben.

Im Test ist die Antwort auf die Frage:

”Welches ist die Aufnahmeposition von Hörbeispiel B?”

anzugeben.

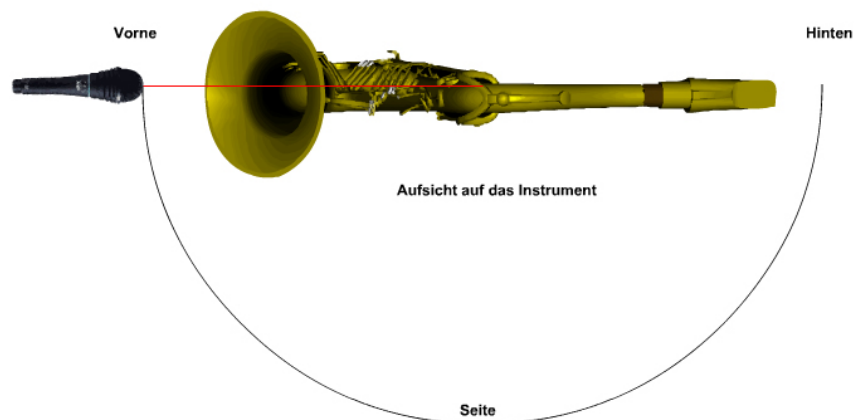


Abbildung E.1: Testteil 1: Zum Bewegen des Mikrophons bitte die "links" und "rechts" Tasten am Computer verwenden.

Testteil 2:

Im zweiten Teil des Tests sollen zwei Hörbeispiele hinsichtlich ihrer Qualität bewertet werden. Hierzu werden nacheinander zwei Hörbeispiele vorgespielt, die mit unterschiedlichen Methoden erstellt wurden, jedoch die gleiche Hörerposition abbilden sollen. Das Abspielen der Hörbeispiele erfolgt in der Form: A B A B.

Im Test ist die Antwort auf die Frage:

”Welches der Hörbeispiele gefällt Ihnen besser?”

anzugeben.

Als Antwortmöglichkeiten stehen:

- A gefällt besser
- B gefällt besser
- A und B gefallen gleich gut

zur Verfügung.

A = **B**

Abbildung E.2: Testteil 2: Zum Bewegen der Markierung bitte die ”links” und ”rechts” Tasten am Computer verwenden.

Anhang F

Numerische Testergebnisse

In den folgenden Tabellen ist die genau numerische Auszählung der Testergebnisse dargestellt.

F.1 Testteil 1: Wahrnehmung von Klangabstrahlverhalten

Die Tabellen F.1, F.2, F.3, F.4, F.5 und F.6 zeigen die numerischen Ergebnisse des Hörtests von Testteil 1. Angegeben ist die Häufigkeit, mit der die Probanden einem akustisch dargestellten (beabsichtigten) Winkel eine Winkelangabe (angegebener Winkel) zugeordnet haben. Genaueres ist den Tabellenbeschriftungen zu entnehmen.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			3		65					
36	1		20		14		16			
72	5		14		1		23		3	
108	13		5				15		9	
144	25		11				15		30	
180	36		27				11		38	

Tabelle F.1: Testergebnisse für reale Hörbeispiele. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0	1			1	32	3	1			
36	1	3	3	16	7	9	18	1		2
72	3	4	6	16	1	22	14	14	3	2
108	15	16	19	7		4	7	13	5	7
144	18	13	6			2		12	22	14
180	2	4	6						10	15

Tabelle F.2: Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Interpolation). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			2	10	38	20			1	
36	2	2	9	28	2	15	8	1	1	
72		7	23	2		4	23	4	3	
108	7	16	5			1	6	17	12	8
144	17	11	1				3	15	15	13
180	14	4						3	8	19

Tabelle F.3: Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Filter). Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			3		57					
36	1		17		10		13			
72	5		11		1		23		2	
108	10		4				8		7	
144	20		9				14		25	
180	32		24				10		34	

Tabelle F.4: Testergebnisse für reale Hörbeispiel unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0	1				28	3	1			
36	1	3	3	13	5	7	14	1		2
72	1	2	4	14	1	19	13	10	2	1
108	12	14	16	7		3	6	12	4	4
144	17	11	6			2		11	20	12
180	2	4	5						8	15

Tabelle F.5: Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Interpolation) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
0			2	9	32	17			1	
36	2	2	7	23	2	12	6	1	1	
72		5	19	2		4	21	3	1	
108	5	14	5			1	4	16	10	4
144	16	9	1				3	12	14	12
180	11	4						2	7	18

Tabelle F.6: Testergebnisse für simulierte Hörbeispiele (Filter) unter Berücksichtigung der Antwortkonsistenz der Probanden. Zeilen: Beabsichtigte Winkel. Spalten: Angegebene Winkel.

F.2 Testteil 2: Bewertung der Hörbeispiele

Die Tabellen F.7 und F.8 zeigen die numerischen Ergebnisse des Hörtests von Testteil 2. Angegeben ist die Häufigkeit mit der eine Antwort von den Probanden gegeben wurde.

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
F	23		19		17		27		38	
=	29		21		22		16		19	
R	28		40		41		37		23	

Tabelle F.7: Reale Hörbeispiele (R) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).

	-144	-108	-72	-36	0	36	72	108	144	180
F	9	21	19	22	26	15	7	16	16	28
=	7	4	13	9	7	7	13	9	11	5
I	24	15	8	9	7	18	20	15	13	7

Tabelle F.8: Simulierte Hörbeispiele (Interpolation) (I) verglichen mit simulierten Hörbeispielen (Filter) (F).