
Evaluation eines Raumsimulationsmodells auf Grundlage von Arraymessungen

Masterarbeit von Matthias Jung

Matrikelnummer 19795

vorgelegt an der Hochschule der Medien Stuttgart

im Studiengang Elektronische Medien

am 30. November 2010

Erstprüfer

Prof. Jens Hergesell
Hochschule der Medien
Nobelstraße 10
70569 Stuttgart

Zweitprüfer

Dipl.-Ing. Frank Melchior
IOSONO GmbH
Erich-Kästner-Straße 1
99094 Erfurt


HOCHSCHULE DER MEDIEN

IOSONO)))

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und nicht veröffentlicht.



Matthias Jung

Erfurt, den 25. November 2010

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit ist ab Abgabe (30.11.2010) für den Zeitraum von 12 Monaten gesperrt. Veröffentlichungen der Arbeit und Veröffentlichungen von Teilen der Arbeit bedürfen dem Einverständnis des Verfassers und der IOSONO GmbH.

Abstract

Die Schallfeldreproduktion mittels Wellenfeldsynthese bietet Tonschaffenden vielfältige Möglichkeiten der räumlichen Darstellung auditiver Inhalte. Dabei stellt der virtuelle Raum als Klangüberträger ein wesentliches Gestaltungskriterium im Mischprozess dar und es entsteht so das Bedürfnis nach einem adequate Hallgerät für das System.

Auf der theoretischen Basis der Auralisation für Wellenfeldsynthese entstand die IOSONO Room Simulation, ein Raumsimulationsmodell, das sich momentan in der Entwicklungsphase befindet. Für raumakustische Messungen wurde kürzlich das Messgerät Varisphear vorgestellt, das akustische Kreisarraymessungen in realen Räumen ermöglicht.

Ziel der Arbeit ist es, den Weg von der raumakustischen Messung bis hin zur Verwendung der gemessenen Raumimpulsantworten in der Room Simulation praktisch zu testen. Die Arbeit evaluiert in einem zweiten Schritt bisherige Funktionen des Raumsimulationsmodells und erörtert anschließend Kriterien für eine zukünftige Weiterentwicklung des Systems. Hierzu werden Experten auf dem Gebiet der Bewegtbildmischung befragt, da diese eine zentrale Anwendung des Wellenfeldsynthesystems darstellt.

Bezüglich der Nachbearbeitung gemessener Raumimpulsantworten ergibt sich eine Reihe von Ansätzen, die für einen zukünftigen, automatisierten Workflow von Bedeutung sind. Die Auswertung der Experteninterviews zeigt anwendungsrelevante Aspekte auf und führt zu einigen Konsequenzen für die Weiterentwicklung des Raumsimulationsmodells.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1. Einleitung	10
1.1. Geschichtliche Entwicklung von Hallgeräten	10
1.2. Untersuchungsfragen	13
1.3. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	13
2. Grundlagen der raumakustischen Messtechnik	15
2.1. Impulsantwortmessung	15
2.1.1. Anregungssignale	16
2.1.2. Zeitliche Trennung der Impulsantwortteile	22
2.2. Arraymessungen	23
2.2.1. Kreisarraymessung mit Druck- und Schnellempfängern	23
2.2.2. Ebene Wellen Zerlegung	24
3. Messung und Nachbearbeitung der Raumimpulsantworten	30
3.1. Messung des Kemptner Fürstensaals mit dem Messgerät Varisphear	30
3.1.1. Messaufbau	34
3.1.2. Messdurchführung	37
3.2. Nachbearbeitung der durchgeführten Arraymessungen	42
3.2.1. Entfernung des Predelays	42
3.2.2. Entfernung des Direktschalls	42
3.2.3. Ebene Wellen Zerlegung	44
3.2.4. Kombination der Messungen	44
3.2.5. Extraktion der diskreten Reflektionen	49
3.2.6. Bearbeitung der diskreten Reflektionen	51
3.2.7. Reduzierung auf wenige Wiedergaberichtungen	51
3.2.8. Trennung von frühen Reflektionen und diffusem Nachhall	52
3.2.9. Dekorrelation des diffusen Nachhalls	52
3.2.10. Erstellung des RSM-Presets	54

4. Praxisevaluation der RSM	55
4.1. Wiedergabesetup und Authoringumgebung	55
4.1.1. Authoringumgebung Nuendo und die IOSONO Spatial Audio Workstation . .	55
4.1.2. Funktionenbeschreibung der RSM	55
4.2. Experteninterview zum Potential der RSM für die tonmeisterliche Praxis	64
4.2.1. Interviewpartner	64
4.2.2. Konzeption des Experteninterviews	65
4.2.3. Auswertung des Experteninterviews	66
5. Fazit und Ausblick	71
5.1. Praxisevaluation der RSM	72
5.2. Ausblick auf zukünftige Entwicklungsbereiche	73
A. Auswertungsmatrix des Experteninterviews	75
B. Aufbau des Raummikrofons im Fürstensaal Kempten	80
Literaturverzeichnis	83

Abbildungsverzeichnis

1.	Zeitlicher Abfolge der Reflektionen einer RIR (schematisch) [Dic08], S.26	16
2.	Gemessene RIR im Zeitbereich	17
3.	Frequenzspektren des linearen und logarithmischen Sweeps im Vergleich zum typischem Frequenzspektrum eines Mikrofons [Hul04], S.104	19
4.	Effektivität verschiedener Anregungssignale [Hul04], S.103	21
5.	Simulierte Kreisarraymessung einer ebenen Welle aus 45° mit Druck- und Schnellempfänger; x-Achse: horizontaler Winkel, y-Achse: Zeit	25
6.	Ebene Welle aus 45° im Frequenzbereich mit verschiedener Anzahl an Messpositionen auf dem Kreisarray; x-Achse: horizontaler Winkel, y-Achse: Frequenz	27
7.	Doppelte Fouriertransformation einer ebenen Welle für 256, 360 und 512 Messpositionen; x-Achse: Auflösung des Kreisarrays (Messpositionen), y-Achse: Frequenz	28
8.	Spatial Aliasing Artefakte für ein Kreisarray mit 360 Messpositionen und einen Radius von 2 Metern	29
9.	Varisphear GUI für den Messdurchgang [Ber10]	30
10.	Sample Browser der Varisphear GUI [Ber10]	31
11.	Messaufbau im Fürstensaal Kempten	35
12.	Audiosetup für die Messung im Fürstensaal Kempten	36
13.	Spezifikationen des Meyersound CQ-1 nach Herstellerangaben [CQb]	37
14.	Polardiagramme des Meyersound CQ-1 nach Herstellerangaben [CQa]	38
15.	Horizontale und vertikale akustische Achse des Meyersound CQ-1 (Angaben in Inches) [CQa]	39
16.	Freifeldfrequenzgang des Neumann KM184 nach Herstellerangaben [KM1]	39
17.	Polardiagramm des Neumann KM184 nach Herstellerangaben [KM1]	39
18.	Fürstensaal der Residenz Kempten, eigenes Foto	40
19.	Meyersound CQ-1 im Fürstensaal, eigenes Foto	41
20.	Varisphear Messgerät im Fürstensaal, eigenes Foto	41
21.	Überblick der RIR-Nachbearbeitung	43
22.	RIR bei 0° ohne Predelay	44
23.	Einzelne RIR vor und nach der Entfernung des Direktschalls	45
24.	360 RIRs der Messung mit einer Lautsprecherausrichtung von 180° bis 85ms	46
25.	PWD der Messungen mit einer Lautsprecherausrichtung von 180° bis 85ms	47
26.	PWD der Messung mit einer Lautsprecherausrichtung von 180° bis 341ms	47
27.	Kombination der vier Messungen mit unterschiedlichen Lautsprecherausrichtungen in der Ebenen Wellen Domäne	48
28.	PWD der vier kombinierten Messungen	49
29.	Diskrete Reflektionen in der Ebenen Wellen Domäne	50
30.	PWD nach Entfernung der diskreten Reflektionen	50
31.	Frequenzdarstellung der diskreten Reflektionen	51
32.	Diskrete Reflektionen von linker und rechter Seitenwand (rot und gelb), Vorderwand (blau) und Rückwand (grün) im Zeitbereich	52
33.	PWD nach der Reduzierung auf acht Richtungen	53

34.	Trennung der RIRs in frühen und späten Zeitbereich	53
35.	RSM Blockschaltbild	56
36.	Auswahl der Output Ports	57
37.	Tracks für die Returnwege	58
38.	Einstellung der Wiedergabequellen	58
39.	Platzierung der Wiedergabequellen in der Spatial Audio Workstation	59
40.	RSM Konfigurationsmenü	61
41.	Überblick der RSM Kontrolloberfläche in der Spatial Audio Workstation	62
42.	Object View Tab der RSM GUI	63
43.	EQ-Einstellung für die Discretes im Object Editor Tab der RSM GUI	63
44.	Grafische Oberfläche des Spread Widgets	63
45.	Ausgleich der Systemlatenz	64

Abkürzungsverzeichnis

AES

Audio Engineering Society

ASR

Aliasing to Signal Ratio (dt. Abstand von erwartetem Signal(z.B. ebene Welle) zu räumlichen Aliasing Artefakten)

DAW

Digital Audio Workstation (dt. digitaler Arbeitsplatz für Audioproduktionen)

DPWD

Discrete Plane Wave Decomposition (dt. diskrete Ebene Wellen Zerlegung)

DSP

Digital Signal Processor (dt. Digitaler Signalprozessor)

FFT

Fast Fourier Transformation (dt. Schnelle Fouriertransformation)

GUI

Graphical User Interface (dt. grafische Benutzeroberfläche)

LTI

Linear Time Invariant System (dt. lineares, zeitinvariantes System)

MADI

Multichannel Audio Digital Interface, Multikanalinterface mit einer Datenübertragungsrate von bis zu 100MBit/s. Die AES-Spezifikation [AES10] basiert auf der Bündelung von 28 AES3-Kanälen, sodass insgesamt 56 Mono-Kanäle über eine MADI-Leitung übertragen werden können [Dic08], S. 638f.

MIR

Multi Impulse Response

MLS

Maximum Length Sequence (dt. Maximalfolge)

PWD

Plane Wave Decomposition (Ebene Wellen Zerlegung)

QEP

Quelle Empfänger Position, bei Messungen die Positionen von Messlautsprecher und -mikrofon, bei der Wiedergabe die Positionen der Quelle und des Abhörpunkts.

RIR

Room Impulse Response (dt. Raumimpulsantwort)

RSM

IOSONO Room Simulation Model (dt. Auralisationsmodell der IOSONO GmbH)

RT60

Reverb Time, Nachhallzeit eines Raumes, innerhalb derer der Schallpegel um 60dB (ein Millionstel des ursprünglichen Schalldrucks) abfällt.

SNR

Signal to Noise Ratio (dt. Signal Rausch Verhältnis)

SPL

Sound Pressure Level (dt. Schalldruckpegel)

WFS

Wave Field Synthesis (dt. Wellenfeldsynthese)

1. Einleitung

1.1. Geschichtliche Entwicklung von Hallgeräten

Die künstliche Verhallung von Mikrofonsignalen begleitet die Entwicklung der Tontechnik seit ihren Anfängen. Die Vorteile der nahen Mikrofonierung wie die getrennte Bearbeitung einzelner Instrumente sind unvermeidlicherweise mit dem Ausblenden des Aufnahmegebietes verbunden. Im Fall einer Orchesteraufnahme sind in der Regel zwar zusätzliche Raummikrofone aufgestellt, diese enthalten aber nur den kompletten Orchesterhall und eignen sich daher nicht zur Verhallung der einzelnen Stützschnale. Man benötigt also schon bei dieser Standardaufnahmesituation eine Lösung zur künstlichen Generierung eines Raumes.

Erste Versuche der Generierung von Raumklang

Die wohl bekannteste historische Methode der Nachhallzeugung ist die Verwendung eines Hallraumes, wie er bis zur Ablösung durch die Digitaltechnik Anfang der 80er Jahre in fast jedem großen Studio bestand [Kü10]. Das zu verhallende Signal wird dabei auf Studiomonitoren im Hallraum abgespielt und von Mikrofonen im gleichen Raum wieder aufgenommen. Dieses Verfahren wurde bis zur ferngesteuerten Verschiebung der Wände des Hallraumes getrieben, um die gewünschten Reflektionsmuster und Nachhallzeiten bestimmen zu können.

Neben der Konstruktion echter Hallräume erfolgten mit der Erfindung der Tonbandmaschine in den 1930er Jahren erste Versuche der elektroakustischen Nachhallzeugung. Durch die Verzögerung zwischen Wiedergabe- und Aufnahmekopf entstehen an einem Tonbandgerät kurze Echos. Legt man also das gleiche Signal vom Repro- an den Sync-Kopf an, kann man das Signal mit kurzen Delays versehen [San03], was von der Simulation eines Raumes allerdings noch weit ist.

Analoge Hallgeräte

Das erste für die Nachhallzeugung konstruierte Analoggerät war der Federhall. Die Firma Accutronics stellte 1939 das erste Federhallmodell vor, das ursprünglich für die Verhallung der Hammondorgel konzipiert wurde [Acc].

Beim Federhall wird eine mehrere Zentimeter lange Feder in ein Rack gespannt und am Ende mit Magnetspulen versehen. Das anliegende Signal versetzt die Feder in Schwingung und induziert am anderen Federnende das durch die Feder verhallte Signal. Mittels einer geschickten Bearbeitung der Feder und Einarbeiten von Unterbrechungen der Feder und Verwendung mehrerer Federn gleichzeitig kann der Nachhall modifiziert werden. Allerdings ist der analoge Federhall nur bis zu einer bestimmten Frequenz (ca. 2kHz) synthetisierbar und hat einen stark gefärbten, metallischen Charakter.

1957 stellte der deutsche Ingenieur Dr. Walter Kuhl mit dem EMT140 die erste Version des Plattenhalls vor. Eine ca. zwei Quadratmeter große, dünne Metallplatte wird mit Kontaktlautsprechern angeregt und das durch die Platte verhallte Signal mit auf ihr angebrachten Piezo Tonabnehmern

abgegriffen [Pie04]. Da sich Schall in Stahl ca. 12-mal schneller ausbreitet als in Luft, ist es schwierig, mit der Hallplatte frühe Reflektionsmuster, wie sie in Wiedergaberäumen auftreten, zu erzeugen. Der Plattenhall eignet sich daher nur für die Erzeugung einer Nachhallfahne, die gegebenenfalls mit einem Predelay verzögert wird. Im Gegensatz zum Federhall lässt sich der Plattenhall in Tonproduktionen gut für perkussive Instrumente einsetzen [Kü10]. Eine weitere Variante mit ähnlichen Klangeigenschaften ist der Folienhall, bei dem eine wenige Mikrometer dünne Goldfolie verwendet wird [Goe08].

Feder- und Plattenhall als elektroakustische Pioniere im Bereich der Hallgeräte werden heutzutage selten eingesetzt, finden aber als historische Presets in digitalen Hallgeräten noch heute Eingang in die Klanggestaltung.

Digitale Hallgeräte

Mit der Entwicklung der Digitaltechnik wurde Ende der 1970er Jahre die algorithmische Hallsynthese möglich. Das zu verhallende Signal wurde zunächst mit verschachtelten, rekursiven Allpass-Filtern mit unterschiedlicher Bedämpfung und Verzögerung synthetisiert [Goe08]. Erste Modelle für den Einsatz in Tonstudios waren das EMT 250 (1976), das Lexicon 224 (1978) und das Quantec QRS (1982). Oftmals bestand bei diesen Geräten noch eine Beschränkung auf ca. 10kHz, um die Rechenleistung zu beschränken und es wurden mehrere hundert einzelne DSPs eingesetzt, auf welche die Rechenlast verteilt wurde. Die Weiterentwicklung im Bereich der Hallalgorithmen brachte Tonstudiostandardgeräte wie das Lexicon 480L/-960L und das TC Electronic 6000 auf den Markt. Die vor allem zur Berechnung des diffusen Nachhalls eingesetzten, zufallsgesteuerten Algorithmen sorgen für nichtdeterministische Signale in digitalen Hallprozessoren [Goe08], was sie für manche Toningenieure mit einer gewissen Magie versieht. Außerdem werden sie im Tonstudio gern eingesetzt, da dem Anwender für die Hallerzeugung eine Vielzahl an Parametern zur Verfügung steht.

Bei der rein digitalen Anwendung von Hallalgorithmen entfällt der Wandlungsprozess des Analogsignals für periphere Audiohardware und die Programme werden als Plugins direkt in der Digital Audio Workstation (DAW) eingesetzt. Beispiele aus der professionellen Audioproduktion sind der Digidesign D-Verb und der True-Verb aus dem Waves-Bundle.

Der Bereich der Hallalgorithmen wird in der vorliegenden Arbeit keine nennenswerte Rolle spielen. Ansätze für die künstliche Raumsimulation finden sich in [UZ97].

Faltungshall

Ein besonders realistisches Raumbild wird mit dem Einsatz von vorab gemessenen Impulsantworten erzeugt, die mit dem zu verhallenden Signal mittels FFT-Algorithmen gefaltet werden. Beispiele hierfür sind das Altiverb-Plugin der Firma Audio Ease, das SIR2 und das Waves IR1. Diese Programme stellen einige Parameter zur nachträglichen Veränderung der gemessenen Impulsantworten, wie beispielsweise EQs, Nachhallzeit und Pegel der frühen Reflektionen, zur Verfügung. Die eingeschränkten Eingriffsmöglichkeiten in die impulsantwortbasierte Hallerzeugung werden im Allgemeinen nach wie

vor als Nachteil gewertet. So kann beispielsweise der Parameter Raumgröße nur zu einem gewissen Grad abgeändert werden und ist eng an die tatsächliche Größe des gemessenen Raumes gebunden.

Der Faltungshall bietet allerdings auch vielfältige Möglichkeiten. Anregungssignale für die Impulsantwortmessung können beispielsweise auch durch alte Analoggeräte oder modernere Digitalprozessoren geschickt und auf diese Weise nachgebildet werden. Außerdem ist es in vielen Faltungshallprogrammen möglich, selbst gemessene Impulsantworten zu importieren und diese für die Audibearbeitung zu nutzen.

Halllösungen für mehrkanalige Wiedergabesysteme

Faltungshallprogramme bieten oft nur Stereolösungen an, die für die 5.1-Wiedergabe mit Panningalgorithmen erweitert werden. Es besteht in der Regel eine Beschränkung auf eine feste Quelle Empfänger Position (QEP) in einem Raum beschränkt. Zusätzlich werden bei aufwendigeren Programmen verschiedene Raumimpulsantworten mit unterschiedlichen QEPs im gleichen Raum angeboten, sodass die Wahl zwischen mehreren Bühnen- und Hörerpositionen besteht. Ein Beispiel für ein vergleichbares Hallplugin ist das Vienna Multi Impulse Response (MIR) [VSL]. Dieses Hall-Plugin eignet sich zwar für klassische Ensembleaufstellungen, kommt aber schon bei einfachen Bewegungen einer Quelle im Raum an seine Grenzen, da der verwendete Hall nicht mit dem 5.1-Panning mitgeführt wird. Dynamische Bewegungen mit Hallanteilen können so nur durch aufwendige Automatisierungen und den Einsatz mehrerer Presets realisiert werden.

Auch im Bereich des algorithmischen Halls gibt es für vergleichbare Anwendungen bisher keine praxistaugliche Lösung. Selbst professionelle 5.1-Hallalgorithmen bleiben auf starre Raummodelle beschränkt und berücksichtigen die Quellposition im 5.1-Panner nicht für die Hallberechnung. Der Effekt, dass das trockene Signal aus einer bestimmten Richtung, der Multikanalhall aber aus allen Richtungen kommt, schränkt den Einsatz von Multikanalhall für das Richtungsmischen in großem Maße ein.

Für die Mischung mit Wellenfeldsynthese (WFS) gibt es seit einigen Jahren Ansätze für die künstliche Raumsimulation sowie für den Einsatz von gemessenen Raumimpulsantworten (RIRs) in mehrkanaligen Faltungshallprogrammen. Für erstere wurde am Fraunhofer IDMT ein Raumsimulationstool entwickelt, mit dem mittels Eingabe akustischer Raumparameter wie Raumgröße, Absorptionsgrad, Luftdämpfung, QEP etc. künstliche RIRs berechnet und anschließend für die Auralisation verwendet werden können. Zusätzlich zu der Einstellung der akustischen Parameter gibt es grafische Interaktionsmöglichkeiten zur Einflussnahme auf die erstellten RIRs, die auf Grundlage der NURBS-Surfaces realisiert sind [MLV06], [MSV08]. Diese sind bislang noch nicht echtzeitfähig und müssen in einem statischen Interaktionsprozess vorab gerendert werden.

Der dynamische Interaktionsprozess zum Einsatz für Audiomischungen beschränkt sich momentan auf eine achtkanalige Richtungsauflösung, wie in [MSPB10] beschrieben. [Hul04] lieferte hierzu umfangreiche Grundlagenarbeit, die in ähnlicher Form in [PML04] und [Mer06] psychoakustischen Fragestellungen und Hörtests unterzogen wurden. Auf Grundlage dieser Ansätze wurde die IOSONO Room Simulation (RSM) entwickelt, die für die Wiedergabe der im Rahmen der Arbeit gemessenen RIRs verwendet wird.

Trotz der umfangreichen Möglichkeiten für räumlich hochauflösende Schallfeldmessung und die anschließende Wiedergabe mittels schneller Faltung (FFT) bleibt das Problem der Festlegung auf wenige, gemessene QEPs. Somit ist dem Preset für die RSM-Wiedergabe immer auch eine bestimmte QEP aufgeprägt.

Die räumliche Mischung mit einem WFS-System erfordert aber in grundlegendem Maße die Abbildung von Raumanteilen, die sich mit der Quelle mitbewegen, um so einen realistischen Raumeindruck zu schaffen. Ein längerfristiges Ziel für das räumliche Audioauthoring muss daher die automatische Mitführung von mehrkanaligem Hall für dynamische Quellen sein.

1.2. Untersuchungsfragen

Der erste Schritt für die Verwendung von Faltungshall ist die Messung der RIRs. Da das Messdesign große Auswirkung auf die daraus entwickelten Hall-Presets hat, sollte ihm besondere Aufmerksamkeit zukommen.

Untersuchungsfrage I

Wie gestaltet sich der Workflow von der Messung von Raumimpulsantworten bis hin zu deren Verwendung innerhalb eines Audioverarbeitungsprogramms?

Die Anforderungen an Hallgeräte sind höchst unterschiedlich und hängen stark von der jeweiligen Anwendung und dem beabsichtigten Effekt ab. So soll ein Hall für eine Orchesteraufnahme möglichst realistisch klingen, beim popmusikalischen Einsatz sind aber oft unrealistische Anwendungen, wie beispielsweise eine Anhebung der hohen Frequenzen für brillante Stimmen, gefordert. Ein Hall für virtuelle Instrumente soll zwischen den einzelnen Instrumentensamples eine Konstante schaffen, für Sounddesigns braucht man aber häufig dynamischen Hall, dem als eigenes künstlerisches Element Gestaltungscharakter zukommt.

Untersuchungsfrage II (Praxisevaluation der RSM)

Was sind die Kriterien für ein praxistaugliches Faltungshallprogramm für WFS aus Anwendersicht?

Diese Frage untergliedert sich in mehrere Teilaspekte, die im Abschnitt 4.2.2 im Detail vorgestellt werden.

1.3. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit der Diskussion der nötigen Grundlagen raumakustischer Messungen in Kapitel 2. Kapitel 3 widmet sich Untersuchungsfrage I, hier finden sich die Ergebnisse der raumakustischen

Messungen mit einem Kreisarraysystem sowie eine Darstellung der Nachbearbeitung der gemessenen RIRs bis hin zur Erstellung eines Presets für die RSM.

Für die klangliche Einschätzung der RSM im Vergleich zu einem Raummikrofon wurden zusätzlich im gemessenen Raum kurze Aufnahmen von Trompete und Snaredrum gemacht und der Raum dementsprechend mikrofoniert. Es stellte sich aber im Verlauf der Arbeit heraus, dass eine weitere Beschäftigung mit der Nachbearbeitung der RIRs und die Evaluation von RSM-Features einem vergleichenden Hörtest zum gegebenen Zeitpunkt vorzuziehen war. Der Aufbau des Raummikrofons findet sich in Anhang B. Dieser Ansatz wird aber nicht weiter verfolgt, da er für die Untersuchungsfragen nicht als zielführend betrachtet wird.

Kapitel 4 behandelt Untersuchungsfrage II, stellt die Authoringumgebung für die Wiedergabe vor und fasst Ergebnisse der Praxisevaluation der RSM zusammen. Als Methode ist ein Interview mit Experten auf dem Gebiet der WFS-Mischung gewählt. Es wird als qualitatives, teilstrukturiertes, problemzentriertes Experteninterview durchgeführt und ist demnach nicht repräsentativ. Alle Interviewpartner arbeiten größtenteils in der Film- und Bewegtbildvertonung.

Kapitel 5 fasst Ergebnisse zusammen und schlussfolgert eine sinnvolle Weiterentwicklungsstrategie für die RSM. Da die Entwicklungsmöglichkeiten sehr vielseitig sind, wird eine Prioritätenliste für die Verbesserungen der RSM auf Grundlage der aus Expertensicht geforderten Tools erstellt. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungsbereiche im Bezug auf die Raumsimulation für WFS.

2. Grundlagen der raumakustischen Messtechnik

Die Disziplin der theoretischen Raumakustik gliedert sich in die Bereiche wellentheoretische, geometrische und statistische Raumakustik. Die wellentheoretische Raumakustik macht die Wellennatur des Schalls zum Ausgangspunkt ihrer Fragestellungen, wobei die geometrische bzw. statistische Raumakustik vereinfachend die sehr frühen bzw. sehr späten Reflektionen in einem Raum untersucht. Für die ersten Reflektionen kann man in großen Räumen zweckmäßig von der Wellennatur und von der statistischen Betrachtung des Schalles absehen und die Ausbreitung rein geometrisch behandeln (vgl. [MN75], S.81). Die näherungsweise Behandlung von Schall als Strahlen wird auch Raytracing bezeichnet, dementsprechende Modelle als Spiegelschallquellenmodelle. Die Spiegelschallquellen sind dabei die an den Wänden gespiegelten, virtuellen Quellen, als die sie im Modell verarbeitet werden. Die statistische Raumakustik beschäftigt sich hingegen mit dem Zustand von Wellenfeldern, an denen keine räumliche Unterscheidung mehr zwischen verschiedenen Punkten im Raum sinnvoll ist, die Energie sich also bereits durch vielfache Wandreflektionen gleichmäßig über den ganzen Raum verteilt hat. Inhalte der statistischen Raumakustik sind deshalb vor allem energetische Betrachtungen von Schallfeldern [CM76].

2.1. Impulsantwortmessung

Die Schallausbreitung in einem Raum kann als System verstanden werden, das den Schall einer Quelle zum Schallempfänger überträgt. Voraussetzungen für diese Beschreibung sind Linearität und Zeitinvarianz, die für akustische Systeme näherungsweise gelten (vgl. [Wei08] S.15ff). Linearität meint in diesem Zusammenhang die Linearität des Mediums und lineare, homogene Grenzwertbedingungen an den Wänden. Mit Zeitinvarianz werden zeitkonstante Mediums- und Grenzwertbedingungen bezeichnet (vgl. [Spo05], S. 54).

Als Raumimpulsantwort (RIR) wird die zeitliche Reaktion des Systems auf einen infinitesimal kurzen Diracimpuls verstanden. Transformiert man dieses Signal in den Frequenzbereich, erhält man die zugehörige Übertragungsfunktion.

Typischerweise erkennt man in einer RIR nach dem Direktschall einige frühe Reflektionen von Boden, Decke und den Seitenwänden. Diese werden im folgenden als *Earlies* (*Early Reflections*) bezeichnet. Eine weitere Unterteilung des frühen Teils der RIR kann über die Ordnung der Reflektion geschehen. Unmittelbare Wandreflektionen erster Ordnung werden als *Discretes* (*Discrete Reflections*) bezeichnet. Sie können nach wenigen Millisekunden nach dem Direktschall als einzelne, diskrete Peaks im Signal erkannt werden. Reflektionen höherer Ordnungen sind in der Impulsantwort schwer voneinander zu trennen, da sie sich im zeitlich zunehmend diffusen Schallfeld gegenseitig überlagern. Diese Überlagerung führt schließlich dazu, dass sich die Schallenergie über den ganzen Raum gleichverteilt. Dieser späte Teil einer RIR wird im Folgenden als *Lates* (*Late Reflections*) bezeichnet. Eine schematische Darstellung des zeitlichen Aufbaus einer RIR findet sich in Abbildung 1, eine gemessene RIR im Zeitbereich ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Faltung des Eingangssignals mit der Impulsantwort liefert das Ausgangssignal des Systems. Digitalprozessoren garantieren heutzutage die Umsetzung des Faltungsintegrals in Echtzeit. Im Frequenz-

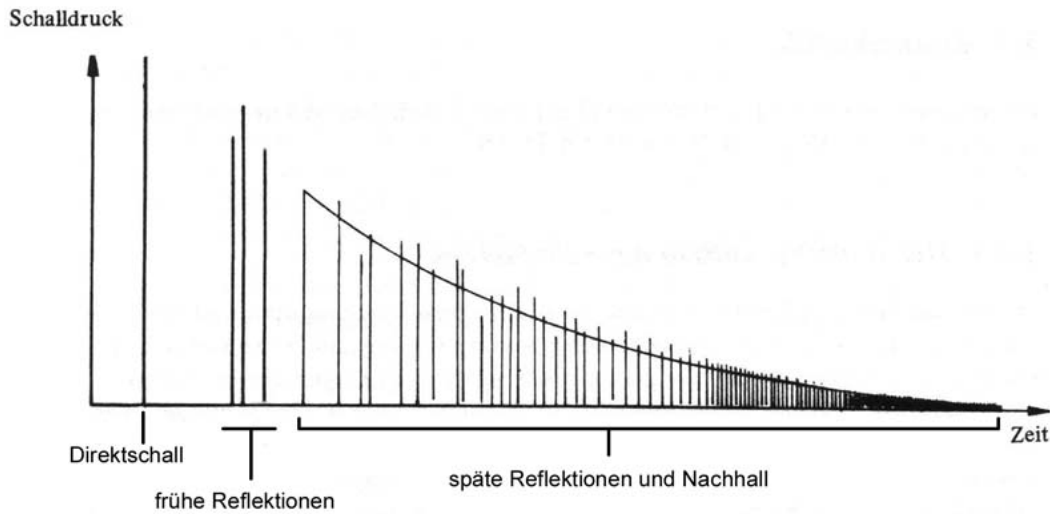


Abbildung 1: Zeitlicher Abfolge der Reflektionen einer RIR (schematisch) [Dic08], S.26

bereich entspricht das Ausgangsspektrum der komplexen Multiplikation des Eingangsspektrums mit der Übertragungsfunktion. Eine mathematische Beschreibung findet sich z.B. in [Wei08], S.16f.

Zum Einsatz einer gemessenen Impulsantwort in einem digitalen Hallprozessor wird eine realitätsgetreue Abbildung der Raumwirkung und dessen Konservierung mittels der RIR angestrebt. Voraussetzung hierfür ist ein möglichst verzerrungsfreies Quellsignal (Lautsprecher) sowie ein möglichst verzerrungsfreier Empfänger (Mikrofon).

2.1.1. Anregungssignale

Theoretisch wäre als Anregungssignal für die Messung ein Diracimpuls am besten geeignet, da er einen idealen Frequenzgang hat, der alle Frequenzen gleich stark enthält. Außerdem wäre dann das Ausgangssignal dann mit der Impulsantwort identisch. Im Fall raumakustischer Messungen ist dies aber nicht umsetzbar, da Lautsprecher in der kurzen Zeit eines Diracimpulses (im mathematischen Sinne unendlich kurz) nicht die nötige Energie für alle Frequenzen aufbringen, um einen Raum für Messungen ausreichend anzuregen. Hinzu kommt beim Einsatz von Lautsprechern und Mikrofonen, dass mit genügend Energie ein ausreichendes Signal Rausch Verhältnis (SNR) erreicht werden soll. Dies ist bei Messungen nur mit Signalen zu erreichen, bei denen die Energie über einen längeren Zeitraum verteilt wird (vgl. [Mü08], S.1097). Die Impulsantwort kann dann mittels Faltung des Ausgangssignals mit dem inversen Filter des Eingangssignals berechnet werden.

Bei allen Anregungssignalen ohne weißes Spektrum wird die Berechnung des inversen Filters im Frequenzbereich durchgeführt und anschließend wieder in den Zeitbereich transformiert [Mü08].

Messsignale sollten daher keine Nullen im Frequenzbereich haben. Außerdem muss der Messzeitraum in einem Raum mindestens so lange wie seine Nachhallzeit gewählt werden, da sich sonst wegen der Periodizitätseigenschaft der Fouriertransformation Signalschleifen (*wrap around effects*) bilden, die sich zur Impulsantwort hinzuaddieren (vgl. [Hul04], S.100).

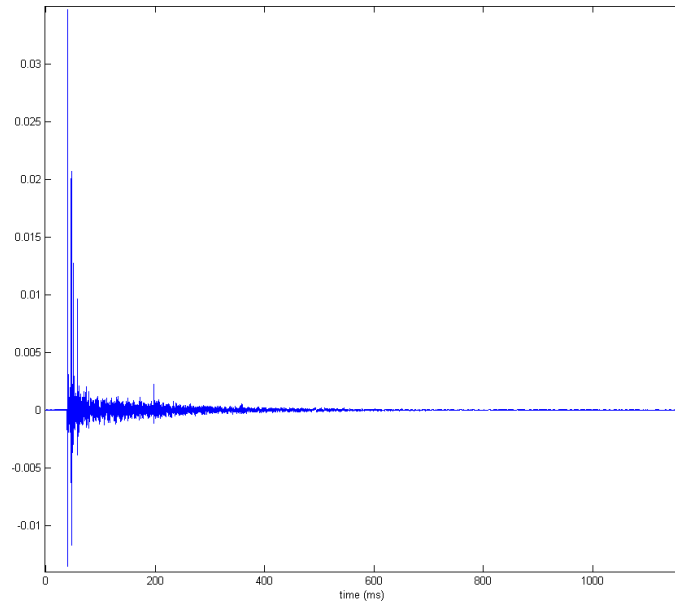


Abbildung 2: Gemessene RIR im Zeitbereich

FFT-Grad

Der FFT-Grad N des Anregungssignals bestimmt über die Frequenzauflösung der Übertragungsfunktion. Es sind wegen der diskreten FFT bzw. IFFT nur die Einzelfrequenzen

$$\frac{n \cdot f_s}{2^N} \text{ mit } n = 0, 1, 2, 3, \dots, 2^{N/2} \quad (1)$$

im Signal enthalten, wobei f_s die Samplingfrequenz bezeichnet.

Im Zeitbereich entscheidet der FFT-Grad über die Länge des Anregungssignals und somit auch über das erreichte SNR. Die Länge in Sekunden berechnet sich als Quotient aus 2^N und der Samplingfrequenz. Für die im Rahmen der Arbeit wird für das Anregungssignal FFT-Grad 18 gewählt. Ein einzelner Sweep dauert somit ca. 5 Sekunden an.

Die folgende Diskussion verschiedener Anregungssignale bezieht sich vor allem auf Ergebnisse aus [Hul04] und [Mü08]. In letzterem ist eine detaillierte Besprechung von Anregungssignalen für raumakustische Messungen zu finden. Die gebräuchlichsten Typen von Anregungssignalen sind Pseudo-Rauschen, Maximalfolgen und Sweeps. Zunächst werden einige wichtige Parameter für Anregungssignale vorgestellt.

Signal Rausch Verhältnis (SNR)

Das Signal Rausch Verhältnis (SNR), auch Geräuschspannungsabstand, beschreibt das Verhältnis der maximal unverzerrt reproduzierbaren Signalamplitude zur Amplitude des Geräuschsignals bei Abwesenheit eines Eingangssignals (vgl. [Mü08], S.1137).

Für die Verbesserung des SNR schlägt [Hul04] eine mehrfache Wiederholung derselben Messung vor. Das elektrische Rauschen der Geräte ist nicht korreliert und die Pegel summieren sich quadratisch, wobei sich die Pegel der deterministischen Messsignale linear aufaddieren. Dies bringt eine Verbesserung der SNR von $\sqrt{n}$ bei n Messdurchgängen. Bei der ohnehin langen Messdauer für Arraymessungen wird aber bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen aus praktischen Gründen hierauf verzichtet.

Müller schlägt absolute SNR-Werte für die Messung akustischer Parameter von minimal 65dB SPL, für die RIR-Messung zur Auralisation für Musikmaterial von minimal 90dB SPL, vor (vgl. [Mü08], S. 1124). Für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messungen beträgt der Schalldruckpegel ca. 104 db SPL.

Effektivität und Scheitelwert

Um mit einem hohen Effektivwert ein ausreichendes SNR zu erreichen, eignen sich für die Messung Signale mit geringem Scheitelfaktor C (*crest factor*). Der Scheitelfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen Spitzenwert oder Scheitelwert $\hat{x}$ und Effektivwert x_{eff} :

$$C = \frac{\hat{x}}{x_{eff}}; \tag{2}$$

wobei der Effektivwert

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \tag{3}$$

als quadratische Mittelung eine leistungsbezogene Größe darstellt (vgl. [Wei08], S.10f).

Im Fall der Wiedergabe über Messlautsprecher, die hinsichtlich Verzerrungen in ihrer maximalen Aussteuerung beschränkt sind, wird deshalb ein geringer Scheitelfaktor angestrebt, um das Signal für die Messung mit maximal möglicher Energie einzuspeisen.

Anregungsspektrum

Im Verleich zu einem Signal mit weißem Spektrum, in dem alle Frequenzen gleich stark enthalten sind, nimmt der der Pegel für Signale mit rosa Rauschen im Frequenzbereich um 3dB pro Oktave ab. Für raumakustische Messungen eignen Signale mit einem rosa Spektrum besser als Signale mit einem weißen Spektrum, da das elektrische Grundrauschen von Mikrofonen und Lautsprechern in der Regel

näherungsweise ein rosa Spektrum hat. Ein weißes Spektrum im Anregungssignal hätte zur Folge, dass für tiefe Frequenzen das SNR im Vergleich zu hohen Frequenzen schlechter ist. Hinzu kommt, dass bei weißen Spektren der Hochtöner des Messlautsprechers unnötig belastet würde (vgl. [Hul04], S.104). Abbildung 3 zeigt den Unterschied zwischen einem weißen und einem rosa Anregungssignal (linearer bzw. logarithmischer Sweep) im Vergleich zum Frequenzspektrum eines Mikrofons.

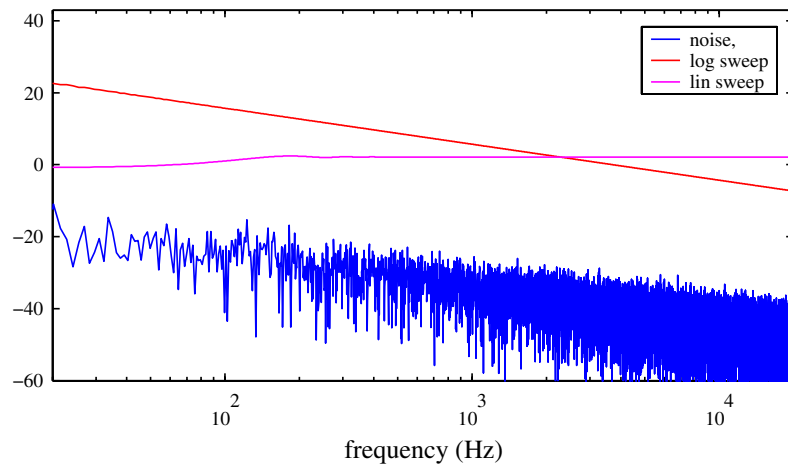


Abbildung 3: Frequenzspektren des linearen und logarithmischen Sweeps im Vergleich zum typischen Frequenzspektrum eines Mikrofons [Hul04], S.104

Für den logarithmischen Sweep ist das SNR also im Frequenzbereich konstanter (ca. 40dB), für den linearen Sweep ist es für tiefe Frequenzen bei nur 20dB.

Pseudoräuschen

Weißes Pseudoräuschen ergibt sich, wenn ein flaches Frequenzspektrum in den Zeitbereich transformiert wird und dabei die Phase randomisiert wird. Pseudoräuschen ist im Unterschied zu Rauschen ein deterministisches Signal und hat eine rechteckige Amplitudendichteverteilung. Rauschen mit einer Gauß'schen Amplitudendichteverteilung enthält viele Frequenzkomponenten nahe Null und eignet sich daher nicht für akustische Messzwecke. Außerdem garantiert die rechteckige Amplitudendichteverteilung einen geringeren Scheitelfaktor (vgl. [Mü08], S.1098).

Wegen den oben genannten Vorteilen eines rosa Frequenzspektrums für akustische Messungen kann das Pseudoräuschen mit -3dB/Oktave gefiltert und so als rosa Pseudoräuschen verwendet werden.

Maximum Length Sequence (MLS)

Das MLS-Signal ist binär, es nimmt nur zwei Amplitudenzustände an und hat ein perfekt flaches Frequenzspektrum. Für RIR-Messungen wird es auch mit rosa Spektrum eingesetzt. MLS-Signale haben prinzipiell einen Scheitelfaktor von 0dB, wären also ideal für RIR-Messungen geeignet. In ihrer digitalen Form steigt ihr Scheitelfaktor aber auf 7-8dB, da die Anti-Aliasing-Tiefpassfilter für das Oversampling in D/A-Wandlern, über die es eingespeist wird, Überschwinger erzeugen (vgl. [Mü08], S.1104).

Ein weiterer Nachteil des MLS-Signals ist, dass seine Länge keinen Zweierpotenzen entspricht, die aber für die Anwendung von FFT-Algorithmen notwendig ist. Die Verarbeitung von MLS-Signalen mittels FFT ist deshalb problematisch [Mü08], S.1114.

Sweeps

Bei SweepSignalen entfällt die Bindung an die Länge einer Zweierpotenz. Sie werden für die FFT einfach bis zur nächsten Zweierpotenz mit Nullen aufgefüllt. Der lineare Sweep hat ein weißes Spektrum, der logarithmische ein rosa Spektrum. Da sich, wie oben erwähnt, Signale mit einem rosa Spektrum besser für raumakustische Messungen eignen, wird im folgenden nur noch auf den logarithmischen Sweep Bezug genommen.

Die Synthesgleichung eines logarithmischen Sinus-Sweeps basiert auf dem logarithmischen Anstieg der Frequenz im Zeitbereich [MM01], S.32f:

$$\frac{\log(f_2/f_1)}{T_2 - T_1} = \text{const.} \quad (4)$$

Im Zeitbereich kann der logarithmische Sweep daher mittels einer iterativen Phasenerhöhung synthetisiert werden

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi + \Delta\varphi \\ \Delta\varphi &= \Delta\varphi \cdot 2^{\frac{\log_2(f_{stop}-f_{start})}{N}}, \end{aligned} \quad (5)$$

wobei φ die Phase, N die Anzahl der generierten Samples und f_{start} bzw. f_{stop} die unterste bzw. oberste Messfrequenz bezeichnet.

Mittels der über die Zeit ansteigende Phase wird dann im Zeitbereich das Anregungssignal $A\sin(\varphi)$ synthetisiert.

Die Konstruktion im Zeitbereich führt allerdings zu einer Verfärbung des Frequenzspektrums um f_{start} bzw. f_{stop} . [MM01] empfiehlt daher eine Konstruktion des logarithmischen Sweeps im Frequenzbereich.

Der logarithmische Sweep hat im Bezug auf raumakustische Messungen zudem folgende Stärken (vgl. [Hul04], S. 105):

- Der Sweep hat das beste SNR-Verhalten (siehe Abbildung 3).
- Das Sweep-Signal ist sehr effektiv, es kann im Zeitbereich mit einem Scheitelfaktor von 2, bzw. von 3dB synthetisiert werden (vgl. [Mü08], S. 1099). Es folgen dann die rosa MLS und schließlich das rosa Pseudoräuschen. Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der Effektivität der verschiedenen Anregungssignale.
- Harmonische Verzerrungsprodukte können bei Rauschsignalen nicht vom Messrauschen unterschieden werden. Wegen der logarithmischen Natur des Sweeps treten Verzerrungsprodukte hingegen alle zu einer bestimmten Zeit im Signal auf und können so besser von der RIR getrennt

werden. Die einzelnen Klirrkomponenten tauchen in der RIR zu negativen Zeiten auf, können aber wegen den Periodizitätseigenschaften der FFT in Abhängigkeit der FFT-Länge auch am Ende der RIR auftauchen (vgl. [Hul04], S.105).

Bei der hohen Aussteuerung von Messlautsprechern, wie sie zum Erreichen eines guten SNR nötig ist, können neben Oberwellen auch sogenannte Subharmonische entstehen, die besonders durch Tieftöner hervorgerufen werden. Diese tauchen dann im Zeitbereich in gleicher Entfernung zur Grundwelle, aber in positiver Richtung der Zeitachse, auf. Die halbe Grundwelle befindet sich beispielsweise in gleicher Entfernung zur Grundwelle wie die $k/2$ Komponente, aber eben in positiver Richtung (vgl. [Mü08], S. 1117).

- Sweeps sind auch gegenüber der Zeitvarianz von LTI-Systemen unempfindlicher. Wenn man mit sich bewegenden Mikrofonen arbeitet, ist die Zeitinvarianz für hohe Frequenzen besser als z.B. bei MLS-Folgen, da bei logarithmischen Sweeps hohe Frequenzen in einem zeitlich kürzeren Fenster gemessen werden. Für tiefe Frequenzen spielt dies eine weniger wichtige Rolle. Beim verwendeten Messsystem bleibt dieser Aspekt unbeachtet, da das Mikrofon während der Messperiode in Ruheposition ist.

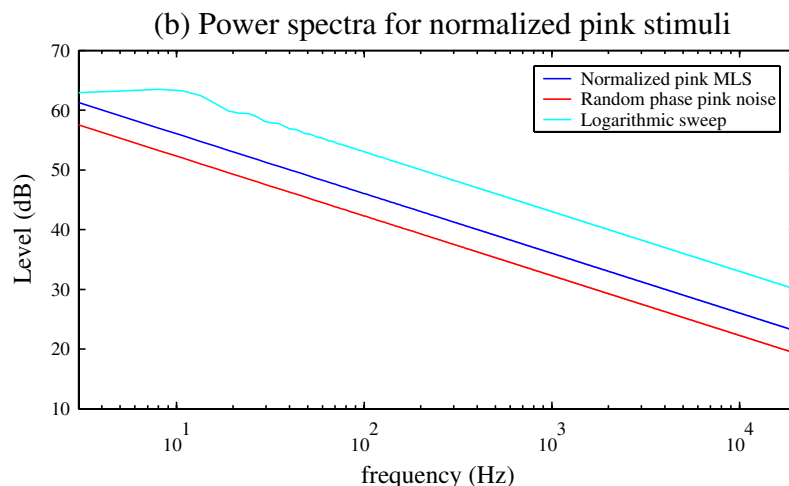


Abbildung 4: Effektivität verschiedener Anregungssignale [Hul04], S.103

Bei der Messung mit Sweeps ist darauf zu achten, dass nach dem Sweep-Signal eine Pause bleibt. Die Stille muss dabei solange anhalten, bis der diffuse Nachhall unter dem Grundrauschen des Raumes verschwindet. Günstigerweise hat der tieffrequente Bereich, mit dem das Sweep-Signal beginnt, normalerweise die längsten Nachhallzeiten, die dann noch während des Aussendens des Sweeps eingefangen werden können (vgl. [Mü08], S. 1114). Es reicht also eine Pause mit der Länge der vorab gemessenen Nachhallzeit zu lassen, da die höchsten Frequenzen am Ende des Sweep-Signals eine weitaus kürzere Nachhallzeit aufweisen.

Details zur Messung und Klirranalyse mit Sweep-Signalen finden sich in [Far00]. Dort wurde das Messverfahren auch erstmals vorgestellt.

Gelegentlich werden für die Impulsantwortmessung auch Sweeps eingesetzt, deren Amplitude zu hohen

Frequenzen hin ansteigt und so die Dissipation in Luft ausgleicht. Diese Signale werden Chirps genannt, finden hier aber keine Verwendung, da ein realistisches Raumbild angestrebt wird.

2.1.2. Zeitliche Trennung der Impulsantwortteile

Der Zeitpunkt, zu dem das frühe Reflektionsmuster in den diffusen Nachhall übergeht, wird in [LKW10] als *Mixing Time* bezeichnet. Das späte Schallfeld zeichnet sich durch eine gleichmäßige Verteilung der akustischen Energie im ganzen Raum und einen richtungsunabhängigen Energiefluss aus. Im Unterschied zum positionsabhängig sehr unterschiedlichen, frühen Reflektionsmuster herrschen also für das späte Schallfeld an allen Punkten im Raum gleiche Schallfeldbedingungen. Es wird dabei zwischen der *Physical Mixing Time* t_m und der *Perceptual Mixing Time* t_{mp} unterschieden, da eine physikalische Gleichverteilung der Schallenergie sich von der wahrgenommenen stark unterscheiden kann. t_{mp} für einen Raum zu kennen ist vor allem in der Raumsimulation wichtig, da ab diesem Zeitpunkt keine Berechnung von Einzelreflektionen mehr nötig ist und daher für die späten Impulsantwortteile Rauschsignale verwendet werden können. Aber auch beim Einsatz von gemessenen RIRs ist die Kenntnis von t_{mp} essentiell, wenn man die einzelnen RIR-Teile getrennt von einander steuern möchte.

Obwohl scheinbar keine direkte Beziehung zwischen der t_m und t_{mp} besteht, wurde basierend auf zahlreichen Hörtests versucht, Regressionsformeln für t_{mp} zu finden, die sich aus akustischen Schallfeldparametern zusammensetzen. [LKW10] diskutiert die verschiedenen Ansätze ausführlich und beobachtet eine Beschränkung der drei wesentlichen Schallfeldparameter Raumvolumen, Raumbegrenzungsfläche und die Nachhallzeit.

Die mit binauralen Impulsantworten durchgeführten Hörtests führen zum Ergebnis, dass für schuhkartonförmige Aufführungsräume t_{mp} am besten durch die mittlere freie Weglänge approximiert werden kann, wobei die mittlere Absorption an den Raumbegrenzungsflächen keinen signifikanten Einfluss hat (vgl. [LKW10], S.15). Die mittlere freie Weglänge ergibt sich als

$$l_m = 4 \frac{V}{S} [m], \quad (6)$$

wobei V das Raumvolumen und S die Summe aller Raumbegrenzungsflächen bezeichnet.

[RJ99] berechnen t_{mp} unter der Annahme, dass das Schallfeld dann als diffus empfunden wird, wenn jeder Schallpartikel mindestens vier Reflektionen vollzogen hat:

$$t_{mp} = 4l_m \frac{V}{S} \frac{10^3}{c_0} = 47 \cdot \frac{V}{S} [ms], \quad (7)$$

wobei c_0 hier für die Schallgeschwindigkeit in Luft steht.

[LKW10] findet keine signifikante Frequenzabhängigkeit t_{mp} , [HYN07] hingegen berechnet t_m auf

Grundlage von 59 Konzertsaalmessungen in Oktavbändern, z.B.

$$t_{m500Hz} = 80 \cdot RT_{500Hz} [ms], \quad (8)$$

wobei RT_{500Hz} die Nachhallzeit RT60 im 500Hz-Band bezeichnet. Die Nachhallzeit RT60 ist als die Zeit definiert, innerhalb derer der Schalldruck nach Abschalten der Schallquelle um 60dB (auf ein Millionstel des ursprünglichen Schalldruckpegels) abfällt.

Als Größe für die wahrgenommene Diffusität in einem Raum wird auch die Reflektionsdichte

$$\frac{dN}{dt} = \frac{4\pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} [ms] \quad (9)$$

herangezogen, für die an verschiedenen Stellen der Literatur Werte zwischen 1000 und 10000 s^{-1} vorgeschlagen werden (vgl. [LKW10]).

Neben der Vorhersage von Werten für t_{mp} mittels raumakustischer Parameter gibt es verschiedene Ansätze für die algorithmische Berechnung von t_{mp} auf Grundlage gemessener RIRs. [LKW10] findet für die Berechnung nach den Ansätzen von [AH06] die besten Ergebnisse. Der Ansatz geht von einer Gauß'schen Amplitudendichteverteilung im diffusen Schallfeld aus und vergleicht diese mit rechteckig gefensterten Sampleblöcken der gemessenen RIR. t_{mp} ergibt sich dann als der Zeitpunkt, zu dem dieses Verhältnis sich mit dem Unterschied einer vorab festgelegten Abweichung 1 nähert. [LKW10] schlägt zudem eine vorherige Mittelung der untersuchten RIR über mehrere Raumpositionen vor.

Die Abhängigkeit von t_{mp} von der Raumposition wird im Allgemeinen vernachlässigt. Besonders für kurzes t_{mp} , wie es für die praktische Verwendung von RIRs in Hallprozessoren oft gewünscht ist, wäre eine weitere Untersuchung des Zusammenhangs von Raumposition und t_{mp} sicherlich aufschlussreich. Eine weitergehende Analyse der gemessenen RIRs zur Bestimmung von t_{mp} übersteigt den Rahmen dieser Arbeit, sollte aber für die weitere Untersuchung von t_{mp} durchgeführt werden.

2.2. Arraymessungen

Als Arraymessung wird der Vorgang bezeichnet, an mehreren Punkten, die in einem bestimmten Verhältnis zueinander angeordnet sind, den Schalldruck bzw. die Schallschnelle zu messen. Mit dieser Information kann anschließend das so gemessene Schallfeld mit gewissen Einschränkungen extrapoliert werden, also für Punkte bestimmt werden, die nicht auf dem Array liegen.

2.2.1. Kreisarraymessung mit Druck- und Schnellempfängern

Hulsebos untersuchte verschiedene Mikrofonanordnungen für die Extrapolation von Schallfeldern für Auralisationszwecke [HVB02]. Er kommt zum Ergebnis, dass sich für die Schallfeldextrapolation

Kreisarrays am besten eigenen, da sich bei Linien- bzw. Kreuzarrays Artefakte von den Arrayenden bemerkbar machen. Als Messmikrofone sind Nierenmikrofone am besten geeignet (vgl. [Hul04], S.89), da sie Informationen über Schalldruck und Schallschnelle liefern können (vgl. [Thi08], S.23).

Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Messung einer ebenen Welle aus 45° mit Druck- bzw. Schnellempfängern. Das idealisierte Schallfeld einer ebenen Welle ist richtungskonstant, es breitet sich nur in einer Richtung aus. In Abbildung 5a sind die Einzelmessungen auf einem Kreisarray mit Druckempfängern nebeneinander dargestellt. Die ebene Welle trifft an den einzelnen Kreispositionen zu unterschiedlichen Zeiten ein. Da die ebene Welle orthogonal zur Messebene des Arrays gewählt ist ergibt sich über die verschiedenen Winkelpositionen der Einzelmessungen ein cosinusförmiger Verlauf.

Abbildung 5b simuliert die gleiche ebene Welle mit Schnellempfängern. Zusätzlich zum zeitlichen Verlauf zeigt sich eine Winkelabhängigkeit im Bezug auf die gemessene Intensität an den Einzelpositionen auf dem Kreisarray. Diese nimmt mit steigender Abweichung von 45° ab und erreicht ihr Minimum bei der gegenüberliegenden Kreisposition (225°). Hier ist der Schnellempfänger blind für die ebene Welle, da sich die Ausbreitungsrichtung der ebenen Welle und die Ausrichtung des Schnellempfängers entsprechen.

2.2.2. Ebene Wellen Zerlegung

Anhand der Druck- und Schnellemessungen auf dem Kreisarray kann das gemessene Schallfeld in ebene Wellen zerlegt werden. Dieser Vorgang wird als Ebene Wellen Zerlegung oder *Plane Wave Decomposition* (PWD) bezeichnet. Die PWD stellt für die Schallfeldextrapolation ein flexibles Format dar, da sie nur richtungskonstante, ebene Wellen enthält, die für die Reproduktion nur entfernungsabhängig angepasst werden müssen (vgl. [HVB02], S. 781).

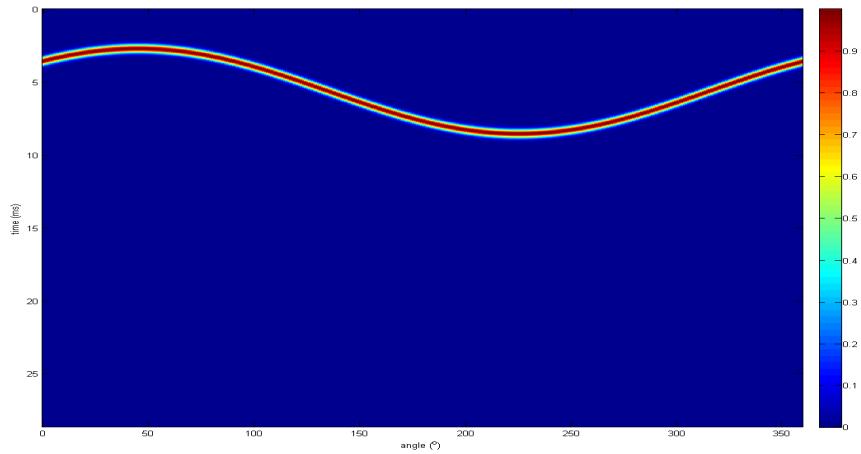
Die PWD verwendet zylindrische Harmonische, die für der Lösung der akustischen Wellengleichung in zylindrischen Koordinaten verwendet werden. Für eine ausführliche Beschreibung der zylindrischen Harmonischen sei auf [Bla00] verwiesen. Detaillierte Herleitungen der akustischen Wellengleichung finden sich an verschiedenen Stellen der Grundlagenliteratur, z.B. [MN75], [ZZ03], [Bla00], [Kut04], mathematische Beschreibungen der PWD bei [HVB02], [Hul04] und [Spo05].

Die Zerlegung in ebene Wellen kann als eine räumliche Fouriertransformation verstanden werden, wobei die ebenen Wellen der zylindrischen Harmonischen die Eigenlösung dieser räumlichen Fouriertransformation sind ([Spo05], S. 19).

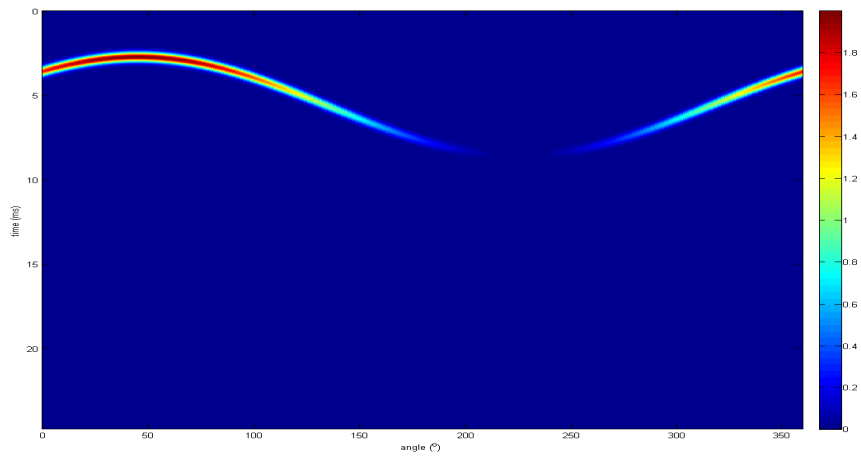
In praktischen Anwendungen der PWD beschränkt die Anzahl der Messpositionen auf dem Kreisarray die Auflösungsgenauigkeit der PWD. Als Artefakte ergeben sich Spatial Aliasing Komponenten, die ab einer von der Messpositionenanzahl abhängigen Frequenz auftauchen.

Spatial Aliasing Artefakte

Abbildung 6 zeigt die zeitliche Fouriertransformation der PWD einer ebenen Welle aus 45° mit verschiedener Anzahl an Messpositionen. Abbildung 6b simuliert die später verwendeten Messbedingungen, es sind ein Kreisradius von einem Meter und 360 Messpositionen gewählt. In diesem Fall tauchen die



(a) Messung mit Druckempfänger



(b) Messung mit Schnellempfänger

Abbildung 5: Simulierte Kreisarraymessung einer ebenen Welle aus 45° mit Druck- und Schnellempfänger; x-Achse: horizontaler Winkel, y-Achse: Zeit

Spatial Aliasing Artefakte ab ca. 10kHz auf. Eine Reduzierung der räumlichen Auflösung auf 256 Positionen bewirkt, dass die Artefakte bereits ab ca. 7kHz auftreten (siehe Abbildung 6a). Eine Erhöhung auf 512 Positionen hat ein Auftreten der Artefakte ab ca. 14kHz zur Folge (siehe Abbildung 6c).

Die Frequenzdarstellungen illustrieren neben den Spatial Aliasing Artefakte auch das Auflösungsverhalten des Kreisarrays für tiefe Frequenzen. Im tieffrequenten Bereich verteilt sich die Energie der ebenen Welle über einen größeren Frequenzbereich, wie der grüne Kreis in Abbildung 6b markiert.

Abbildung 7 zeigt die Aliasing Artefakte anhand einer zeitlichen und räumlichen Fouriertransformation.

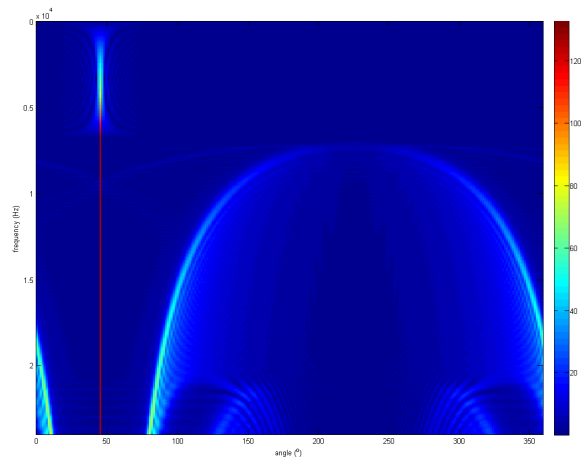
Einen weiteren Einfluss auf die Spatial Aliasing Frequenz hat der Radius des Kreisarrays. Bei größerem Radius ergibt sich ein größerer Abstand zwischen den Messpositionen und die räumliche Auflösung des Arrays nimmt ab. Abbildung 8 zeigt die Spatial Aliasing Artefakte für 360 Messpositionen und einen Radius von 2 Metern. Die Artefakte tauchen dann ab ca. 5KHz auf.

Amplitudenfehler

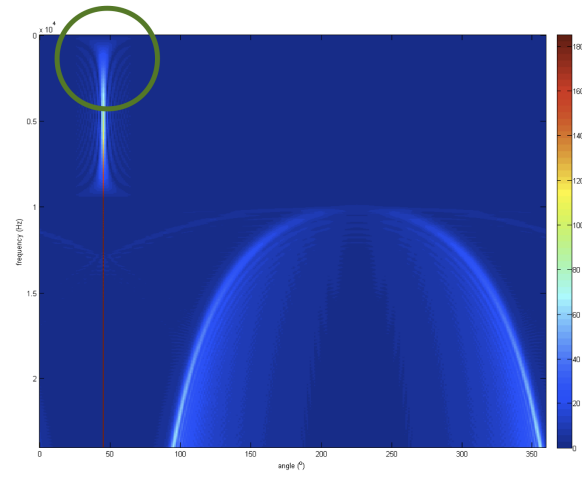
Bei der Verwendung von Kreisarrays für die Messung findet ein zweidimensionales Modell Anwendung für ein dreidimensionales Phänomen. Nimmt man für die Lautsprechenabstrahlung eine Kugelwellencharakteristik an, so gilt für den dreidimensionalen Schallabfall der Impulsantwort im Fernfeld das $1/r$ -Gesetz, im zweidimensionalen Schallfeld fällt der Schalldruck aber proportional zur Wurzel des Radius ab ($\frac{1}{\sqrt{r}}$). Mit der Beziehung $r = c \cdot t$ können die entstehenden Amplitudenfehler bei bekanntem Lautsprecherabstand r durch den Faktor $\sqrt{ct}$ aus der Messung herausgerechnet werden [Hul04], S. 70f.

Außerdem wird es ohne die Information über den Elevationswinkel einer Reflektion unmöglich, zwischen reinen Reflektionen außerhalb des Arrays und Kombinationen von Quellen außerhalb und innerhalb des Arrays zu unterscheiden, [HVB02], S. 787. Decken- und Bodenreflektionen werden bei einer Messung mit einem 2D-Kreisarray immer problematisch sein. Sie können beispielsweise nicht richtungsselektiv extrahiert werden, wie das für eine getrenntes Authoring der ersten Raumreflektionen wünschenswert wäre. Es wurden mittlerweile schon einige Messungen mit Kugelarrays durchgeführt [Sch07] und die Beschränkung auf Kreismessungen ist hier vor allem dem Fehlen einer dreidimensionalen Wiedergabeumgebung geschuldet.

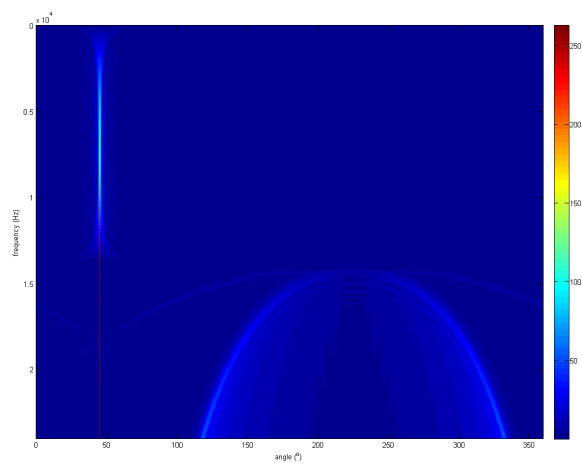
Eine übersichtliche Diskussion der PWD-Artefakte, insbesondere von Spatial Aliasing Artefakten, dem Einfluss von Mikrofonrauschen und nicht-idealer Mikrofoncharakteristik sowie Positionierungsfehlern, findet sich bei [Thi08], S.44ff.



(a) 256 Messpositionen

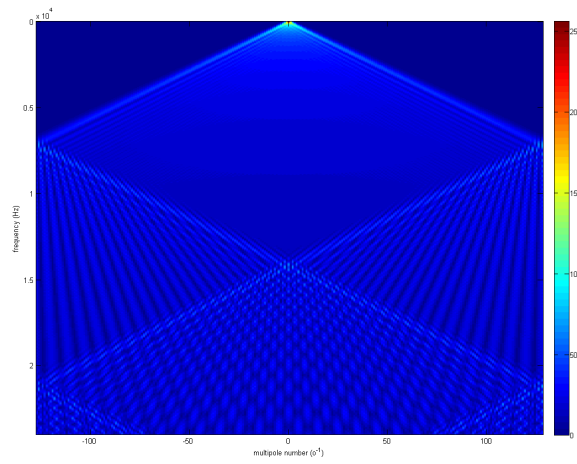


(b) 360 Messpositionen

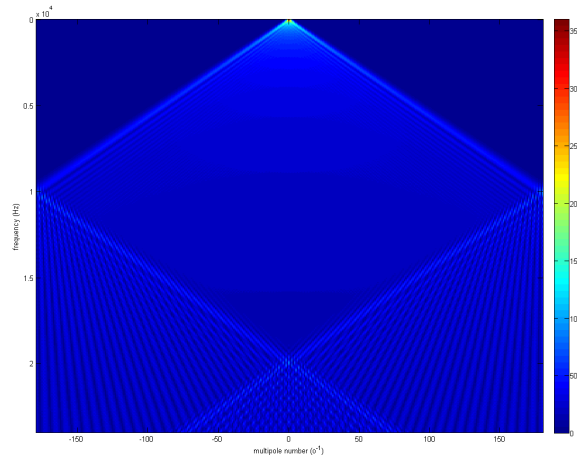


(c) 512 Messpositionen

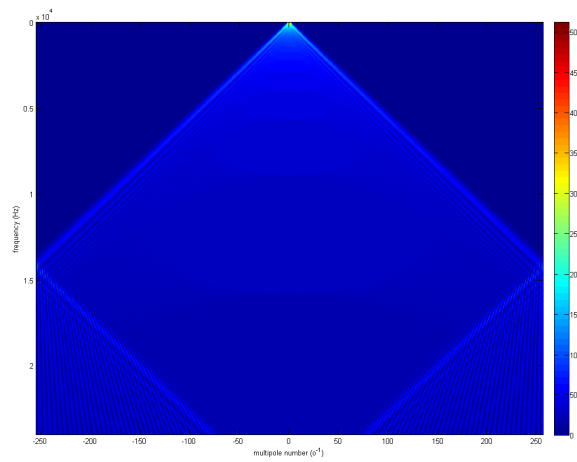
Abbildung 6: Ebene Welle aus 45° im Frequenzbereich mit verschiedener Anzahl an Messpositionen auf dem Kreisarray; x-Achse: horizontaler Winkel, y-Achse: Frequenz



(a) 256 Messpositionen

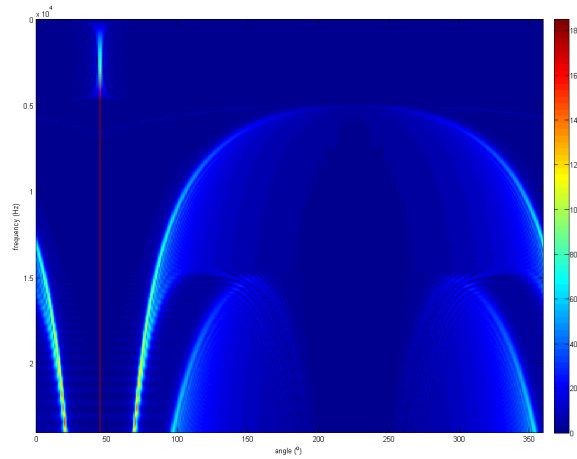


(b) 360 Messpositionen

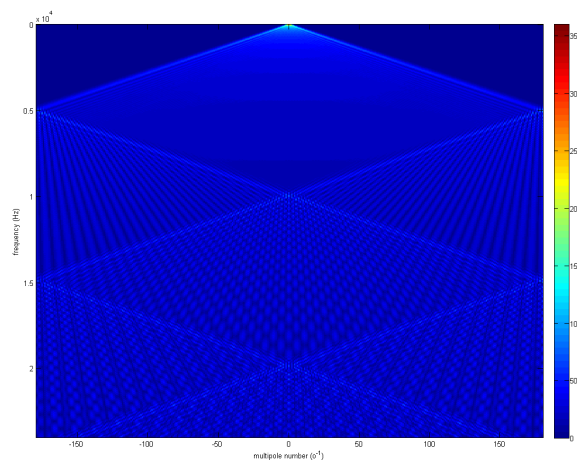


(c) 512 Messpositionen

Abbildung 7: Doppelte Fouriertransformation einer ebenen Welle für 256, 360 und 512 Messpositionen; x-Achse: Auflösung des Kreisarrays (Messpositionen), y-Achse: Frequenz



(a) Ebene Welle Frequenzbereich



(b) Doppelte Fouriertransformation der ebenen Welle

Abbildung 8: Spatial Aliasing Artefakte für ein Kreisarray mit 360 Messpositionen und einen Radius von 2 Metern

3. Messung und Nachbearbeitung der Raumimpulsantworten

3.1. Messung des Kempfner Fürstensaals mit dem Messgerät Varisphear

Messgerät

Das Varisphear Messgerät ist ein Mikrofonarraysystem, mit dem Mehrfachmessungen von RIRs auf Kreis- bzw. Kugeloberflächen vorgenommen werden können. Abbildung 12 zeigt ein Foto des Messgeräts. Die Steuerung des Elektromotors wird durch die Einrichtung von virtuellen COM-Ports realisiert. Die insgesamt vier COM-Ports werden dabei für den Azimuth-Motor, den Elevations-Motor, den Temperatur-Sensor und den Laser-Sensor verwendet. Der Laser ist für die Vermessung des Raums vorgesehen, auf Grundlage dessen dann ein CAD-Modell erstellt werden kann. Die Varisphear Software ist in eine MATLAB-Umgebung implementiert. Abbildung 9 zeigt die Varisphear GUI, wie man sie für die Einstellung der Messparameter vorfindet. Es kann hier z.B. die Anzahl der Messpositionen auf einem Kreis oder auch verschiedene Kugeloberflächenfunktionen als Grundlage für die angesteuerten Messpositionen gewählt werden. Außerdem gibt es die Möglichkeit, in MATLAB eigene Arrays zu schreiben und diese als Gridfiles in das Messmodul einzuladen. In den durchgeführten Messungen wird ausschließlich auf Horizontalkreisen gemessen.

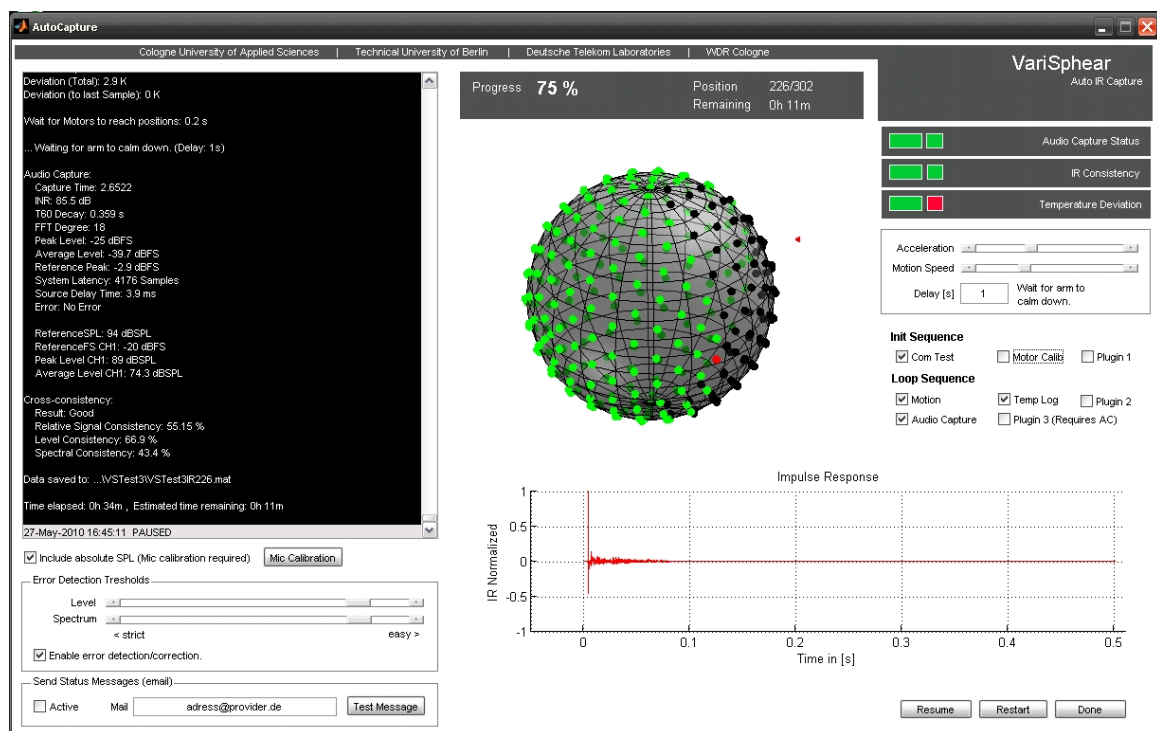


Abbildung 9: Varisphear GUI für den Messdurchgang [Ber10]

Wenn die Messung abgeschlossen ist, lassen sich die einzelnen Impulsantworten im sogenannten Sample Browser überprüfen. Gab es beispielsweise ein Störgeräusch während einer längeren Messung, so können hier die betroffenen Impulsantworten gefunden und die Messung gegebenenfalls wiederholt werden. Hier findet man auch ein Logfile mit allen Parametern der Messung (siehe Abbildung 10).

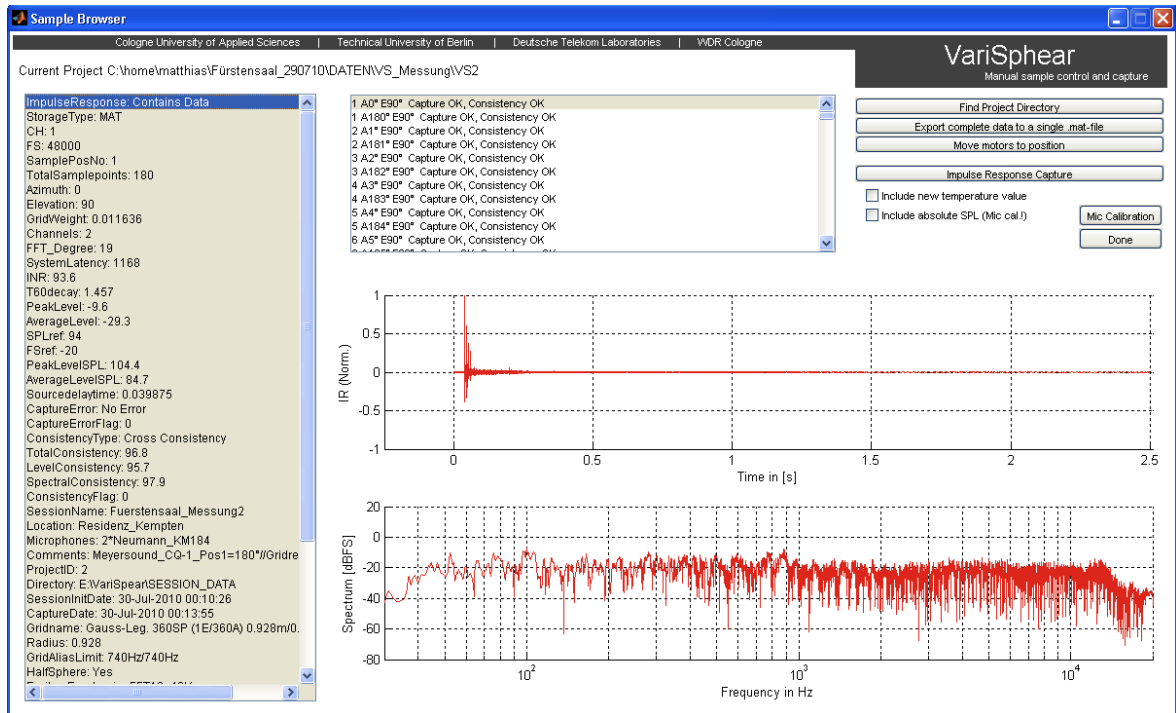


Abbildung 10: Sample Browser der Varisphear GUI [Ber10]

Die Varisphear Software ist momentan auf die MATLAB-Version 2009b beschränkt und funktioniert nur bedingt mit anderen MATLAB-Versionen. Als Betriebssystem kann Windows XP 32bit verwendet werden, eine 64bit-Version der Treiber ist aber für kommende Versionen angekündigt. Allgemein erweist sich das Varisphear Messsystem als sehr intuitiv verwendbar und ist daher für die geplante Raummessung optimal geeignet. Durch die offene Struktur gibt die Software dem Anwender einen leichten Zugang, um an gewünschten Stellen einzugreifen. Die Messdaten liegen anschließend als MATLAB-Files vor und können in dieser Form für die anschließende Nachbearbeitung verwendet werden.

Eine ausführliche Beschreibung findet sich im zugehörigen Manual des Varisphear Messgeräts [Ber10]. Ein vergleichbares Messsystem wurde in [Sch07] vorgestellt.

Saalauswahl

Die maximal mögliche Nachhallzeit, die momentan von der RSM berechnet werden kann, beträgt 3 Sekunden (siehe 4.1.2). Bei der Raumauswahl ist also zunächst wichtig, dass diese nicht überschritten wird. Die Nachhallzeit RT_{60} kann näherungsweise mit der Sabineschen Nachhallformel berechnet werden [Mey03], S. 31f:

$$RT_{60} = \frac{0,163V}{\sum A + 4mV}, \text{ mit } \sum A = \sum \alpha_n \cdot S_n \quad (10)$$

V bezeichnet dabei das Raumvolumen, S die Raumbegrenzungsflächen, m die Dämpfungskonstante für die Dissipationsverluste in Luft (auch *Airabsorption* oder *Airdamping*). Diese beträgt frequenzabhängig bei einer Temperatur von 20° und einer Luftfeuchte von 50 % [Mey03], S.33.

500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,0006	0,0011	0,0022	0,0065

Die Absorptionsgrad α ist material- und frequenzabhängig. Auf der Website der physikalisch-technischen Bundesanstalt in Braunschweig wird ein umfangreiches Dokument mit Absorptionsgraden zum Download bereitgestellt, hieraus stammen die folgenden Absorptionsgrade oder auch Absorptionskoeffizienten für Raummaterialien [PTB], die Werte für „geschlossen sitzendes Publikum“ sind [Sen] entnommen.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Stühle gepolstert, leer	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Grob-Beton - rau	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Grob-Beton - gestrichen	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Glas: 1/4" Platte groß	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Glas: Fenster	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Geschlossen sitzendes Publikum	0,25	0,35	0,42	0,46	0,50	0,50

Für 1000 Hz sagt die Sabinesche Nachhallformel dann für die Raummaße des Fürstensaals $l=27,41\text{m}$, $b=8,88\text{m}$, $h=6,39\text{m}$ mit $\sum A = (2(27,41 \cdot 6,39) + 2(8,88 \cdot 6,39) + 27,41 \cdot 8,88)m^2 \cdot 0,31 + (27,41 \cdot 8,88)m^2 \cdot 0,80 = 707,19m^2 \cdot 0,31 + 243,40m^2 \cdot 0,88 = 256,62m^2$

einen RT60-Wert von

$$RT60 = \frac{0,163 \cdot 1555,33m^3}{256,62m^2 + 4 \cdot 0,0011 \cdot 1555,33m^3} = 0,96s, \quad (11)$$

also knapp einer Sekunde Nachhallzeit für das 1000 Hz Band, voraus. Da für die Berechnung von einer kompletten Bestuhlung als Bodenbelag ausgegangen wird und der Raum einige Fenster enthält, überrascht es nicht, dass die tatsächliche Messung eine etwas längere Nachhallzeit ergibt. Für die Messung wurde der NTI Acoustilizer verwendet, für die Anregung das Zusammenklappen einer Mikrofonkiste.

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1,51s	1,82s	1,62s	1,45s	1,22s	1,07s

Die maximale Nachhallzeit RT60 beträgt 1,82s im 250Hz-Band. Dies liegt noch weit innerhalb der maximalen Implusanwortlänge, die mit der RSM bearbeitet werden kann. Auch in dieser Hinsicht eignet sich der Fürstensaal in Kempten also prinzipiell für eine Messung.

Ob ein Raum 'gut klingt', sich eine Messung für die Auralisation als lohnenswert erweist, ist von

vielen subjektiven Kriterien abhängig. Ein Verfolgen dieser Frage führt unweigerlich in das Feld der Psychoakustik und ist von subjektiven Hörtests begleitet. Es gibt allerdings Versuche, die Raumempfindung zu objektivieren und sogar näherungsweise messbar zu machen, für eine erste Einschätzung der Raumwirkung wird daher kurz auf die Begriffe Klarheit- und Deutlichkeitsmaß (*clarity factor* bzw. *distinctness ratio*) eingegangen.

Die Bestimmung des Klarheitsmaßes geschieht unter der Annahme, dass alle Reflektionen, die bis 80ms nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen, die Klarheit von musikalischen Darbietungen oder von Sprache verbessern, wobei die Reflektionen nach 80ms nach dem Direktschall diese Klarheit in verschlechtern. Dabei entsprechen 80ms dem Abstand zwischen einzelnen 16tel-Noten bei einem Tempo von 180 Schlägen pro Minute, was an der Grenze der spielerischen Ausführbarkeit von akustischen Instrumenten liegt (vgl. [Mey03], S. 51). Das Klarheitsmaß wird also als der Quotient aus der Schallenergie der innerhalb der ersten 80ms eintreffenden und der Schallenergie der nach 80ms eintreffenden Reflektionen definiert (vgl. ebd):

$$C_{80} = 10 \lg \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} dB. \quad (12)$$

Da das Klarheitsmaß extrem positionsabhängig ist und z.B. Reflektionsflächen in der Nähe der Schallquelle das Klarheitsmaß in bestimmte Richtungen maßgeblich verbessern bzw. verschlechtern können, gibt es den Versuch der Definition eines statistischen Klarheitsmaßes, das einen Erwartungswert für das Klarheitsmaß in Abhängigkeit des Abstands zur Schallquelle r , dem Hallradius r_H und der Nachhallzeit RT60:

$$C_{80,stat} = 10 \lg \frac{(r_H/r)^2 + 1 - e^{-1,1s/T_{60}}}{e^{-1,1s/RT60}} dB. \quad (13)$$

Diese ist frequenzabhängig und natürlich auch von der Abstrahlcharakteristik der Schallquelle abhängig. Da die Nachhallzeit für höhere Frequenzen stark nachlässt, ist das Klarheitsmaß für höhere Frequenzen in der Regel besser. Ein empfohlenes Klarheitsmaß für Aufführungsräume liegt für gute Plätze bei zwischen -2 und +1dB; für entferntere Plätze soll es -5dB im 1000Hz-Band nicht unterschreiten (vgl. [Mey03]).

Entsprechend den Definitionen für das Klarheitsmaß, wird das Deutlichkeitsmaß D_{50} definiert, das sich für extrem scharfe musikalische Passagen und für die Textverständlichkeit als sinnvolle Bemessung erwiesen hat. Für das statistische Deutlichkeitsmaß $D_{50,stat}$ werden dann die 1,1s mit 0,7s in der Formel des statistischen Klarheitsmaßes ersetzt.

Meyer weist außerdem darauf hin, dass frühe Reflektionen innerhalb der ersten 30ms zu Klangverfärbungen führen, wobei der kritischste Bereich für verfärbende Reflektionen bei ca. 20ms liegt (vgl. [Mey03], S. 54). Hier finden sich auch weitere Ausführungen zur Sprachverständlichkeit sowie allgemein zu Auswahl- und Bewertungskriterien für Aufführungsräume, auf die an dieser Stelle verzichtet wird.

Ein weiteres objektives Qualitätskriterium ist die Schwerpunktzeit t_s eines Raumes. Sie gibt in Abhängigkeit des Schalldrucks p und der Zeit t an, um welche Zeit der Hauptanteil einer RIR verzögert erscheint [Goe08], S. 93:

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt}, \quad (14)$$

Kleine Werte von t_s bedeuten auch hier eine große Durchsichtigkeit.

Ein Maß für die akustische Umhüllung und wahrgenommene Breite ist der Seitenschallgrad (*lateral fraction*) [Goe08], S. 93:

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_s^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt}. \quad (15)$$

Die 8 steht hier für die achtförmige Charakteristik des Messmikrofons, das quer zur Längsachse des Raums aufgestellt wird und vor allem die Seitenreflektionen einfangen soll. Ein hoher Seitenschallgrad bedeutet, dass der Raum breiter wirkt. Es werden Werte für $LF=12-22\%$ empfohlen. Diese ergeben sich oft für schuhkartonförmige Aufführungsräume, die dann trotz ihrer schmalen Form sehr breit klingen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Reflektionen noch innerhalb der ersten 50ms nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen und nicht als separate Reflektionen wahrgenommen werden, sondern dem Direktschall aus der entsprechenden Seitenrichtung zugeordnet werden. Es entsteht daher in länglichen Räumen in der Regel ein breiteres Schallbild.

3.1.1. Messaufbau

Einen Überblick über die räumlichen Abmaße gibt der Grundriss in Abbildung 11. Die Höhe des Saales beträgt 6,39m, die Messhöhe für Lautsprecher und Mikrofone 2,80m. Die 0°-Richtung zeigt in die Richtung der Frontwand des Saals, wie in der Abbildung an den Lautsprecherpositionen erkennbar ist.

Die verwendeten Messgeräte und deren Verkabelung sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Samplingfrequenz beträgt 48000 Samples/s.

Messlautsprecher

Als Messlautsprecher für die RIRs wird der Meyersound CQ-1 gewählt. Dabei handelt es sich um einen zweiwegigen Fullrangelausprecher mit einer Übergangsfrequenz bei 700Hz. In Abbildung 13 sind einige Spezifikationen des Lautsprechers aufgeführt. Die 136 dB SPL beziehen sich auf den maximalen Schallpegel (*sound pressure level*, SPL), der auf der Achse des Lautsprechers in einem Meter Abstand gemessen wurde. Für die Messungen wurden in einem Meter Abstand des Lautsprechers 117 dB SPL

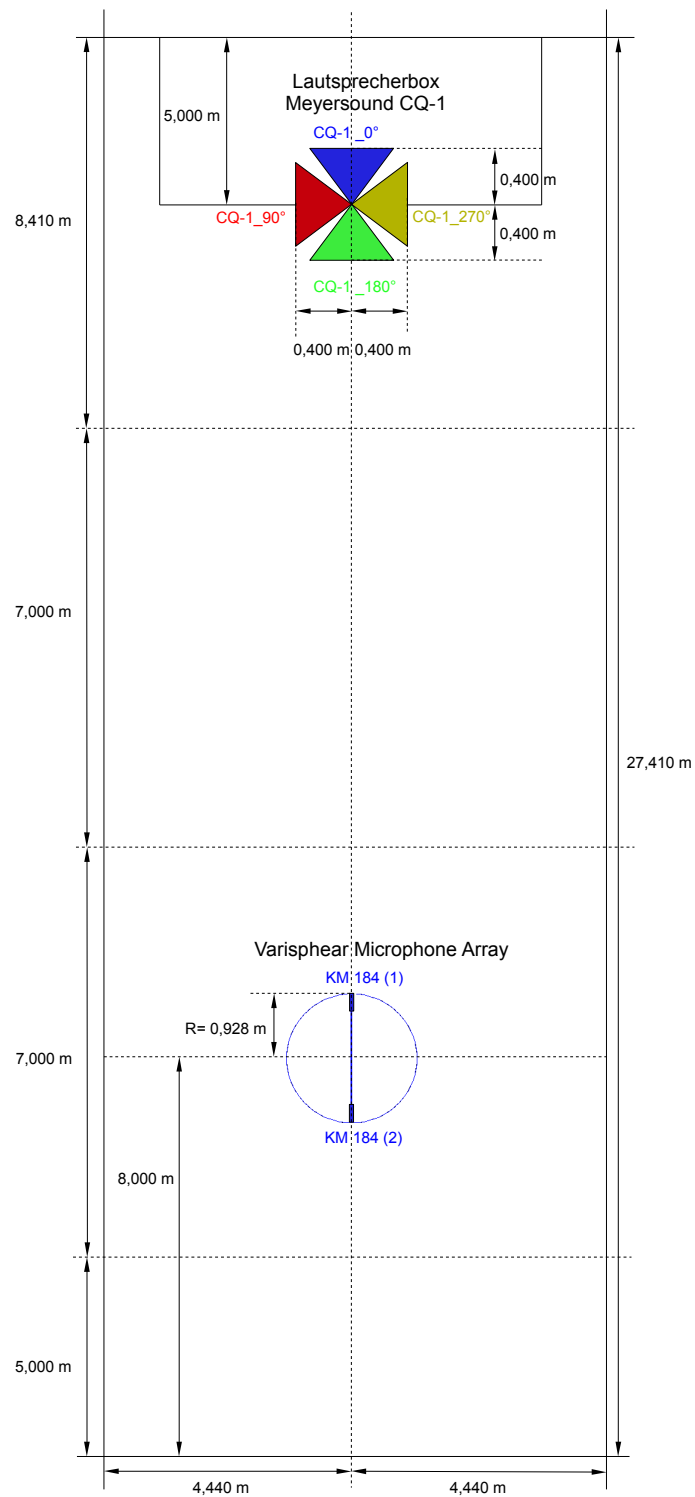


Abbildung 11: Messaufbau im Fürstensaal Kempten

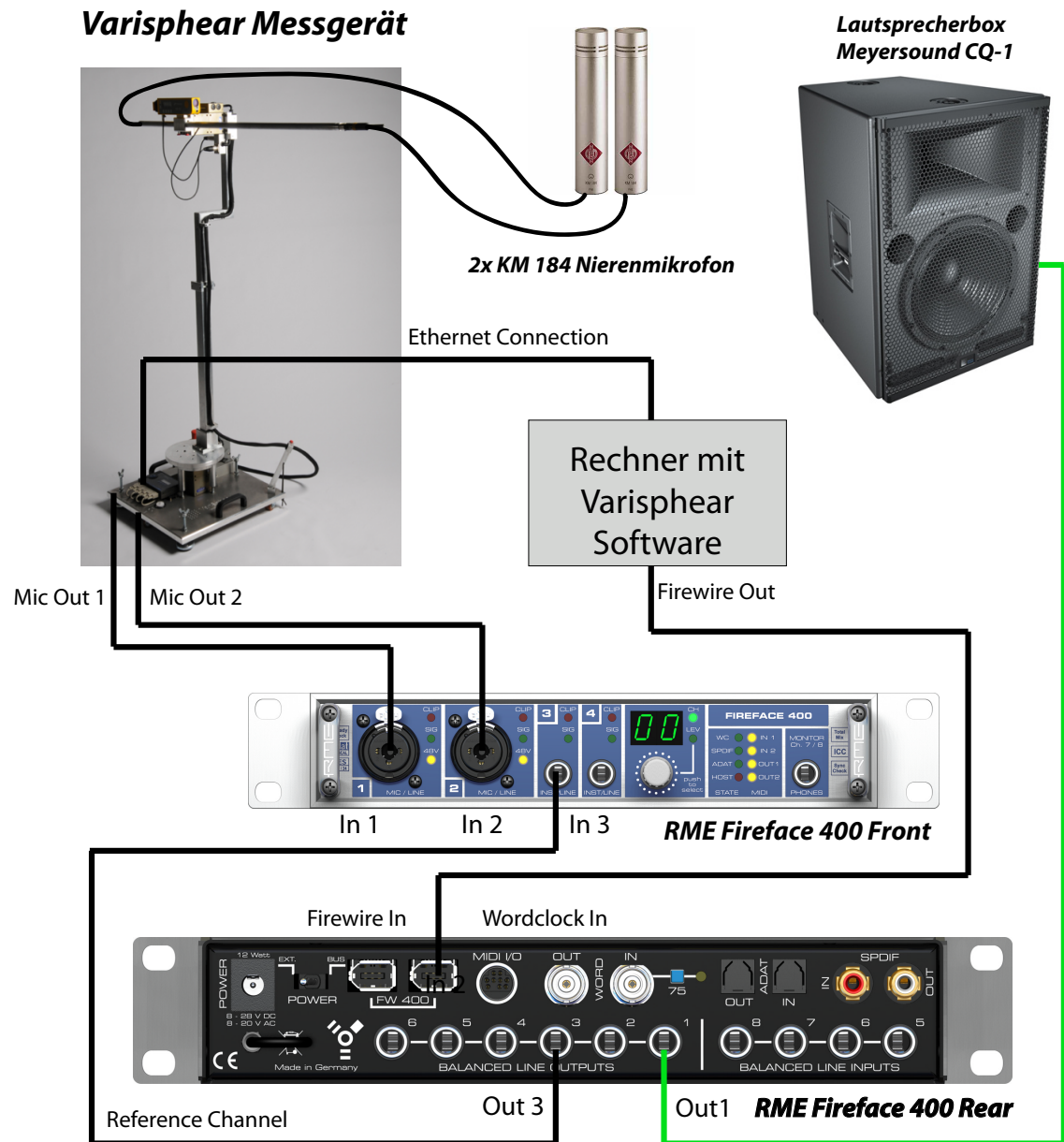


Abbildung 12: Audiosetup für die Messung im Fürstensaal Kempten

ACOUSTICAL	
Operating Frequency Range ¹	35 Hz – 18 kHz
Frequency Response ²	40 Hz – 16 kHz ± 4 dB
Phase Response	50 Hz – 16 kHz $\pm 90^\circ$
Maximum Peak SPL ³	136 dB
Dynamic Range	>110 dB
COVERAGE	
80° Horizontal x 40° vertical	
CROSSOVER⁴	
700 Hz	
TRANSDUCERS	
Low Frequency	One 15" cone driver Nominal impedance: 8 Ω Voice coil size: 3" Power-handling capability: 600 W (AES) ⁵
High Frequency	One 4" diaphragm driver Nominal impedance: 8 Ω Voice coil size: 4" Diaphragm size: 4" Exit size: 1.5" Power handling capability: 250 W (AES) ⁵

Abbildung 13: Spezifikationen des Meyersound CQ-1 nach Herstellerangaben [CQb]

gemessen. Für die 0°-Ausrichtung des Varisphear war der gemessene Schalldruckpegel am Mikrofon bei 104 dB SPL (siehe Abbildung 11).

Der Lautsprecher wird als Wide Coverage Lautsprecher beworben, nach Herstellerangaben hat er einen horizontalen Abstrahlwinkel von 80°. Das heißt, bei einem Winkel von $\pm 40^\circ$ im Bezug auf die horizontale Achse des Lautsprechers der gemessene SPL die Hälfte des auf der Achse gemessenen SPL (-6dB). Abbildung 14 zeigt die Polardiagramme des CQ-1 in Oktavbändern und einer Winkelauflösung von 2°. Gemessen wurde in 1/24-Oktav-Auflösung, 1° Winkelauflösung und einem Abstand von 14ft (ca. 4.27m) [CQa].

Eine Darstellung der horizontalen und vertikalen akustischen Achse findet sich in Abbildung 15. Gemäß diesen Angaben wird der Lautsprecher in die Messebene im Fürstensaal gestellt (siehe Abbildung 11).

Im Rahmen der Arbeit wurde keine Vermessung des verwendeten Lautsprechers durchgeführt. Diese wäre aber für die Vorentzerrung des Anregungssignals bzw. eine anschließende Entzerrung der RIRs für zukünftige Messungen sicher lohnenswert.

Messmikrofone

Es werden zwei Neumann KM184 als Messmikrofone verwendet, deren Frequenzgang in Abbildung 16 und deren Polardiagramme in Abbildung 17 dargestellt sind.

Zwar hat das empfohlene DPA 4011-TL einen geringfügig lineareren Frequenzgang, da für die Messung aber zwei KM184 verfügbar waren, konnten so mit dem Dual Sphere Mode des Varisphear immer gleich zwei Mikrofonpositionen gemessen werden, was die Messdauer auf die Hälfte verkürzte.

3.1.2. Messdurchführung

Abbildung 18 zeigt einen Blick von der Bühne in den Fürstensaal der Residenz Kempten. Abbildungen 19 und 20 zeigen die aufgestellte Box und das Varisphear Messgerät im Saal.

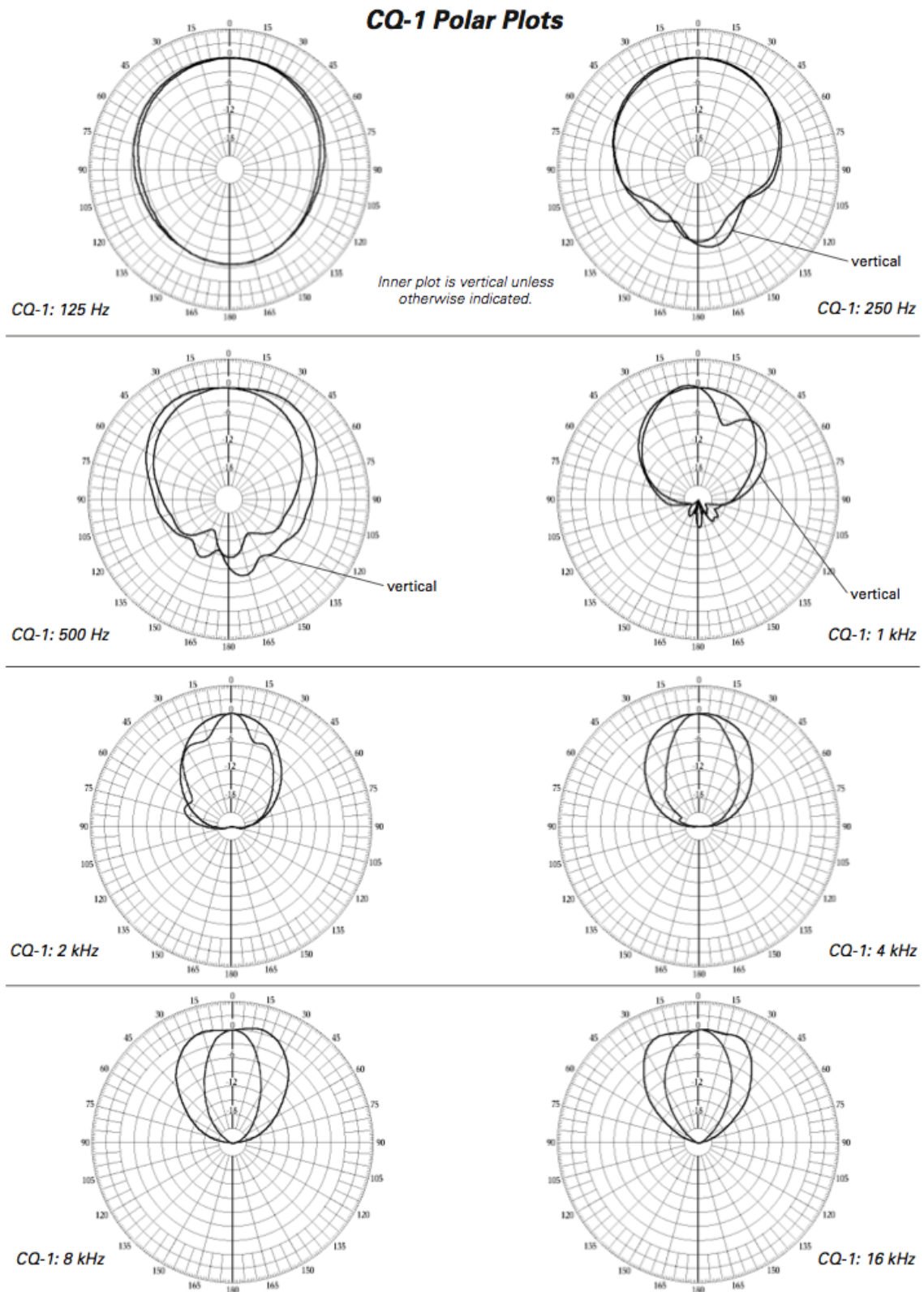


Abbildung 14: Polardiagramme des Meyersound CQ-1 nach Herstellerangaben [CQa]

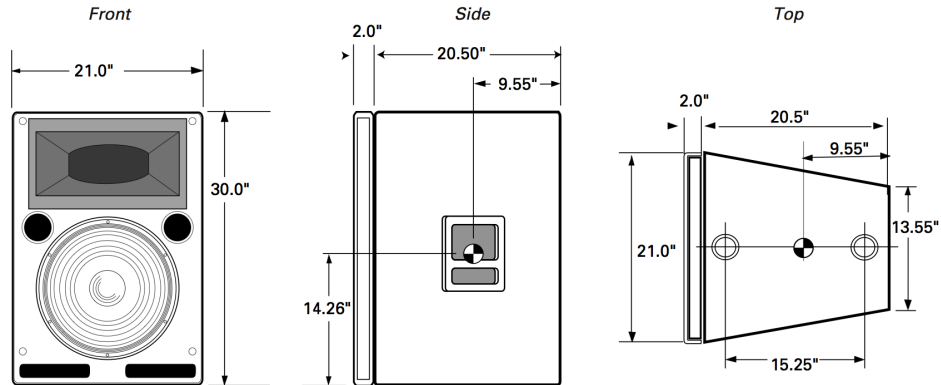


Abbildung 15: Horizontale und vertikale akustische Achse des Meyersound CQ-1 (Angaben in Inches) [CQa]

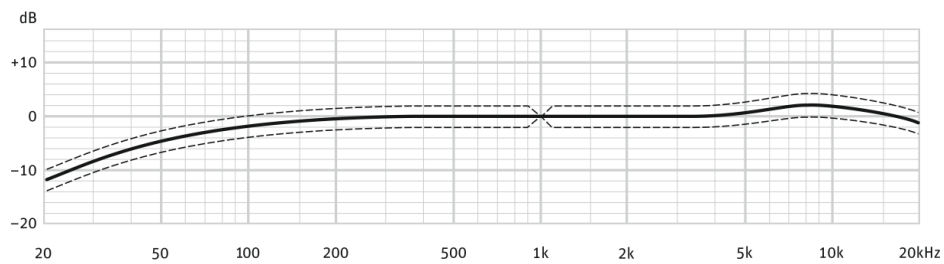


Abbildung 16: Freifeldfrequenzgang des Neumann KM184 nach Herstellerangaben [KM1]

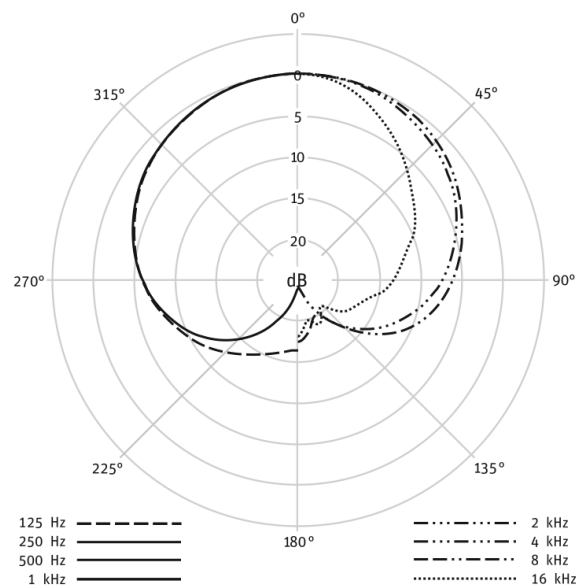


Abbildung 17: Polardiagramm des Neumann KM184 nach Herstellerangaben [KM1]



Abbildung 18: Fürstensaal der Residenz Kempten, eigenes Foto

3. Messung und Nachbearbeitung der Raumimpulsantworten



Abbildung 19: Meyersound CQ-1 im Fürstensaal, eigenes Foto



Abbildung 20: Varisphear Messgerät im Fürstensaal, eigenes Foto

Es wurden insgesamt fünf Messungen durchgeführt. Für die ersten vier Messungen beträgt die Winkelauflösung 1° , sodass nach dem Messdurchgang 360 Impulsantworten an unterschiedlichen Kreispositionen vorliegen. Die Messungen werden für vier verschiedene Lautsprecherorientierungen durchgeführt (siehe Abbildung 11). Bei der fünften Messung wird die Anzahl der Messpositionen auf 512 erhöht, wodurch eine Abnahme der Spatial Aliasing Artefakte erreicht werden soll. Die Messdauer für eine Messung beträgt für 360 Positionen ca. 45min, für 512 Positionen ca. 60min.

Bei den vorhergehenden Probemessungen gab es Probleme mit dem MATLAB-internen Arbeitsspeichermanagement für die Messungen. MATLAB gab den für die Einzelmessungen nötigen Speicher nach der Einzelmessung nicht frei und das Memoryleak führte so zum Abbruch der Messung. Das Problem konnte durch ein Software Update gelöst werden. Als sehr hilfreich stellte sich hierbei die Verwendung der integrierten Plugins heraus. Eigene MATLAB-Skripte werden in einen der drei möglichen Plugincontainer geschrieben und nach jeder Einzelmessung ausgeführt.

3.2. Nachbearbeitung der durchgeführten Arraymessungen

Die folgende Nachbearbeitung der RIRs wird ebenfalls in MATLAB durchgeführt, hier sind auch alle Plots erstellt. Ein Großteil des Skripts für die Nachbearbeitung bestand bereits zu Beginn der Arbeit. Eigene Änderung und selbst geschriebene Skriptteile wurden auf Grundlage von Funktionen aus dem Repository der IOSONO GmbH und unter Zuhilfenahme der internen Dokumente [HB09] und [Mel09] erstellt.

Abbildung 21 zeigt einen Überblick der gesamten Nachbearbeitung der RIRs bis hin zum fertigen Preset für die RSM.

3.2.1. Entfernung des Predelays

Nach dem Import in MATLAB wird zunächst für alle RIRs das Predelay entfernt, das durch die Entfernung vom Lautsprecher zum Messmikrofon entstand und hier ca. $14,41 \cdot 3 = 43,23[ms]$ beträgt. In Abbildung 22 findet sich die erste RIR der Messung bei 0° , bei der das Predelay bereits entfernt wurde.

3.2.2. Entfernung des Direktschalls

Da in Audiotbearbeitungsprogrammen in der Regel der Direktschall getrennt vom Hallsignal gesteuert werden und deshalb nicht in der RIR enthalten sein soll, wird der Direktschall mithilfe einer Fensterfunktion aus allen RIRs entfernt. Abbildung 23 zeigt die RIR bei 0° vor und nach der Entfernung des Direktschalls.

Abbildung 24 zeigt alle 360 RIRs der Messung mit einer Lautsprecherorientierung von 180° bis $85ms$. Hier sind die frühen Reflektionen gut erkennbar.

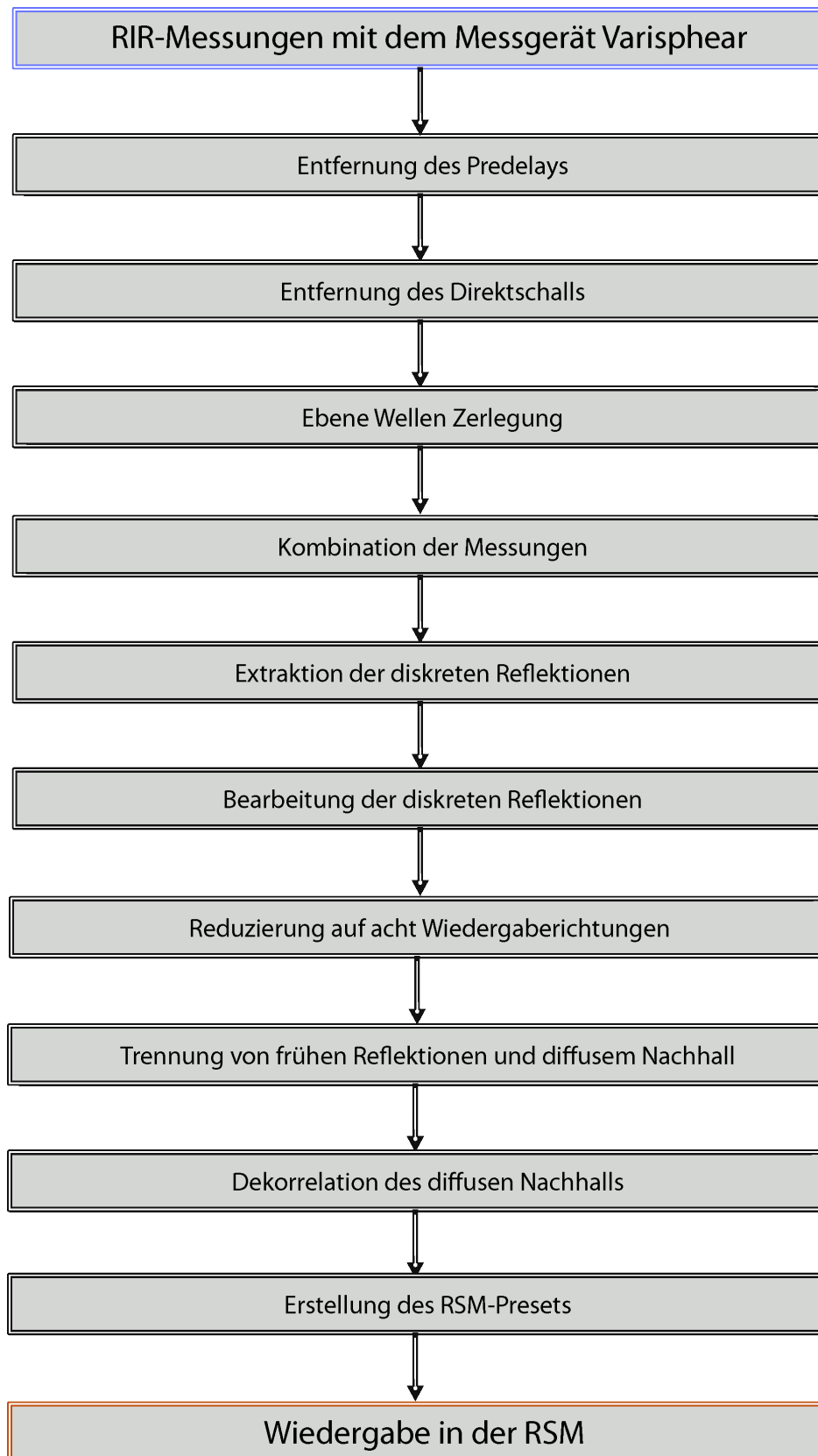


Abbildung 21: Überblick der RIR-Nachbearbeitung

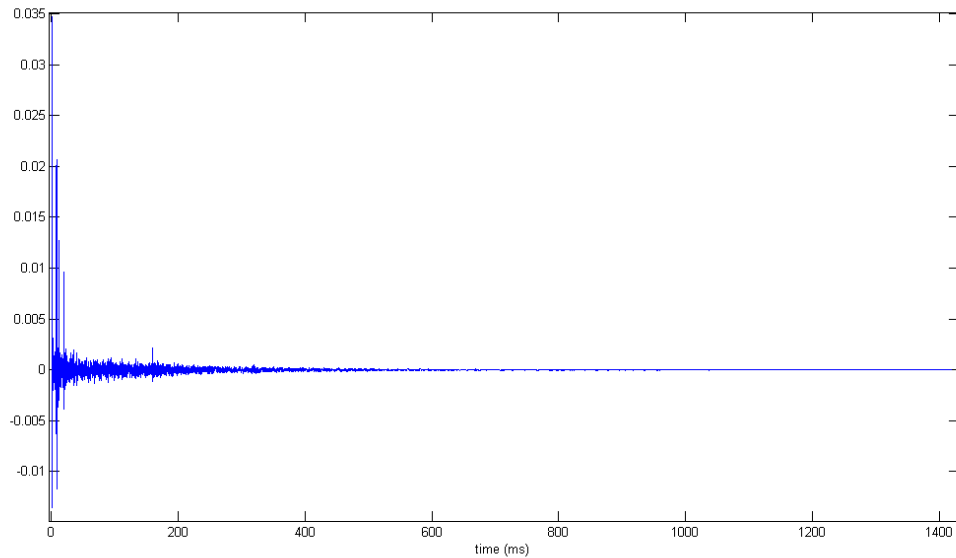


Abbildung 22: RIR bei 0° ohne Predelay

3.2.3. Ebene Wellen Zerlegung

Im nächsten Schritt werden alle Messungen in ebene Wellen zerlegt. Abbildung 25 zeigt die Ebene Wellen Zerlegung (PWD) der Messung mit einer LautsprecherAusrichtung von 180° bis 85ms, Abbildung 26 die PWD der gleichen Messung mit einem etwas längeren Ausschnitt bis 341ms.

3.2.4. Kombination der Messungen

Wegen der stark richtenden Abstrahlcharakteristik des verwendeten Meyersound CQ-1 Lautsprechers wurden vier Messungen mit unterschiedlichen LautsprecherAusrichtungen im Winkelabstand von 90° durchgeführt (vgl. Abbildung 11). Für die Quellen in der Spatial Audio Workstation wird ein Punktschallquellenmodell verwendet, das heißt die Quellen haben näherungsweise eine kreisförmige Abstrahlcharakteristik, was auch für die Verhallung übernommen werden soll.

Für tiefe Frequenzen bis ca. 700Hz hat der Lautsprecher eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik. Ab dieser Frequenz richtet der Lautsprecher zunehmend, wie in Abbildung 14 zu erkennen ist. Es werden deshalb alle vier Messungen mit unterschiedlicher LautsprecherAusrichtung hochpassgefiltert, nur eine Messung wird tiefpassgefiltert. Anschließend werden alle Messungen aufaddiert. Die Filterung wird so vorgenommen, dass sich bei der Addition der Messungen ein linearer Crossfade ergibt. Der Vorgang ist in Abbildung 27 schematisch dargestellt und findet in der Ebenen Wellen Domäne statt.

Abbildung 28 zeigt die resultierende PWD als Kombination aller vier Messungen.

Direktschall

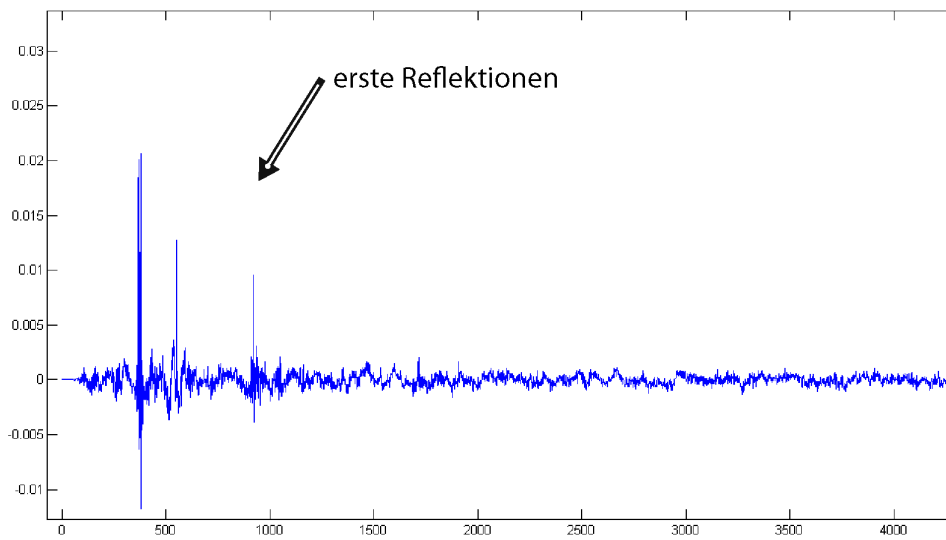
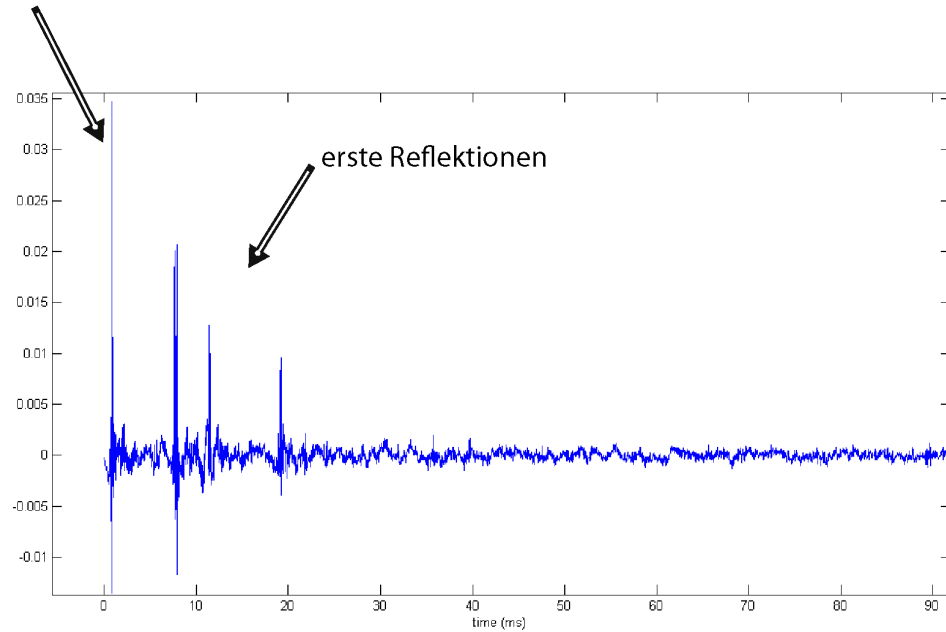


Abbildung 23: Einzelne RIR vor und nach der Entfernung des Direktschalls

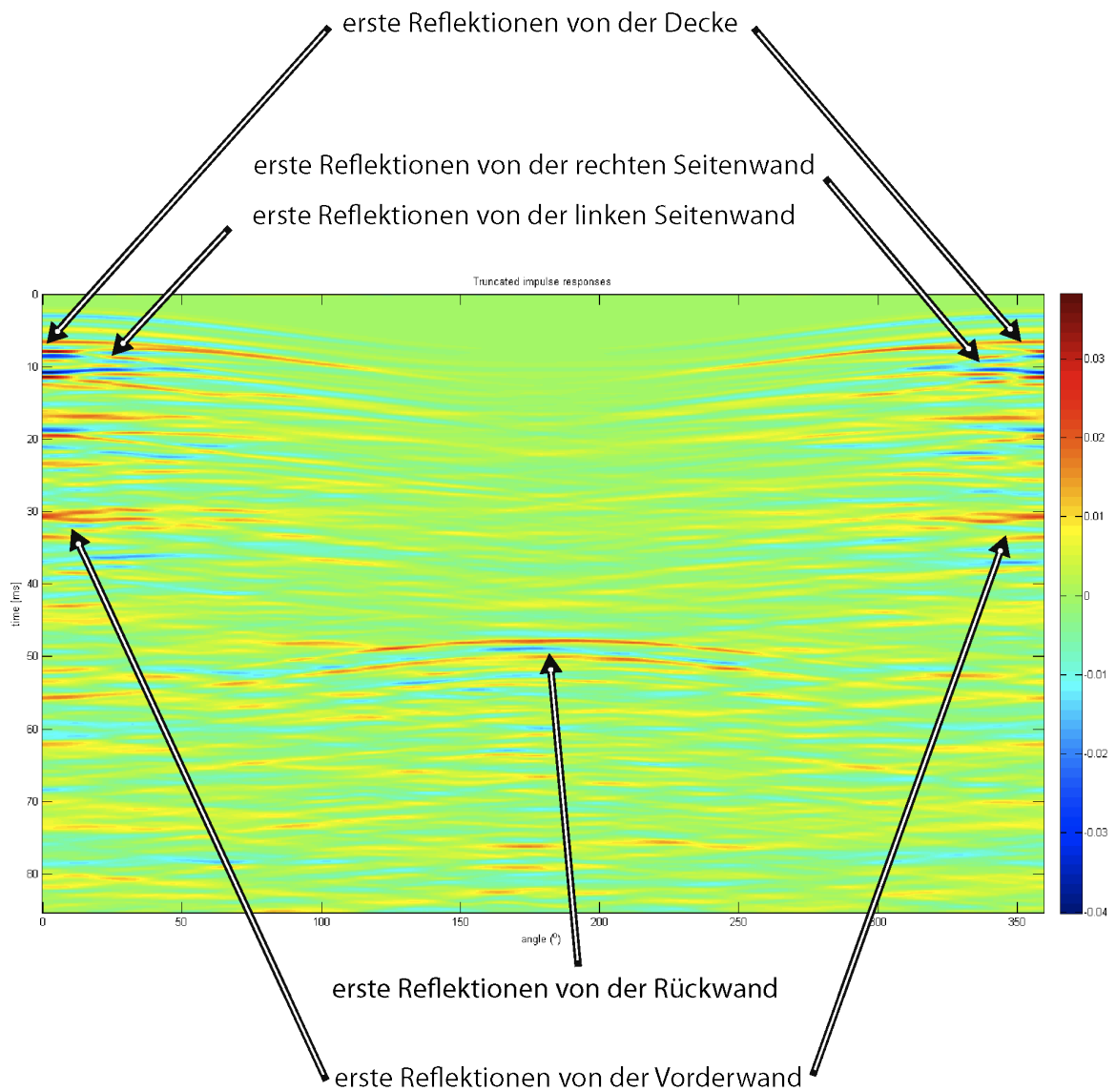


Abbildung 24: 360 RIRs der Messung mit einer Lautsprecherausrichtung von 180° bis 85ms

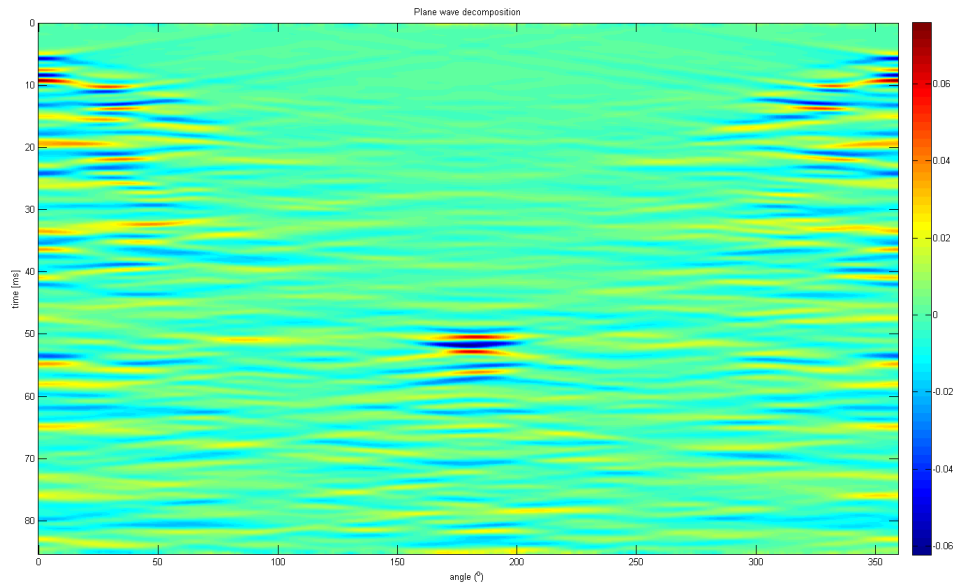


Abbildung 25: PWD der Messungen mit einer Lautsprecherausrichtung von 180° bis 85ms

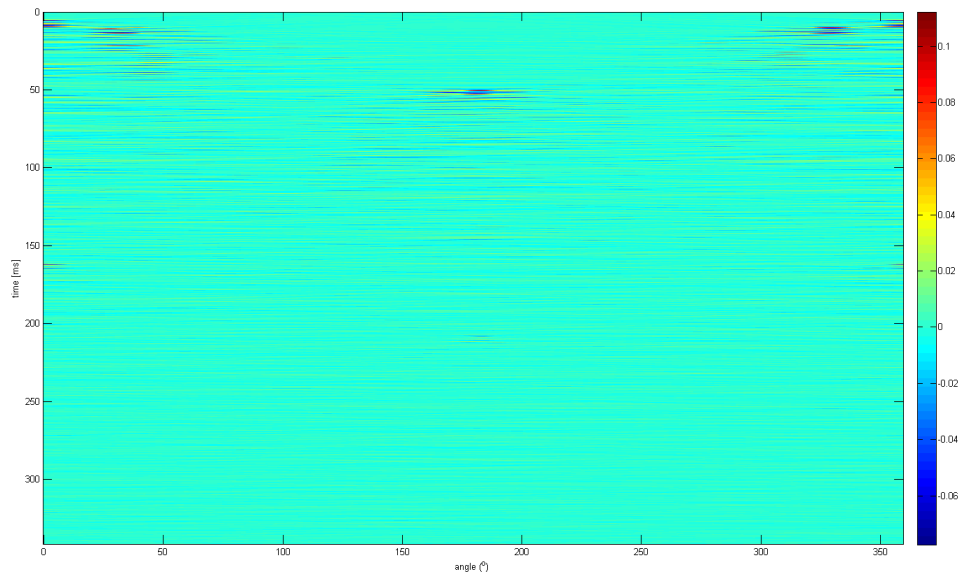
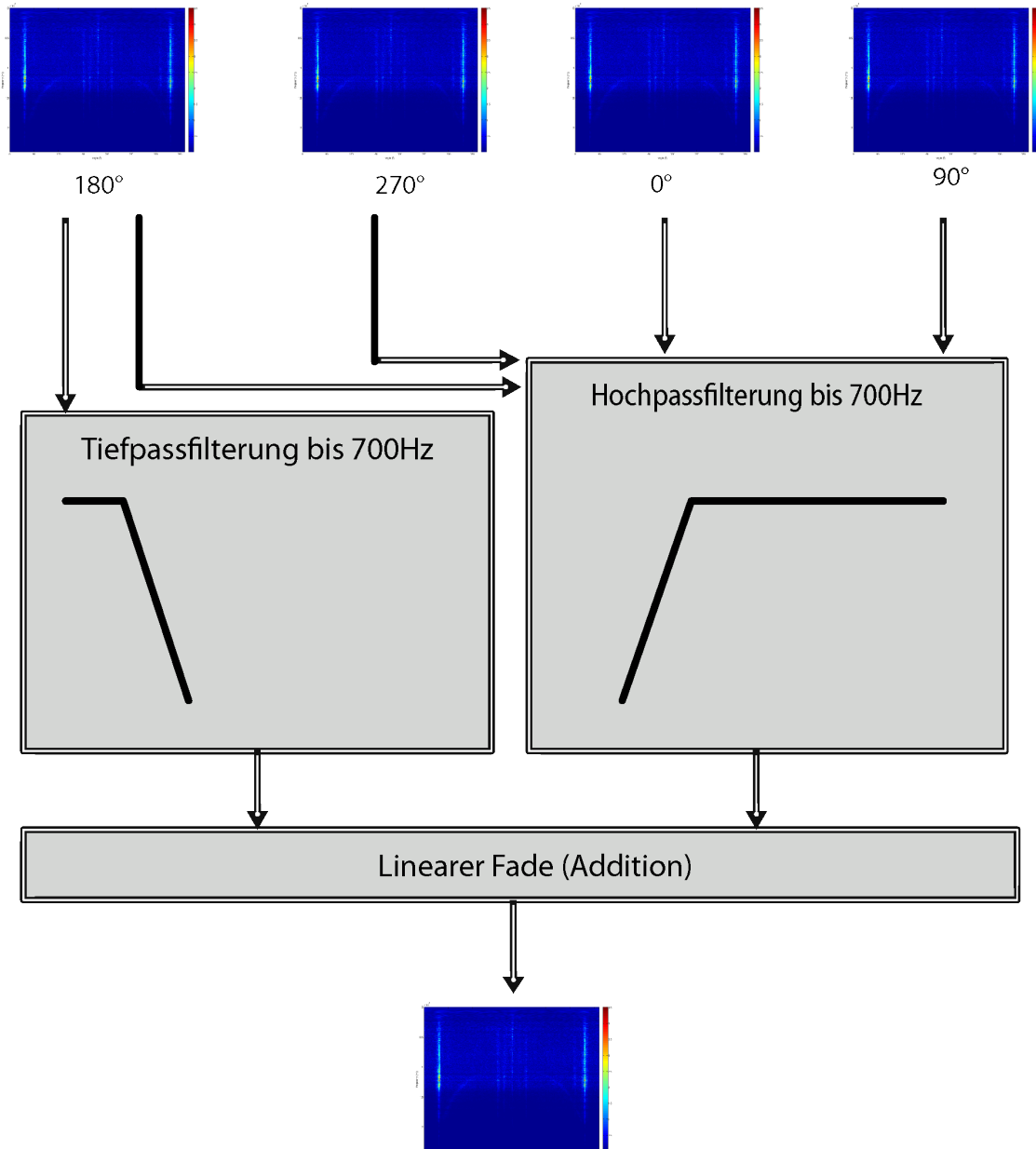


Abbildung 26: PWD der Messung mit einer Lautsprecherausrichtung von 180° bis 341ms

Messungen mit verschiedenen Lautsprecherausrichtungen in der Ebenen Wellen Domäne



Kombinierte PWD für alle Lautsprecherausrichtungen

Abbildung 27: Kombination der vier Messungen mit unterschiedlichen Lautsprecherausrichtungen in der Ebenen Wellen Domäne

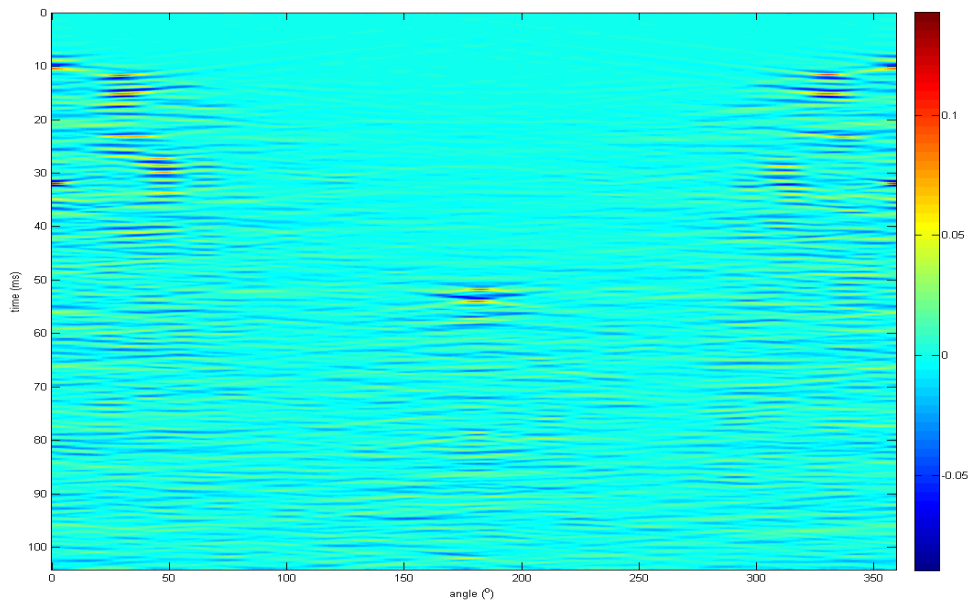


Abbildung 28: PWD der vier kombinierten Messungen

3.2.5. Extraktion der diskreten Reflektionen

Die RSM bietet eine Funktion für die getrennte Steuerung der Raumreflektionen erster Ordnung (Discretes). Da es sich um eine Horizontalmessung handelt, sind dies die rechte und linke Seitenreflektion, sowie die Reflektionen von der Vorder- und Rückwand. Sie sollen im nächsten Schritt in der Ebenen Wellen Domäne von den Reflektionen höherer Ordnungen separiert werden.

Die Discretes sind in der PWD deutlich erkennbar und befinden sich bei ca. 0° , 30° , 180° und 330° . Allerdings handelt es sich bei den allerersten Reflektionen innerhalb der ersten 10ms bei 0° um die Reflektionen der Saaldecke. Die horizontale Ebene, in der gemessen wurde, war mit 2,80m relativ hoch. Die Decke des Raumes war deshalb mit $6,39\text{m} - 2,80\text{m} = 3,59\text{m}$ für die Messungen bei 0° näher am Mikrofon als die Seitenwände. Man sieht daher die Decken- und hohe Seitenwandreflektionen einige Millisekunden früher eintreffen als die Seitenwandreflektionen bei 30° bzw. 330° (siehe Abbildung 24). Mit der Faustregel für die Schallgeschwindigkeit von ca. 3ms pro Meter erkennt man in der PWD diesen Unterschied von ca. 3ms zwischen Decke und Seitenwand. Die Bodenreflektion ist wegen der Bestuhlung des Saales so stark gedämpft, dass sie im frühen Reflektionsmuster untergeht und deshalb nicht berücksichtigt wird.

Da das verwendete Wiedergabesystem auf zwei Raumdimensionen beschränkt ist, wird die Deckenreflektion ignoriert. Das bedeutet, sie wird mit den anderen Reflektionen herausgefenstert, aber nicht in das Hall-Preset übernommen. Abbildung 29 zeigt die gefensterten diskreten Reflektionen von Saalwänden und -decke.

Anschließend wird diese Matrix invertiert und von der gesamten PWD abgezogen, sodass die PWD in Abbildung 30 übrig bleibt. Es sind hierin nur noch Reflektionen höherer Ordnungen enthalten.

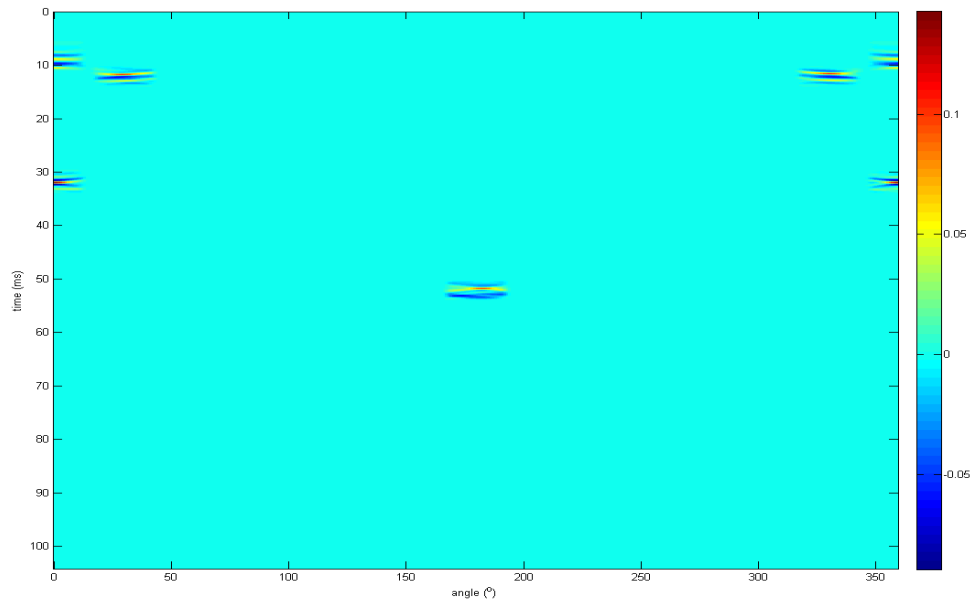


Abbildung 29: Diskrete Reflektionen in der Ebenen Wellen Domäne

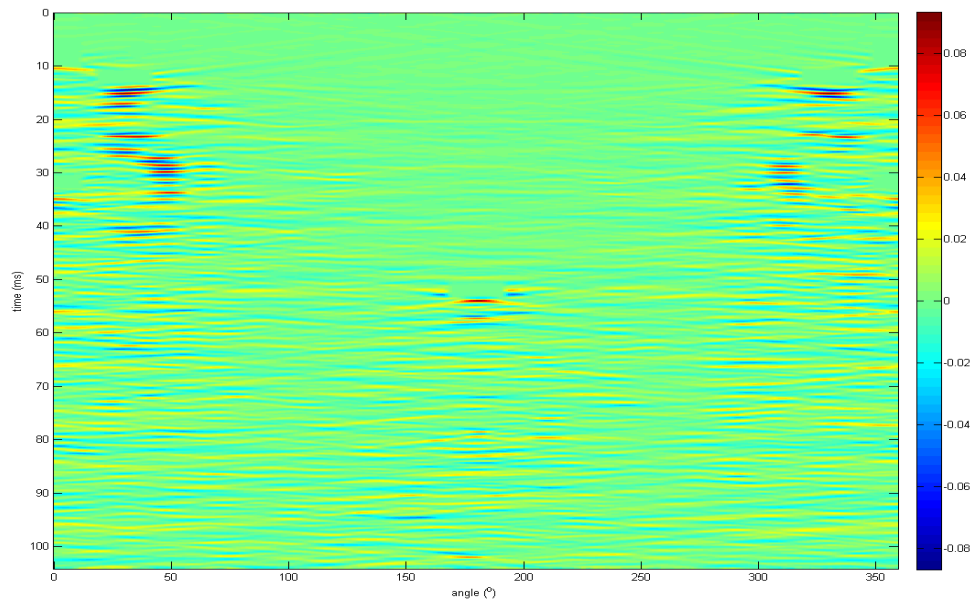


Abbildung 30: PWD nach Entfernung der diskreten Reflektionen

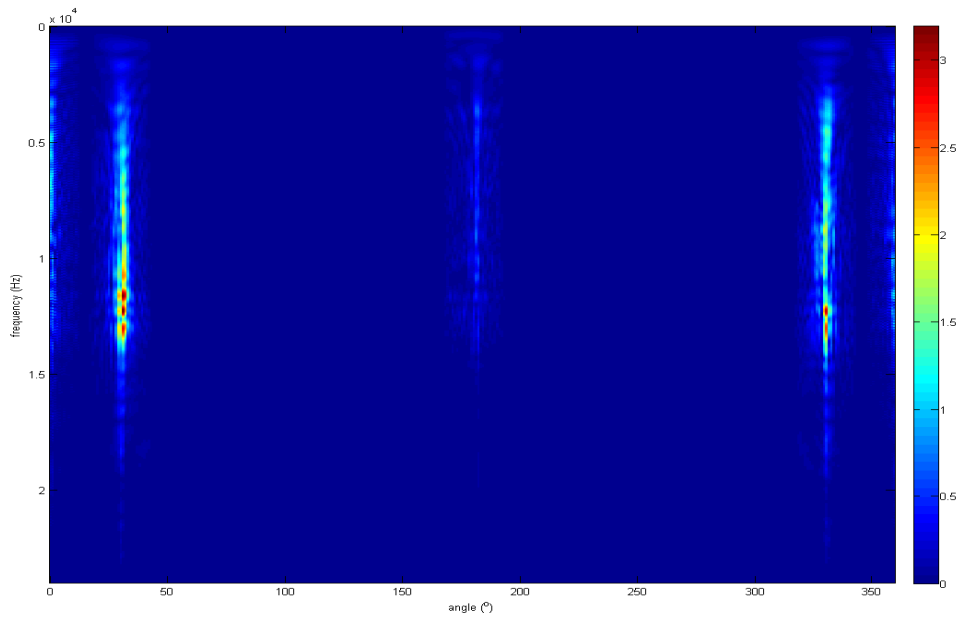


Abbildung 31: Frequenzdarstellung der diskreten Reflektionen

Aufgrund der frequenzabhängigen Auflösung des Kreisarrays bietet sich die Wahl von Fenstern an, die zu den tiefen Frequenzen hin breiter werden. Dies wurde der Einfachheit wegen bisher noch nicht umgesetzt, sollte aber zukünftig berücksichtigt werden, da die Reflektionen ansonsten zu viele hochfrequente Anteile enthalten. Abbildung 31 zeigt, dass im tieffrequenten Bereich durch die frequenzunabhängige Fensterung Fehler in der Frequenzabbildung der diskreten Reflektionen entstehen.

3.2.6. Bearbeitung der diskreten Reflektionen

Die einzelnen Reflektionen werden nun über Winkel von ca. 20° aus den einzelnen RIRs aufsummiert, sodass einzelne RIRs entstehen. Abbildung 32 zeigt die resultierenden Reflektionen von linker und rechter Seitenwand (rot und gelb), Vorderwand (blau) und Rückwand (grün) im Zeitbereich. Da diese noch zu unterschiedlichen Zeiten auftreten, man sie aber im Spiegelschallquellenmodell der RSM positionsabhängig mit Delays versehen möchte, wird jeweils das Predelay entfernt und zusätzlich minimalphasige Filter erstellt.

3.2.7. Reduzierung auf wenige Wiedergaberichtungen

[Son98] kommt mittels Hörtests zum Ergebnis, dass eine Wiedergabe der RIRs aus acht Richtungen für eine Schallfeldreproduktion ausreichend ist, die von höheren Richtungsauflösungen nicht mehr zu unterscheiden ist. Dies wurde allerdings bislang nur für einen zentralen Abhörpunkt im Wiedergabearray nachgewiesen. Trotzdem erfolgt hier zunächst die Beschränkung auf acht Wiedergaberichtungen. Eine winkelmäßige Fensterung ergibt dann acht RIRs im Abstand von 45° (siehe Abbildung 33). Hier

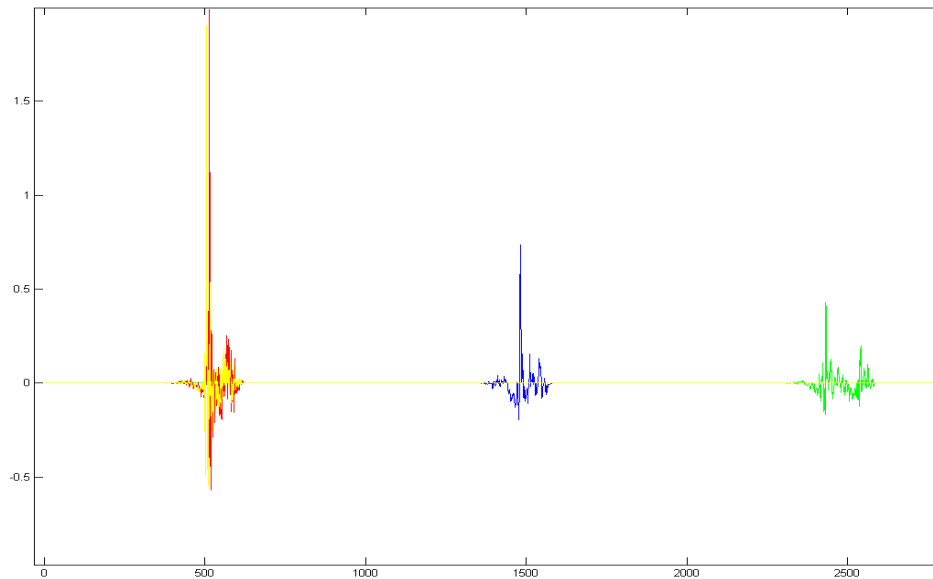


Abbildung 32: Diskrete Reflexionen von linker und rechter Seitenwand (rot und gelb), Vorderwand (blau) und Rückwand (grün) im Zeitbereich

zeigt sich besonders deutlich eine Unsymmetrie des Raumes. Trotz gleicher Pegel für alle Lautsprecherrichtungen ergibt sich eine Rechtslastigkeit aus der Perspektive des Abhörpunktes, was auf eine unterschiedliche Wandreflektion von rechter und linker Saalseite und die verschiedene Anordnung der Saalfenster zurückzuführen ist.

3.2.8. Trennung von frühen Reflexionen und diffusem Nachhall

Für die getrennte Bearbeitung der frühen und späten Reflexionen werden die RIRs nun voneinander getrennt (siehe Abbildung 34). Die in Abschnitt 2.1.2 vorgestellte Gleichung 7 sagt eine *Perceptual Mixing Time* von 76,90ms voraus. Die *Physical Mixing Time* berechnet sich nach 8 zu 129,60 ms. Für das RSM-Preset wird hier die *Perceptual Mixing Time* von 76,90ms eingestellt.

Die gemessenen RIRs zeigen noch einzelne Peaks bis ca. 187 ms, sodass testweise für ein Preset eine Mixing Time von 187 ms gewählt wurde. Für die spätere Anwendung in der RSM stellte sich diese aber als zu lang heraus und es wurden zunächst die 76,90ms beibehalten.

3.2.9. Dekorrelation des diffusen Nachhalls

Für Kreisarraymessungen ist es nützlich, die späten Teile der RIRs zu dekorrelieren (vgl.[Hul04]). Dies wird durch ein Randomisieren des Phase erreicht und bewirkt den Verlust der zeitlichen Information der RIRs für die späten Hallanteile. Die Dekorrelation führt somit zu einer Richtungsentkopplung der RIRs, da die zeitliche Struktur, die an bestimmte Richtungen gebunden ist, nicht mehr besteht.

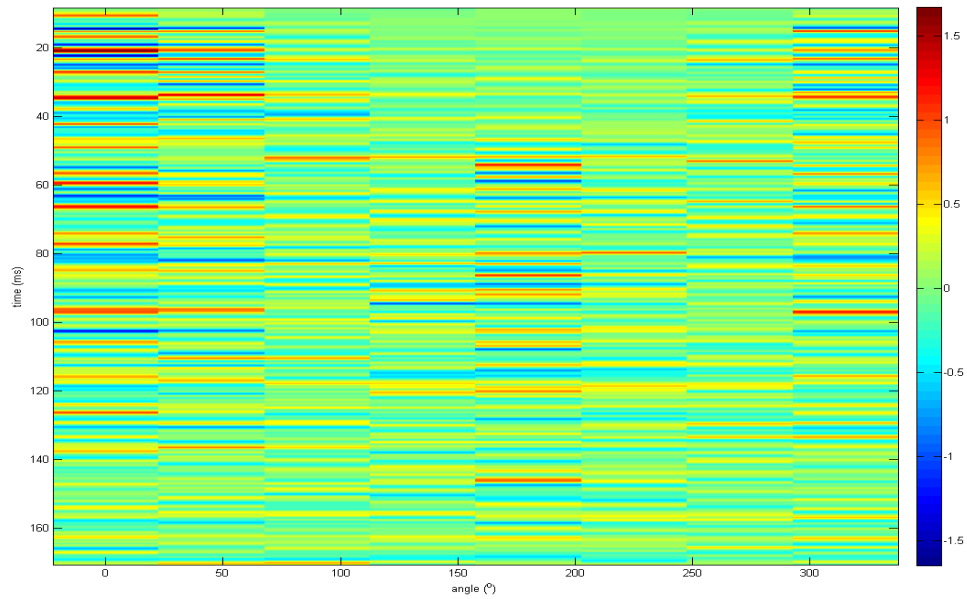


Abbildung 33: PWD nach der Reduzierung auf acht Richtungen

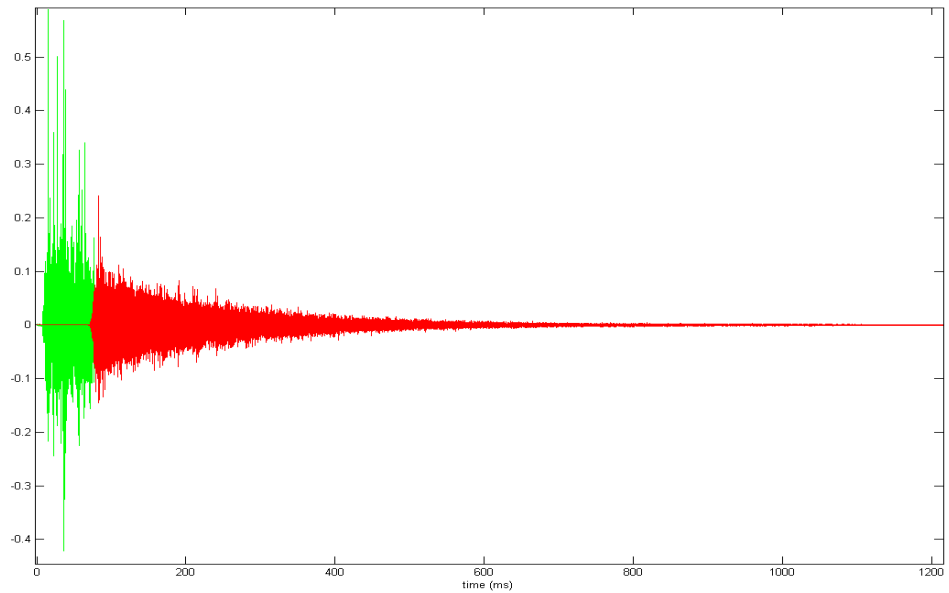


Abbildung 34: Trennung der RIRs in frühen und späten Zeitbereich

3.2.10. Erstellung des RSM-Presets

Der letzte Schritt in der Signalverarbeitungskette ist die Erstellung des RSM-Presets. Es wird ein .irp-File erstellt, das alle Daten für die Wiedergabe enthält. Dazu müssen die Positionen der diskreten Reflektionen sowie die Direktschallposition für das Spiegelschallquellenmodell angegeben werden. Anschließend kann das .irp-File in die RSM importiert werden.

4. Praxisevaluation der RSM

4.1. Wiedergabesetup und Authoringumgebung

Die Wiedergabetests mit der RSM erfolgen im IOSONO Test Lab in Erfurt. Es wird ein optimiertes WFS-Setup mit 18 Genelec 8030 Lautsprechern verwendet. Im Vergleich zu WFS-Pannels haben die Abhörmonitore eine bessere Qualität und es lassen sich mit dem Setup klanglich bessere Ergebnisse erzielen als mit einer Vielzahl an Lautsprechern. Allerdings befindet man sich bei den Genelec 8030 in 2m Entfernung schon an der Grenze des vom Hersteller empfohlenen Lautsprecherabstandes [Gena]. Außerdem war die Ausrichtung der horizontalen Abhörebene auf die akustische Achse der Lautsprecher nicht optimal [Genb].

Theoretische Diskussionen der verwendeten WFS-Algorithmik übersteigen den Rahmen dieser Arbeit. Eine anschauliche Erklärung der Ansätze und Probleme der WFS findet sich bei [SRA08].

4.1.1. Authoringumgebung Nuendo und die IOSONO Spatial Audio Workstation

Für die Ansteuerung der RSM wird im Labor ein PC mit Steinberg Nuendo verwendet. Die Spatial Audio Workstation (SAW) ist im Nuendo als Core Plugin eingebunden und stellt die Oberfläche für das räumliche Authoring zur Verfügung. Da man trotz 64-kanaliger MADI-Verbindung bei umfangreicheren Mischprojekten an die Grenzen der Kanalzahl gelangt, gibt es für die Arbeit mit der SAW den sogenannten Eventmode, bei dem auf einer Spur mehrere Audioobjekte zeitlich hintereinander angelegt werden und dann getrennt voneinander in der SAW-GUI auftauchen. Dieser objektbasierte Ansatz wird in [MAGF08] näher beschrieben.

In der SAW gibt es für die räumliche Darstellung von Audioobjekten die Wiedergabemöglichkeit als Punktschallquelle oder ebene Welle, die positionsabhängig mit Delays versehen werden können. Eine ebene Welle beinhaltet eine für alle Wiedergabepositionen konstante Richtungsinformation. Punktschallquellen sind am Modell von Kugelstrahlern orientiert und werden im Unterschied zu ebenen Wellen an einer bestimmten Position abgebildet.

Zudem gibt es in der SAW die Möglichkeit der entfernungsabhängigen Lautstärkeanpassung, die für die Auralisation von sich in die Raumtiefe bewegendem Quellen essentiell ist.

4.1.2. Funktionenbeschreibung der RSM

Im Folgenden wird die IOSONO Room Simulation (RSM) als interaktiver Mehrkanalhallprozessor für die WFS-Wiedergabe vorgestellt. Die Beschreibung hier ist als ein Einblick in die Arbeitsweise mit der RSM unter Nuendo gedacht, da diese für die spätere Praxisevaluation eine wichtige Rolle für die Anwenderfreundlichkeit spielt.

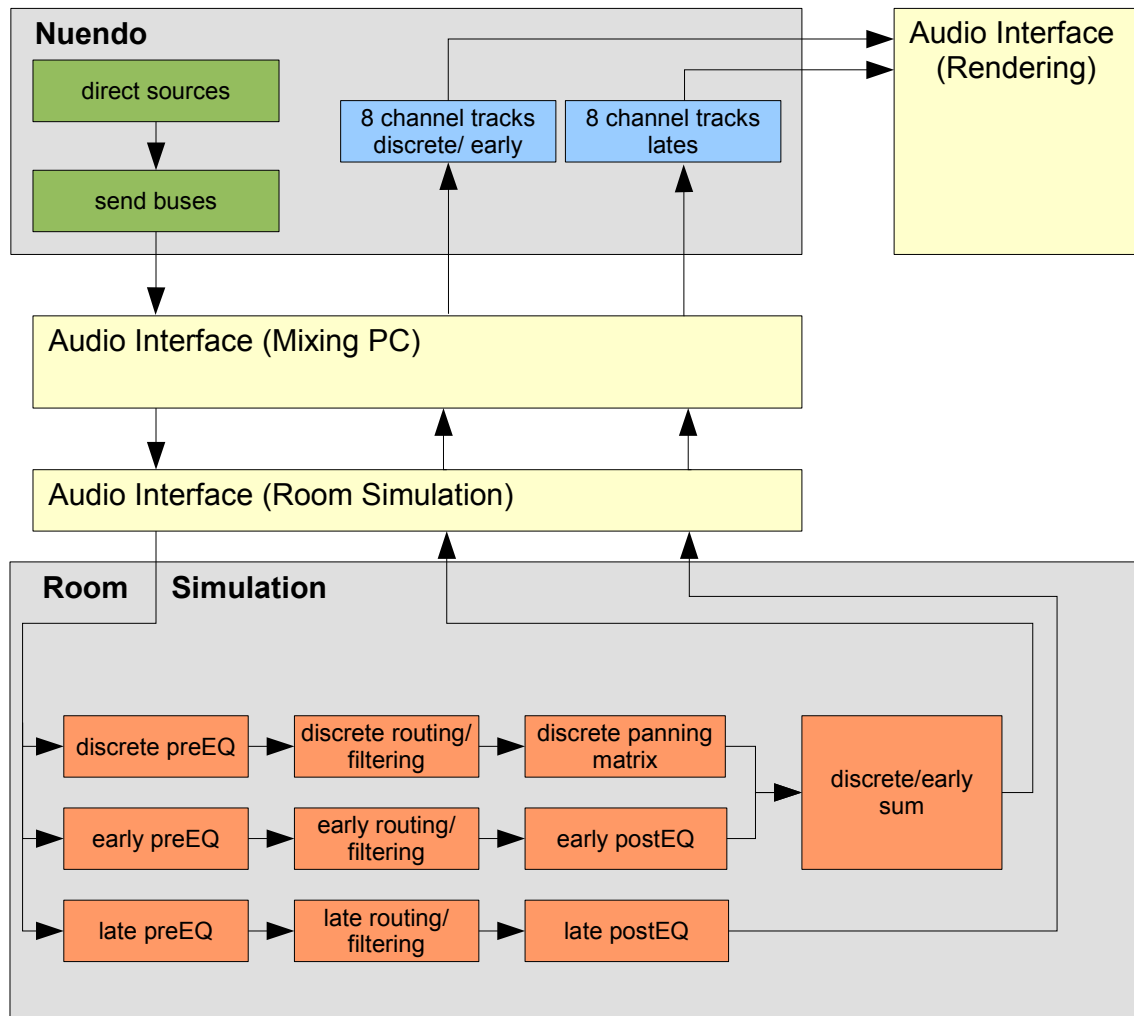


Abbildung 35: RSM Blockschaltbild

Signalfluss

Das Blockschaltbild in Abbildung 35 zeigt den Signalfluss zwischen der Nuendo Host-DAW, der RSM und den Renderingprozessoren. Die RSM Software läuft auf einem separaten Prozessor, in den hier verwendeten Setups auf einem IOSONO Spatial Audio Processor. Die RSM verfolgt das Send-Return-Prinzip und funktioniert daher grundsätzlich wie ein herkömmlicher Hallprozessor.

Die Signale, die man verhallen möchte, werden im Nuendo auf Sendbusse geschickt, die den Mixing PC über ein separates Audiointerface, hier eine MADI PCI-Karte, verlassen und über die MADI-Leitung zum Audiointerface des RSM PC gelangen. Nach dem Processing durch die RSM werden diskrete und frühe Reflektionen summiert und gelangen auf acht Kanälen zurück ins Nuendo. Auch für die späten Reflektionen werden acht Kanäle benutzt, sodass insgesamt 16 Kanäle als Rückwege verwendet werden.

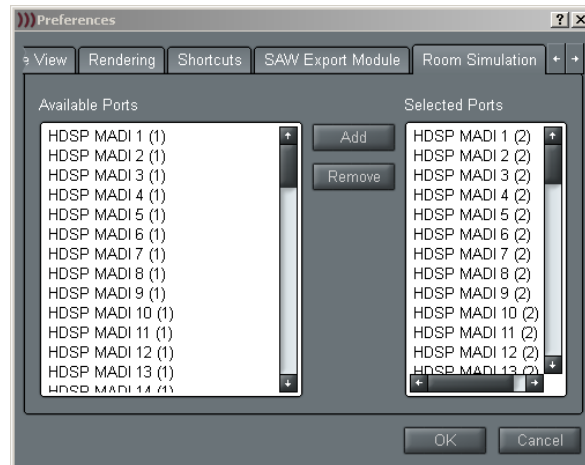


Abbildung 36: Auswahl der Output Ports

Einrichten der Sendwege

Sobald die Spatial Audio Workstation unter Nuendo mit *Project/ Spatial Audio Workstation* geöffnet ist, kommt man mit *Settings/ Preferences/ Room Simulation* zum Auswahlmenü für die Output Ports, die für die Sendwege verwendet werden (siehe Abbildung 36). Im einzelnen Kanal, der die zu verhandelnden Clips enthält, muss dann bei den Panningeigenschaften der IOSONO Spatial Panner aktiviert werden. Es wird dann automatisch ein Sendbus angelegt, der auf die ausgewählten Output Ports geroutet wird. Das Sendlevel wird mit 0dB angelegt und wird normalerweise auch dabei belassen, da das Leveling dann innerhalb der RSM Kontrolloberfläche vorgenommen wird.

Einrichten der Returnwege

Für die Returnwege werden im Nuendo 16 Monokanäle angelegt. Unter *Devices/ VST connections/ Input* wählt man die ersten 16 Kanäle des für die RSM benutzten Audiointerfaces aus, wobei die ersten acht Returnwege die Discretes/Earlies und die folgenden acht Kanäle für die Lates verwendet werden (siehe Abbildung 37).

Für alles Returntracks wird dann im Nuendo der Renderingbus als Output gewählt, in dem hier verwendeten Setup ist dies das WFS-Rendering auf den externen Rendering Prozessoren. Sobald man in den Panningeigenschaften der Returntracks den IOSONO Spatial Panner aktiviert hat, tauchen die Returnwege als Channelsources in der Spatial Audio Workstation auf.

Platzierung der Wiedergabequellen in der Spatial Audio Workstation

Für alle Quellen muss im unteren Teil der Spatial Audio Workstation 'Playback Source' angegeben werden, da es bei der Verwendung von Returnwegen als 'Normal Source' zu Feedbackschleifen kommen kann (siehe Abbildung 38). Als Quelltyp wird für die Discretes/Earlies 'Point Source' und für die Lates 'Plane Wave' angegeben.

Anschließend werden die Playback Sources in der Szenenansicht der Spatial Audioworkstation angelegt. Jeder der jeweils acht Returnwege für die Discretes/Earlies bzw. Lates stellt eine Raumrichtung



Abbildung 37: Tracks für die Returnwege

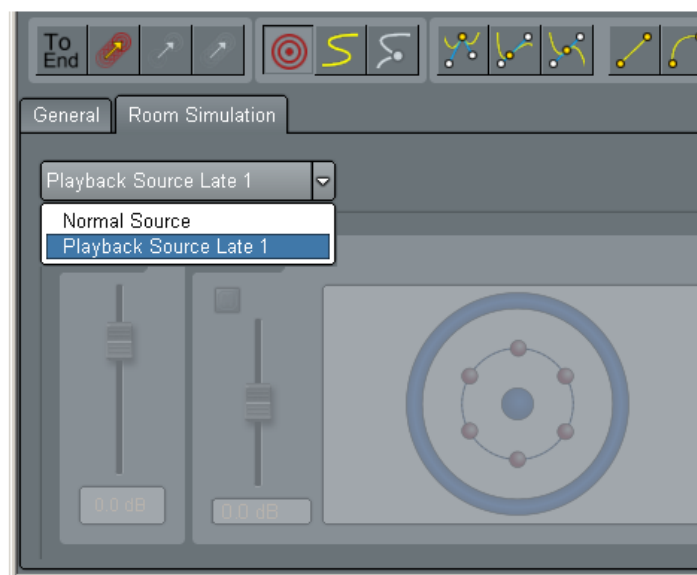


Abbildung 38: Einstellung der Wiedergabequellen

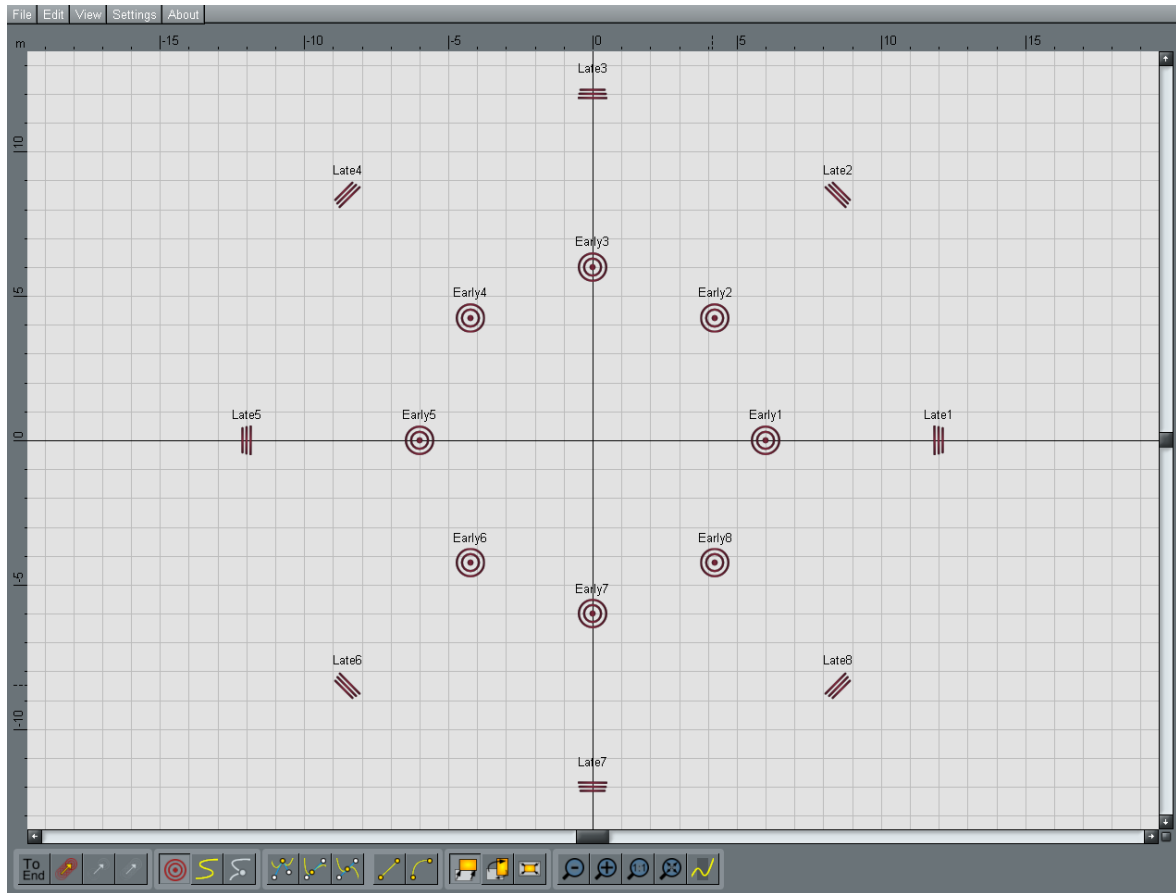


Abbildung 39: Platzierung der Wiedergabequellen in der Spatial Audio Workstation

der richtungsreduzierten PWD dar. Die Quellen werden also im Abstand von 45° mit jeweils gleichem Radius um den Referenzpunkt der Hörzone verteilt (siehe Abbildung 39). Die Szenenansicht in der Spatial Audio Workstation kann als kartesisches Koordinatensystem mit dem Abhörreferenzpunkt als Ursprung verstanden werden. Die 0° -Richtung entspricht dabei der positiven x-Achse. In dieser Richtung beginnt man mit dem Anlegen der Wiedergabequellen und fährt dann in mathematisch positiver Richtung, also entgegen dem Uhrzeigersinn, fort. Bei der Verwendung von Messdaten als Raumimpulsantworten müssen sich die Richtungen für Discretes/Earlies und Lates entsprechen, da die Reduzierung auf acht Raumrichtungen bei der Erstellung des RSM-Presets in gleicher Weise passiert und diese erst nach der Richtungsreduzierung zeitlich getrennt werden. Beim Anlegen der Wiedergabequellen muss darauf geachtet werden, die Quellen nicht innerhalb des Wiedergabearrays zu platzieren, da die Quellen ansonsten als fokussierte Quellen wiedergegeben würden.

Konfiguration der RSM

Die Konfiguration genereller Parameter wird direkt auf dem RSM PC vorgenommen. Abbildung 40 zeigt das entsprechende Konfigurationsmenü. Es können die folgenden Parameter eingestellt werden:

Parameter	Variablen	Kommentare
Sample frequency	44.100 Hz 48.000 Hz	
Buffersize	64-4096 Samples	Momentan ist eine Buffersize von 2048 Samples für einen Zyklus nötig.
Input select	Master SlaveSignal SlaveWordClock	Hier wird ausschließlich mit der Einstellung SlaveWordClock gearbeitet.
Number of sources	1-32	Anzahl der geöffneten Quellen.
Scene adress	192.168.0.2	Die IP-Adresse, die für die RSM innerhalb des Netzwerks verwendet wird. Diese wird nur im Fall möglicher Kollisionen mit anderen Services, die auf dem RSM PC ausgeführt werden, geändert.
Osc control port	7273	Der Port kann auch auf jeden möglichen anderen Port geändert werden.
Osc port	8999	
Maximum IR lenght	1-10s	Die Länge der maximal möglichen Impulsantwort ist von der Rechenleistung des RSM PCs abhängig und beträgt hier maximal 3s.

RSM Kontrolloberfläche

Die Kontrolloberfläche für die RSM ist als Remote Control Lösung innerhalb der Spatial Audio Workstation im Nuendo umgesetzt. Einen Überblick mit den Bezeichnungen für die einzelnen GUI-Bereiche gibt Abbildung 41.

Leveling

Wie bereits erwähnt ist es für die Arbeit mit der RSM am übersichtlichsten, die Sendlevels in den einzelnen Spuren alle auf 0dB zu belassen und alle Levels in der RSM GUI einzustellen. Der große horizontale Fader im Object View Tab bestimmt über die Gesamtlautstärke aller Returnwege der RSM, die zwei vertikalen Fader innerhalb der Early und Late Post EQ Sections regeln die Pegel der acht Returnwege für die Discretes/Earlies und der Lates getrennt. Dies bezieht sich nach wie vor auf den Gesamtpegel des RSM-Halls. Die Hallpegel für die einzelnen Objekte werden dann im Object Editor Tab geregelt. Dieser Fader entspricht also gewissermaßen dem Sendregler eines klassischen Hallprozessors. Hier können aber zusätzlich die Sends der einzelnen RIR-Teile separat geregelt werden. An den entsprechenden Stellen finden sich auch Mutebuttons zum Stummschalten der Signale. Der Pegel des Direktschalls wird nach wie vor im Object editor der Spatial Audio Workstation geregelt, wie dies auch für Quellen ohne RSM-Verhallung der Fall ist.

Equalizer-Einstellungen

Auch das Einstellen von EQs kann global und quellspezifisch vorgenommen werden. Es wird ein Dreiband-EQ mit verschiedenen Filtercharakteristiken zur Verfügung gestellt. Abbildung 42 zeigt beispielhaft einen globalen EQ im RSM Object View Tab.

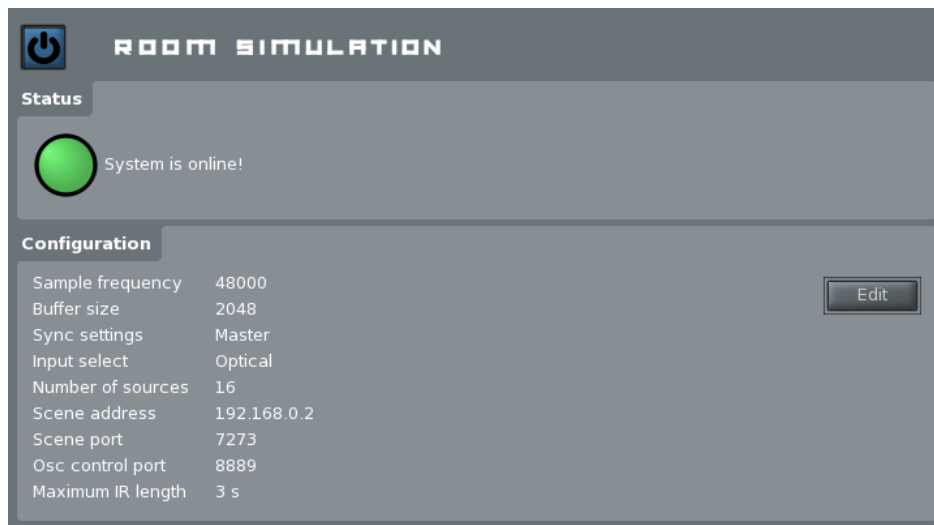


Abbildung 40: RSM Konfigurationsmenü

Die gleichen Filter können dann für die einzelnen Sendwege der Quellen und für die einzelnen Teile der RIR angewendet werden. Abbildung 43 zeigt eine EQ-Einstellung für die Discretes.

Spread Widget

Mit dem Spread Widget ist es möglich, den RSM-Hall für bestimmte Richtungen zu fokussieren. Dazu gibt das Interface die Möglichkeit, mit verschiedenen Drag Points in das Leveling der Wiedergaberichtungen einzugreifen (siehe Abbildung 44).

Das Verschieben der 6 roten Punkte hat demnach die Verstärkung bzw. Dämpfung in eine bestimmte Richtung um maximal $\pm 9\text{dB}$ zur Folge. Durch Klicken ins Zentrum des Spread Widgets und gleichzeitiges Bewegen der Mouse ändert das gesamte Verhältnis der einzelnen Drag Points richtungs-spezifisch. Das Bewegen der Mouse auf dem äußeren Ring hat eine Rotation der räumlichen Hüllkurve zur Folge.

Latenzausgleich

Die durch das Framework der RSM generierte Systemlatenz beträgt momentan drei Buffersizes. Bei 2048 Samples summiert sich diese zu einer Latenz von ca. 128 Millisekunden. Um diese Zeit muss der Direktschall der Quelle verzögert werden, dass die zeitlichen Bezüge zwischen Direktschall und generiertem Hall nicht verletzt werden. Die Systemlatenz wird im General Tab des Object Editor Tabs der SAW eingestellt (siehe Abbildung 45).

Die Autodelay-Funktion sollte bei Verwendung der RSM unberücksichtigt bleiben, da Earlies und Lates bisher nicht positionsabhängig verzögert werden und es somit bei größeren Entfernungen der Quelle zu zeitlichen Fehlern und Phasingartefakten kommen kann.

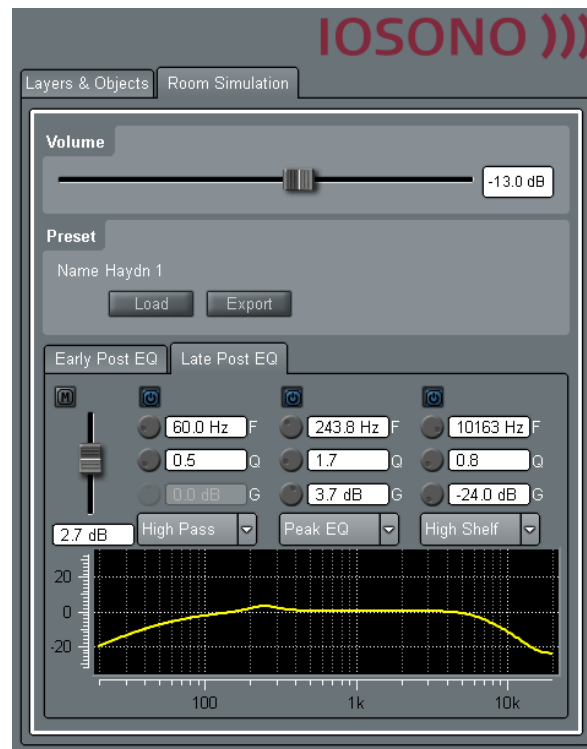


Abbildung 42: Object View Tab der RSM GUI

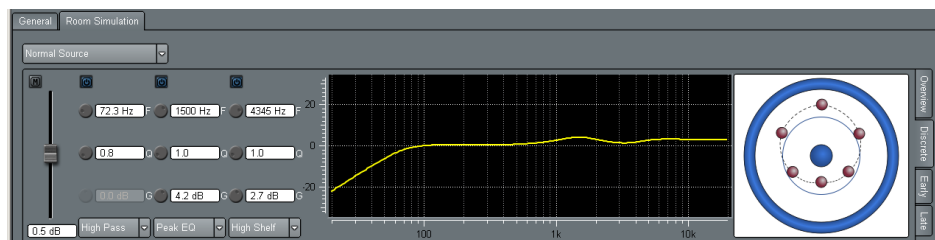


Abbildung 43: EQ-Einstellung für die Discretes im Object Editor Tab der RSM GUI

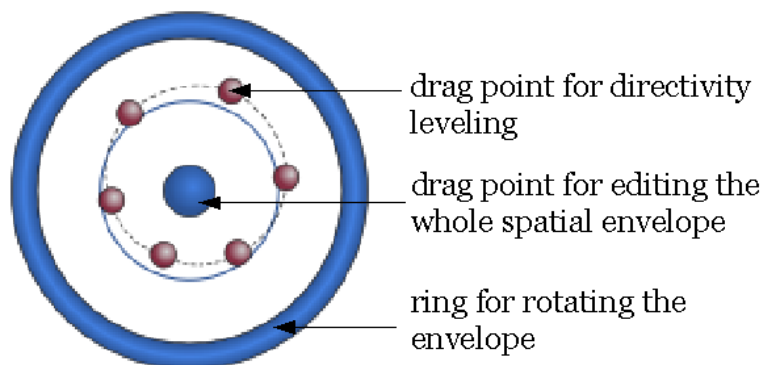


Abbildung 44: Grafische Oberfläche des Spread Widgets

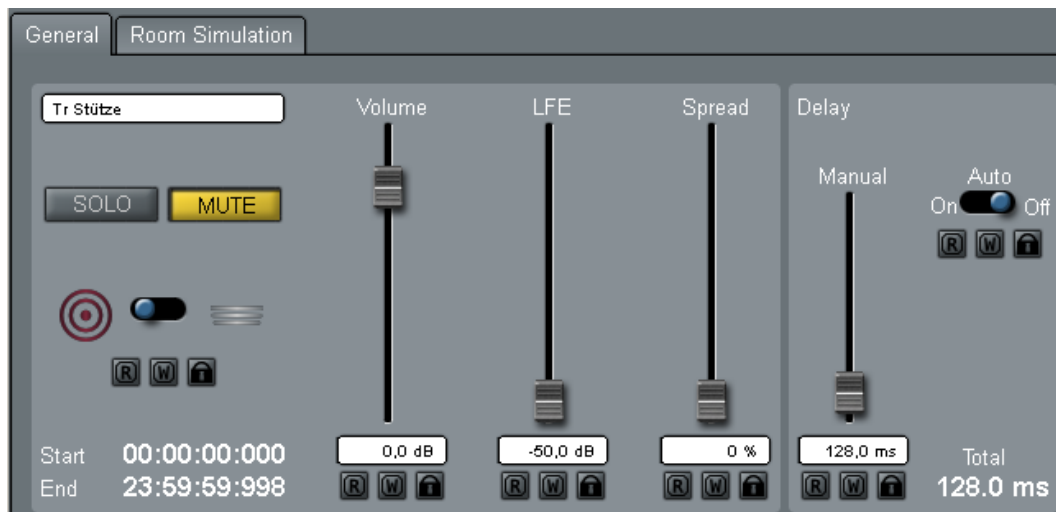


Abbildung 45: Ausgleich der Systemlatenz

4.2. Experteninterview zum Potential der RSM für die tonmeisterliche Praxis

Der im letzten Abschnitt beschriebene Stand der RSM stellt die Grundlage für die Konzeption des anschließenden Experteninterviews.

4.2.1. Interviewpartner

Es werden insgesamt fünf Einzelinterviews mit Experten auf dem Gebiet der WFS-Mischung durchgeführt. Alle Interviewpartner haben mehrjährige Erfahrung mit Hallgeräten im Bereich der Tonstudio-technik und bereits Mischungen mit WFS-Systemen angefertigt. Die Zitierkürzel hinter den Namen der Interviewpartner beziehen sich auf das jeweilige Interview und werden innerhalb der Auswertung in dieser Weise verwendet. Alle Interviews fanden am 9. bzw. 11.11.2010 im IOSONO Testlab in Erfurt statt. Ein Einzelinterview erstreckte sich über ca. 90 Minuten.

Bernhard Albrecht [Alb10]

Bernhard Albrecht arbeitete im Bereich Synchronmischung und als Dozent an der TU Ilmenau, wo er mehrjährige Erfahrung mit WFS sammelte. Er ist Dozent an der HFF Potsdam im Studiengang Filmtone und leitete Projekte für WFS-Hörspielproduktionen. Aktuell untersucht er die Kombination von 180°-Kinobildinhalten mit WFS-Mischungen in Zusammenarbeit mit dem Heinrich-Hertz-Institut in Berlin.

Johannes Varga [Var10]

Johannes Varga ist Absolvent des Studiengangs Filmtone an der HFF Potsdam und arbeitete im Bereich Sounddesign und Filmmischung bereits an WFS-Projekten.

Johannes Scherzer [Sch10]

Johannes Scherzer hat ebenfalls den Studiengang Filmtone an der HFF Potsdam absolviert. Er hat bereits mit einer eigenen Mehrkanallösung für WFS-Mischungen gearbeitet.

Stephan Radom [Rad10]

Stephan Radom ist selbständig im Bereich Bewegtbildvertonung und arbeitet regelmäßig an WFS-Mischungen. Im Projekt „Georgenthal“ hat er bereits mit der frühen Version der RSM gearbeitet und engagiert sich auch aktuell im Bereich WFS-Mischung.

Stefan Kolbe [Kol10]

Stefan Kolbe arbeitet seit ca. zehn Jahren im professionellen Audiobereich als Tonmeister und Projektleiter für audiovisuelle Produktionen. In den Bereichen Filmpostproduktion, Dokumentarfilm und im Messebereich hat er sich für flexible Mehrkanalformate eingesetzt und versucht, dadurch das starre 5.1-Format zu ersetzen. Auch er kennt die frühere Version der RSM.

4.2.2. Konzeption des Experteninterviews

Das Interview beginnt mit allgemeinen Fragestellungen zur Arbeit mit Hallgeräten und zu generellen Anforderungen an WFS-Hallgeräte für Mischungen im audiovisuellen Bereich. Dann folgt eine Vorstellung der oben beschriebenen RSM-Features und eine kurze Demonstration anhand von Audiobeispielen. So soll garantiert werden, dass die Interviewpartner bei der Beantwortung der allgemeinen Fragen nicht von der vorgestellten RSM voreingenommen sind. Für die RSM-Demo werden einzelne, trockene Signale eines Saxofons sowie die im Fürstensaal aufgenommenen Trompeten- und Snaredrum-Samples verwendet. Für die Demonstration anhand einer kompletten Saalmischung wird auf eine bereits bestehende Tangoaufnahme mit mehreren Instrumentengruppen aus dem Archiv der IOSONO GmbH zurückgegriffen. Die Interviewpartner bekommen an dieser Stelle die Möglichkeit, die RSM selbst anzutesten.

Anschließend werden Detailfragen zu einzelnen RSM-Features gestellt, die sich auf folgende Bereiche beziehen:

1. Getrennte Bearbeitung der RIR-Teile
2. Interaktionsmöglichkeiten des Spread Widget
3. Anforderungen an ein RSM-Hardwareinterface
4. Dynamische Quellen in der RSM
5. RSM-Presets
6. Automatisierung
7. Zusätzliche Anregungen und Präferenzen für die Weiterentwicklung der RSM

Zu jedem Teilbereich wird eine oder mehrere Fragen gestellt, die sich so oder in ähnlicher Form in der Auswertungsmatrix des Interviews in Anhang A finden.

4.2.3. Auswertung des Experteninterviews

Die Auswertungsmatrix enthält eine stichpunktartige Transkription der Interviews, die alle zunächst mitgeschnitten wurden. Die Chronologie der exzerpierten Stichpunkte richtet sich dabei nach thematischen Aspekten. Außerdem ist als letzter Punkt ein Freifeld angelegt, das für zusätzliche Äußerungen der Interviewpartner genutzt wird.

Generelle Arbeit mit Hallgeräten

Alle Interviewpartner verfügen über einen guten Überblick des Marktes von Hallgeräten und haben sowohl mit entsprechender Hard- und Software Erfahrung, wobei Softwarelösungen präferiert werden. Einer der Interviewpartner lehnt die Arbeit mit Hardwaregeräten sogar gänzlich ab [Rad10]. Im Bereich der Plugins sind die Produkte des US-amerikanischen Herstellers Wave Inc. besonders beliebt [Wav].

Sehr unterschiedliche Vorlieben zeigen sich bei der Frage nach den gewünschten Parametern, die für die Interaktion mit Hallgeräten erwartet werden. So werden grundlegende akustische Parameter für das Halldesign einerseits erwartet [Alb10], um daraus dann selbst tonmeisterliche Begriffe wie Tiefenstaffelung etc. zu erreichen. Andererseits aber eher abgelehnt, und stattdessen Parameter erwartet, die sich an der klanglichen Wirkung orientieren [Kol10]. Einigkeit herrscht allerdings bei den Parametern frühe Reflektionen, Nachhallzeit, EQ und Raumgeometrie, die in jedem Fall zugänglich sein sollten.

Für mehrkanalige Hallgeräte wird die Reaktion des Hallgeräts auf die Veränderung von Quellen im Panorama vermisst [Kol10], [Sch10]. Für die Arbeit mit WFS-Systemen gab es daher verschiedene Lösungen für die Schaffung von Räumlichkeit. [Sch10] und [Var10] verwendeten die zwölfkanalfähige Raumsimulation des Programms Sequoia und verwendeten dafür acht auf einem Kreis gemessene und vier an den Wänden gemessene RIRs. Für die Kreismessung wurden Sennheiser-Mikrofone der MKH-Serie und für die Wandmessungen Grenzflächenmikrofone verwendet. Es wurden dann verschiedene QEPs gemessen und diese im Sequoia verfügbar gemacht. Im Laufe der Produktion erfolgte jedoch eine Beschränkung auf eine einzige QEP, da ein ständiger Wechsel zwischen den verschiedenen RIR-Messungen und damit verbundene Automatisierungen als zu umständlich und zeitaufwendig empfunden wurden [Sch10]. [Rad10] verwendete für WFS-Mischungen den Nuendo-internen 5.1-Hall, der aber nur als Effekthall in Sounddesignanwendungen ausreichend ist. [Kol10] und [Alb10] verwendeten für WFS-Mischungen bereits das Vorläufermodell der RSM Origami, dem ein Raumsimulationsmodell zugrunde liegt, vermissten hier aber eine anwenderfreundliche Parametrisierung und die Verwendung von Messungen.

Außerdem wünschen sich mehrere Interviewpartner einen unkomplizierten Import eigener RIRs in Standardformaten wie .wav-Files in mehrkanalige Hallgeräte und anschließende, umfangreiche Parametrisierungsmöglichkeiten der RIRs im Hallplugin in Echtzeit [Rad10], [Var10], [Sch10]. Im Allgemeinen wird für WFS-Mischungen der Einbezug von Abstrahlcharakteristiken vermisst, der eng mit der erzeugten Räumlichkeit zusammenhängt. Zukünftige Halllösungen für WFS sollten deshalb auch Parameter der Abstrahlcharakteristik miteinbeziehen [Sch10].

Getrennte Bearbeitung der RIR-Teile

Alle Interviewpartner empfinden den Eingriff in die einzelnen, zeitlichen RIR-Teile als sehr wichtig. Die Steuerung der Discretes wird durchweg als vorteilhaft empfunden. Allerdings stellt sich schnell die Notwendigkeit einer zusätzlichen Einstellungsmöglichkeit von Delaywerten für Earlies und Lates heraus, die von allen Interviewpartnern gefordert wird. Für die Verarbeitung von sich überlagernden Earlies und Lates sollten verschiedene Möglichkeiten des Crossfading als zusätzlicher visueller Parameter in der RSM-GUI bereitgestellt werden [Alb10], [Kol10] .

Zudem wird an verschiedene Stellen die Forderung nach einem Parameter zum zeitlichen Strecken der RIRs gestellt, der bis zu einem gewissen Grad die wahrgenommene Raumgröße verändern könnte [Var10], [Rad10].

Für die schnelle Arbeit im Mischprozess sind zusätzliche Gruppierungsfunktionen für die Bearbeitung einzelner RIR-Teile (eventuell auch aus verschiedenen Presets) nötig. Außerdem wird eine Copy-Paste-Funktion für Einstellungen für einzelne RIR-Teile zur schnellen Übertragung von Einstellungen erwartet [Rad10].

Die Möglichkeit zur Einstellung eigener EQs für jede Quelle und jeden Raumanteil wurde durchgängig als positiv und notwendig beurteilt.

Interaktionsmöglichkeiten des Spread Widgets

Die Oberfläche des Spread Widgets wurde in einer spontanen Reaktion von allen Interviewpartnern als ansprechend beurteilt. Allerdings gab es bezüglich des Spread Widgets für die Discretes anfänglich Verwirrungen. Die quellpositionsabhängige Mitführung der Discretes durch das Spiegelschallquellenmodell wird in der GUI nicht angezeigt und so war die Funktionsweise des Spread Widget, nämlich eine richtungsabhängige Verstärkung des Halls, nicht sofort klar [Alb10], [Sch10]. Hier gab es deshalb den Vorschlag, die Discretes als einzelne Punktschallquellen zu realisieren, die dann auch zusätzliche Vorteile einer nachträglichen Bearbeitung hätten. Für Außenszenen wird beispielsweise in der Filmmischung oft eine spezielle Verteilung der ersten Reflektionen benötigt, die der abgebildeten Geometrie der Szene entspricht, mit dem verwendeten Spiegelschallquellenmodell ist ein Eingriff dieser Form noch nicht möglich [Alb10]. An verschiedenen Stellen gab es zudem den Wunsch nach einer Visualisierung des Spiegelschallquellenmodells [Sch10], [Alb10].

Als weiterer Verbesserungsvorschlag wurde die Möglichkeit einer Kopplung der Einstellungen des Spread Widget der einzelnen RIR-Teile genannt, da die Richtcharakteristik in aller Regel für alle RIR-Teile gelten soll [Rad10].

Zudem wurde die Drehung der Hüllkurve im Spread Widget an einigen Stellen mit einer Drehung des Raumes verwechselt und nicht als die Drehung der Richtcharakteristik erkannt, die dargestellt werden [Alb10], [Rad10]. Vorschläge zur Verbesserung wären hier das Einfügen einer Kompassnadel, die andeutet, dass die Raumausrichtung bestehen bleibt, oder auch das Einfügen einer Hintergrundgrafik des Raumes innerhalb des Spread Widgets, bei der sich der Raumteil, der verstärkt wird, in der Helligkeit ändert [Rad10].

Unabhängig von der Funktionalität des Spread Widgets tauchte der Wunsch nach einem Tool zur

Drehung des ganzen Wiedergaberaumes auf [Alb10], [Rad10]. Das Spread Widget wurde hierfür teils als geeignete Stelle [Alb10], aber auch als gänzlich ungeeignete Möglichkeit [Var10] beurteilt. Dies könnte durch die Drehung aller Wiedergabequellen realisiert werden, könnte dann aber nur auf alle Quellen gleichzeitig angewendet werden. Als mögliches Interface hierfür wurde eine Hintergrundgrafik in der SAW vorgeschlagen, die entsprechend den Wiedergabequellen gedreht werden kann, oder ein eigenes Grafikfeld mit einer möglichst dreidimensionalen Visualisierung des Raumes, die neben der Rotation auch Einstellmöglichkeiten für Raumgröße, Wandmaterial, Richtcharakteristik im Raum etc. anbietet [Rad10]. In der SAW könnte zusätzlich der Hallradius des jeweils aktiven Presets angezeigt werden (Anmerkung des Verfassers).

Ein weiterer Anwendungsvorschlag für die Oberfläche des Spread Widgets ist die Verwendung von Stereoimpulsantworten innerhalb der RSM. Vergleichbar mit dem 5.1-Panner in Pro Tools, der jeweils ein Koordinatensystem für einen Kanal des Stereosignals miteinander verknüpft und so beispielsweise achsensymmetrische Bewegungen und gegenläufige Kreisfahrten ermöglicht, könnten stereofone Hallsignale dynamisch für WFS-Mischungen verfügbar gemacht werden [Kol10].

Anforderungen an ein RSM-Hardwareinterface

Sehr unterschiedliche Vorstellung gibt es für ein mögliches Hardwareinterface für das Spread Widget bzw. die RSM-Features im Allgemeinen. [Alb10], [Var10] und [Sch10] sprechen sich für eine Lösung aus, die sich von der reinen Interaktion mit der Mouse entfernt. [Alb10] kritisiert an der Arbeit mit der Mouse, dass immer nur ein Parameter verändert werden kann, wobei bei Mischung am Mischpult mehrere gleichzeitig verändert werden können. Er sieht eine sinnvolle Hardwarelösung für die Steuerung des frühen Zeitbereichs bis ca. 100ms als vorrangig an. Für das Spread Widget wird auch eine 3D-Mouse bzw. ein Space-Navigator vorgeschlagen [Kol10]. Diese Geräte entstammen ursprünglich CAD-Anwendungen und erlauben die dreidimensionale Steuerung von Objekten, was für die zukünftige Vertikaldimension auch für die RSM-Steuerung sinnvoll wäre. Ein Joystick wird für die Steuerung des Spread Widgets eher kritisch gesehen, da Ungenauigkeiten auftreten können und er wenig Vorteile gegenüber der gewohnten Interaktion mit der Mouse bietet [Var10], [Kol10]. [Sch10] schlägt die Verwendung des MC5 des Pulherstellers Euphonics vor, mit dem bis zu 6 DAWs gleichzeitig angesteuert werden können, also mit einem Gerät die Steuerung des Zuspieldersprogramms, von Nuendo, SAW und RSM abgedeckt wäre. Ein weiteres Plus dieser Idee ist die unkomplizierte Umsetzung unter Verwendung des offenen EuCon-Protokolls.

[Rad10] und [Kol10] fordern hingegen nur geringfügige Veränderungen des Mouse-Interfaces und betrachten eine Mouse, zwei Fader und einige, sinnvolle Tastaturkürzel als völlig ausreichend für ihre Arbeit. Beide haben bereits mit einem Wacon-Touchscreen für eine WFS-Mischung gearbeitet, empfanden dabei aber die unkomfortable Eingabe mit einem Stift als ungeeignet für die Arbeit mit WFS-Quellen [Kol10]. Als eine Lösung für SAW und RSM interessant ist für [Rad10] dennoch eine Multitouchoberfläche, wie man sie beispielsweise beim Apple iPhone vorfindet. Hier wären verschiedenste Steuerungen möglich, wie beispielsweise das Zoomen in eine Szene, die Modellierung des Spread Widgets, das Bewegen mehrerer Quellen, das Drehen der Richtcharakteristik einer Quelle, die Anzeige von Faderbays etc. Wichtig in jedem Fall ist [Rad10] und [Kol10] die Beschränkung auf ein Steuerungsgerät als Customhardware für SAW und RSM.

Dynamische Quellen in der RSM

Die wohl wichtigste dynamische Veränderung im Bezug auf die RSM ist nach Aussage aller Interviewpartner die Abnahme des Direktschallpegels mit der Entfernung. Nur so kann über das Verhältnis von Hall- und Direktschallpegel auch in die Raumentiefe gearbeitet werden. Zusätzlich sollte sich mit der Entfernung der Quelle von der Hörposition auch der Fokus für den Direktschall ändern [Sch10]. Im Bezug auf die Raumanteile sollte sich bei zunehmender Entfernung auch die Luftabsorption anpassen, also alle RIR-Teile tiefpassgefiltert werden.

Außerdem ist die Anpassung der Earlies an die Quellposition wichtig. Bei Quellpositionen, die stark von der gemessenen QEP abweichen kann ansonsten der Eindruck von mehreren Quellen entstehen, da die Discretes angepasst werden, die Earlies aber statisch bleiben [Alb10]. Diese Anpassung könnte über eine automatisierte Steuerung der Spread Widget Einstellungen in Abhängigkeit von der Quellposition realisiert werden, wenn neben der richtungsmäßigen Verstärkung noch zusätzliche Predelays für Earlies und Lates berechnet würden [Sch10], [Rad10]. Da vor allem im frühen Zeitbereich der Earlies die Reflektionsmuster bei unterschiedlichen Quellpositionen sehr unterschiedlich sein können, ist zu prüfen, ob eine Anpassung mit Delay und Pegel reicht, oder tatsächlich verschiedene Messungen in mehreren Presets gleichzeitig berechnet werden müssen, auf die dann in Abhängigkeit von der Quellposition gepannt wird (Anmerkung des Verfassers).

RSM-Presets

Geht man davon aus, dass ein Preset pro Raum ausreichend ist, werden von den Interviewpartnern folgende, sehr unterschiedliche Angaben für die Anzahl der gleichzeitig verfügbaren Presets gemacht. [Var10], [Rad10] und [Kol10] schätzen zwei gleichzeitig verfügbare Presets als ausreichend ein, wenn das Laden der Presets automatisiert ist. [Alb10] gibt dagegen vier bis sechs Presets als Mindestanzahl an, da im Fall von Filmmischungen oft unterschiedliche Räume für die unterschiedlichen Mischgruppen (Foley, Dialog, Atmo etc.) verfügbar sein sollten. [Sch10] geht von acht gleichzeitigen Presets aus und erklärt dies damit, dass bei einem Szenenwechsel und vier gleichzeitigen Presets schon vier weitere für die nächste Szene geladen werden müssen. [Rad10] schlägt vor, sich bei Presetwechseln auf bestimmte Parameter zu beschränken, die während des Übergangs zum nächsten Preset gehalten werden, um Rechenkapazität einzusparen.

Bei der Erstellung einer Presetbibliothek werden neben Konzertsälen [Kol10] vorwiegend gute, realistische Räume für Sprache in Standardszenen erwartet [Alb10], [Var10], [Rad10], [Kol10], die mit einer sinnvollen Parametrisierung angepasst werden können. Darüber hinaus empfinden [Alb10] und [Rad10] die Verfügbarkeit von Presets für Außenszenen als besonders wichtig, da diese im Allgemeinen in Hallgeräten schwer zu realisieren sind. Hier wäre, wie bereits erwähnt, ein dezidiertes Editing der Discretes von Vorteil.

[Kol10] schlägt neben den realistischen Raumpresets eine Erweiterung der Bibliothek mit „Samplings der alten Klassiker“ oder schon bestehender Stereohallpresets vor, die anteilig für alle Raumrichtungen verwendet werden und mit Panning und Delays den Quellpositionen folgen. Dies ist insbesondere für Situationen interessant, bei denen die Klangcharakteristik eines bestimmten Halls wichtiger als die raumgetreue Raumsimulation sind, d.h. vor allem für kreative Sounddesignanwendungen.

Im Bezug auf die Presetbibliothek wiederholt sich der Wunsch nach dem Import eigener RIRs mit eventuell geringerer Raumauflösung [Var10]. Dieser Wunsch ist vor allem bei der Mischung realistischer Szenen und bei der Vorlage von RIRs vom Set gerechtfertigt. Dabei tauchte die Idee auf, mittels einem möglichen Onlineservice externe RIRs ins .irp-Format der RSM-Presets zu rendern und dem User so den Import eigener Presets in die RSM zu ermöglichen [Sch10], [Var10].

Automatisierung

Neben der Automatisierung des Ladens von Presets werden umfangreiche Automatisierungsmöglichkeiten als generelle Voraussetzung für den Einsatz für die Filmmischung genannt. [Sch10] fordert eine umfangreiche Automatisierung der Parameter Pegel, EQ und Spread Widget-Einstellung für alle Quellen und alle RIR-Teile. [Kol10] erachtet dies als nicht unbedingt notwendig, wenn das automatisierte Laden vorher abgespeicherter Presets möglich ist. Für chronologische Mischungen setzt [Rad10] die Auswahl zwischen verschiedenen Automatisierungsmodi voraus, die sich am Konzept von DAWs orientieren könnte. Er schlägt auch Tastaturkürzel für die Automatisierung, wie beispielsweise „alle Parameter auf einen bestimmten Bereich schreiben“, vor.

Zusätzliche Anregungen und Präferenzen für die Weiterentwicklung der RSM

[Alb10] rät zu einer umfangreicheren Nutzung der grafischen Möglichkeiten des Spread Widgets, z.B. für die Visualisierung der Discretes oder für Raumdrehungen.

[Var10] sieht den Import eigener RIRs als besonders notwendig für die tonmeisterliche Arbeit. Jeder Mischtonmeister hat seine eigene RIR-Bibliothek und würde diese auch gern in einer WFS-Umgebung nutzen können.

[Sch10] erachtet die Kombination von verschiedenen Raumpresets als besonders wichtig. Außerdem wäre ihm nach die Möglichkeit interessant, den Abhörpunkt an bestimmte Raumpositionen verlegen zu können ohne den Arbeitsplatz verlassen zu müssen.

[Rad10] schlägt für die Weiterentwicklung der RSM-Features eine Beschränkung auf wenige Tools vor, um einen unkomplizierten Einsatz zu garantieren. Er nennt hierfür wenige einfache Presets (Hall, Echo, Room ein algorithmisches Preset) sowie eine Änderung der Parameter Raumgröße und -geometrie. Außerdem sieht er den Mehrwert der RSM vor allem im interaktiven Gamesbereich, wofür eine Kopplung der Abhör- und Quellpositionen an Koordinatendaten für den Kamerastandpunkt nötig wäre.

[Kol10] betont die Wichtigkeit synthetischer Presets, da sie sich besonder gut im Bereich Musikmischung einsetzen lassen. Insgesamt sollte es ihm nach möglich sein, Extremwerte für die einzelnen Parameter zuzulassen. Die bereits erwähnte Forderung nach Delays für die einzelnen RIR-Teile kann so auch als kreatives Tool Einsatz finden, indem beispielsweise mit einer bewusst zu langen Predelay-einstellung für die Lates ein Slapback-Effekt erzielt oder mit der gleichzeitigen Wiedergabe von Earlies und Lates ein unrealistischer Effekt geschaffen werden kann.

5. Fazit und Ausblick

Es wurde in der vorliegenden Arbeit mit einem neuen Kreisarraysystem ein Konzertsaal akustisch vermessen und auf Grundlage der Messungen ein Preset für den Faltungshallprozessor ISONO Room Simulation erstellt. Die Interaktionsoberfläche der RSM wurde auf Grundlage eines Experteninterviews evaluiert und daraus Konsequenzen für eine sinnvolle Weiterentwicklung der RSM abgeleitet.

Die zwei Untersuchungsfragen der Arbeit werden im Folgenden wiederholt und mit einer Reihe von Verbesserungsvorschlägen beantwortet. Der letzte Abschnitt beinhaltet einige grundsätzliche Bereiche, die für die Weiterentwicklung der RSM in einer weiteren Perspektive als notwendig erachtet werden.

Untersuchungsfrage I

Wie gestaltet sich der Workflow von der Messung von Raumimpulsantworten bis hin zu deren Verwendung innerhalb eines Audioverarbeitungsprogramms?

Saalauswahl

Für die Eigenschaften des erstellten RSM-Presets ist der für die Messung gewählte Raum von entscheidender Bedeutung. Es sollte daher vor der eigentlichen Messung eine Eignungsprüfung anhand der bekannten raumakustischen Größen bzw. anhand einer Einzelmessung einer RIR mit einem Pegelmessgerät durchgeführt werden. Interessant wäre bei Konzertsälen auch die Untersuchung, inwiefern die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Größen Klarheits- und Deutlichkeitsmaß für die RSM-Wiedergabe eine Rolle spielen und wie aussagekräftig diese für eine Raumeinschätzung vorab sind.

Messgeräte

Die Vermessung des Wiedergabelautsprechers ist für die Entzerrung der gemessenen RIRs von Vorteil. Gleiches gilt für die verwendeten Messmikrofone.

Messverfahren

Möchte man das auf der Saalmessung basierten RSM-Preset neben der Verwendung von klassischen Bühne-Publikum-Aufstellungen auch für Extrempositionen und dynamische Quellaufbewegungen nutzen, führt kein Weg an mehreren Messungen mit verschiedenen QEPs vorbei. Bei symmetrischen Räumen reicht hierbei eine Beschränkung auf eine Saalseite, die für die andere Saalseite gespiegelt werden kann. Die Messungen an ausgewählten Quellpositionen könnten dabei mit mehreren synchronisierten VS-Geräten durchgeführt werden.

Die Ausrichtung des Lautsprechers in 4 Richtungen, wie sie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben ist, führte zu zufriedenstellenden Ergebnissen für Punktschallquellen, die sich im vorderen Bereich des Raums befinden. Bei einer zukünftigen Wahl frequenzabhängiger Abstrahlcharakteristiken für Quellen wäre eine genauere Auflösung, vor allem bei geringem Abstand von Quelle und Empfänger, vorteilhaft. Es sollten daher Verfahren eingesetzt werden, die verschiedene Abstrahlcharakteristika berücksichtigen.

RIR-Processing

Neben der Weiterentwicklung eines sinnvollen Messaufbaus lohnt eine tiefergehende Analyse der gemessenen RIRs. So könnte man beispielsweise die in Abschnitt 2.1.2 erwähnten Verfahren zur Berechnung der Nachhallzeiten aus den Impulsantworten näher untersuchen und so die Trennung der Earlies und Lates automatisieren.

Die in Abschnitt 3.2 beschriebene Nachbearbeitung der RIRs ist momentan noch als interaktiver Workflow angelegt, bei dem mit wiederholter visueller Betrachtung der RIRs Einstellungen vorgenommen werden müssen. Dieser Workflow sollte an vielen Stellen (Entfernung von Predelays, Extraktion der Discretes, etc.) automatisiert und um eine grafische Interaktionsoberfläche erweitert werden.

5.1. Praxisevaluation der RSM

Untersuchungsfrage II

Was sind die Kriterien für ein praxistaugliches Faltungshallprogramm für WFS aus Anwendersicht?

Nach der Auswertung des Experteninterviews aus Abschnitt 4.2.3 ergibt sich folgende Prioritätenliste für die Weiterentwicklung der RSM aus Anwendersicht.

Quellpositionsabhängige Automatisierung des frühen Zeitbereichs

Für einen Einsatz der RSM ist zusätzlich zum Spiegelschallquellenmodell für die Discretes die Mitführung des frühen Zeitbereichs nötig. Diese kann zunächst durch Lautstärke- und Delayberechnungen für die Earlies in Abhängigkeit der Quellposition geschehen und eventuell bei der Vorlage von Mehrfachmessungen neu berechnet werden. Eine Option zur automatischen Mitführung der Lates sollte zudem getestet werden.

Parametrisierung der Messungen für die RSM

Für die Anpassung der auf Messungen basierenden RSM-Presets werden einige Schallfeldparameter benötigt. Der Parameter Raumgröße könnte durch zeitliches Strecken der RIRs erreicht werden, der Parameter Luftabsorption durch einen geeigneten, globalen Tiefpassfilter. Bei der Parametereinstellung sind zusätzliche Grafiken des Aufnahmerraumes als Merk- und Klangvorstellungshilfe für den Anwender wichtig. Hier kann auch ein Tool zur Drehung des Wiedergaberraumes sowie eine Vorhör-option mit trockenen Samples von Standardsignalen (z.B. Sprache, Trompete, Snare) bereitgestellt werden.

Automatisierung

Eine umfangreiche Automatisierung aller Parameter, vor allem aber ein automatisierter Ladeprozess für RSM-Presets ist absolute Voraussetzung für den Einsatz der RSM in der Bewegtbildmischung.

Presetbibliothek

Es sollte eine Presetbibliothek mit geeigneten Messungen angelegt werden, die mindestens 20 Presets umfasst. Presets sollten miteinander kombinierbar sein und als individuelle Presets abgespeichert werden können. Die Presetbibliothek sollte auch einige besonders charakteristische Hallpresets wie z.B. gesamplete Retrohallgeräte für den Gestaltungsbereich enthalten.

Hardwareinterface

Ein geeignetes Hardwareinterface, das im Zusammenspiel mit der SAW funktioniert, sollte ausgewählt und einem Usabilitytest unterzogen werden.

5.2. Ausblick auf zukünftige Entwicklungsbereiche

Hörtests

Die oben beschriebenen Vorschläge wie die Anpassung des frühen Zeitbereichs sollten auf Grundlage repräsentativer Hörtests geschehen, die im Rahmen dieser Arbeit keinen Platz fanden. Insbesondere wäre es aufschlussreich, wie sich mehrere Messungen in einem Preset pro Raum kombinieren lassen und ob eine sinnvolle Kombination von Messungen mit verschiedenen QEPs überhaupt möglich ist.

Presets für musikalische Anwendungen

Aufführungsräume für Musik werden oft als gut klingend empfunden, wenn sich im Raum sehr schnell ein diffuses Schallfeld ergibt, und sich der Zuhörer umhüllt fühlt. Es wird daher in Konzerträumen versucht, diskrete Reflektionen für den Zuschauerbereich mit bauakustischen Maßnahmen zu bedämpfen oder umzuleiten. Hierfür könnten spezielle, von den Presets für Filmmischungen stark unterschiedliche Presets erstellt werden.

Eine weitere interessante Anwendung der RSM im Musikbereich wäre die Simulation von Regieräumen. So wäre es möglich, RIRs in Regien und Aufnahmerräumen von Studios zu messen und diese als virtuelle Räume für WFS-Umgebungen zur Verfügung zu stellen.

Im Bereich der RIR-Messung von Konzertsälen gibt es außerdem das Problem, dass sich Räume klanglich stark verändern, wenn Publikum anwesend ist. Eine tiefe Eingriffsmöglichkeit in die Messung bzw. die Kombination des gemessenen Presets mit Simulationen würde in diesem Bereich sicher auch zu weiteren klanglichen Verbesserungen führen.

Visualisierung und Interaktion

Wie sich schon bei der Auswertung der Interviews zur RSM zeigte, gibt es den Wunsch nach zusätzlichen Visualisierungen im Sinne einer anschaulichen Darstellung für die Interaktion. Diese kann auf Grundlage von Grafiken realisiert werden, die den gemessenen bzw. simulierten Raum abbildet, wobei der Anwender die Möglichkeit haben sollte, in das optimalerweise dreidimensionale Modell eingreifen zu können. Hierfür sind noch geeignete Formen der Interaktion zu finden.

Richtcharakteristik

Einen ganz wesentlichen Einfluss auf die erzielte Raumwirkung hat die Abstrahlcharakteristik von Instrumenten bzw. Quellen im Allgemeinen. Sobald diese Funktionen für die SAW implementiert ist, sollte sie für die RSM mitgenutzt werden. Die Abstrahlcharakteristik ist dann als zusätzlicher Quellparameter für Audioobjekte verfügbar. So kann man sich vorstellen, verschiedene Standardinstrumente bzw. Sprache als Quelltyp in der SAW anzuwählen, hinter denen sich ein winkel- und frequenzabhängiges Abstrahlpattern verbirgt. Für RSM-Messungen bedeutet dies eine möglichst hochauflösende Information darüber zubekommen, wie sich die Drehung des Messlautsprechers auf die RIRs auswirkt. Perspektivisch ist demnach auch im Bezug auf die Abstrahlcharakteristik ein sinnvolles Konzept für die Kombination von RSM-Presets aus verschiedenen QEP-Messungen mit unterschiedlicher LautsprecherAusrichtung der nächste Schritt zu einer praxistauglichen Raumsimulation.

A. Auswertungsmatrix des Experteninterviews

Bernhard Albrecht [Alb10]	Johannes Varga [Var10]	Johannes Scherzer [Sch10]	Stephan Radom [Rad10]	Stefan Kolbe [Kol10]
I. Generelle Arbeit mit Hallgeräten				
_Welche Hallgeräte setzen Sie für Musik- bzw. Filmmischungen ein?				
. kennt Vorgängermodell der RSM	. Lexikon 960, TC6000, digitale Lexicons, Waves Plugins, kein Altverb	. ausschließlich die Raumsimulation von Sequoia . eigene 12-Kanal-Lösung für WFS-Mischung realisiert . aufgenommen mit 8 Sennheiser MKH auf einem Kreis und Grenzflächen an den Wänden . verschiedene Quellpositionen gemessen aber in der Mischung vernachlässigt	. Nuendo-interner Hall als Effekthall . Digidesign-eigener Reverb . Waves IR1, Altverb . keine Hardwaregeräte	. Zoom Stereohall . Waves Bundle . Lexicon 300, PCM70, 100 (Retrohardware) . Federhall zum Experimentieren . TC Electronic als Plugin . Logic Space Designer . Digidesign D-Verb und Quantec für Sounddesign
_Welche Parameter sind bei der Interaktion mit Hallgeräten gefordert?				
. Parametrisierung auf Grundlage von akustischen Begriffen zur Beschreibung des Schallfelds (diskrete Reflektionen etc.)	. Nachhallzeit, erste Reflektionen, Raumgeometrie	. Presets aus Hallgeräten und gute Faltungshall-Presets . Eingriff in die RIR-Hüllkurve, FFT-Filter in Echtzeit berechenbar	. Roomsize, Reverbtime, Early Reflections, EQ . Parameter zur Anpassung an die Raumgeometrie . Density-Parameter (Diffuseness)	. EQ, Nachhallzeit . akustische Parameter wie Raumgröße etc. eher selten eingesetzt
_Welche Anforderungen an Hallgeräte stellen Sie diesbezüglich?				
_Erfüllen die vorhandenen Hallgeräte diese Anforderungen, was fehlt?				
. akustische Begriffe und daraus tonmeisterliche Begriffe wie Tiefenstaffelung etc. selbst ableiten	. Import und Verarbeitung eigener RIRs	. Parameteränderung abhängig von Quellposition (Reflektionsmuster und Frequenzabhängigkeit) . ein physikalisch fundiertes Model mit anschließenden, weitreichenden Gestaltungsmöglichkeiten . Abstrahlcharakteristik wird für den Hall mitberechnet . Import eigener RIR-Files in Standardformaten	. RIRs vom Settonmeister ins Hallgerät importieren . Interaktionsparameter auf gemessene RIRs . Entfernungsabhängige Lautstärkenanpassung für SAW-Quellen	. vermisst die Mitführung von Hall bei 5.1 abhängig von der Quellposition . gestalterische Einsatzmöglichkeiten, Hall als Farbe

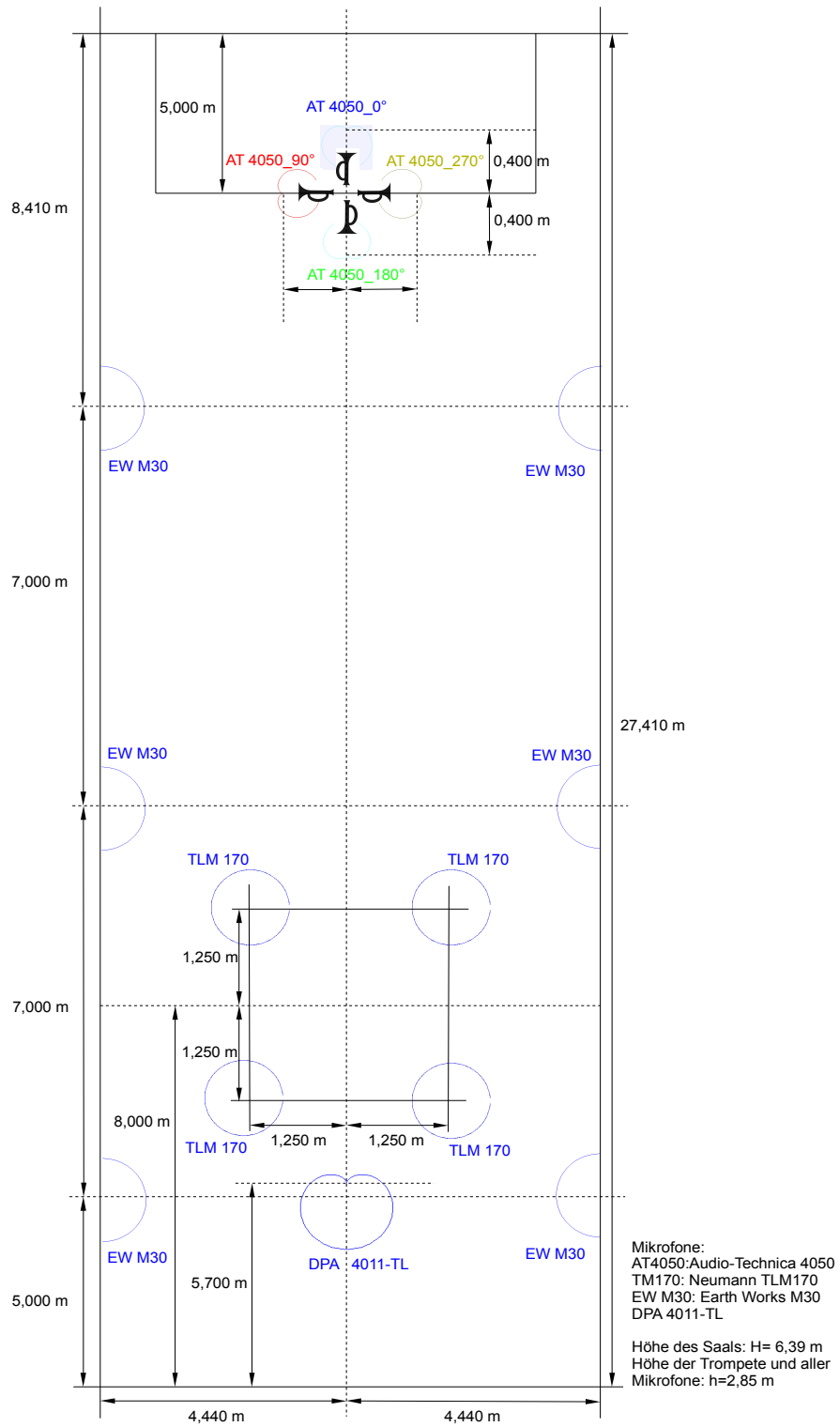
RSM DEMO				
II. Untersuchungsfragen				
1. Getrennte Bearbeitung der RIR-Teile				
_ Wo sehen Sie die Einsatzbereiche getrennter Raumimpulsantworten (RIRs) in zukünftigen Audioauthoring-Umgebungen? _ Wie sensibel ist der Tonmeister diesbezüglich? _ Ist eine Einstellungsmöglichkeit von EQs für jeden RIR-Teil notwendig?				
. enorm wichtig, verwendet oft unterschiedliche RIR-Teile aus verschiedenen Hallgeräten und legt diese als einzelne Rückwege auf das Mischpult . Slapback-Effekt des späten RIR-Teils, Delays für RIR-Teile für Darstellung von Außenszene gewünscht . Blending zwischen Earlies und Lates: verschiedene Crossfades anbieten . EQing aller RIR-Teile unbedingt notwendig	. Earlies und Lates zeitlich flexibel gestalten . Eingriff in die Presets bereitstellen: zeitliches Stretching von RIRs . EQing aller RIR-Teile unbedingt gewünscht	. Delays für alle Raumteile wichtig . EQing interessante Option zum Eingreifen, definitiv wichtig	. Copy-Paste-Funktion für das Spread Widget und Koppeln der Spread Widget Einstellungen für alle RIR-Teile . Editing der Discretes sinnvoll . Gruppenfunktionen für einzelne RIR-Teile . Automatisches Mitführen einzelner RIR-Teile, aber Eingriffsmöglichkeiten zulassen . EQing der einzelnen RIR-Teile sehr wichtig	. zeitliches Fenster für die Verschiebung von Earlies und Lates . EQing als ausschlaggebende Eingriffsmöglichkeit in die Färbung des Halls
2. Interaktionsmöglichkeiten des Spread Widget				
_ Inwiefern schätzen Sie das Spread Widget als praxisrelevant ein? _ Welche speziellen Anwendungen sehen Sie für diesen Zugriff?				
. Visualisierung der Discretes erforderlich . empfindet Spread Widget bei den Discretes als irritierend . Discretes als eigene Punktschallquellen realisieren (für Außenszenen mehrere Einzelreflektionen nötig) . Tool zur Raumdrehung für Filmmischungen gewünscht, Spread Widget als mögliches Interface hierfür . quellpositions-abhängige Automatisierung der Earlies (des Spread Widget) für Raumdrehung interessant	. Spread Widget interessant für kreatives Sounddesign . Spread Widget als Tool zur Raumdrehung uninteressant	. Discretes im Spread Widget verwirrend . Anzeigen des Spiegelschallquellenmodells für Discretes gewünscht	. Koppelung aller Spread Widget Einstellungen pro Quelle gewünscht (ist die Regel der Anwendung) . 3D-Darstellung der Raumskizze mit einstellbaren Absorptionskoeffizienten (erhöht die Arbeitsgeschwindigkeit) . kleine Grafik ins Spread Widget, Pfeil oder Fläche als Anzeige . Helligkeitsstufen in der Raumskizze zeigen den verstärkten Bereich . Kompassnadel zeigt die Raumausrichtung	. Import und Bewegung von Stereohall wie im Pro Tools 5.1-Panner realisieren: Verknüpfen von zwei Koordinatensystemen (Achsensymmetrische Bewegungen für beide Achsen, gegenläufige Kreisfahrten etc.), interessant für dynamische Verknüpfung von Quellbewegung und Spread Widget oder Wiedergabequellen

3. Anforderungen an ein RSM-Hardwareinterface				
_Wie sollte ein Hardware-Interface für das Spread Widget aussehen? _Welche zusätzlichen Features sollte ein Hardwareinterface steuern?				
. Hardwareinterface wichtig, da man mit der Mouse immer nur einen Parameter ändern kann, mit dem Mischpult aber mehrere . richtungsmäßige Interaktion im frühen Zeitbereich sehr wichtig . 3D Mouse als Option	. momentan zuviel Mousearbeit für einfache Pegeleinstellungen notwendig . Joystick aus früherer WFS-Mischung wenig hilfreich, Problem der Ungenauigkeit . Soloschaltung, Pegel- und EQ-Einstellungen als Tastenkombination oder mit Potis realisieren	. Proserie des Pultherstellers Euphonics zur Steuerung von bis zu 6 DAWs (z.B.MC5), Fader und Sektionen zuordnen, offenes Protokoll EuCon nutzen . Euphonics Artistserie für Desktoplösungen . zusätzlichen Tablet-PC zur Fernsteuerung des Multi-DAW-Controllers	. Mouse und 2 Fader reichen aus . Touchscreen zum gleichzeitigen Bewegen mehrerer Quellen, für das Spread Widget, Raum aufziehen, klein schieben, Mehrfinger-Interaktion nutzen, an iPhone orientieren, mit Faderansicht, Quellen anschubsen, nicht unbedingt zum Anfassen (Trackball) . Modellieren von Raum auf Touchoberfläche . Drehen von Quellen mit Mehrfingersystem für zukünftige Richtcharakteristik	. Wacom zur Positionierung von Quellen: Stift ist umständlich . Mouse und Tastenkombinationen ist ausreichend . Space-Navigator als Custom-Hardware für das Spread Widget interessant . maximal ein Controller für SAW, RSM und Richtcharakteristik
4. Dynamische Quellen in der RSM				
_Was sind die Anforderungen an die RSM bei dynamischer Quellbewegung?				
. Verhältnis von Discretes, Earlies und Lates muss sich mit Verschieben der Quelle in die Raumtiefe mit-verändern . bei Richtungsänderung der Quelle stimmt das Verhältnis von Discretes und Earlies nicht mehr (Doppelquelle) . grobes Mitführen des frühen Zeitbereichs bis 100ms gewünscht . Panning der Earlies (Spread Widget), Raumfokus wandert mit Quelle mit	. Drehung für extreme Filmsituationen (z.B. Figur vor einer Wand) nötig . Fades zwischen mehreren Presets aus positionsabhängigen Messungen für Quellbewegungen	. Mitführen der Earlies, da sich ansonsten die komplette Raumfarbe ändert . Pegel und Delays an Quellpositionen koppeln . Charakteristik des Raums wird erhalten, Pegel- und Delayanpassung reicht . Position an Fokussierung für die (Punktschall-)Quelle koppeln: breiter für nahe Quellen	. dynamische Quellen für den Games-Bereich interessant . Predelays für Earlies und Lates in Abhängigkeit der Quellposition mitführen (an Quellentfernung koppeln) . Sequentielles Hintereinanderschalten der Predelays von Discretes und Earlies/Lates . Richtungsabhängige, automatisierte Delays für Earlies und Lates (unterschiedliche Verzögerung der 8 RIR-Richtungen, im Spread Widget realisieren, an Richtungspegel koppeln)	. Raumdrehung durch Drehen der Wiedergabequellen (Hintergrundgrafik in der SAW)

5. RSM-Presets				
_Wieviele Presets sollten gleichzeitig verwendbar sein? _Wie stellen Sie sich eine praxistaugliche Presetbibliothek für die RSM vor? _Was ist beim Einsatz mehrerer Presets für Filmmischungen wichtig?				
. mindestens 4-6 gleichzeitig verwendbare Presets für Filmmischungen nötig (Mischgruppen brauchen verschiedene Presets, z.B. für Foley anderes Preset als für Dialog etc.) . Realistische Innen- und Außenräume, Teile von RIRs für Kombinationen von Außen und Innen (z.B. Fensterszene) . Presets für Außenszenen: einige Discretes, dann verzögerter Nachhall, Einzelreflektionen selbst verteilen können	. 2 Presets ausreichend, wenn das Laden automatisiert ist und eigene Presets abgespeichert werden können . Sammlung von Standardräumen zunächst wichtig . Anpassungsmöglichkeit von Presets an realistische Räume . mit wenigen eigenen RIRs eigene Presets erstellen können . RIRs vom Set importieren, in verschiedenen Presets speichern und auf diese quellpositionsabhängig pannen	. mindestens 2 für Szenenwechsel, 4 parallel in einer Szene, also 8 gleichzeitig verwendbar (im klassischen Studio auch nicht mehr als 8 Hallgeräte vorhanden)	. 2 automatisierte Presets für Filmmischungen, ein guter, in Größe und Form verstellbarer Raum ist ausreichend . gute realistische Räume für Sprache, Effekte gibt es schon genug . gute Presets für Außenszenen	. 2-3 gleichzeitige Presets ausreichend, wenn diese automatisierbar sind . möglichst viele realistische Presets und einige synthetisierte Räume . große Konzertsäle mit Bildskizze für schnelles Anwählen und als Merkhilfe (Klang kann dann schnell in etwa eingeschätzt werden) . Samplings der alten Klassiker als Effekthall . gute Stereohall-Presets importieren und den Hall grob aus der Quellrichtung mitführen genügt
6. Automatisierung				
_In welcher Form sind in der RSM Automatisierungen notwendig?				
. Automatisierung von Presetwechsel wichtig	. verschiedene Automatisierungsmodi bereitstellen . Automatisierung von Spread Widget nötig . Automatisierung von Presets	. Automatisierung aller Features in Abhängigkeit der Quellpositionen, aber auch selbst Nachregeln können . Automatisierung von Spread Widget und Pegel von RIR-Teilen, große Entfernung: fokussierter, weniger Earlies, mehr Lates	. für chronologische Mischungen verschiedene Automatisierungsmodi wichtig (write to start etc., vergleichbar mit Pro Tools Konzept) . mit Tastaturkürzel alle Parameter auf einen bestimmten Bereich schreiben . Crossfade-Bereich für Presetwechsel, nur bestimmte Parameter werden für einen Presetwechsel gehalten	. Automatisieren von gespeicherten Presets wichtiger als jeden einzelnen Parameter zu automatisieren . EQ für Luftabsorption sollte automatisierbar sein . wenn Raum als verbindendes Element genutzt wird sind weniger Automatisierungen nötig

7. Zusätzliche Anregungen und Präferenzen für die Weiterentwicklung der RSM				
_Welche der vorgestellten Features sind verbesserungswürdig? _Was wünschen Sie sich an zusätzlichen Features für eine bessere Praxistauglichkeit der RSM?				
. Visualisierung des Spread Widget besser nutzen, um Mehrwert zu generieren, reines Panning zu wenig . Visualisierung der Discretes (Spiegelschallquellenmodell) . Tool für die Raumdrehung gewünscht	. Import eigener RIRs . Onlineservice für Rendering eigener RIRs ins .irp-Format	. Pegelfader der RIR-Teile auf -60 anstatt auf -24 dB . Entfernungsabhängige Lautstärkenanpassung sehr wichtig, weil sonst nur Kreisbewegungen möglich sind . Güte des Spread Widget (Fokussierung) in Abhängigkeit der Quellentfernung . virtuelles Bewegen der Abhörposition ohne sich selbst im Raum zu bewegen (mit einem Tastaturkürzel) . Superposition von verschiedenen Raumpresets	. Room-, Hall-, Echo-Anwahl für algorithmischen Hall rechts des Spread Widgets . Parameter Size und Form für Echtzeitauthoring . Import eigener RIRs . Lösung für den Import von Stereohall . Kopplung von Kamera und Wellenfeld für den Gamesbereich . Verwendung für binaurales Tracking im Games-Bereich interessant (wichtiger als für Kinomischungen)	. Stretch-Regler für die Impulsantworten . Import eigener RIRs . N-Kanalhall mit einfachem Lautstärkepanning ausreichend (ohne ebene Wellenzerlegung, z.B. Quadarray), Beschränkung auf Frequenzverlauf der RIR . Hintergrundgrafik in der SAW zur Raumdrehung . Abhörpunkt verschieben und so Quelle-Empfänger-Positionen verschieben . Darstellung des Messaufbaus im Hintergrundbild . Verwendung des Mismatch von Discretes und Earlies als Gestaltungsmittel im Hörspiel oder der Darstellung von Außenszenen

B. Aufbau des Raummikrofons im Fürstensaal Kempten



Literatur

- [Acc] *The History of Spring Reverberation*. <http://www.accutronicsreverb.com>. – letzter Zugriff am 16.11.2010
- [AH06] ABEL, J. S. ; HUANG, P.: A Simple, Robust Measure of Reverberation Echo Density. In: *Proceedings of the 121st AES Convention, San Francisco, 2006*
- [Alb10] ALBRECHT, Berhard: *im Interview zur Room Simulation am 9.11.2010 im IOSONO Test Lab, Erfurt*. 2010
- [Ber10] BERNSCHÜTZ, Benjamin: *Varisphear Manual v1.1*. 2010. – Revision 1.0
- [Bla00] BLACKSTOCK, David T.: *Fundamentals of physical acoustics*. Wiley-Interscience New York, 2000
- [CM76] *Kapitel Teil 4: Wellentheoretische Raumakustik*. In: CREMER, Lothar ; MUELLER, Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik (Band 2)*. S.Hirzel Verlag Stuttgart, 1976
- [CQa] *Operating Instructions Meyersound CQ Series (1997), Part 05.041.010.01 Rev A*. <http://www.meyersound.de/products/concertseries/cq-1/>. – letzter Zugriff am 30.10.2010
- [CQb] *Datasheet CQ-1 (2005)*. <http://www.meyersound.de/products/concertseries/cq-1/>. – letzter Zugriff am 30.10.2010
- [Dic08] DICKREITER, Michael: *Handbuch der Tonstudiotechnik*. 7. Auflage. K.G. Saur München, 2008
- [Far00] FARINA, A.: Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique. In: *108th AES-Convention Paper 5093(D-4)*. Paris, Februar 2000
- [Gena] *Genelec 8030A Quick setup guide*. www.genelec.com. – letzter Zugriff am 17.11.2010
- [Genb] *Genelec AMS Acoustic Axis Location Tables. : Genelec AMS Acoustic Axis Location Tables*, www.genelec.com. – letzter Zugriff am 17.11.2010
- [Goe08] GOERNE, Thomas: *Tontechnik*. Carl Hanser Verlag München, 2008
- [HB09] HULSEBOS, Edo ; BAAN, Jan: *Manual for the Data Class 3 object toolbox*. 2009
- [Hul04] HULSEBOS, Edo: *Auralization using Wave Field Synthesis*, Delft University of Technology, Diss., 2004
- [HVB02] HULSEBOS, Edo ; VRIES, Diemer de ; BOURDILLAT, Emanuelle: Improved Microphone Array Configurations for Auralization of Sound Fields by Wave-Field Synthesis. In: *Journal of the Audio Engineering Society* Bd. 50, 2002, S. 779–790
- [HYN07] HIDAKA, T. ; YAMADA, Y. ; NAKAGAWA, T.: A new definition of boundary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses. In: *Journal of the AES* Bd. 122, 2007, S. 326–332

- [KM1] *Operating Instructions Neumann Series 180*. Publ. 01/10 539525. http://www.neumann.com/?lang=en&id=current_microphones&cid=km180_manuals. – letzter Zugriff am 30.10.2010
- [Kol10] KOLBE, Stefan: *im Interview zur Room Simulation am 11.11.2010 im IOSONO Test Lab, Erfurt*. 2010
- [Kut04] KUTTRUFF, Heinrich: *Akustik*. S.Hirzel Verlag Stuttgart, 2004
- [Kü10] KÜHNE, Christian: *Die Entstehung von Hall und seine künstliche Reproduktion*. Version: 2010. www.tontempel.de. – letzter Zugriff am 16.11.2010
- [LKW10] LINDAU, Alexander ; KOSANKE, Linda ; WEINZIERL, Stefan: Perceptual evaluation of physical predictors of the mixing time in binaural room impulse responses. In: *Proceedings of the 128th AES Convention, London, preprint 8089* (2010)
- [MAGF08] MELTZER, S. ; ALTMANN, L. ; GRAEFE, A. ; FISCHER, J.-O.: An object oriented mixing approach for the design of spatial audio scenes. In: *25. Tonmeistertagung Leipzig*, 2008
- [Mel09] MELCHIOR, Frank: *Matlab Coding Rules*. 2009
- [Mer06] MERIMAA, Juha: *Analysis, synthesis, and perception of spatial sound - binaural localization modeling and multichannel loudspeaker reproduction*, Helsinki University of Technology, Diss., 2006
- [Mey03] MEYER, Jürgen: *Kirchenakustik*. Erwin Bochinski GmbH Co.KG Frankfurt am Main, 2003
- [MLV06] MELCHIOR, F. ; LANGHAMMER, J. ; VRIES, D. de: A new Approach for Direct Interaction with Graphical Representations of Room Impulse Responses for the Use in Wave Field Synthesis Reproduction. In: *AES Convention Paper Preprint 6657, 120th Convention, Paris(France)*, 2006
- [MM01] MÜLLER, Swen ; MASSARANI, Paulo: Transfer-Function Measurement with Sweeps. In: *Journal of the Audio Engineering Society* (2001)
- [MN75] MEYER, Erwin ; NEUMANN, Ernst-Georg: *Physikalische und Technische Akustik*. Friedr. Vieweg + Sohn, 1975
- [MSPB10] MELCHIOR, F. ; SLADCEZEK, C. ; PARTZSCH, A. ; BRIX, S.: Design and Implementation of an Interactive Room Simulation for Wave Field Synthesis. In: *AES Conference Paper Preprint*. 40th AES Conference, Tokyo(Japan), 8.-10. Oktober 2010
- [MSV08] MELCHIOR, F. ; SLADCEZEK, C. ; VRIES, D. de: Spatial Sound Design: From Special Effects to Spatial Effects. In: *25. Tonmeistertagung Leipzig*, 2008
- [Mü08] MÜLLER, Swen: Messtechnik. In: WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Springer, 2008
- [Pie04] PIEPER, Frank: *Das Effekte Praxisbuch*. 1. Auflage. Carstensen, 2004

- [PML04] PULKKI, Ville ; MERIMAA, Juha ; LOKKI, Tapio: Reproduction of Reverberation with Spatial Impulse Response Rendering. In: *AES Conference Paper 6057*. 116th AES Convention, Berlin, 8.-11. Mai 2004
- [PTB] *Absorptionsgradtabelle*. <http://www.ptb.de/de/org/1/16/163/datenbank.htm>. – letzter Zugriff am 28.10.2010
- [Rad10] RADOM, Stephan: *im Interview zur Room Simulation am 11.11.2010 im IOSONO Test Lab, Erfurt*. 2010
- [RJ99] RUBAK, P. ; JOHANSEN, L. G.: Artificial Reverberation based on a Pseudo-random Impulse Response II. In: *Proceedings of the 106th AES Convention, München, preprint no. 4900*, 1999
- [San03] SANDMANN, Thomas: *Effekte und Dynamics*. 5. Auflage. PPV Medien, 2003
- [Sch07] SCHLESINGER, Anton et.al.: *Holographic sound field analysis with a scalable spherical microphone-array*. 2007. – 122th AES Convention in Vienna, Austria
- [Sch10] SCHERZER, Johannes: *im Interview zur Room Simulation am 9.11.2010 im IOSONO Test Lab, Erfurt*. 2010
- [Sen] *Absorptionsgrad verschiedener Materialien und Oberflächen*. <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60Koeff.htm>. – letzter Zugriff am 28.10.2010
- [Son98] SONKE, J.-J.: Variable acoustics by wave field synthesis: A closer look at amplitude effects. In: *AES Convention Paper, 104th Convention, Amsterdam*, 1998
- [Spo05] SPORS, Sascha M.: *Active Listening Room Compensation for Spatial Sound Reproduction Systems*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2005
- [SRA08] SPORS, S. ; RABENSTEIN, R. ; AHRENS, J.: The theory of wave field synthesis revisited. In: *AES Convention Paper, 124th Convention, Amsterdam* Audio Engineering Society (AES), 2008
- [Thi08] THIERGART, Oliver: *Sound Field Analysis on the Basis of a Spherical Microphone Array for Auralization Applications*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2008
- [UZ97] UDO ZÖLZER, Dr.-Ing.habil.: *Digitale Audiosignalverarbeitung, Kapitel Raumsimulation*. T.G. Teubner, 1997. – 199–223 S.
- [Var10] VARGA, Johannes: *im Interview zur Room Simulation am 9.11.2010 im IOSONO Test Lab, Erfurt*. 2010
- [VSL] *Multi Impulse Response der Vienna Symphonic Library GmbH*. www.viennamir.de. – letzter Zugriff am 20.10.2010
- [Wav] *Waves Reverb Plugins*. www.waves.com
- [Wei08] WEINZIERL, Stefan: Grundlagen. In: *Handbuch der Audiotechnik*, Springer, 2008
- [ZZ03] ZOLLNER, Manfred ; ZWICKER, Eberhard: *Elektroakustik*. 3.Auflage. Springer, 2003