

Diskrettfrequente Synthese von Nachhall-Prozessen

vorgelegt von

Robert Boesnecker

Von der Fakultät I – Geisteswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. phil.

genehmigte Dissertation

Berichter: Prof. Dr. de la Motte

Berichter: Prof. Dr. Weinzierl

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Februar 2008

Berlin

D83

EINLEITUNG	4
DEFINITION VON NACHHALL.....	4
AUFTRETEN VON NACHHALL.....	9
BEDEUTUNG DES PHÄNOMENS NACHHALL.....	10
<i>Aus der Perspektive des Zuhörers</i>	10
<i>Aus der Perspektive des Komponisten</i>	10
<i>Aus der Perspektive des Musikers</i>	11
<i>Aus der Perspektive des Tontechnikers</i>	13
PROBLEMSTELLUNG.....	14
<i>Raumimpulsantworten</i>	14
<i>Virtueller Nachhall</i>	15
ZIELSETZUNG UND VERWENDUNGSZWECK.....	15
VERFAHREN DER RAUMSIMULATION	16
SYNTHESE-MODELLE AUS DELAY, IIR-FILTERN UND ALLPÄSSEN.....	16
<i>Schröder, Göttingen, Schröder Algorithmus</i>	16
<i>Moorer, Stanford, Moorer Reverberation</i>	18
<i>Jean Marc Jot, IRCAM, FDN Algorithmus</i>	19
<i>William Gardner, MIT, Gardner Algorithmus</i>	20
<i>Boesnecker, TU Berlin, Twinpass Algorithmus</i>	21
<i>Fazit</i>	31
VERHALUNG MITTELS LANGER FALTUNG.....	31
<i>Hyo-In Koh, TU Berlin, Faltung langer Impulsantworten</i>	31
<i>Eigener Ansatz zu Koh'scher Faltung</i>	32
NEUER LÖSUNGSANSATZ	36
BESCHREIBUNG DES „KLAVIERHALL“-ALGORITHMUS.....	36
HÖRBEIPIELE.....	41
<i>Frequenz- und Amplitudenmodulation</i>	41
<i>Teiltonsummation</i>	44
<i>Hüllkurven</i>	48
<i>Phasenmodulation</i>	49
<i>Eigenversuch 1</i>	50
<i>Eigenversuch 2</i>	52
<i>Ergebnis</i>	53
VORAUSSETZUNGEN FÜR DAS KLAVIERHALL-MODELL	54
HÖRPHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGEN.....	54
<i>Signal-Pulse-Kodierung</i>	54
<i>Monaurale Phasenbeziehungen</i>	54
<i>Binaurale Phasenbeziehungen</i>	55
ENTWICKLUNG DES KLAVIERHALL-MODELLS	56
ECHOFREIHEIT.....	56
RESONANZFREIHEIT.....	56
SPEKTRALES EINSCHWINGEN.....	56
SPEKTRALES AUSSCHWINGEN.....	56
SPEKTRALE ZUSAMMENSETZUNG.....	57
SOFTWARE „KLAVIERHALL“.....	58
<i>Systemvoraussetzungen</i>	58
<i>Frequenz-Bestimmung</i>	60
<i>Spektrumsbestimmung</i>	62
EVALUATION	76
HÖRVERSUCHE ZUR SYNTHESE REALER RÄUME.....	76
<i>Ein kleiner Raum</i>	76
<i>Ein mittelgroßer Raum</i>	77
<i>Ein großer Raum</i>	78
<i>Faltung mit Musiksignalen</i>	79

HÖRVERSUCHE ZUR SYNTHESE IRREALER RÄUME	82
<i>Räume mit Frequenzmustern</i>	82
<i>Faltung mit Musiksignalen</i>	85
VERGLEICH MIT KOMMERZIELLEN HALLGERÄTEN	91
<i>EMT250 EMT</i>	92
<i>QRS Yardstick Quantec</i>	93
<i>PCM91 Lexicon</i>	94
<i>M3000 TC Electronics</i>	95
<i>Faltung mit Musiksignalen</i>	96
GRENZEN DES ALGORITHMUS	99
<i>Reduktion der Frequenzmodulationsstärke</i>	99
<i>Reduktion der Frequenzmodulationsgeschwindigkeit</i>	101
<i>Reduktion der Amplitudenmodulationsstärke</i>	103
<i>Reduktion der Amplitudenmodulationsgeschwindigkeit</i>	105
<i>Evaluation mit Musiksignalen</i>	107
DISKUSSION.....	108
EIGENSCHAFTEN	108
ANWENDUNGSGEBIETE	113
<i>Verhalten von trockenen Aufnahmen</i>	113
<i>Hörbarmachen von virtueller Akustik</i>	113
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	114
VERBESSERUNGSVORSCHLÄGE	114
<i>Mehrkanalige Aufnahme</i>	114
<i>Mehrkanalige Wiedergabe</i>	115
<i>Nicht-reale Erweiterungen</i>	116
LITERATURANGABEN.....	118
DANKSAGUNG.....	136
ANHANG.....	137
VERWENDETE UNTERMODULE DER SIGNALVERARBEITUNG	137
<i>Bandpass Filterbank</i>	137
<i>FM/AM Modulations-Parameter</i>	139
<i>Sinus-Interpolation</i>	140
<i>Hüllkurven Folger</i>	141
<i>Envelope Berechnung</i>	141
<i>IIR-Filter</i>	146
PARAMETER DES „KLAVIERHALL“-ALGORITHMUS.....	149
AUDIO CD MIT KLANGBEISPIELEN	151
<i>Disk 1</i>	151
<i>Disk 2</i>	151

Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Methode zur Erzeugung virtueller Nachhall-Signale vorgestellt. Virtuell bedeutet, daß es sich um ein rechnergestütztes Verfahren handelt, das in der Lage ist, den in natürlichen Räumen vorhandenen Nachhall zu simulieren und das Ergebnis mittels Stereo-Kopfhörer oder Lautsprecher dem Zuhörer darzustellen.

Dabei wird die These aufgestellt, daß sich dieser virtueller Nachhallschwanz ohne die Simulation von Echos oder Reflexionen, sondern nur durch Summation diskretfrequenter und modulierter Sinus-schwingungen berechnen läßt. Die akustischen Ergebnisse sind auf der beigefügten Audio-CD zu finden.

Definition von Nachhall

Nachhall ist eine Eigenschaft des Raumes. Wird ein Schall in einem Raum erzeugt, so breiten sich die Schallwellen bis zu den Raumbegrenzungen aus. Dort werden sie reflektiert und in den Raum zurückgeworfen. Eine einzelne Reflexion (aus dem lat. „Zurückbiegen“) nennt man Echo. Das durch die vielfachen Reflexionen aufgebaute akustische Ereignis nennt man Nachhall. Der Nachhall besteht also aus einer Fülle sehr dicht aufeinanderfolgender Echos.

Die Dauer des Nachhalles hängt einerseits von der Größe des Raumes, andererseits von der Zahl der Reflexionen ab. Je mehr Schall an einer Wand absorbiert (und nicht reflektiert) wird, desto kürzer ist die Nachhalldauer.

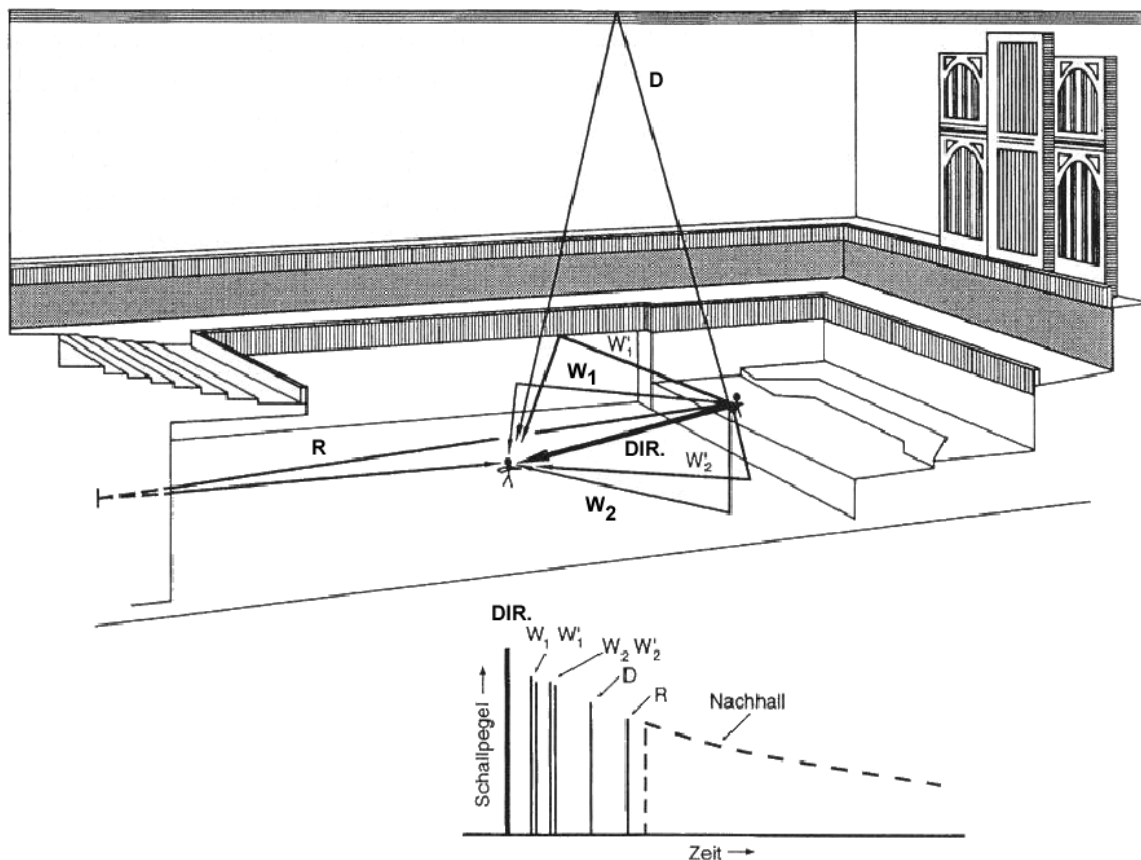


Abbildung Reflexionen im Raum J.Meyer Akustik u. musikalische Aufführungspraxis [144]

Die Abbildung zeigt eine Schallquelle rechts auf einer Bühne stehend. Der von ihr ausgesendete Schall erreicht den Zuhörer in der Mitte des Raumes auf direktem Weg (DIR.) sowie über Reflexionen an den Wänden (W1, W'1, W2, W'2), der Decke D, und der Rückwand R. Die ausgewählten Strahlen sind exemplarisch zu betrachten. In Wirklichkeit treffen weitaus mehr Reflexionen beim Zuhörer ein, sind aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet. Die eingezeichneten Reflexionen treffen auf Grund der längeren Wegstrecke später als das Direktsignal beim Zuhörer ein. Außerdem kommen sie aus anderen Richtungen als der Originalschall. In dem Schallpegel-Zeit-Diagramm ist schematisch die Beziehung zwischen Lautstärkepegel und Laufzeit dargestellt. Zuerst hört der Zuhörer den Direktschall (DIR.), danach hört er die Reflexionen. Die Dichte der Reflexionen nimmt immer mehr zu, ihr Pegel nimmt aufgrund der Absorption der Luft und der Wände immer weiter ab. Dieser Vorgang ist im Diagramm als Nachhall gestrichelt gekennzeichnet. Beim Nachhall ist also die Anzahl der Reflexionen pro Zeit so groß geworden, daß das menschliche Ohr sie nicht mehr als Einzelreflexionen wahrnehmen kann.

Um die künstliche Erzeugung dieses Nachhalles geht es in dieser Arbeit. Dabei ist einiges zu beachten:

1.) Die Nachhallzeit

Wie oben beschrieben hängt die Dauer des Nachhalles von den geometrischen Gegebenheiten des Raumes und der Beschaffenheit der Raumbegrenzungen ab. Durch die Architektur des Raumes wird folglich seine Nachhalldauer bestimmt. Der Zusammenhang zwischen dem Bestimmungszweck des Raumes und seiner Architektur legt zwangsweise seine Akustik und somit auch seine Nachhallzeit fest. Die Länge der Nachhallzeit wird subjektiv unterschiedlich bewertet. Für musikalische Darbietungen finden sich deswegen unterschiedliche Vorschläge für die zu empfehlende Nachhallzeit. Bei Darbietungen, bei denen es auf Sprachverständlichkeit ankommt, häufen sich die Empfehlungen die Nachhallzeit unter einer Sekunde zu halten. Deswegen klingen kleine wie große Opernhäuser eher „trocken“ im Vergleich zu Kirchen.

Die folgende Abbildung zeigt eine Statistik über die gemessene Nachhallzeit in Abhängigkeit des Raumvolumens. Während bei Kirchen ein langer Nachhall erwünscht ist, wird selbst bei großen Opernhäusern ein „kurzer“ Nachhall angestrebt.

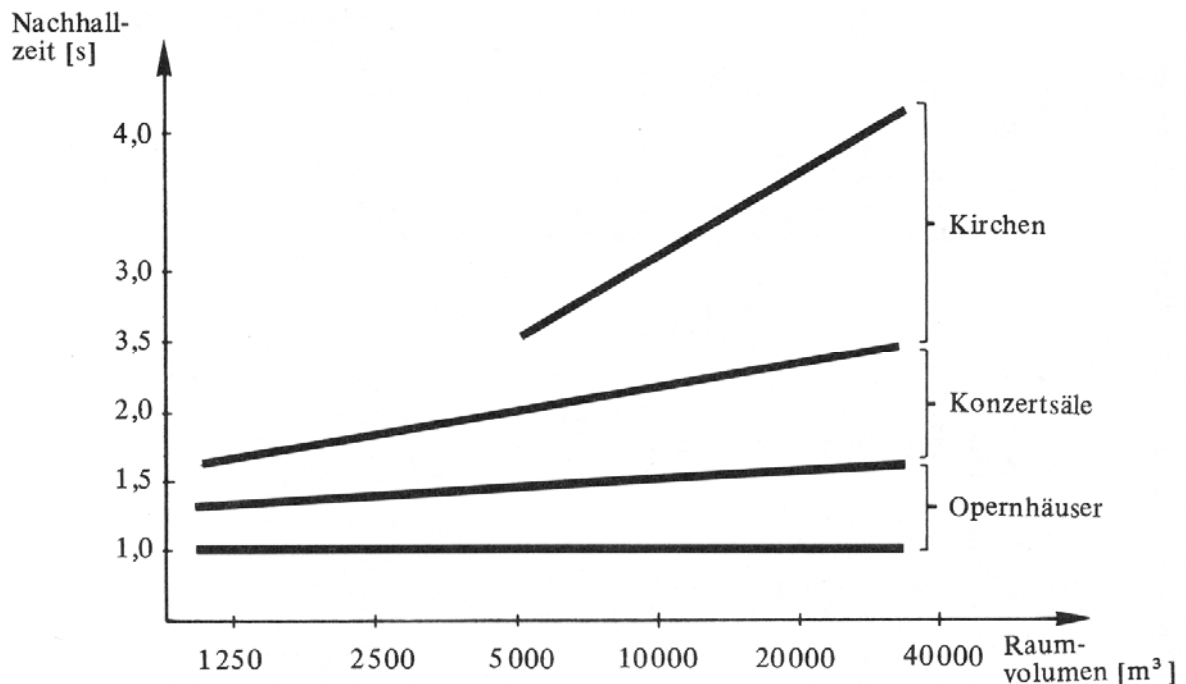


Abbildung Nachhallzeiten, Dickreiter [53]

Bei einer virtuellen Nachhall-Simulation sollen sich beliebige Halldauern erzeugen lassen.

2.) Das Nachhallspektrum

Die Frequenzabhängigkeit des Nachhalls hängt von der Raumgröße und der Beschaffenheit der Raumbegrenzungen ab. Je kleiner ein Raum ist, desto stärker wird der Nachhall im mittleren Frequenzbereich, je größer ein Raum ist desto mehr Anteil wird sich im Bassbereich aufbauen. Die Materialien der Decke, des Boden und der Wände färben den Nachhall durch ihr frequenz-abhängiges Reflexionsverhalten. Steinharte Wände reflektieren das nahezu gesamte Spektrum, holz-vertäfelte Wände reflektieren die hohen Frequenzen schlecht. Somit ist die Dauer des Nachhall frequenzabhängig.

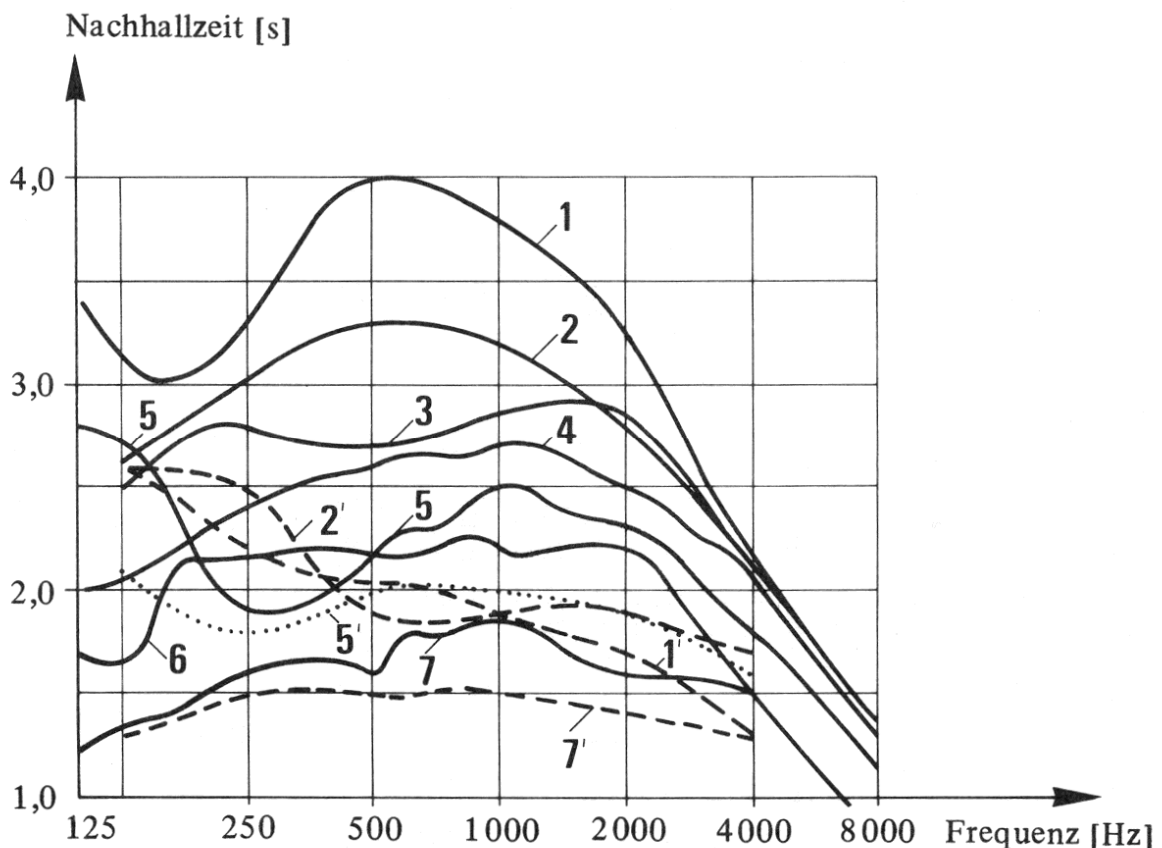


Abbildung Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit, Dickreiter [53]

Linien 1..7 unbesetzt, Linie 1', 2', 5', 7' mit Publikum besetzt

1. Musikvereinssaal Wien, 2. Alte Philharmonie Berlin (zerstört), 3. Symphony Hall Boston, 4. Oetkerhalle Bielefeld, 5. Herkulessaal München, 6. Musikhalle Hamburg, 7. Royal Festival Hall London.

Dr. Leo Beranek hat 66 Opernhäuser und Konzertsäle auf ihre akustischen Eigenschaften hin analysiert und in seinem Buch „How they sound“ [21] zusammengestellt. Hier zeigt er auch auf, welche bauphysikalischen Maßnahmen von Architekten und Akustikern zu Hilfe genommen werden, um einen gleichmäßigen und dichten Nachhall zu erreichen.

Durch die Dämpfung der Luft gilt bei vielen Räumen das die tiefen Frequenzen oft einen längeren Nachhall als die hohen Frequenzen.

Bei einer virtuellen Nachhall-Simulation sollte sich dieser Effekt ebenfalls einstellen lassen. Wünschenswert sind allerdings völlig frei bestimmbare Nachhall-Spektren bei denen sich mittels einer graphischen Oberfläche die Spektralkurven von Hand „malen“ lassen, ähnlich zu der obigen Abbildung.

3.) Die Diffusität

Eine akustische Reflexion an einem Hindernis (z.B. einer Wand) kann unter bestimmten Bedingungen gemäß der geometrischen Strahlenoptik erklärt werden. Es gilt also Einfallswinkel = Ausfallswinkel, wie in folgender Abbildung gezeigt.

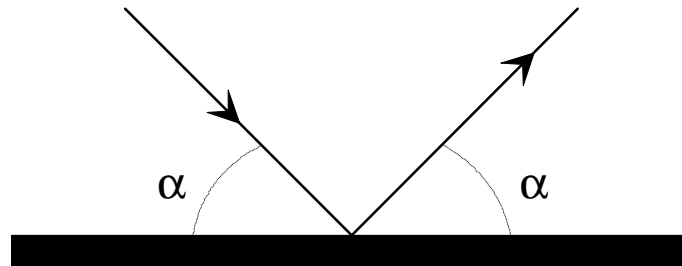


Abbildung glatte Reflexion an einer harten Wand

Unter Diffusion versteht man das Aufsplitten des reflektierten Signals in verschiedene Ausfallswinkel.

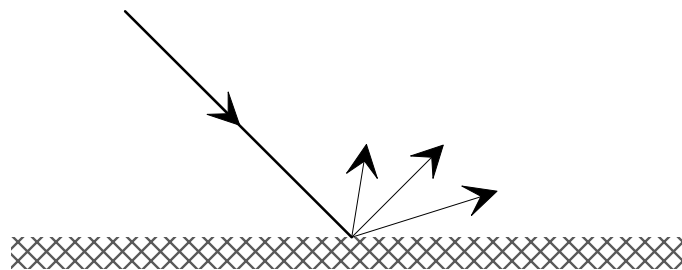


Abbildung Diffusion an einer porösen Wand

Dieser Effekt bedeutet, daß der Schall in diverse Richtungen zurückgeworfen wird. „Diffusion“ wird diese Zersteuerung genannt. Akustisch bedeutet diese Diffusion, daß ein Echo in viele kleinere und leisere Echos zerfällt, und somit die Echodichte schneller zunimmt. Dies wirkt sich positiv auf den Aufbau eines dichten Nachhalles auf.

Die Reflexion eines Schalles an einer Begrenzung oder einem Hindernis hängt von seiner Wellenlänge, d.h. von seiner Frequenz ab. Bei einer Schallgeschwindigkeit von 320 Metern pro Sekunde ist z.B. eine 1Khz Welle 32 cm lang. 100 Hz ergeben eine Wellenlänge von 3,20 Metern, 20 Hz ergeben eine Wellenlänge von 16 Metern. Ein Schall mit einer Frequenz f wird nur an einem Hindernis reflektiert, wenn dieses ein Ausmaß von mindestens $320/f$ Meter besitzt. Andernfalls wird der Schall um das Hindernis herumbeugt.

Diese physikalische Tatsache nutzt man, um die Dichte der Echos frequenzabhängig zu erhöhen. Durch „Diffusoren“ wird dafür gesorgt, daß der auf eine Wand fallende Schall in möglichst viele Richtungen reflektiert wird. Durch die Abmessung der Diffusoren und deren Bauform wird der spektrale Wirkungsbereich bestimmt.

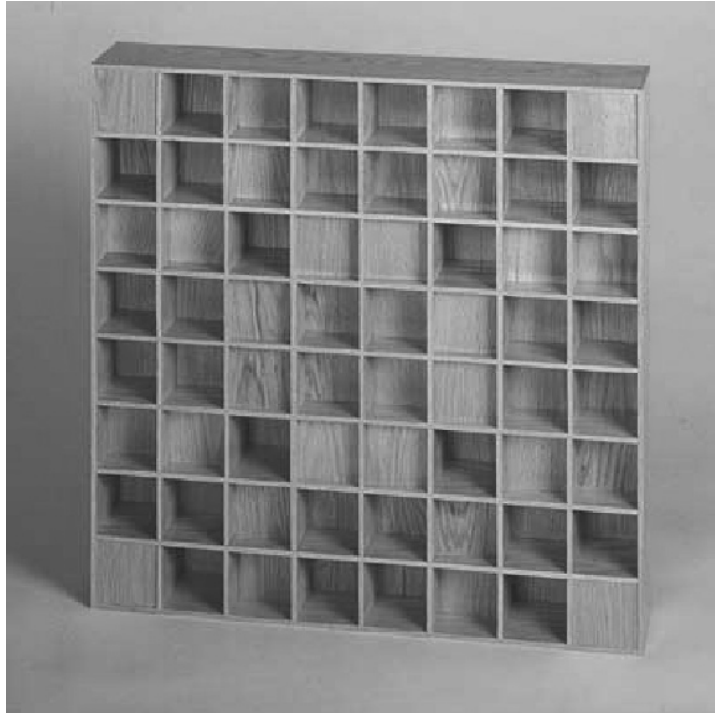


Abbildung Diffusor nach Schroeder [182, 183]

Ziel dieser Maßnahme ist es, schon die ersten Reflexionen möglichst weit zu zerstreuen, da diese bei der Ortung des Direktsignals stören können. Außerdem soll der Nachhall möglichst schnell aufgebaut werden und frei von Resonanzen sein. Resonanzen entstehen z.B. durch zueinander parallel stehende Wände

Bei einer virtuellen Nachhall-Simulation sollten deswegen erste Reflexionen möglichst gar nicht auftreten und die Aufbauzeit des Nachhalles möglichst kurz sein.

Weitere Charaktereigenschaften und Parameter von Nachhallen werden in der Diskussion unter dem Punkt Eigenschaften genannt.

Auftreten von Nachhall

Als akustisches Ereignis steht der Nachhall im Gegensatz zum hallfreien Geschehen, dem sogenannten Freifeld. Das Freifeld ist ein Ort ohne Reflexionen. Man kann einen sehr guten Eindruck einer Freifeldakustik z.B. bei einer Ballonfahrt erleben. Läßt man die spärlichen Reflexionen des Ballons über sich außer Betracht, und befindet man sich in einer gewissen Höhe über dem Boden (300m oder mehr), dann erreichen keine Echos oder Reflexionen mehr unser Ohr. Lautes Rufen oder Klatschen verschwindet vollkommen ohne akustischen Widerhall.

Denselben Effekt kann man (mit etwas größerem Aufwand) in einem sogenannten schalltoten Raum wahrnehmen. Dort wird mittels technischer Hilfsmittel (absorbierende Materialien an den Wänden, der Decke und dem Boden) ebenfalls eine nahezu ideales Freifeld erzeugt.

Der Nachhall eines Raumes hingegen „verlängert“ den Klang der Töne, die in ihn hinein ausgesendet werden. Dieses „Sustain“ ist wie oben erwähnt frequenzabhängig. Die ausgesendeten Töne werden unterschiedlich lange nachklingen, dadurch wird das Klangbild frequenzabhängig beeinflusst. Somit erklingt dieser Effekt in jedem Raum verschieden. Die Folgen für die musikalische Aufführungspraxis werden später diskutiert.

Für das Ohr ergibt sich durch das verlängerte Ausklingen noch ein zusätzlicher Effekt, wenn der anregende Ton mit Vibrato gespielt wird: dann nämlich entsteht durch den Nachhall, der ja eine zeitlich versetzte spektrale Antwort auf die Anregung darstellt, eine Schwebung (auch Chorus-Effekt genannt). Diese Schwebung klingt für das menschliche Ohr angenehm. Nicht umsonst wird Musikschülern von Instrumenten mit liegenden Tönen (Streicher, Holzbläser uva.) nahegelegt, ihr Instrument mit Vibrato zu spielen. Bei Vokalkünstlern wird das Vibrato der Stimme ebenfalls ausgiebig geübt.

Abgrenzung Echo \Leftrightarrow Nachhall.

Wie schon oben beschrieben, breitet sich der Schall von der Quelle weg in den Raum hinein aus, und erreicht zunächst als Direktschall den Zuhörer. Danach treffen eine Folge von Echos ein, die in der Intensität abnehmen, in der Dichte aber zunehmen. Die Art und Weise wie laut und aus welcher Richtung kommend die Echos den Zuhörer erreichen, ändert sich dessen Wahrnehmung des ursprünglichen Schallereignisses. In der Literatur gibt es Dutzende von Abhandlungen zu diesem Thema. z.B. Bauphysik [23, 28, 44, 45, 98, 130, 154, 155, 163, 172, 176, 205], Klang und Raum [7, 10, 27, 33, 42, 43, 77, 78, 89, 106, 111, 122, 129, 139, 143, 152, 161, 169, 178, 185, 194, 199], musikalische Architektur [14, 30, 31, 32, 54, 59, 95, 125, 136, 144, 156, 160, 193], etc. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß eine gute Akustik folgende Eigenschaften erfüllt:

Die ersten Reflexionen, die beim Zuhörer eintreffen und höchstens 10dB leiser als der Direktschall sind, sollen für Sprachanwendungen nicht später als 50 msec, für musikalische Anwendungen nicht später als 80 msec eintreffen. [43]

Die Reflexionen dürfen nicht als einzelne Ereignisse wahrgenommen werden können, sondern müssen miteinander verschmelzen. Ihr zeitlicher Abstand sollte weniger als 30 msec betragen. [95]

Räumlichkeitsfördernd sind seitlich, d.h. außerhalb eines 40°-Kegels eintreffende Reflexionen mit 25 bis 80 msec Verzögerung. Die Einschwingzeit eines Raumes darf etwas kürzer angenommen werden als 1/20-tel der Nachhalldauer. [144]

Bei einer Nachhalldauer von 1 Sekunde soll die Dichte der Eigenmoden nicht unter 0,15 Moden pro Hertz liegen. [181].

Aus den gewünschten Forderungen lassen sich im Wesentlichen zwei Aspekte für einen virtuell erzeugten Nachhall herauskristallisieren:

Der Nachhall produziert vorzugsweise keine Echos.

Der Nachhall schwingt beliebig schnell ein und hat eine sehr hohe Resonanzdichte.

Bedeutung des Phänomens Nachhall.

Aus der Sicht der täglichen Psychoakustik ist der Nachhall eines der gebräuchlichsten Klangeffekte. Viele (auch unmusikalische) Menschen singen im Badezimmer, weil der Nachhall ihrer Stimme einen verstärkenden und verschönernden Effekt gibt – egal wie genau die Töne getroffen werden. Und aufgrund der geringen Ausmaße eines typischen Badezimmers muß der Singende auch keine trainierte Stimme besitzen, um den üblicherweise kleinen Baderaum zu Nachhall anzuregen.

Bei Tonaufnahmen für Rundfunk oder Tonträger spielt der Nachhall eines Raumes eine entscheidende Rolle für die Aufstellung der Mikrophone. Der Hallradius stellt hierbei ein wichtiges Charakteristikum dar. Unter dem Hallradius versteht man den Abstand zur Schallquelle, bei dem der Direktschall und der Diffusfeld gleichlaut sind.

Vor allem sind es die musikalische Darbietungen (Konzerte, Oratorien, Opern etc.) die durch den Nachhall geprägt werden. Im folgenden werden vier Perspektiven beschrieben, die den Nachhall des Raumes aus jeweils einer anderen Sicht beurteilen:

Aus der Perspektive des Zuhörers

Das Nachhallen einer Stimme oder eines Instrumentes zeigt an, daß sich der Zuhörer und der Musiker in einem Raum – ja sogar im gleichen Raum befinden.

Durch die Lautstärke des Nachhalls, bzw. durch das Verhältnis von Direktschall zu Nachhall kann der Zuhörer seine Entfernung zur Schallquelle abschätzen. Je weiter weg er sich von der Quelle befindet, desto weniger Direktschall und mehr Diffusanteil hört er.

Das Zuhören in einem für musikalische Darbietungen gebauten Raum erzeugt im Zuhörer eine andere Wahrnehmung, als z.B. das Zuhören unter freiem Himmel (z.B. Klassik bei einer Open-Air Veranstaltung). Aus eigener Erfahrung bei Open-Air Aufführungen von klassischer Musik, die mit PA-Anlagen verstärkt werden mußte, ist bekannt, daß Tonmeister recht gerne ein wenig künstlichen Nachhall zu den mit Mikrofonen abgenommenen Instrumenten hinzufügen, weil eine „trockene“ Verstärkung unter freiem Himmel (also nahezu Freifeld-Bedingungen) ein gar schauerliches Klangbild erzeugt hätte.

Das Zuhören in einem Raum hingegen läßt den geübten Hörer den Raum nicht als Eingrenzung oder Einengung, sondern als Klangkörper und als Teil des Musikerlebens erleben. Vielen nicht musikalischen Zuhörern wird der Nachhall unbewußt vermittelt. Guter Nachhall wird oftmals nicht aktiv wahrgenommen, zu lange Nachhall wird als störend empfunden, weil die Darbietung dann „verschwommen“ und undeutlich wirkt.

Aus der Perspektive des Komponisten

Die Frage „Wieviel Raum braucht eine Musik“ ist von nahezu allen Komponisten mit ihren Werken subjektiv beantwortet worden. In vielen Fällen war zuerst der Raum vorhanden, und dann wurde die Musik dazu geschrieben. Zwei Beispiele:

- G. Gabrieli, mehrchörige Werke – St. Markus Dom, Nachhalldauer über 5 Sekunden [175]
- J.S.Bach, Orgelwerke – Thomas Kirche, Nachhalldauer 2-3 Sekunden [124]

Auch in der Literatur gibt es einige Analysen zum Thema „Komponist und Raum“. Als Beispiel sei hier Haydn (J. Meyer, Raumakustik und Orchesterklang in den Konzertsälen Joseph Haydns [146]) und Beethoven (siehe S. Weinzierl, Beethovens Konzerträume [207]) genannt.

Der Komponist G. Nono sagte: „*Wir müssen auf den Raum hören, und unsere Musik daran anpassen.*“

Johann Quantz schreibt 1752: „*Der Ort, wo eine Musik aufgeführt wird, kann der richtigen Beurteilung sehr viele Hindernisse in den Weg legen ... Ein Stück das uns in der Kammer fast*

bezaubert hatte, kann uns hingegen, wenn man es auf dem Theater hören sollte, kaum mehr kenntlich seyn.“

Nachhall wird hier als klangmodellierendes Ereignis erkannt. Der Nachklang ist Teil der Musik, weshalb viele Komponisten über den Aufführungsraum Bescheid wissen wollen, bevor sie mit ihrem Werk beginnen. Virtueller Nachhall sollte also die musikalischen Anforderungen abdecken können.

Aus der Perspektive des Musikers

1. Freie Wahl des Aufführungsraumes

Häufig hat ein Musiker oder ein Ensemble den Wunsch das mühsam erarbeitete Repertoire vor einem Auditorium zu Gehör zu bringen. Häufig werden dazu Reisen unternommen, und nicht allzu selten landet man in einer Akustik, die für die ausgewählten Stücke unpassend ist. Für einen großen Chor ist ein Gemeinde-Mehrzwecksaal genauso unpassend wie der Kölner Dom für ein Streichquartett. „Überakustisch“ ist das häufig gebrauchte Wort, wenn zuviel Nachhall im Spiel ist, „trocken“ oder „tot“ nennt man eine Akustik mit zu wenig Nachhall. Ein Erproben der Akustik des Aufführungsraumes ist deswegen unerlässlich. Manchmal kann man durch eine Veränderung der Aufstellung des Ensembles akustische Probleme mildern, die Nachhallzeit kann i.A. dadurch nicht in den Griff bekommen werden. Sie wird sehr häufig zu einem ungewissen Parameter: Die Nachhallzeit ist nämlich abhängig vom Füllgrad des Raumes mit Zuhörern. Während bei der Probe die Akustik der kleinen Kirche noch angenehm und förderlich war, ist am Abend bei der Aufführung der Raum praktisch halltot – weil eben 200 Zuhörer als Absorber wirken und den Nachhall in einem hohen Maß bedämpft haben. (Der Nachhall wird deswegen bei Konzertsälen im leeren wie im besetzten Zustand gemessen.) Nachfolgende Abbildung gibt einen subjektiven Anhaltspunkt für die Nachhallzeiten bei unterschiedlichen Musikrichtungen.

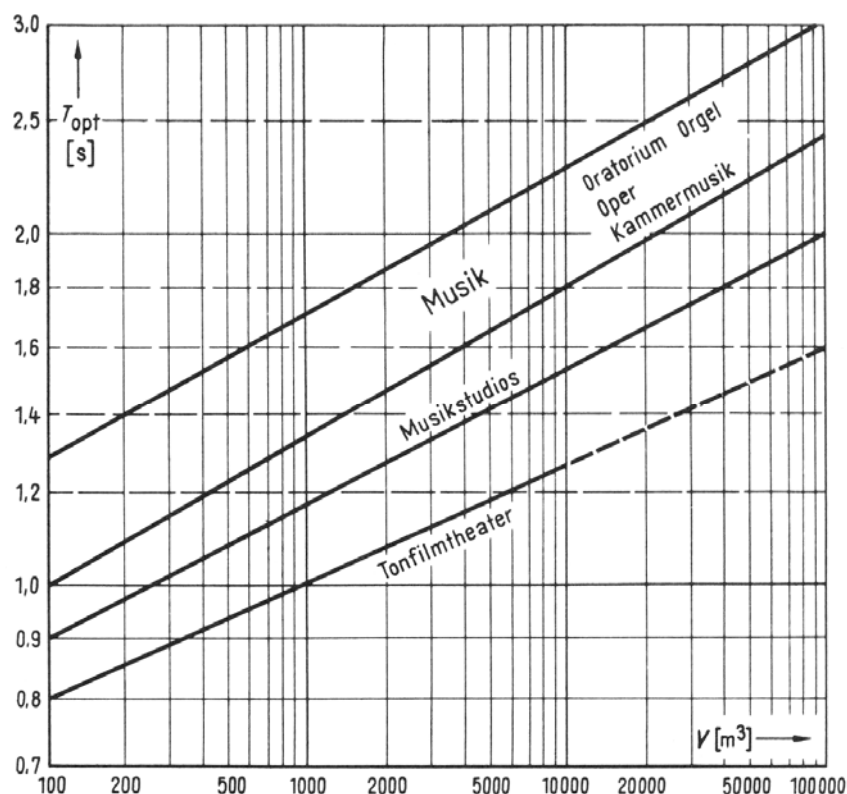


Abbildung Subjektiv günstig erscheinende Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Raumvolumen
Dickreiter [53]

2. Vorgegebener Aufführungsraum

Da der Musiker oftmals „nur“ der Ausführende einer Komposition ist, bleibt ihm bei der raumakustischen Ausgestaltung wenig Spielraum. Oratorien werden zweckgebunden in Kirchen aufgeführt, Opern in Opernhäusern. Durch diese Festlegung ist der Musiker gezwungen, den angedachten Aufführungsraum als vorgegeben zu akzeptieren.

Zuvor hatte der leitende Akustiker während der Planung und dem Bau des Gebäudes die Verantwortung über den guten Klang des Raumes. Doch nur allzu häufig wurde er vom Architekten überstimmt, weil die optischen Aspekte höher bewertet werden, als die akustischen. Erst wenn ein bekannter Dirigent oder Musiker seinen Unbill über die mangelhafte Akustik öffentlich äußert, werden Notmaßnahmen ergriffen, wie z.B. die Deckensegel aus Plexiglas in der Münchner Philharmonie.

In wieweit ein mangelhafter Nachhall eine negative Beeinflussung erzeugen kann, sei hier exemplarisch am Beispiel einer Bariton-Gesangsstimme beschrieben. Nachfolgende Abbildung zeigt den Stimmumfang der männlichen und weiblichen Stimme.

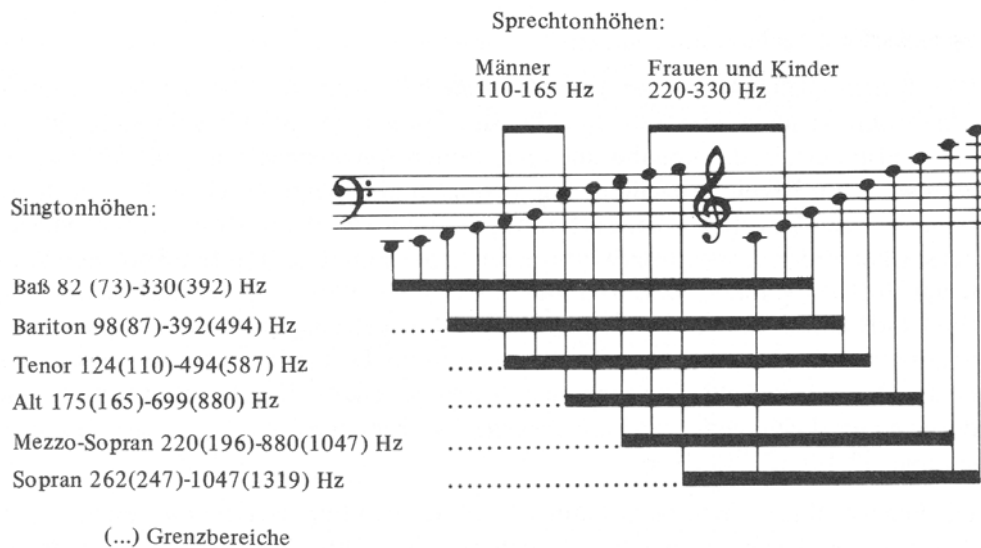


Abbildung Singtonhöhen, Dickreiter [53]

Der Bariton überstreicht mit seinem Grundtonumfang 98Hz bis 392Hz. Ein Nachhall, der diesen Umfang durch seinen Nachklang unterstützt wird von einem Bariton erfahrungsgemäß als angenehm empfunden. „In diesem Raum singt es sich leicht“ – so oder ähnlich äußert sich der Sänger, wenn er zum ersten Mal in diesem Raum probiert. Der Raum „trägt“ seine Stimme. Ein voll besetzter Musikvereinssaal in Wien wird für ihn eine „bessere“ Akustik darstellen wie z.B. die voll besetzte Royal Festival Hall in London, wie aus der Abbildung auf Seite 6 ersichtlich ist.

Für einen virtuellen Nachhall ist es somit erforderlich, sich an die musikalischen und stimmlichen Belange anpassen zu können. Optimal wäre eine Beeinflussung des Spektrums in Halbtonschritten, so wie sie der modernen Notation entspricht.

3. Beliebiger Aufführungsraum, PA-Akustik

Im Bereich der elektroakustischen Musik stellt der Nachhall eines Raumes eher ein Problem als eine Lösung dar. Da im elektronischen Bereich häufig mit künstlichem Nachhall gearbeitet wird, ist ein akustisch unauffälliger Raum (z.B. gedämmte Turnhalle) besser geeignet als ein Saal mit 2 Sekunden Nachhall. Die Musiker bringen quasi ihren eigenen Nachhall mit und sind deswegen auf die akustischen Eigenschaften ihrer Umgebung nicht angewiesen.

Das Problem des „guten“ Nachhalles, der Stimmen und Instrumente umgibt und weiterträgt, ist nun von der bauphysikalischen Seite zur elektronischen Seite gewandert.

An dieser Stelle setzt diese Arbeit an, und zeigt einen neuen, bisher unbekanntem Weg, Nachhall auf elektronische Weise zu berechnen.

Aus der Perspektive des Tontechnikers

Seit der zunehmenden Verbreitung von digitalen Rechnersystemen werden immer mehr Aufgaben des täglichen akustischen Lebens auf computergestützte Prozesse abgebildet. War in den Jahren um 1970 das Aufnehmen und Schneiden von musikalischen Ereignissen mit Tonband und Schere die Regel, so ist heute im Jahre 2004 beides vom Computer übernommen worden. Hochauflösende Digital-Wandler haben ab den 90' er Jahren zunehmend die notwendige Abtastraten und die Sampling-Auflösung zur Verfügung gestellt, um akustische Signale nahezu unverfälscht aufnehmen und wiedergeben zu können. Schnelle und preiswerte CPU-Prozessoren haben die notwendige Rechenleistung zur Verfügung gestellt, um akustische Signale zu verarbeiten. Massenspeicher wie z.B. Festplatten haben immer höhere Datentransfer-Raten und Speicherkapazitäten erschlossen und so das mehrspurige Aufzeichnen von Audiosignalen wirtschaftlich gemacht. Langzeitspeicher wie z.B. die CDROM oder die DVD-A ermöglichen heute die Archivierung von Audiosignalen für kleines Geld.

Im Zuge dieser Umstellung von analoger Technik auf die digitale Technik sind auch akustische Simulationsaufgaben in den Digitalbereich gewandert. Während man früher in der Studioteknik zur Erzeugung von Nachhall einen real existierenden Raum, den sog. Hallraum, verwendet hat, erledigten in den 90' er Jahren diese Aufgabe digitale Hall-Geräte mehr oder weniger gut. Diese digitalen Hallgeräte enthalten Prozessoren, die speziell für digitale Signalverarbeitung erfunden worden sind. Diese Prozessoren heißen DSPs (Digitale Signal Prozessoren). Ihre Architektur ist so gebaut, daß sie in der Lage sind typische Aufgaben wie Filter, Equaliser, u.a. hardwareunterstützt effizient zu berechnen. Dadurch unterscheiden sie sich von den general-purpose-CPUen der Intel und MacIntosh-Welten. Jedoch auf der Suche nach neuen Absatzmärkten haben die Hersteller oben genannter CPUen entdeckt, daß typische DSP-Strukturen wie z.B. SIMD-Befehle (Single Instruction Multiple Data) sich auch in ihren CPUen einpflanzen lassen. Somit nahm in letzter Zeit das Angebot an Audio- und Video verarbeitender Software für Windows oder MacIntosh rapide zu, und drängt die klassischen DSP-Lösungen in den Hintergrund. In täglichen Studiobetrieb werden deswegen vermehrt reine Softwarelösungen, auch für das Problem der Nachhallerzeugung, eingesetzt. Tonband und Schere sind zur Nostalgie geworden.

Aufgrund der enorm gestiegenen CPU-Rechenleistung ist es mittlerweile sogar möglich eine Raum-Impulsantwort komplett in Echtzeit auf ein Audiosignal anzuwenden. Das Rechenverfahren heißt Faltung und ist ein Standardverfahren der digitalen Audiosignalverarbeitung. Neu ist heute allerdings, daß dieses Verfahren eine Raumimpulsantwort von mehreren Sekunden Länge auf ein beliebig langes Audiosignal errechnen kann, und die Software dazu unter dem Namen SIR kostenlos in Internet verfügbar ist [127].

Um einen Raumnachhall auf ein Audiosignal zu rechnen bedarf es also nur noch einer brauchbaren Raumimpulsantwort im digitalen Format.

Das Errechnen einer solchen Impulsantwort ist das Ziel dieser Arbeit.

Problemstellung

Mittels einer Faltung soll ein Audiosignal mit Nachhall versehen werden. Dazu ist es notwendig, den Nachhall in digitalisierter Form vorliegen zu haben. Um diesen Nachhall zu erhalten gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten:

1. einen real existierenden Raum „auszumessen“ und seinen Nachhall aufzuzeichnen
2. einen virtuellen Nachhall aufgrund von Hall-Algorithmen zu berechnen

Zunächst ein paar Anmerkungen zum ersten Punkt:

Raumimpulsantworten

Reflexionen und Nachhalle realer Räume werden in Raumimpulsantworten dargestellt.. Raumimpulsantworten beschreiben u.a. das Ausklingen eines Raumes, nachdem er durch ein akustisches Signal angeregt worden ist. Will man also den Nachhall z.B. einer Kirche aufnehmen, dann muß man „nur“ diesen Kirchenraum zu seinem Nachhall anregen und diesen aufnehmen. So einfach wie es theoretisch klingt, ist es in der Praxis nicht.

Um ein verwertbares Nachhallsignal zu erhalten, muß die Aufnahme frei von Nebengeräuschen sein. Vorbeifahende Autos oder Flugzeuge, Besucher der Kirche etc. veranstalten typischerweise einen unbrauchbaren Nebengeräuschpegel, der den Nachhall verunreinigt und unbrauchbar macht. Deshalb werden die meisten realen Nachhallaufnahmen zwischen 3 und 4 Uhr morgens gemacht, weil zu diesem Zeitpunkt ein Großteil der Störer noch schläft.

Um den Raum zu einem verwertbaren Nachhall anzuregen wird häufig ein kurzer akustischer Impuls verwendet. Idealerweise enthält dieser Impuls alle Frequenzen des Hörspektrums mit gleicher Amplitude, damit der Raum auch mit seinem gesamten Spektrum antwortet. In der Praxis gibt es so einen Impuls nicht. Man verwendet i.a. Starterpistolen, deren Knall zwar genügend Schalldruck erbringt, um einen lauten Nachhall zu erzeugen, aber keinen gleichmäßigen Frequenzverlauf aufweist, weshalb der aufgezeichnete Nachhall stark gefärbt klingt. Der aufgezeichnete Nachhall weist in seinem Spektrum deswegen Resonanzen auf, die aber nicht auf den Raum, sondern auf die Starterpistole zurückzuführen sind.

Ein anderes Verfahren verwendet keinen Knall, sondern einen Sinus-sweep, d.h. einen reinen Sinuston der von tiefen Frequenzen (ab 20 Hz) bis hohen Frequenzen (bis 12kHz) durchgefahren (gesweept) wird, um so das Nachklingen des Raumes pro Frequenz mit einem Meßmikrofon zu messen. In einem weiteren Schritt muß dann aus dem gemessenen Ergebnis der eigentliche Raumhall geschätzt werden.

Wieder ein anderes Verfahren verwendet eine MLS-Rauschfolge als Sample, das per Lautsprecher in den Raum gesendet wird. Mit einem Meßmikrofon wird dann das Rausch-Sample und die Raumantwort aufgezeichnet und per Computeranalyse das reine Raumsignal vom Meßsignal getrennt.

Beide zuletzt genannten Arten haben den Nachteil, das der Lautsprecher omnidirektional abstrahlen muß, um nicht bestimmte Raumrichtungen bevorzugt anzuregen. Diese Forderung läßt sich für hohe Frequenzen in der Praxis kaum einhalten, da pistonische Lautsprecher (z.B. Konuslautsprecher) bei hohen Frequenzen eine starke Bündelung aufweisen.

Als Fazit bleibt festzuhalten, daß die Erzeugung von Raumimpulsantworten in realen Räumen ein schwieriges Geschäft ist. Hat man dennoch eine brauchbare Impulsantwort „ermessen“, dann stellt sich als nächstes die Frage, ob diese Impulsantwort musikalisch sinnvoll eingesetzt werden kann. Falls der Raum zu dumpf (oder zu hell) klingt, kann sich der gemessene Nachhall als zu basslastig (oder zu penetrant) erweisen. Einer musikalischen Aufnahme, der Nachhall fehlt, kann durch Zugabe von

zu dumpfen Nachhalls die Präsenz verloren gehen – durch Zugabe von zu hellem Nachhall kann der Gesamtklang zu mittig werden.

Am besten wäre es, von einem Raum mehrere unterschiedlich gefärbte Impulsantworten zu erhalten, um beim Verhalten eine größere spektrale Auswahl zu besitzen.

Virtueller Nachhall

Um einen plausiblen, gut klingenden, und leicht parametrisierbaren Nachhall zu berechnen wurde bislang der Weg der Physik beschritten und das Verhalten „realer“ Räume nachempfunden. Das heißt: mittels computerunterstützter Berechnungen wurden in dreidimensionalen CAD-Modellen die Echostrukturen simuliert und daraus die virtuellen Impulsantworten generiert.

Durch diesen Ansatz tauchen in den virtuellen, physikalischen Modellen dieselben Probleme auf, wie sie in der echten Bauphysik und Architektur auch bekannt sind. Das Problem der frühen Echos (early reflections) sowie die Zeitdauer, bis der Nachhall aufgebaut ist, sind durch die topologische Ähnlichkeit der programmiertechnischen Ansätze im virtuellen Leben ebenso ungelöst wie im realen.

Das Ziel ist ein Nachhall, der die oben genannten Probleme nicht besitzt. Dieser Nachhall soll als virtueller Nachhall in beliebig kurzer Zeit eingeschwingen sein und er soll keine auffälligen Eigenresonanzen produzieren, außer wir wünschen das. Außerdem soll er keine Echos produzieren.

Zielsetzung und Verwendungszweck

1. Auralisationsaufgaben

In Zuge der oben genannten Digitalisierung der Studiowelt, haben auch andere Berufssparten eine ähnliche Entwicklung erlebt. Hier genannt sei die Architektur. Während früher mit Papier und Stift gearbeitet wurde, sind heute CAD (Computer Aided Design) – Arbeitsplätze die Regel. Ist ein Raum nun digital erfaßt worden und sind alle verwendeten Materialien der Innenausbaues festgelegt, dann kann die zu erwartende Akustik dieses Raumes vorhergesagt werden. Dazu bedient man sich spezieller Programme wie z.B. Ulysses [133] oder EASE [3], die über Raytracing oder ähnliche Verfahren den Nachhall-Charakter zu bestimmen versuchen.

2. Elektroakustische Musik

Die Digitalisierung hat auch starken Einfluß auf die zeitgenössische elektronische Musik ausgeübt. Nicht nur im Bereich der kommerziellen Musikerzeugung, sondern vor allem auch im Bereich der experimentellen Musik ist der Computer als Werkzeug hinzugekommen, jedoch fehlt noch der Sprung hin zum Computer als vollwertiges Musikinstrument. Im Bereich Nachhall-Erzeugung werden im Verlauf dieser Arbeit die grundlegenden Algorithmen genannt, die in der Lage sind, einen plausiblen Nachhall zu erzeugen, wie er für landläufige Pop-Produktionen ausreichend ist. Der in dieser Arbeit beschriebene Algorithmus ermöglicht darüber hinaus auch die Realisierung eines Hall-Klaviers oder einer Hall-Trommel und ist in weiten Bereichen für den experimentellen Einsatz gedacht.

Für die Verhallung von Musik gilt folgendes Hall-Kriterium:

Ein guter Nachhall ist vollkommen resonanzfrei, d.h. der simulierte Raum hat keine bevorzugten Frequenzbereiche, in denen er aufschwingt und er hat keine Frequenzbereiche, in denen er das Hallsignal unterdrückt bzw. auslöscht.

Zum Experimentieren wäre es noch schöner, man könnte den Frequenzgang des Nachhalls frei bestimmen, z.B. ihn als Frequenzkurve auf den Bildschirm zeichnen.

Verfahren der Raumsimulation

Synthese-Modelle aus Delay, IIR-Filtern und Allpässen

Seit der Einführung der Digitaltechnik zur Beschreibung und Simulation akustischer Ereignisse hat es mannigfaltige Ansätze zum Thema Nachhall gegeben. Einer der ältesten in der Literatur greifbaren Algorithmen ist der Schröder-Nachhall. Er ist benannt nach Prof. Dr. Schröder von der Universität Göttingen und stammt aus dem Jahr 1962 [180].

Schröder, Göttingen, Schröder Algorithmus

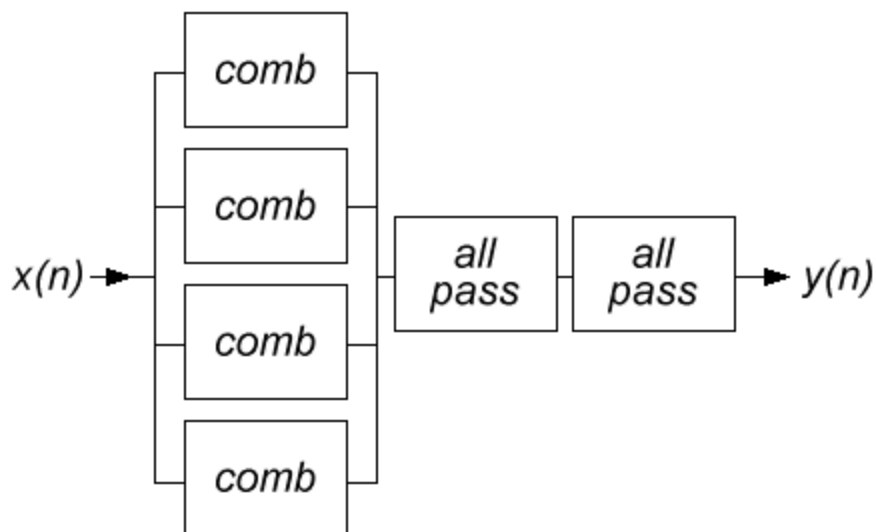


Abbildung: Schröder Algorithmus zur Nachhallerzeugung

Der Aufbau besteht aus 4 IIR-Comb-Filtern und zwei nachgeschalteten Allpässen. Mit Comb-Filtern wird versucht, das Reflektieren der Schallwellen im Raum nachzuempfinden.

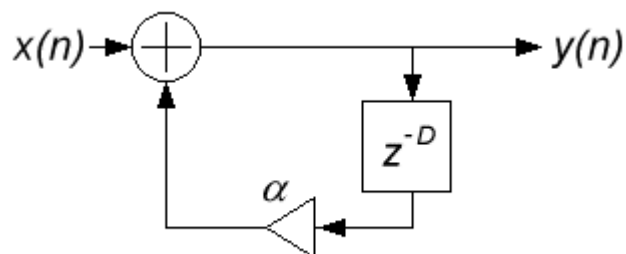


Abbildung: prinzipieller Aufbau eines Comb-Filterers

Mit Hilfe einer Delay-Line (z^{-D}) wird das Schallsignal um eine Zeitdauer D verzögert und über den Gewichtungsfaktor α rückgekoppelt. Der Faktor α muss kleiner als 1 sein, um ein stabiles Filter zu erhalten. Der Name Comb-(= Kamm)-Filter rührt von dem Frequenzgang des Filters her.

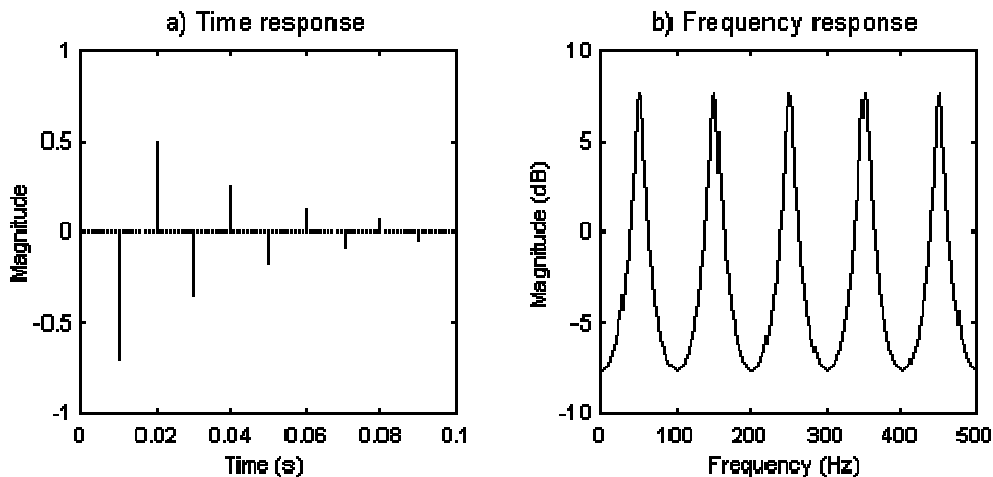


Abbildung: Übertragungscharakteristik eines Comb-Filters

(Delay = 1 msec, Feedback (α) = 75 %)

Wie die Zacken eines Kammes sieht die Übertragungsfunktion eines Comb-Filters aus. Aus dieser Abbildung wird auch deutlich, daß Comb-Filter das Audiosignal spektral beeinflussen, also färben. Die Zeitfunktion zeigt eine abklingende Reflexion, wie sie in der Realität zum Beispiel bei Flutter-Echos tatsächlich auftritt.

Die Färbung des Audiosignals hat zur Folge, daß bei Verwendung mehrerer Comb-Filter eine spezielle Selektion erfolgen muss. Die Werte der 4 Comb-Delays des Schröder-Algorithmus' müssen dann praktisch so vorgegeben werden, daß sich die resultierenden Kamm-Filter-Kurven nicht aufschaukeln. Es werden deshalb primzahlige Verhältnisse bevorzugt, um einen möglichst glatten Frequenzverlauf zu erhalten.

Der Anordnung aus 4 Comb-Filtern sind zwei Allpass-Filter nachgeschaltet. Ein Allpass-Filter erzeugt gegenüber einem Comb-Filter keine spektrale Beeinflussung.

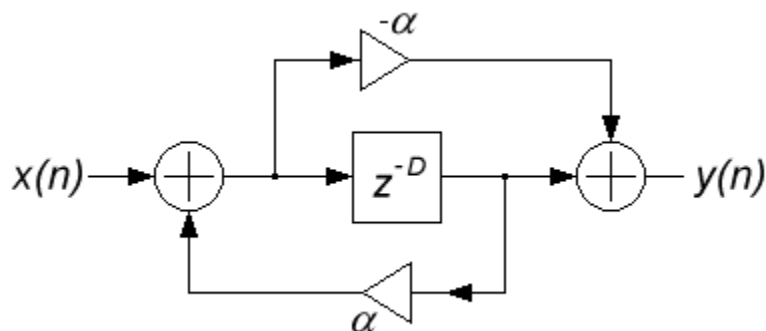


Abbildung: prinzipieller Aufbau eines Allpass-Filters

Seine Übertragungsfunktion ist linear für die Frequenz, aber nicht für die Phase. Kurze Signale und Transienten werden hörbar beeinflusst. Mit den Allpass-Filtern wird versucht, die Diffusität eines Raumes nachzubilden dadurch daß die Phasenlagen frequenzabhängig beeinflusst werden.

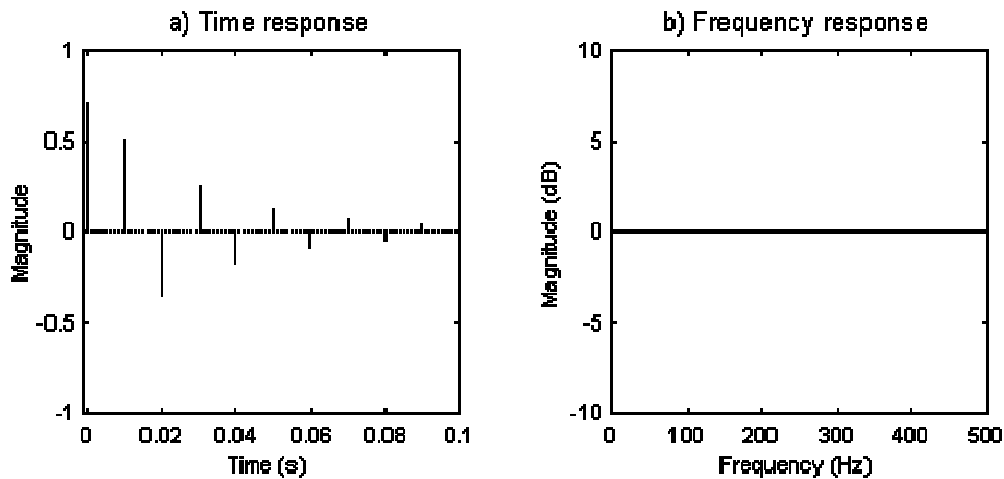


Abbildung: Übertragungscharakteristik eines Allpass-Filters
 (Delay = 1 msec, Feedback (a) = 50 %)

Moorer, Stanford, Moorer Reverberation

Moorer schlug 1979 eine Verbesserung gegenüber Schröders Algorithmus vor [153]. Er verwendet sechs parallel geschaltete Comb-Filter, bei denen in jedem ein Tiefpass erster Ordnung im Rückkoppelungszweig eingebaut ist.

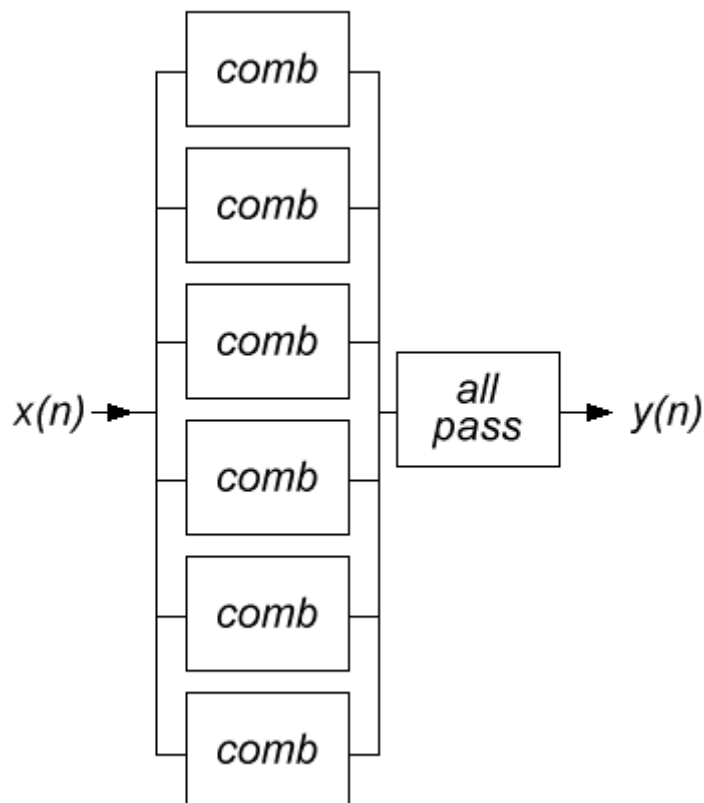


Abbildung: Moorers Algorithmus zur Nachhallerzeugung

Der Sinn dieses Tiefpassfilters ist es die Bedämpfung der hohen Frequenzen zu simulieren. Diese Bedämpfung tritt in der Realität durch die Schall-Leitfähigkeit der Luft und dem Absorptionsverhalten der Wände auf. Der Tiefpassfilter hilft weiterhin kurze transiente Signale zu entschärfen und somit Flatterechos zu unterdrücken. Da er im Rückkoppelungsweig sitzt, also bei jeder „Reflexion“ durchlaufen wird, wird die Höhenbedämpfung mit fortschreitender Nachhallzeit stärker. Dieses Verhalten entspricht auch der Realität.

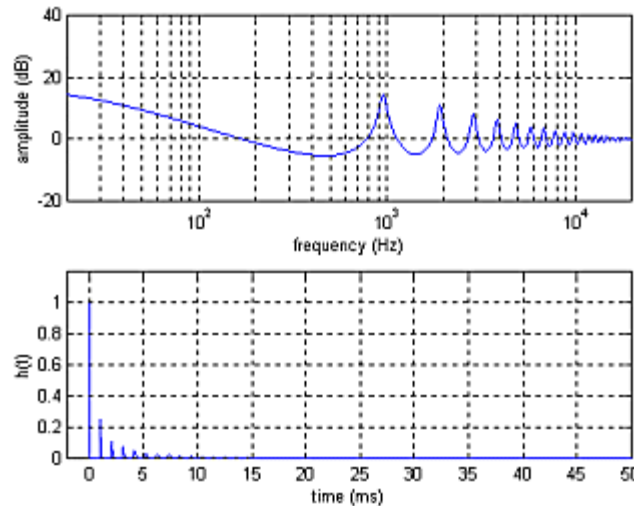


Abbildung: Comb-Filter mit Tiefpass im Rückkoppelungsweig

Obige Abbildung zeigt die Frequenzfunktion und die Zeitfunktion eines einzelnen Comb-Filters mit einer Delay-Zeit von 1 msec. Der TiefpassFilter im Rückkoppelungsweig hat eine Eckfrequenz von 3 kHz, der Rückkoppelungsfaktor a beträgt 85 %.

Jean Marc Jot, IRCAM, FDN Algorithmus

FDN steht für Feedback Delay Network. Dieser patentierte Algorithmus implementiert eine maximale Permutation der DelayLine-Ausgänge [117].

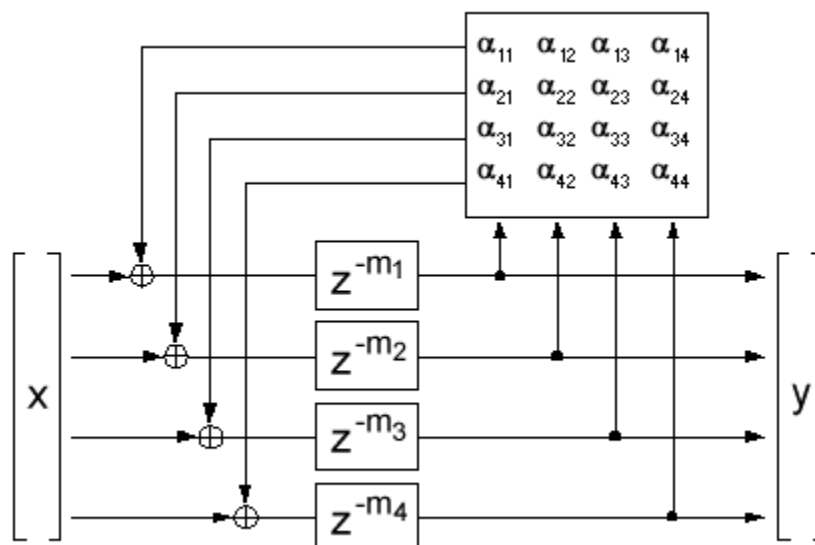


Abbildung: Comb-Filter mit Tiefpass im Rückkoppelungsweig

Die Ausgänge der Delaylines werden hierbei auf alle Eingänge rückgekoppelt und gemischt, was einen sehr dichten Nachhall erzeugt. Das Mischen der Ausgänge geschieht mit Hilfe einer Koeffizienten-Matrix. Dadurch baut dieser Algorithmus in sehr kurzer Zeit eine dichte Hallfahne auf ohne jedoch aufwendig in der Impelmentierung zu sein.

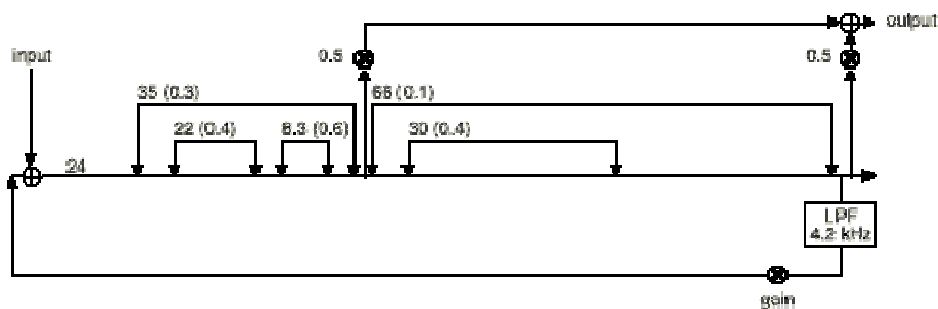
Dieser Algorithmus wird z.B. in den Hallgeräten der Firma Lexicon verwendet.

Ein HörBeispiel und das Frequenzspektrum sind im Kapitel „Vergleich mit kommerziellen Hallgeräten“ angegeben.

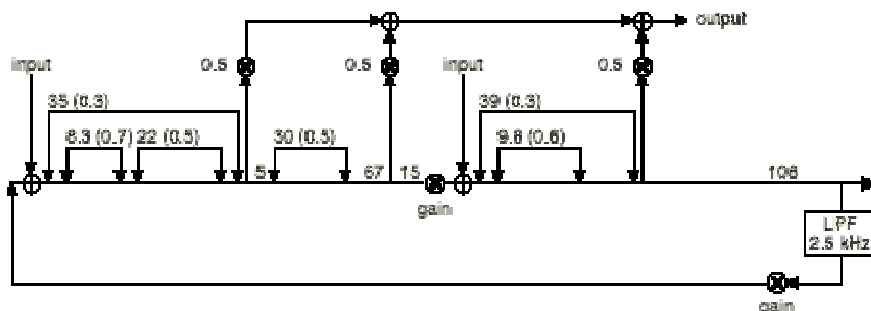
William Gardner, MIT, Gardner Algorithmus

William Grant Gardner hat experimentell drei Raummodelle entwickelt, mit denen der Reverb Effekt für die angegebenen Raumgrößen relativ gut nachgebildet werden kann [84]:

Small room reverberator:



Medium room reverberator:



Large room reverberator:

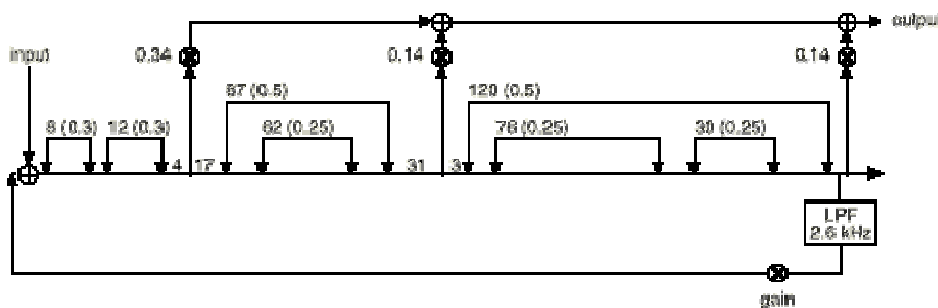


Abbildung: Gardner Algorithmus zur Nachhall-Erzeugung

Die Abbildung zeigt eine DelayLine, die an unterschiedlichen Stellen mit unterschiedlich langen Rückkopplungen versehen ist, um einen möglichst homogenen, resonanzfreien Nachhall zu erzeugen.

Zusätzlich wird am Ende der DelayLine eine Rückkopplung über einen Lowpass-Filter an den Anfang der Delayline gemacht. Die Eckfrequenz des Filters ist für die drei Raumgrößen unterschiedlich gewählt worden.

Diese Strukturen hat Gardner im Rahmen seiner Dissertation entworfen und implementiert. Sie werden zur Zeit in der kommerziellen Software „WavePurity“ eingesetzt.

Boesnecker, TU Berlin, Twinpass Algorithmus

Um die Probleme bei der Realisierung eines auf dem Echo-Verfahren beruhenden Algorithmus besser zu verstehen, wurde ein eigenes Modell zur Nachhallerzeugung entwickelt.

Hier wird ein eigener Ansatz, mittels Delaylines und Filtern einen Nachhall zu generieren, gezeigt. Die zu Grunde gelegte Überlegung ist, den tatsächlichen Vorgang zu abstrahieren und durch Aufteilung in kleinere Elemente berechenbar zu machen. Das Gesamtmodell wird dann aus solchen Elementen zusammengesetzt.

Abstrakter Ansatz: Befindet sich ein Zuhörer zwischen zwei Wänden und sendet einen Schall aus, in dem er z.B. klatscht, dann wandert seine ausgesendete Schallwelle von ihm weg. Trifft dieser Schall auf ein genügend großes Hindernis, z.B. eine Wand, dann wird ein Teil des Schalles reflektiert, und kehrt nach einer Laufzeit t zum Zuhörer zurück. Dieser zurückkehrende Schall ist durch die Absorptionseigenschaft der Wand in seinem Spektrum beeinflusst worden. Er wird gefärbt. Diese Färbung ist im wesentlichen eine Höhenbedämpfung.

Das abstrakte Modell geht davon aus, das dieser zurückgekehrte Schall nun in die andere Richtung weitergesendet wird, so daß er an der gegenüberliegenden Wand zur Reflexion kommt. Dieser Vorgang wird solange fortgeführt, bis der Schall vollständig durch Absorption verbraucht worden ist. Der Absorptionsgrad ist also immer kleiner als 1, d.h. es wird niemals mehr reflektiert, als von der Wand empfangen wurde.

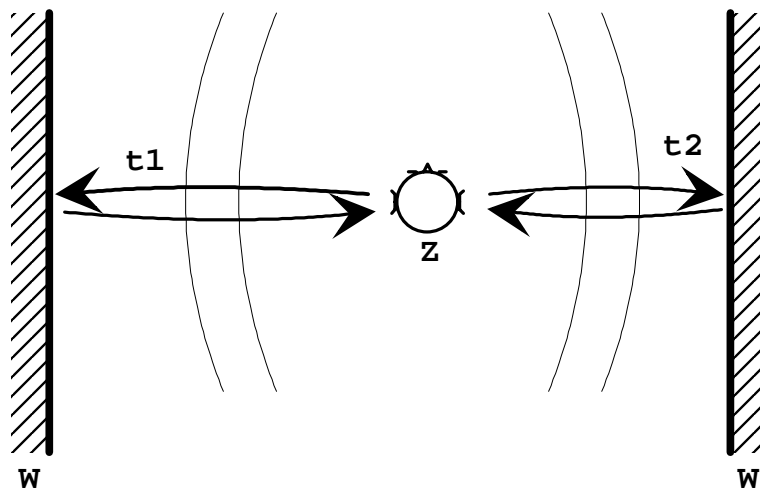


Abbildung Abstraktes Modell einer Raum Reflexion

Ausgehend von dieser Überlegung ist das sog. Twinpass-Modell folgendermaßen aufgebaut:

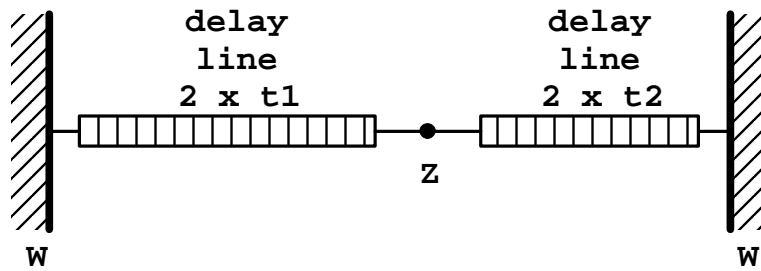


Abbildung: grundlegender Aufbau des Twinpass-Nachhalls

Zwischen zwei Wänden W befindet sich der Zuhörer Z, der zugleich auch die Schallquelle ist. Der Klang wird also im Punkt Z in den „Raum“ eingespeist. Er durchläuft dann je eine delay line und kommt nach der Delay Zeit $2 \times t_1$ bzw. $2 \times t_2$ phasengedreht am Punkt Z zurück. Der so verarbeitete Schall wird erstens an den Zuhörer ausgegeben und zweitens in die gegenüberliegende delay line eingegeben. Die Software Implementierung sieht dann so aus:

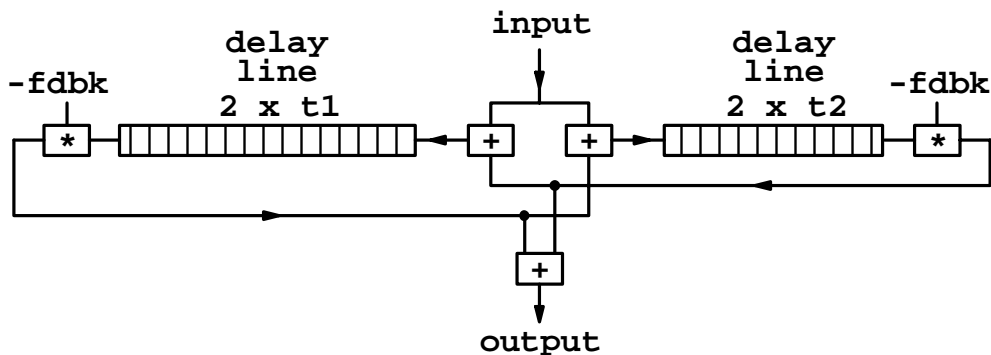


Abbildung: Twinpass Delay-Struktur

Der Multiplikator **-fdbk** bezeichnet den negativen Feedback-Faktor für den Reflexionsgrad. Dieses Modell simuliert eine RaumMode.

Das einfache Modell der Abb. 2 wurde mit zwei IIR-Filtern erster Ordnung erweitert um das Absorptionsverhalten der Wände zu simulieren. Ein Filter ist als Tiefpass, der andere als Hochpass ausgelegt.

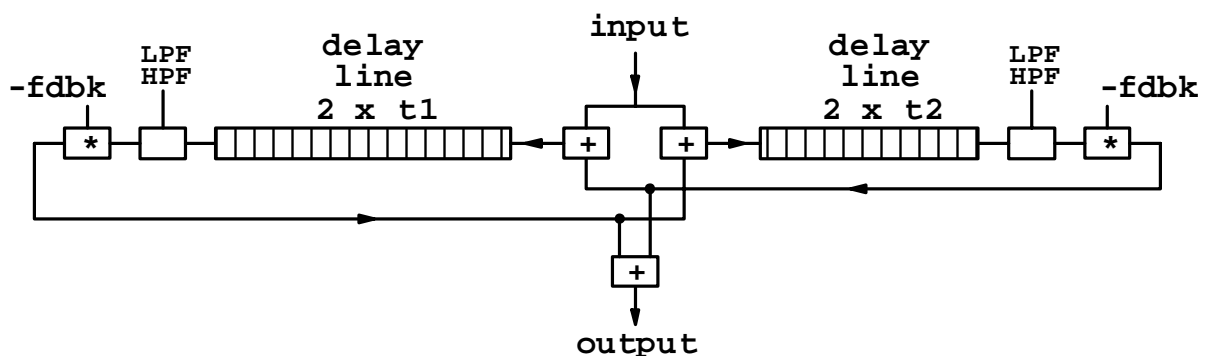


Abbildung erweiterte Twinpass Delay-Struktur

Die IIR-Koeffizienten wurden mit Matlab3 ermittelt. Die verwendeten M-Files sind im Anhang angegeben.

Es werden 2 Filtertypen verwendet, Bessel und Chebyshev.

Die Übertragungsfunktionen von Bessel und Chebyshev Filtern sehen prinzipiell so aus: (hier am Beispiel eines 8kHz Tiefpass-Filters erster Ordnung dargestellt).

Der YuleWalk-Filtertyp wird aufgrund der Ähnlichkeit zum Chebyshev nicht eingesetzt.

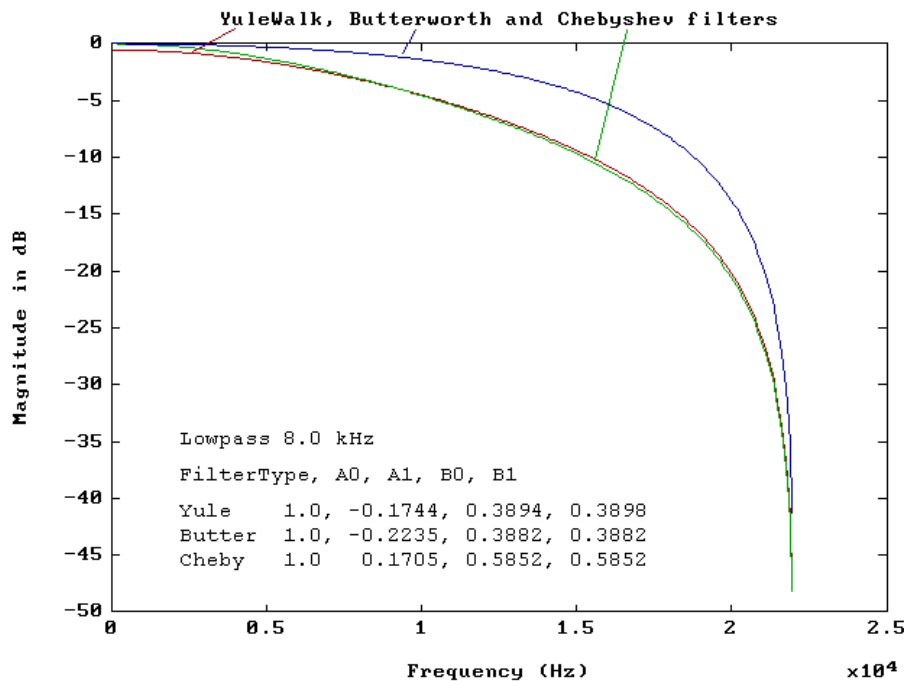


Abbildung Vergleich zwischen Bessel und Chebyshev Filtern

Die Eckfrequenzen der Filter sind in Oktaven unterteilt. Pro Oktave werden 12 Filter zur Verfügung gestellt. Die Eckfrequenzen der Filter entsprechen einer äquidistanten Oktaveinteilung von 12 Teilen. Die Filter sind in der Ordnung 1 bis 4 als Hochpass und Tiefpass berechnet. Im Anhang findet sich eine detaillierte Beschreibung der Filterkoeffizienten.

Das Gesamtmodell besteht aus 7 RaumModen d.h das in oben stehender Abbildung gezeigte Delay Modell ist 7 mal pro Ohr vorhanden. Es werden zwei Ohren unabhängig voneinander simuliert, wobei der Ohrabstand variabel angegeben werden kann. Mit Hilfe der Raileigh-schen Formel werden die entsprechenden Laufzeitwerte berechnet.

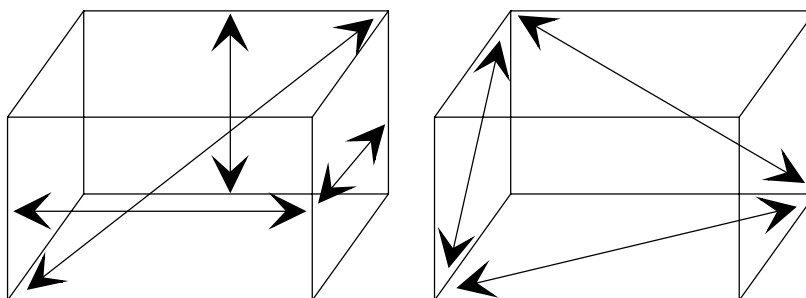


Abbildung Twinpass Delay-Werte

Die Abmessungen des Raumes R_x , R_y und R_z werden vorgegeben, ebenso wie der Standort des Zuhörers / Schallerzeugers S_x , S_y und S_z . Daraus resultieren die Werte für die einzelnen DelayLines. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in obiger Abbildung der Raum zweimal dargestellt. Die Pfeile kennzeichnen die jeweiligen Laufzeiten, die simuliert werden sollen.

Die Parameter des Twinpass Modells:

RX, RY, RZ	Raumgröße [m]
SX, SY, SZ	Position Quelle/Zuhörer [m]
EAROFFSET	Abstand der Ohren [cm]
DIFFUSIONLENGTH	Abstand des zweiten Abgriffes jeder Delayline [%]
DIFFUSIONFACTORLEFT	Skalierung von DIFFUSIONLENGTH für linkes Ohr [0..1]
DIFFUSIONFACTORRIGHT	Skalierung von DIFFUSIONLENGTH für rechtes Ohr [0..1]
REFLECTION	Anteil der Wandreflexion [%]
NUMBEROFREFL	Anzahl der zusätzlichen Abgriffe pro Delayline
DIVISONFACTOR	Skalierungsfaktor, um numerischen Überlauf zu vermeiden
RANDOMFACTOR	Anteil der Delay-Längen-Streuung
IIR_A1	IIR Koeffizient A1 Lowpass
IIR_B0	IIR Koeffizient B0 Lowpass
IIR_B1	IIR Koeffizient B1 Lowpass
IIR_A1	IIR Koeffizient A1 Highpass
IIR_B0	IIR Koeffizient B0 Highpass
IIR_B1	IIR Koeffizient B1 Highpass
DELAY (i , j)	Delay Länge [samples]

Es folgen nun zwei Klangbeispiele, die mit dem Twinpass-Algorithmus berechnet wurden.

Um die Güte einer Raumsimulation prüfen zu können wird die Simulation mit einem Dirac-Impuls angeregt. Darunter versteht man einen „unendlich“ kurzen Impuls mit der normierten Lautstärke = 1. In der digitalen Darstellung besteht der Dirac Impuls aus einem einzigen Sample mit der maximal möglichen Lautstärke.

Der Name „Dirac“ stammt von dem englischen Wissenschaftler Paul A. M. Dirac (1902 bis 1984) .

🎵 Klangbeispiel: kleiner, dumpfer Raum: CD1, Track 02

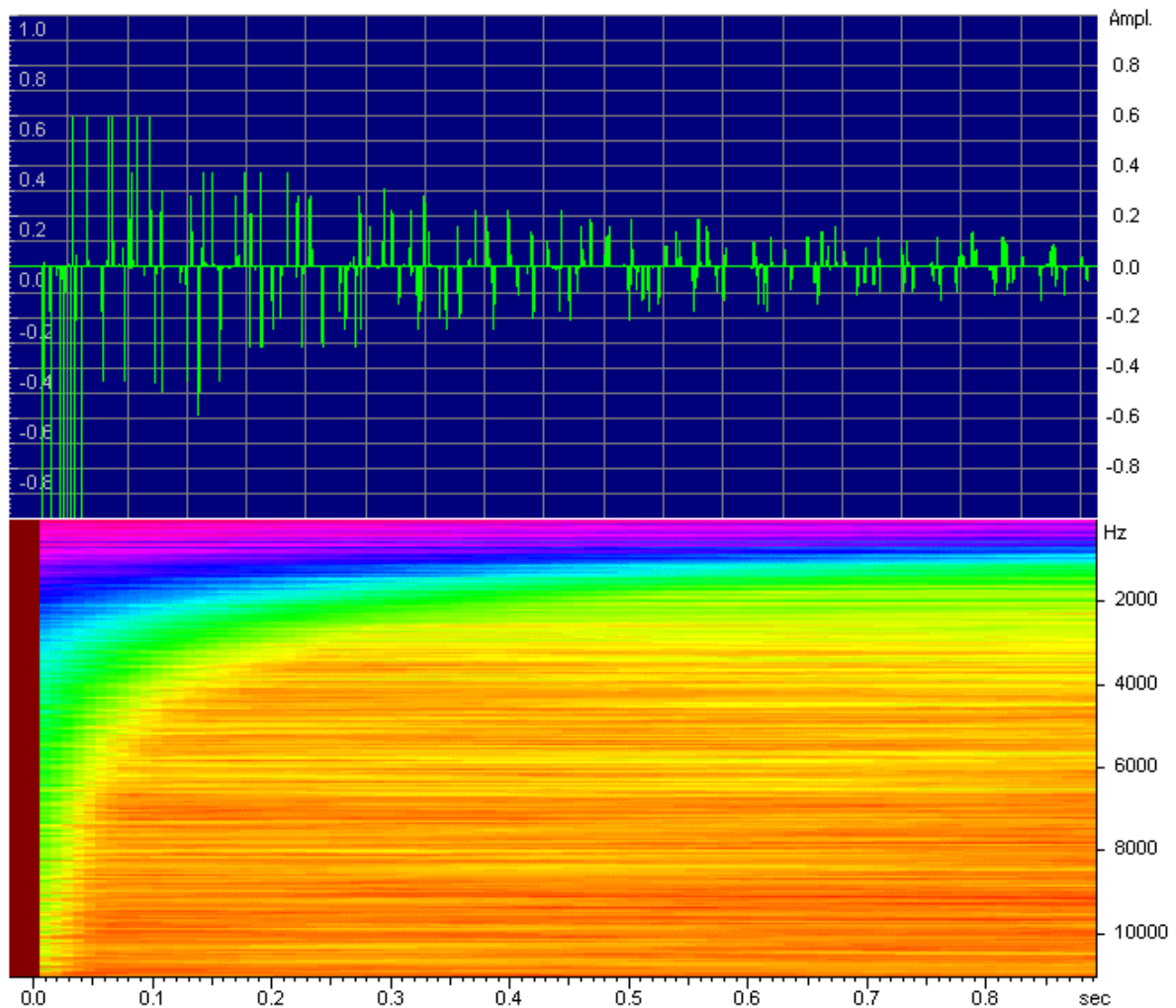


Abbildung: Twinpass Raumhall, kleiner dumpfer Raum

Die Simulation des Raumes klingt sehr unecht. Das Nachhall Spektrum baut sich nicht kontinuierlich auf, ein deutliches „Prasseln“ ist zu vernehmen. Dieses Prasseln wird in der Fachsprache als „shattern“ bezeichnet. Es deutet darauf hin, daß die verwendete Anzahl an Delays und Rückkoppelungen nicht ausreichend ist um einen dichten Nachhall zu erzeugen.

In der Abbildung sind deutlich streifenförmige Muster im Bereich 0Hz bis 2000Hz zu erkennen. Dies zeigt auf, daß nicht alle Frequenzbereiche gleichmäßig verhallt werden.

Nun werden „trockene“, d.h. im schalltoten Raum aufgenommene Audiosignale mit diesem Nachhall gefaltet, d.h. verhallt.

Diese Signale werden mit Hilfe des Programms CONVOLF.EXE gefaltet, d.h. das Mono-Musiksignal wird mit dem jeweiligen Stereo-Nachhall „verhallt“. Als Resultat ergibt sich ein Stereosignal. Das Faltungsprogramm wurde im Rahmen dieser Arbeit geschrieben und realisiert einen 64kWorte langen FIR-Filter. Die Faltung selbst läuft als Batch-Job ab, der mit Hilfe von Init-Dateien parametrisiert wird.

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des kleinen, dumpfen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\IR2497\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des kleinen, dumpfen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\IR2497\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des kleinen, dumpfen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\IR2497\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des kleinen, dumpfen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\IR2497\RYTHMB.WAV

Ergebnis:

Vor allem bei den perkussiven Klängen hört man ein unnatürliches Shattern des Raumes. Es klingt eher nach einer Anzahl von Echos als nach einem Nachhall.

Das tonale Ausklingen des Raumes - das „dumpfer“-werden des Nachhalles – liegt im Bereich realer Räume. Stark bedämpfte Räume, z.B. Räume mit Vorhangbehang oder Holzvertäfelung, besitzen so einen dumpfen Nachhall.

Um das Shattern weiter zu untersuchen, werden die bedämpfenden Filter ausgeschaltet. Die Raumgröße bleibt unverändert. Die Simulation erzeugt nun einen kleinen, hellen Raum.

🎵 Klangbeispiel: kleiner, heller Raum: CD1, Track 03

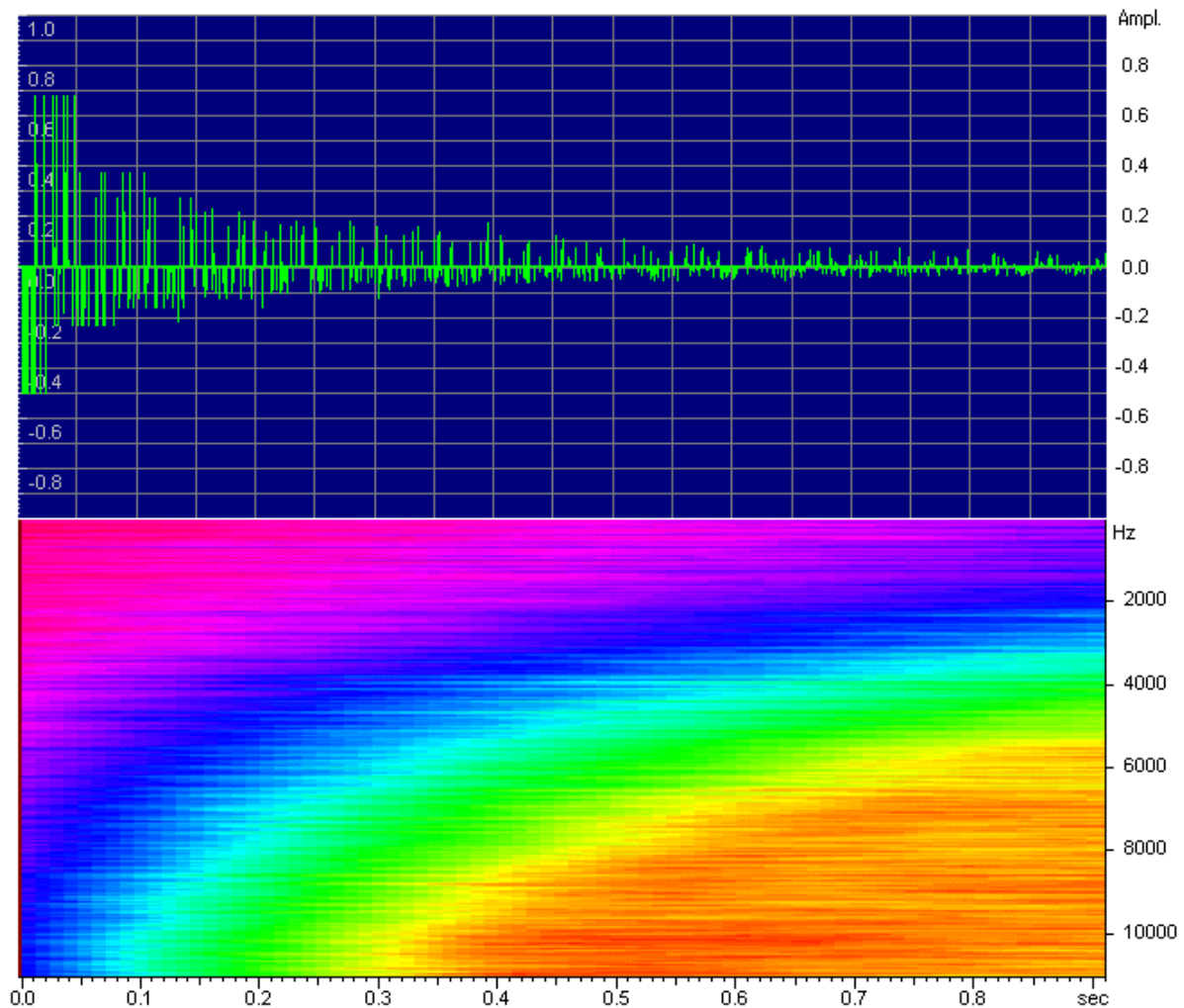


Abbildung: Twinpass Raumhall, großer heller Raum

Auch hier klingt die Simulation des Raumes sehr unecht. Das Nachhall Spektrum baut sich wieder nicht kontinuierlich auf, ein deutliches „Shattern“ ist zu vernehmen. Es deutet darauf hin, daß auch bei geänderten Filtern die verwendete Anzahl an Delays und Rückkoppelungen nicht ausreichend ist um einen dichten Nachhall zu erzeugen.

In der Abbildung sind deutlich streifenförmige Muster im Bereich 20Hz bis 11000Hz zu erkennen. Dies zeigt auf, daß nicht alle Frequenzbereiche gleichmäßig verhallt werden.

Nun werden die oben genannten Audiosignale mit dem Nachhall gefaltet. Die folgenden Klangbeispiele machen die Resultate hörbar.

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E50\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E50\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E50\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E50\RYTHMB.WAV

Ergebnis:

Bei percussivem Klangmaterial kommt die geringe Qualität des Algorithmus zum Tragen. Vor allem beim Dirac-Impuls hört man ein regelrechtes Scheppern, das nicht einem natürlichen Nachhall entspricht. Trotz Emulation einer Reflexionsdiffusion gelingt es diesem Hallmodell nicht eine hohe Echodichte in kurzer Zeit aufzubauen.

Nun wird der Raum um das vierfache vergrößert simuliert. Es soll hierbei untersucht werden, ob sich das Shattern mit der Raumgröße verändern läßt.

🎵 Klangbeispiel: großer, heller Raum: CD1, Track 04

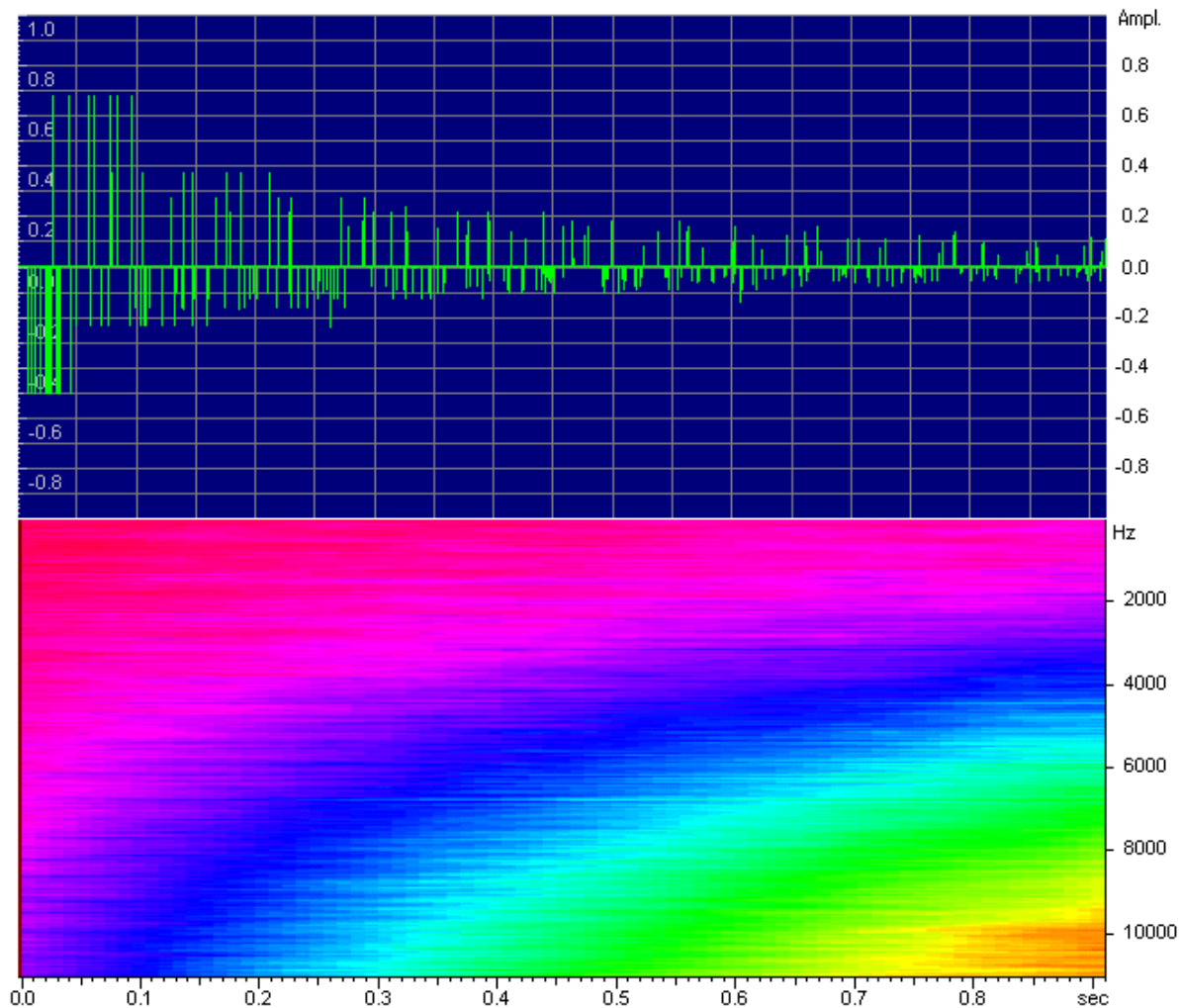


Abbildung: Twinpass Raumhall, großer heller Raum

Auch hier klingt die Simulation des Raumes sehr unecht. Das Nachhall Spektrum baut sich wieder nicht kontinuierlich auf, ein deutliches „Shattern“ ist zu vernehmen. Allerdings ist die Frequenz der wiederkehrenden Echos niedriger, die Echofolge also langsamer. Dies wurde durch die Vergrößerung des Raumes bewirkt.

Die Shatter-Probleme sind aus den obigen Simulationen bekannt und werden durch Vergrößerung des Raumes qualitativ nicht besser. Das Ergebnis deutet darauf hin, daß auch bei geänderter Raumgröße die verwendete Anzahl an Delays und Rückkoppelungen nicht ausreichend ist um einen dichten Nachhall zu erzeugen.

In der Abbildung sind wieder streifenförmige Muster im Bereich 20Hz bis 11000Hz zu erkennen. Dies zeigt auf, daß nicht alle Frequenzbereiche gleichmäßig verhallt werden. Es existieren also Frequenzen, die länger nachklingen als andere. Diese ausgeprägten Eigenresonanzen färben bei der Anregung mit tonalen Signalen (z.B. Gitarre) das Signal auf unnatürliche Weise.

Nun werden die eingangs genannten Audiosignale mit dem Nachhall gefaltet. Die folgenden Klangbeispiele machen die Resultate hörbar.

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E200\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E200\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E200\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des großen, hellen Raumes

D:\FAPM\Result-Febr05\R13E200\RYTHMB.WAV

Ergebnis:

Bei perkussivem Klangmaterial kommt die Qualität des Algorithmus zum Tragen. Vor allem beim Dirac-Impuls hört man wieder das Scheppern, das einem natürlichen Nachhall nicht entspricht.

Bei tonalen Signalen klingen manche Frequenzen länger nach als andere. Das zeigt die Eigenresonanzen des Nachhalles auf.

Aus beidem resultiert, daß die berechneten Nachhalle dieses Algorithmus in hohem Maße von realen Nachhallen abweichen. Das beschriebene Verfahren hat insbesondere in der fehlenden spektralen Räumlichkeit eines seiner Hauptprobleme. Mit diesem auf geometrischer Akustik beruhenden Modell gelingt es nicht einen realen großen Hallraum plausibel nachzubilden.

Aus den genannten Gründen wird das Verfahren nicht weiter betrachtet.

Fazit

Allen oben genannten Algorithmen ist gemeinsam, daß sie auf dem Delay-Verfahren beruhen. Sie erzeugen durch Verzögerungsschleifen Echos. Durch teilweise recht komplexe Rückkoppelungen wird versucht eine schnelle Echo-Verdichtung und eine hohe Diffusität zu erreichen.

Weiterhin versuchen sie mit geringer Rechenleistung auszukommen und trotzdem einen möglichst resonanzfreien Nachhall zu generieren. Physikalische Vorgaben des zu simulierenden Raumes spielen dabei keine entscheidende Rolle. Die Algorithmen bilden die Raumgröße über die Länge der Delaylines nach, Eigenschaften der Wände werden durch Tiefpassfilter angedeutet, die Diffusität des Nachhalls wird durch Phasenbeeinflussung angestrebt.

Die gewünschte Resonanzfreiheit des erzeugten Nachhalls ist eine Forderung aus dem Studioalltag. Echte Räume, vorallem kleine Räume wie z.B. ein Badezimmer, sind nicht resonanzfrei. Hier tragen die Eigenresonanzen des Raumes deutlich zum Klangerlebnis bei.

Verhallung mittels langer Faltung

Hyo-In Koh, TU Berlin, Faltung langer Impulsantworten

Der messtechnische Ansatz zur Berechnung des Raum-Nachhalls ist die Aufzeichnung einer realen Raumimpulsantwort. Diese Aufzeichnung (Digitalisierung) liefert eine Folge von Audio Samples $x_1[m]$. Ebenso ist das zu verarbeitende Signal digitalisiert und liegt als Folge $x_2[m]$ vor. Als Faltung bezeichnet man folgende Rechenoperation, die für jeden Zeitpunkt n durchgeführt werden muß:

$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} x_1[n-m]x_2[m] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x_2[n-m]x_1[m]$$

Da die Faltung kommutativ ist, ist die rechte Summe gleich der linken Summe. Es ist also aus Sicht der Mathematik irrelevant, in welcher Reihenfolge die Summenglieder berechnet werden. Obige Formel stellt die allgemein gültige Form der Faltung dar. Der Zeitraum m läuft deswegen von minus Unendlich bis plus Unendlich. In der Realität muß man sich auf endliche Folgen beschränken. Für den Nachhallschuß bedeutet das die Begrenzung der Länge auf ein endliches Maß. Im allgemeinen reicht es aus, nur den Teil des Nachhalls zu digitalisieren, der zwischen 0dB und -90dB liegt, da hier die Grenze der CD-Technik erreicht wird.

Für einen Raumimpulsantwort von 2 Sekunden Länge (mittelgroßer Raum) ergibt sich bei einer Abtastfrequenz von 44100kHz (CD-Norm) eine Anzahl 88200 Samples pro Abtastkanal. Für den Stereo-Betrieb ergeben sich 176400 Samples.

Das zu verarbeitende Audiosignal liege in gleicher Weise digitalisiert vor. Eine Minute Audiosignal ergibt dann $44100 \cdot 2 \cdot 60 = 5,292000$ mio Samples. Die Faltung für einen Zeitpunkt n innerhalb des Audiosignales berechnet nun die Summe von n bis $n+88200$ pro Kanal. D.h. für jeden Zeitpunkt n werden 176400 Multiplikationen und Additionen (MAC) durchgeführt. Für eine Sekunde Audiosignal fallen somit $176400 \cdot 44100 = 7,78 \cdot 10^9$ MACs an. Für eine Minute sind es $466,8 \cdot 10^9$ MACs. Die direkte Berechnung der Summenformel läßt sich beispielsweise mit DSPs (Digitalen Signalprozessoren) realisieren und ist echtzeitfähig, d.h. für jedes Audiosample wird sofort die Faltungssumme berechnet und ausgegeben, sodaß zwischen Eingabe und Ausgabe des Audiosamples nur ein minimaler Zeitabstand von einem Sample entsteht.

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Faltung ist die FFT (Fast Fourier Transformation). Hierbei wird das Eingangssignal und der Nachhallschuß in Portionen mit einer Länge von $l = 2^i$ eingeteilt. Diese Einteilung (typischerweise 1024, 2048 oder 4096-er Blocklänge) ermöglicht die Reduzierung des Rechenaufwandes von n^2 bei der direkten Berechnung zu $n \cdot \log(n)$ bei der FFT. Diese Reduktion auf der Rechenseite erzeugt aber Laufzeit (Latenzzeit) im Audibereich. Zunächst muß gewartet werden, bis ein Block vollständig aufgefüllt ist. Das dauert beispielsweise bei einer Blocklänge von 2048 Samples 46,4 msec. Dann kann dieser Block gefaltet werden, und danach beginnt erst die Ausgabe. Die Blockgröße hängt zudem von architektonischen Details der verwendeten CPU ab. Die Effizienz der Verarbeitung steigt mit zunehmender Blocklänge, solange alle Daten auf den CPU-internen Speicher (Cache) gehalten werden können.

Die aktuelle Version von SIR [127] besitzt eine Latenzzeit von 8960 Samples – das entspricht 203 msec. Sie ist somit nicht echtzeitfähig. Liegt das Audiosignal bereits digitalisiert vor, z.B. auf Festplatte, dann kann genannter Algorithmus problemlos eingesetzt werden, da die Daten von der Platte im Vorgriff (Prefetch) geholt werden können. Somit „verschwindet“ die Latenzzeit für den Benutzer, da das System quasi vorausschauend arbeitet.

Die Faltung stellt also ein mächtiges Werkzeug zur Bearbeitung von Audiomaterial dar. Durch die erfolgte Aufwandsabschätzung im vorherigen Absatz ist deutlich geworden, daß der Rechenaufwand nicht unterschätzt werden darf. Es stellt sich also die Frage, in wieweit der Nachhallschuß „vereinfacht“ werden kann, um den Rechenaufwand zu minimieren.

Hier wird nun die Magisterarbeit von Frau Hyo-In Koh, TU Berlin Fb01 zitiert. [128] In ihrer Arbeit untersuchte sie folgende Punkte:

1. Nullsetzen von beliebigen Samples der digitalisierten Form eines Nachhalls,
2. Verändern der Amplitude einzelner Samples der digitalisierten Form eines Nachhalls,
3. Ersetzen von einzelnen Samples durch lineare Interpolation aus rechtem und linken Nachbarn.

Zu 1.: Zur Reduktion des Rechenaufwandes einer Faltung sind die ersten beiden Punkte interessant. Das Nullen von Samples hat zur Folge, daß bei der Faltung die Multiplikation des Samples wegfallen kann. Je mehr Samples zu Null gesetzt werden können, desto mehr MACs können gespart werden. Allerdings führen die zu Null gesetzten Samples dazu, daß der Zuhörer die Null-Samples als Knackser wahrnimmt. Schon eine Einstreuung von 0.05% an Null-Samples führt zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Signals. Das Ergebnis der Koh'schen Arbeit zeigt, daß Manipulationen an der Impulsfolge sehr schnell hörbar werden. Eine simple Vereinfachung kann dadurch nicht erreicht werden.

Zu 2.: Das Verändern der Amplitude einzelner Samples bringt keine Erleichterung im Rechenvorgang der Faltung. Allerdings läßt sich diese Idee erweitern zu folgendem Ansatz: Alle Samples des Nachhalls werden bearbeitet, d.h. in der Amplitude verändert, um eine Vereinfachung der Rechenoperation MULT zu erlangen.

Eigener Ansatz zu Koh'scher Faltung

Idee: Reduktion der „1“-Bit-Anzahl in jedem Sample der Impulsfolge

Zunächst werden die Grundlagen der Rechnerarchitektur betrachtet. Zur Faltung werden Addition und Multiplikation benötigt. Während ein Addierwerk eine einfache und damit preiswerte Struktur aufweist, sind Multiplikationswerke aufwendige und somit teure Hardwarestrukturen. Ein Blick in moderne CPUs zeigt, daß viel Chipfläche für den numerischen Teil des Prozessors spendiert werden muß. Um eine Faltung einfach und preiswert berechenbar zu machen, müßte also die Multiplikation eliminiert werden. Die Multiplikation ist aber eines der bestimmenden Elemente der Faltung. Man kann die Multiplikationsoperation nicht weglassen.

Man kann sie aber vereinfachen.

Dazu folgende Betrachtung: Die Impulsfolge liegt digitalisiert vor, es werden 44100 Samples pro Sekunde aufgezeichnet, ein Sample besteht aus 16 Bits. Diese Bitanzahl ermöglicht die Darstellung von $2^{16} = 65536$ Werten. Pro Bit ergibt sich eine Verdoppelung der quantisierten Auflösung (pro Bit 6 dB), folglich überstreichen 16 Bit Auflösung einen Bereich von 96dB. Diese 96dB werden durch die 65536 Quantisierungswerte in 0.00146dB pro Wert aufgelöst.

Bei der Multiplikation zweier Samples in binärer Darstellung, stellen die „1“-en im Sample des Multiplikators den entscheidenden Faktor dar. Würde die Anzahl der „1“-en pro Sample nur eins betragen, dann ließe sich die Multiplikation durch eine Verschiebeoperation ersetzen.

Beispiel: binäre Multiplikation *MAC* (dezimal gerechnet: $10 * 86 = 860$)

```

0000 1010 * 0101 0110 = 0000 0011 0101 1100

0000 1010 * 0 = 000 0000 0
0000 1010 * 1 = 00 0010 10
0000 1010 * 0 = 0 0000 000
0000 1010 * 1 = 0000 1010
0000 1010 * 0 = 000 0000 0
0000 1010 * 1 = 00 0010 10
0000 1010 * 1 = 0 0001 010
0000 1010 * 0 = 0000 0000
-----
000 0011 0101 1100

```

Die Binärmultiplikation besteht aus einer Reihe von Verschiebeoperationen (Shift) und Additionen. Für eine 8–Bit –Multiplikation wie im obigen Beispiel gezeigt, sind 8 Shifts und 8 Additionen notwendig. Für eine 16–Bit –Multiplikation ist der Aufwand doppelt so groß.

Beispiel: Schiebeoperation *SHIFT* (dezimal gerechnet: $10 * 64 = 640$)

```

0000 1010 * 0100 0000 = 0000 0010 1000 0000
                        |< <<<<

```

Um an Stelle der Multiplikation eine Verschiebeoperation (Shift) nutzen zu können, muß der Multiplikator eine Zweierpotenz 2^i sein. Der Shift schiebt dann den Wert um i Stellen nach links. Wie an den genannten Beispielen zu erkennen ist, wird er Aufwand für die *SHIFT*-Operation deutlich geringer als für die *MAC*-Operation.

Es lohnt sich also zu versuchen eine Faltung auf dem *SHIFT*-Operator aufzubauen.

Um diesen Ansatz zu realisieren, wird ein Stück Software geschrieben, das eine Impulsantwort einliest, und die Samples so umarbeitet, daß jedes Samplewort nur noch eine „1“ enthält. Damit wird jedes Sample als 2^i dargestellt.

Dabei wird mit Hilfe des geometrischen Mittels jedes Sample, das beliebig viele „1“-en enthalten kann, durch ein neues Sample ersetzt, das sich als 2^i darstellen läßt, also nur eine „1“ enthält.

Der Algorithmus zur „1“-er Reduzierung ist im folgenden als Pseudocode dargestellt:

```

WHILE NOT END-OF-FILE                                ' Einlesen der Impulsfolgedatei
  LoadSample AIn                                     ' Lies ein Sample von Datei
  ' Sample: z.B. 0101 1001 1000 0110
  IF AIn <> 0 THEN
    IF AIn >= 0 THEN
      SELECT CASE AIn
        CASE IS > 23170
          AIn = 32767
        CASE IS >= 11585
          AIn = 16384
        CASE IS >= 5793
          AIn = 8192
        CASE IS >= 2896
          AIn = 4096
        CASE IS >= 1448
          AIn = 2048
        CASE IS >= 724
          AIn = 1024
        CASE IS >= 362
          AIn = 512
        CASE IS >= 181
          AIn = 256
        CASE IS >= 91
          AIn = 128
        CASE IS >= 45
          AIn = 64
        CASE IS >= 23
          AIn = 32
        CASE IS >= 11
          AIn = 16
        CASE IS >= 6
          AIn = 8
        CASE IS >= 3
          AIn = 4
        CASE IS >= 2
          AIn = 2
        CASE IS >= 1
          AIn = 1
      END SELECT
    ELSE
      . . .
      StoreSample AIn
      ' Sample: jetzt 0100 0000 0000 0000
    END IF
  END IF
WHILE END

```

Im folgenden Klangbeispiel wird eine Raum-Impulsantwort eines kleinen, halligen Raumes durch obige Rechenvorschrift verarbeitet.
 In der Abbildung sieht man links die originale Impulsantwort und rechts die verarbeitete. Deutlich ist zu erkennen, daß die verarbeitete Antwort weniger Amplitudenpegel enthält, als die originale. Dennoch ist es sehr schwer einen Unterschied herauszuhören.

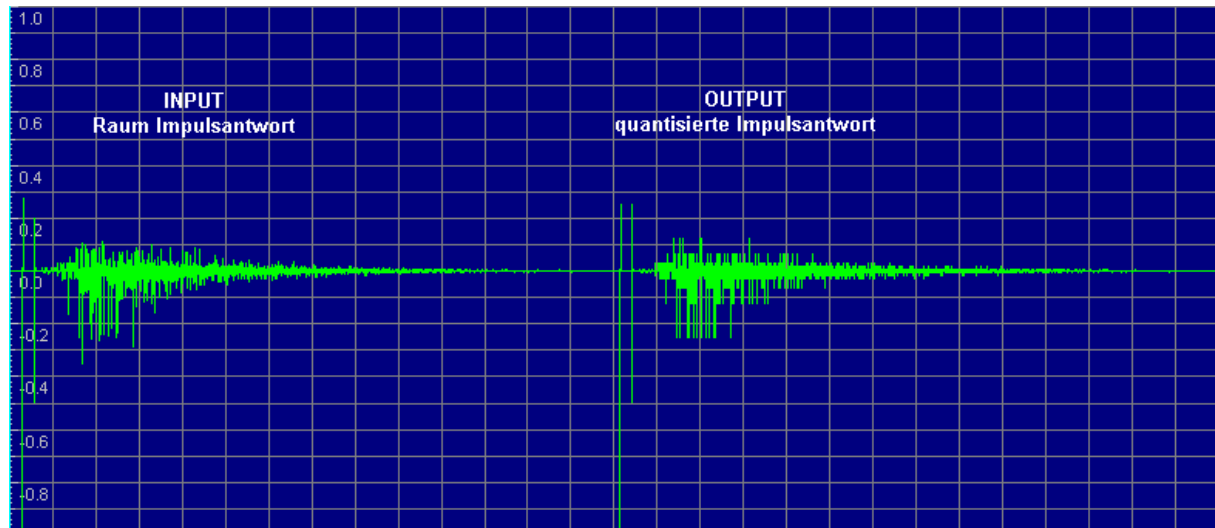


Abbildung: Zeitfunktion Original und Bearbeitung

🎵 Klangbeispiel: CD1, Track 05

Vergleich zwischen nicht-quantisierter und quantisierter Impulsfolge

D:\DATA\WAV\QUANT\COMPARE.WAV

Zunächst hört man die originale Impulsantwort und kurz darauf die verarbeitete Impulsantwort. Das ganze wird viermal abgespielt.

Ergebnis:

Die Reduzierung der Quantisierung auf 1 Bit ergibt in diesem Beispiel keinen hörbaren Unterschied. Dies ist ein brauchbares Ergebnis, das die für die Verhallung notwendige Faltungsoperation vereinfacht, wollte man eine eigene Hardware dafür bauen. Die bislang notwendige Multiplikation ließe sich dann durch eine Shiftoperation ersetzen. Dies erlaubte eine deutliche Reduzierung der Chipfläche eines Faltungsprozessors. Der Aufwand für einen hardware-basierten Faltungsprozessor übersteigt jedoch die vorhandenen Möglichkeiten und Mittel. Außerdem sind mittlerweile software-basierte Faltungslösungen verfügbar, sodaß sich ein Weitermachen auf diesem Gebiet nicht lohnen würde. Aus diesem Grund wird die 1-Bit Quantisierung der Raum-Impulsantwort nicht weiter betrachtet.

Der oben beschriebenen Algorithmen, die sog. Faltung ist eine digitale Anwendung, die mittels existierender Raumimpulsantworten die Verhallung von Audiosignalen ermöglicht. Im vorangegangenen Kapitel „Bekanntes Wissen der Raumsimulation“ wurden verschiedene Ansätze zur Simulation von Raumimpulsantworten besprochen.

All diese Methoden beruhen auf dem Prinzip der Verzögerung und Rückkoppelung von Signalen durch Delaylines und Feedbackloops.

Im folgenden Kapitel wird ein gänzlich anderer Ansatz zur Simulation von Raumimpulsantworten vorgestellt.

Neuer Lösungsansatz

„Man ruft in ein Klavier“

Pianisten kennen folgenden Effekt: Wenn man bei einem Klavier das rechte Pedal drückt, so wird die Bedämpfung der Saiten aufgehoben. Sie klingen dann wesentlich länger nach als wenn sie durch den Bedämpfungsmechanismus vom Ausschwingen abgehalten werden. Ruft man nun kräftig in ein solchermaßen ungedämpftes Klavier, so antworten die Saiten mehr oder weniger stark auf die akustische Anregung. Es entsteht ein vom anregenden Signal abhängiges Schallmuster, daß das Spektrum des anregenden Schalles widerspiegelt. Das Klavier antwortet also auf die Anregung mit einem tonal definierten Nachklang. Dieser diskretfrequente Nachklang ist die Summe der angeregten Einzelfrequenzen der Klaviersaiten.

Um aus der Summe der Einzelfrequenzen einen dichten, plausiblen Nachhall zu machen, wird folgende Strategie getroffen:

1. Jede Klaviersaite wird durch mindestens einen Sinus-Generator ersetzt.
2. Der spektrale Umfang jeder einzelnen Saite wird mittels Frequenzmodulation (FM) und Amplitudenmodulation (AM) so verändert, daß sie nicht mehr als Klaviersaite sondern als schmalbandig gefiltertes weißes Rauschen mit 1/12tel Oktave Breite antwortet.
3. Die Stimmung der Saiten in der Oktave wird von „temperierter Stimmung“ auf eine „äquidistante Stimmung“ geändert, um eine gleichmäßig Verteilung der Oktave auf 12 Halb-Saiten zu erlangen.

Im folgenden wird nun der als Endresultat erarbeitete Algorithmus mit seinen Parametern vorgestellt. Die iterativen Einzelschritte zum Erlangen dieses Ergebnisses werden im Abschnitt *Hörbeispiele* akustisch vorgestellt.

Beschreibung des „KlavierHall“-Algorithmus

Zur Synthese des Nachhalls einer Raumimpulsantwort wird folgendes Signal berechnet:

$$\sum \text{SIN}_i (e^{j\omega t + j\Delta\omega}) * \text{AMP} (\tau) * \text{ENV} (\eta t), i = 1 .. 108$$

Die Summe läuft über 9 Oktaven. Jeder Sinus besitzt eine initiale Tonhöhe f_i . Diese variiert in vorgegebener Weise mit einem Δf_i um die Center-Frequenz f_i . Die Modulation der Frequenz wird durch Zufallszahlen (weißes Rauschen) bestimmt. Die Frequenzmodulation (FM) kennt als Parameter

- den Frequenzmodulationsanteil (Stärke in %)
- die Frequenzmodulationsfrequenz (Häufigkeit der Modulation pro Sekunde)
- die Frequenzmodulationsabweichung (zeitliche Modulation der FM)

Weiterhin wird jeder Sinus amplitudenmoduliert. Die Amplitudenmodulation (AM) hat als Parameter

- den Amplitudenmodulationsanteil (Stärke in %)
- die Amplitudenmodulationsfrequenz (Häufigkeit der Modulation pro Sekunde)
- die Amplitudenmodulationsabweichung (zeitliche Modulation der FM)

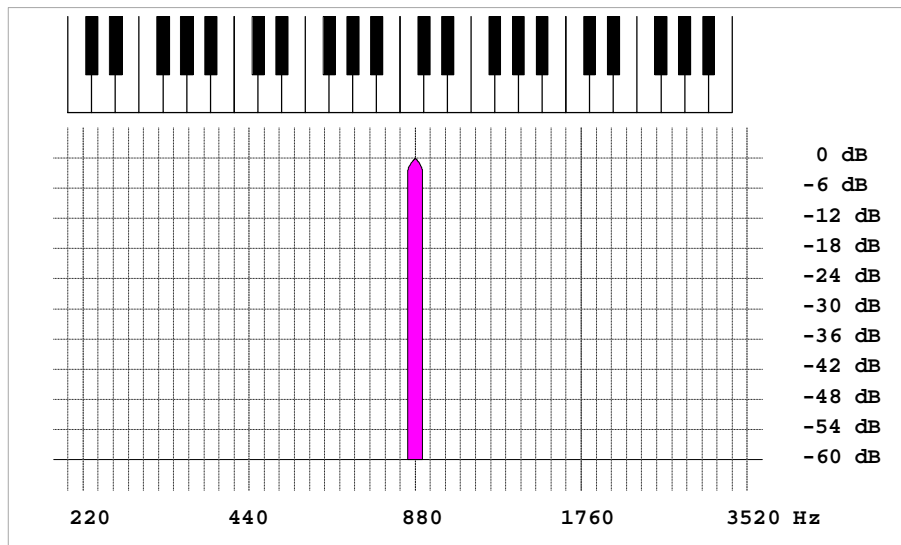


Abbildung: Spektrum eines FM/AM-modulierten Sinus-Generators, $f_1 = 880\text{Hz}$

Jedem Sinus ist eine eigene Lautstärke-Hüllkurve (Envelope) zugeordnet. Die Form dieser Hüllkurve entscheidet über den simulierten Raumeindruck und legt die Anhall- und die Nachhallzeit fest. Beim Klavierhall-Algorithmus können als Hüllkurven gewählt werden:

- die ADDR Hüllkurve (Attack - Decay1 - Decay2 - Release)
- die ASSR Hüllkurve (Attack - Sustain1 - Sustain 2 - Release)
- die EXPO Hüllkurve (Attackdelay – Decay1 exponential)
- die SIG Hüllkurve (max. 256 Stützpunkte aus Sigview-FFT-Matrix-Datei)

Andere Hüllkurven-Formen können nach Belieben implementiert werden.

Wie in der Praxis üblich, werden alle Lautstärkeangaben in Dezibel (dB) gemessen und dargestellt. Dadurch zeigen sich die exponentiellen Hüllkurven des Nachhalles in der logarithmischen Darstellung als Geradenstücke.

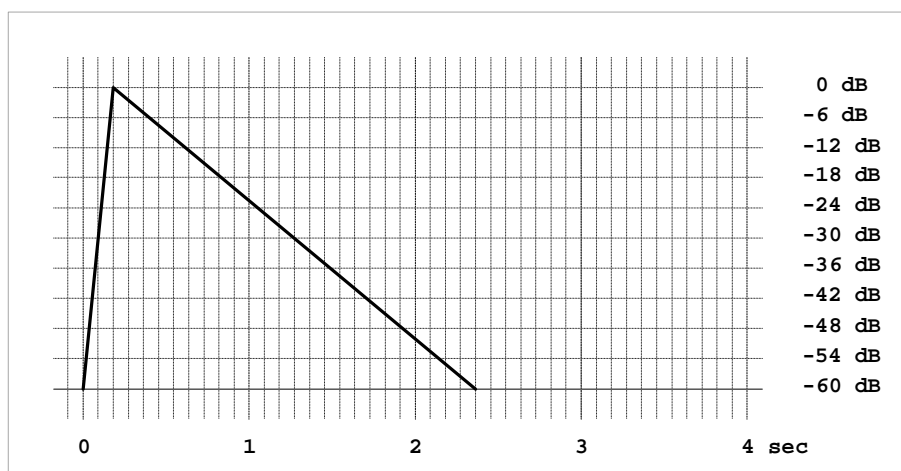


Abbildung: Beispiel: exponentielle Hüllkurve eines einzelnen Sinus-Generators

Um nun ein stereophones Klangbild zu erzeugen, wird zusätzlich jeder Sinus phasenmoduliert. Die Phasenmodulation geschieht für jeden Generator einzeln und unabhängig von den anderen Generatoren. Die Parameter der Phasenmodulation sind in

- die Phasenlage zum Startzeitpunkt
- den Phasenmodulationsanteil (Stärke in %)
- die Phasenmodulationsfrequenz
- die Phasenmodulationsabweichung

eingeteilt. Für jeden Sinusgenerator gibt es einen Parametersatz dieser Art.

Die Berechnung der Phasenmodulation geschieht auf folgende Weise: Es wird für den rechten und linken Kanal dasselbe ursprüngliche Sinus-Signal verwendet, d.h. FM- und AM-Parameter sind für rechts und links identisch. Die Phasenmodulation (PM) verschiebt nun, zeitlich gesehen, den linken Kanal gegen den rechten Kanal. Ist die PM gleich Null, so sind bei Kanäle nicht verschoben zueinander; sie sind also in Phase. Wird die PM aktiv, so verschiebt sie den linken Kanal um den Anteil $+pm$ („nach hinten“) und den rechten Kanal um $-pm$ („nach vorne“).

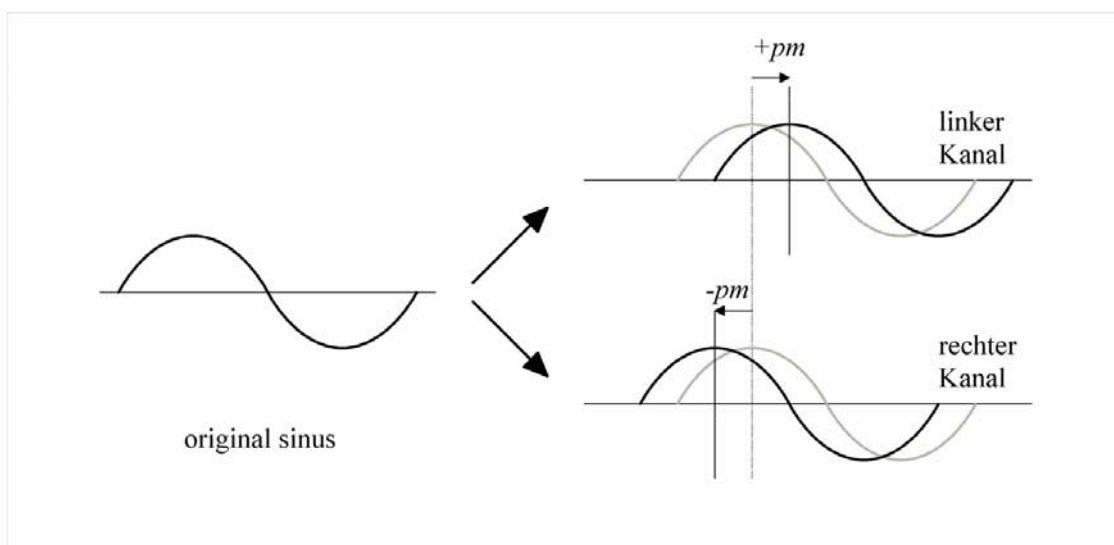


Abbildung: Phasenmodulation eines einzelnen Sinus-Generators

Die Phasenmodulation bewirkt auf der Basilarmembran des linken und rechten Ohres eine unterschiedliche zeitliche Auslenkung. Die Stereozilien senden also zeitlich unterschiedliche Pulsetrains aus, wodurch im Hörzentrum der Eindruck einer Dekorrelation entsteht. Dieser Vorgang ist ein zentraler Schlüssel zur Erzeugung eines plausiblen „räumlichen“ Nachhalles. Als optimal stellt sich eine um 180 Grad verschobene Phasenlage pro Frequenz heraus, wobei die Frequenzen untereinander unabhängig sind.

Die folgende Skizze gibt einen graphischen Überblick:

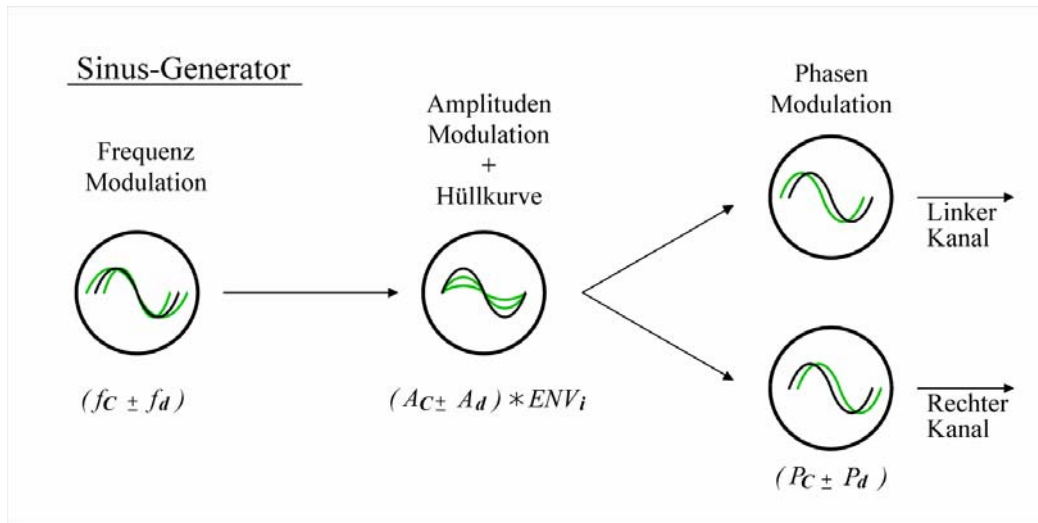


Abbildung: Blockschaltbild eines einzelnen Sinus-Generators

Die Parameter für FM und AM werden benutzt, um mit jedem Sinus ein Bandpass-Rauschen um seine Center-Frequenz herum zu simulieren. Die PM wird verwendet um den Raumeindruck (Diffusion, räumliche Tiefe) darzustellen. Die ENV-Hüllkurven bilden das Ein- und Ausschwingverhalten des Raumes nach.

Die Parameter für FM und AM wurden durch eigene Hörversuche ermittelt. Zunächst wurden aus weißem Rauschen mit Hilfe einer FIR-Filterbank die 12 Teilbänder pro Oktave herausgefiltert, und anschließend in Hörversuchen die Modulationsparameter im A/B-Vergleich gefunden. Die Bestimmung der Parameter für die Frequenz- und Amplituden-Modulation ist im Anhang unter „Bandpass Parameter“ zu finden.

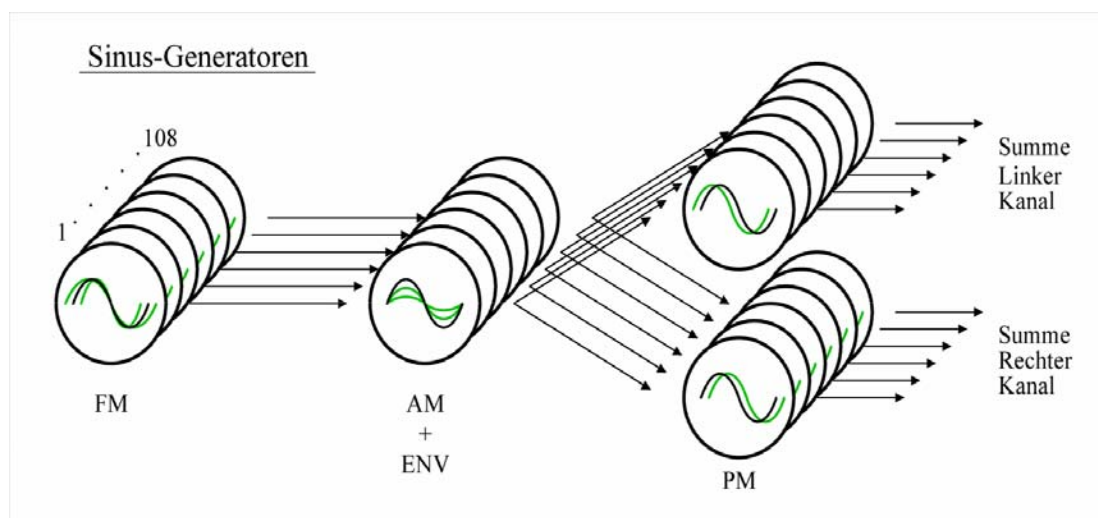


Abbildung: Blockschaltbild aller Sinus-Generators

Das Stereo Ausgangssignal besteht aus der Summe von 108 Teiltönen. Jeder Teilton selbst wird von mindestens 1 Sinus-Generator gebildet. Es ist möglich pro Ton zwei oder mehrere Sinusse zu verwenden, wobei diese untereinander verstimmbar sind.

In der folgenden Abbildung wird die spektrale Zusammensetzung eines Nachhalls an einem selbst programmierten Beispiel erläutert.

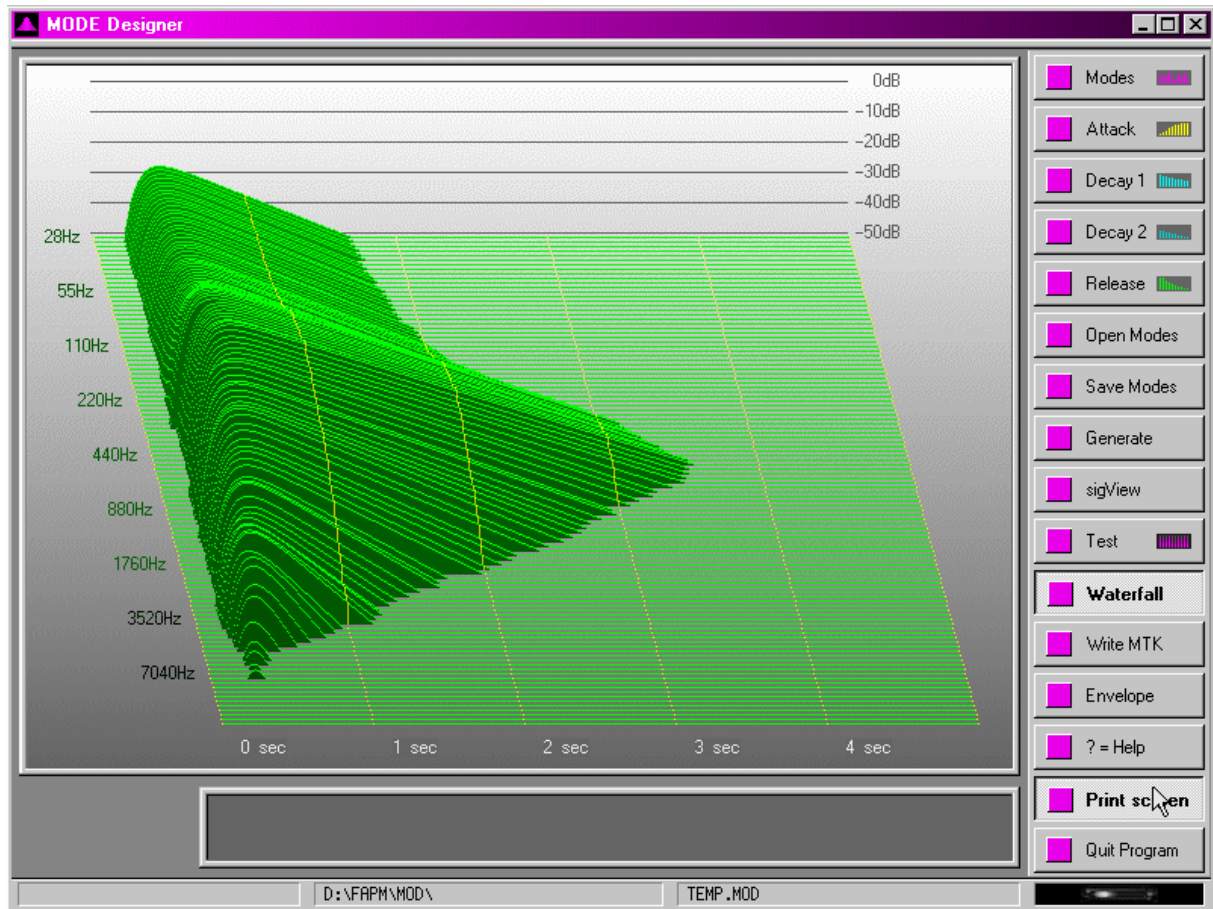


Abbildung: Wasserfalldiagramm eines virtuellen Nachhalls

Das sogenannte Wasserfall-Diagramm zeigt den spektralen Verlauf in Abhängigkeit der Zeit. Die Zeitachse läuft von rechts nach links und erstreckt sich über 5 Sekunden. Die einzelnen Sinus-Hüllkurven sind über 9 Oktaven dargestellt. Der Frequenzumfang reicht von 28Hz bis 14080Hz, die tiefen Frequenzen sind oben, die hohen unten aufgetragen. Obiges Spektrum zeigt einen Nachhall, der leicht mittenlastig ist. Der längste Nachklang ist im Bereich um 440Hz zu finden, er beträgt dort 3,5 Sekunden. Im Bereich 55Hz beträgt die Zeit nur noch 1,7 Sekunden, ab 7kHz ist die Amplitude des Nachhalles unter -50dB .

Die Abbildung zeigt ein Screenshot (Bildschirmfoto) der Klavierhall-Software, die einen Teil des Ergebnisses dieser Arbeit ist.

Im Anhang befindet sich die vollständige Beschreibung der Klavierhall-Software.

Um sich den Prozess der Nachhall-Simulation klanglich zu erschließen, folgen nun Hörbeispiele.

Hörbeispiele

Frequenz- und Amplitudenmodulation

Als erstes muß der Frage nachgegangen werden, ob man mit einer endlichen Anzahl von modulierten Sinusgeneratoren den Klangeindruck eines Bandpass-Rauschens überhaupt vermitteln kann. Dazu nun folgender Test:

Mit Hilfe einer Oktav-Bandpass-Filterbank wird aus weißem Rauschen ein Bandpassrauschen mit der Breite einer kleinen Sekunde errechnet. Diese Bandpass-Filterbank besteht aus 12 Bändern pro Oktave. Jedes Band ist eine 12tel Oktave breit. Die Bänder stehen äquidistant und teilen damit die Oktave in 12 gleichbreite Frequenzbänder ein. Die Filterbank-Koeffizienten wurde als FIR-Filter in Matlab berechnet. Im Anhang findet sich eine genauere Beschreibung unter *Bandpass-Filterbank*.

Bei der Simulation mit frequenz- und amplitudenmodulierten Sinussignalen wird außerdem versucht, mit einer möglichst geringen Anzahl von Sinusgeneratoren auszukommen. Im folgenden Beispiel sind nur zwei Sinusgeneratoren im Einsatz.

Das Hörbeispiel zeigt an der als Beispiel gewählten Frequenz von 576Hz das Ergebnis zwischen Bandpass-Rauschen und simuliertem Sinus-Signal. Als erstes ist das Bandpass-Rauschen zu hören, gefolgt von der Simulation. Dieses Beispiel wird dreimal nacheinander wiederholt.

🎵 Klangbeispiel: CD1, Track 06 NCMP576.WAV

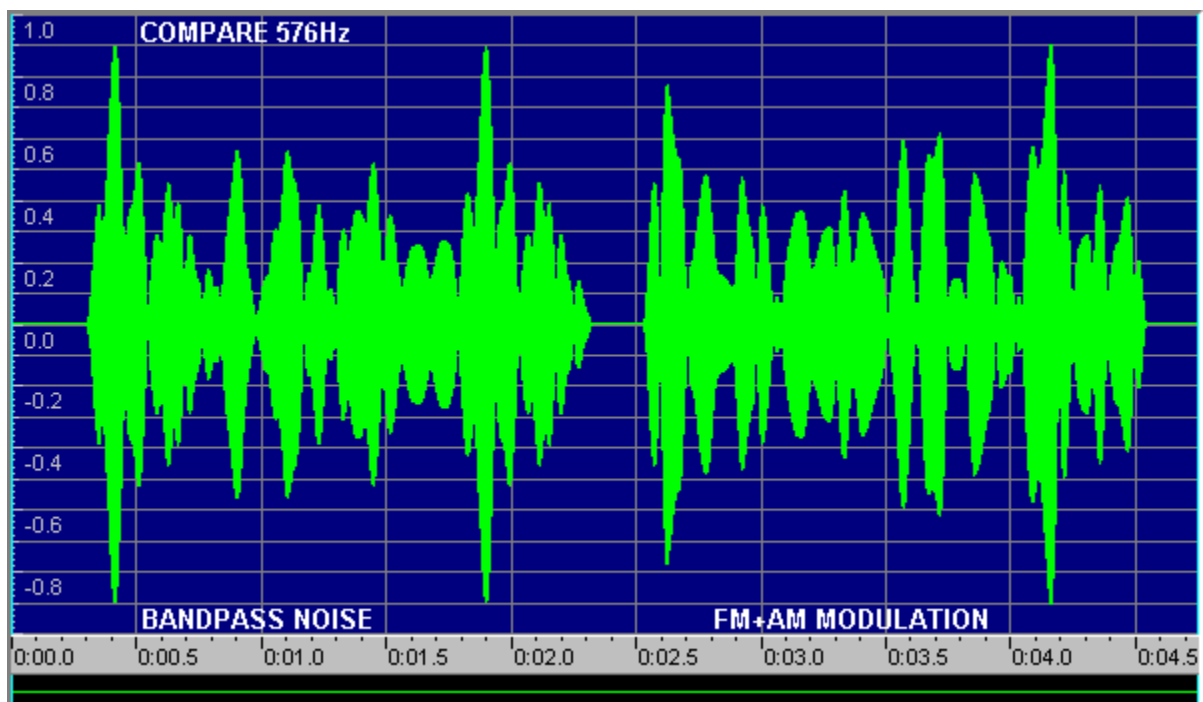


Abbildung: Vergleich zwischen Bandpass-Rauschen und FM/AM-Sinus-Simulation bei 576Hz

Als Ergebnis bleibt festzuhalten: Beide Signale klingen sehr ähnlich. Die oben abgebildete Zeitfunktion zeigt eine deutliche optische Übereinstimmung beider Signale. Die Nachbildung des Bandpass-Rauschens erzeugt durch die Wahl der FM/AM Parameter ein ähnliches Modulationsbild. Die Parameter für die Frequenz- und Amplitudenmodulation (FM und AM) wurden durch eigene Hörversuche ermittelt. Die Software dazu ist im Anhang beschrieben. Als nächstes wird ein Signal mit niedrigerer Frequenz untersucht.

🎵 Klangbeispiel: NCMP172.WAV

Das Hörbeispiel zeigt an der Frequenz von 172Hz das Ergebnis zwischen Bandpass-Rauschen und simuliertem Sinus-Signal. Als erstes ist das Bandpass-Rauschen zu hören, gefolgt von der Simulation. Es werden zwei Sinusgeneratoren verwendet. Dieses Beispiel wird dreimal nacheinander wiederholt.

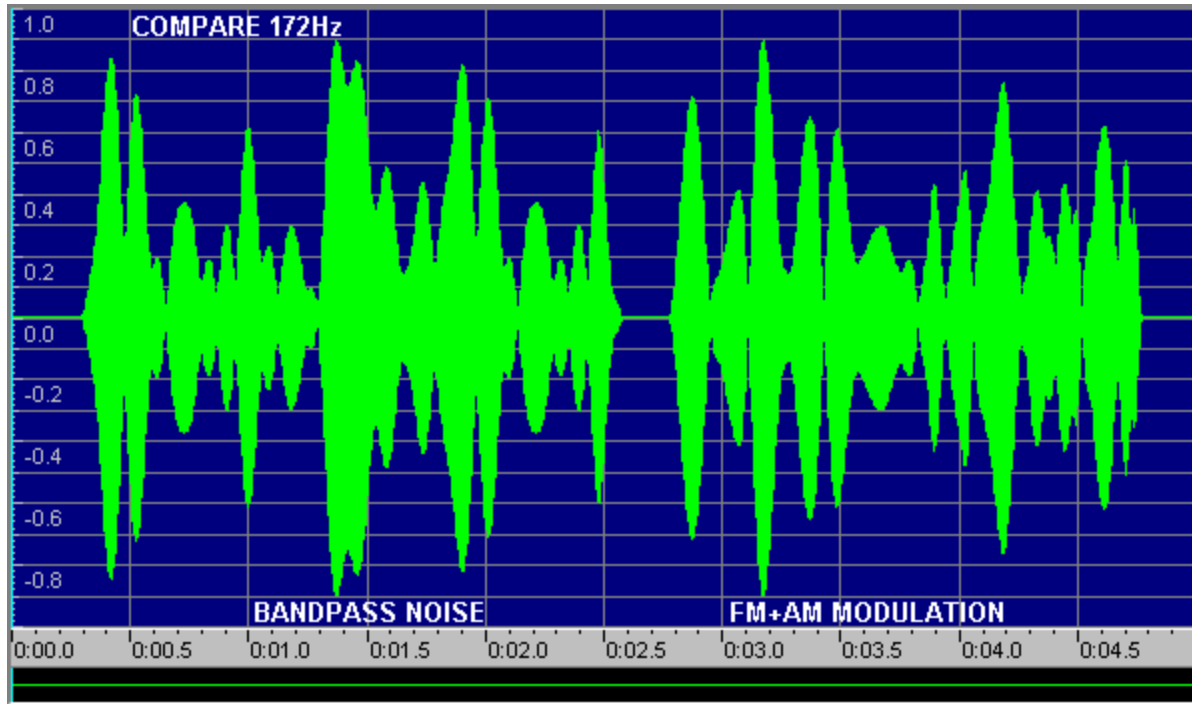


Abbildung: Vergleich zwischen Bandpass-Rauschen und FM/AM-Sinus-Simulation bei 172Hz

Auch hier klingen beide Signale sehr ähnlich. Die oben abgebildete Zeitfunktion zeigt wieder eine deutliche optische Übereinstimmung beider Signale. Auch hier wurden die Parameter für die FM und AM per Hand durch eigene Hörversuche ermittelt. Das Verwenden von zwei Sinus-generatoren ist notwendig um die gewünschte spektrale Dichte zu erzeugen. Umgangssprachlich ausgedrückt klingt ein einzelner Generator zu „dünn“. Drei Generatoren bringen keinen hörbaren akustischen Vorteil.

Als nächstes wird ein Signal mit höherer Frequenz untersucht.

🎵 Klangbeispiel: NCMP3216.WAV

Das Hörbeispiel zeigt an der Frequenz von 3216Hz das Ergebnis zwischen Bandpass-Rauschen und simuliertem Sinus-Signal. Als erstes ist das Bandpass-Rauschen zu hören, gefolgt von der Simulation. Es werden drei Sinusgeneratoren verwendet. Dieses Beispiel wird dreimal nacheinander wiederholt.

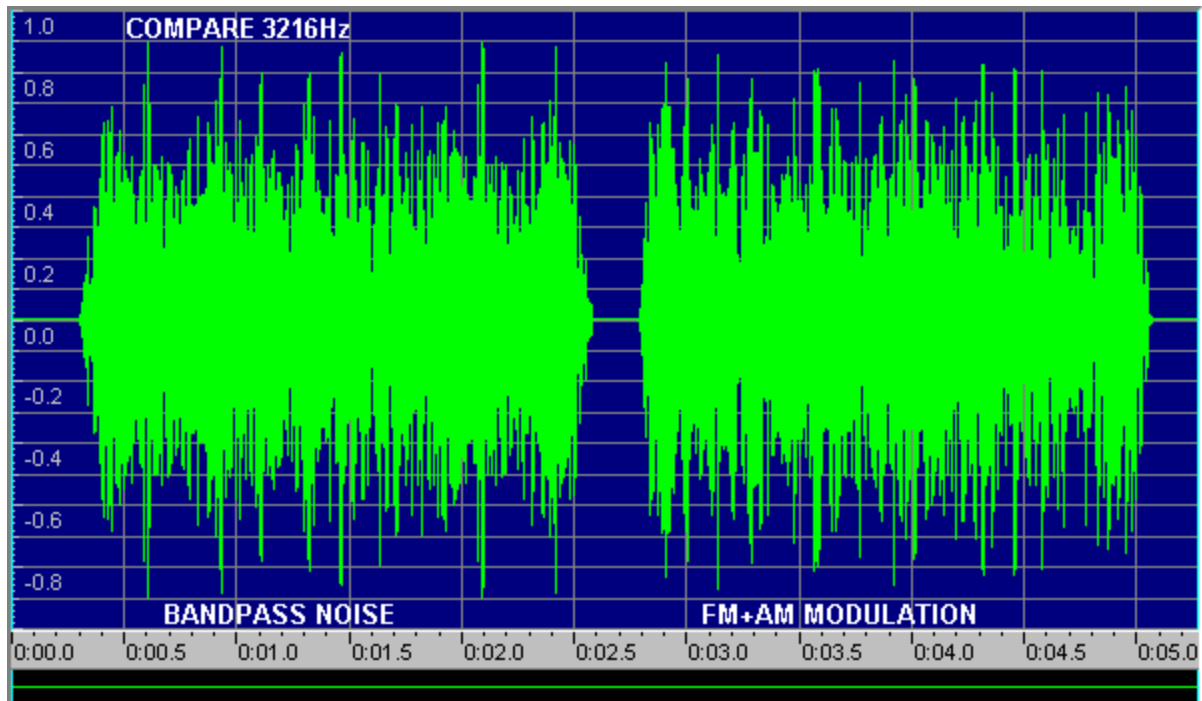


Abbildung: Vergleich zwischen Bandpass-Rauschen und FM/AM-Sinus-Simulation bei 3216Hz

Auch hier klingen beide Signale nahezu identisch. Die oben abgebildete Zeitfunktion zeigt wieder eine deutliche optische Übereinstimmung beider Signale.

Auch hier wurden die Parameter für die FM und AM per Hand durch eigene Hörversuche ermittelt. Das Verwenden von drei Sinus-generatoren ist notwendig um die gewünschte spektrale Dichte zu erzeugen. Umgangssprachlich ausgedrückt klingen zwei Generatoren zu „dünn“. Vier Generatoren bringen keinen hörbaren akustischen Vorteil.

Für alle Teilbänder der 9 Oktaven wurden die FM/AM-Parameter empirisch ermittelt. Sie sind im Anhang als Tabelle zu finden.

Nachdem die Darstellung eines 12tel-Oktav-Bandpass-Rauschens mittels FM/AM-modulierten Sinusgeneratoren als brauchbar erachtet wird, folgen nun Hörbeispiele von zusammengesetzten Klängen.

Die Oktave ist dabei immer gleichmäßig in 12 Teile aufgeteilt. Der Abstand von einem Ton zum nächsten beträgt also ein 1/12tel Oktave. Dadurch sind alle „Bandpässe“ pro Oktave gleich breit. Es wird hier nicht mit temperierter Stimmung o.ä gearbeitet um alle „Bandpässe“ mit gleicher Breite pro Oktave zu erhalten. Diese Art der Stimmung wird im folgenden als „gleichmäßige“ Stimmung bezeichnet.

Teiltonsummation

🎵 Klangbeispiel: CD1, Track 07

Vergleich zwischen 12 Sinus-Generatoren und zwölf Sinus-Bandpassen (eine Oktave) in mono

BspTS01a.FAP BspTS01a.MOD BspTS01a.WAV / BspTS01b.FAP BspTS01b.MOD BspTS01b.WAV

Zunächst erklingen die 12 Töne der Oktave von 440Hz bis 880Hz in der gleichmäßigen Stimmung ohne Frequenz- und Amplituden-Modulation (ohne exponentiell abklingende Hüllkurve). Darauf folgen die gleichen 12 Töne, diesmal mit Frequenz- und Amplituden-Modulation (ohne exponentiell abklingende Hüllkurve). Dabei sind alle 12 Töne gleich laut.

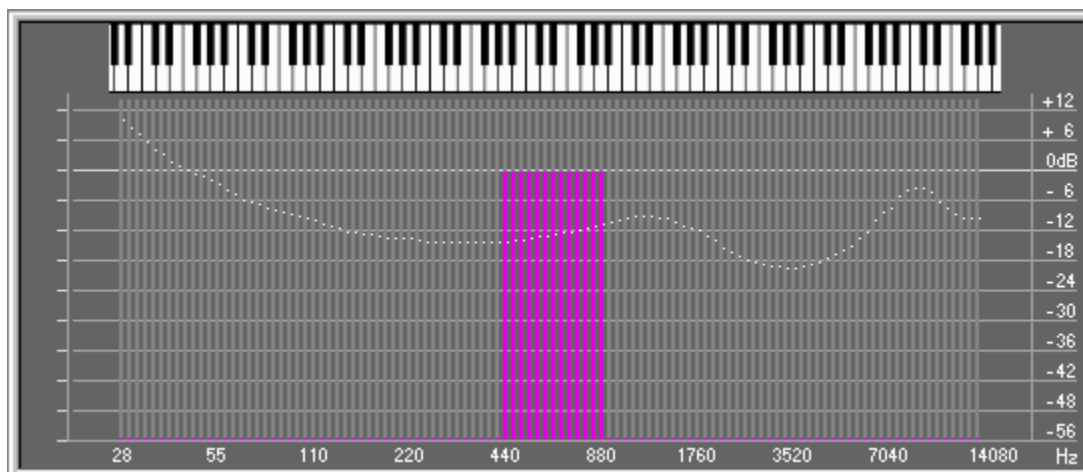


Abbildung Oktave von 440Hz bis 880Hz

Die Abbildung zeigt das Eingabefenster des Spektrums. Die Klaviertastatur zeigt den zur Verfügung stehenden Frequenzumfang an. Dieser erstreckt sich über 9 Oktaven von 28Hz bis 14kHz. Die einzelnen „Teiltöne“ können im Bereich -54dB bis $+12\text{dB}$ in der Lautstärke variiert werden. Hier sind 12 Teiltöne von 440Hz bis 880Hz mit 0dB eingegeben. Die gepunktete Linie zeigt die Isophone an. Diese Kurve (sie wird auch Fletcher-Munson-Kurve genannt) stellt den Pegel gleichlauter Hörempfindung dar. Sie ist bei der freien Erfindung eines Raumnachhalles von wertvoller Hilfe, da man bei Nichtbeachtung der Isophone sehr häufig einen unplausiblen Nachhall erzeugt.

Im Beispiel hört man als erstes die unmodulierten 12 Teiltöne, danach deren Summe. Darauf folgen die 12 modulierten Teiltöne und deren Summe. Das ganze wird einmal wiederholt. Danach hört man abwechselnd die Summe der unmodulierten und der modulierten Teiltöne, dreimal wiederholt.

Spektral betrachtet ergibt sich für die unmodulierten Sinusgeneratoren folgendes Bild:
 Die einzelnen Frequenzen sind als einzelne Linien sichtbar. Da keinerlei Modulation vorliegt, sind die Linien unendlich dünn, was sich aus drucktechnischen Gründen nicht verwirklichen läßt. Deswegen haben die Linien im Bild eine endliche Linienstärke.

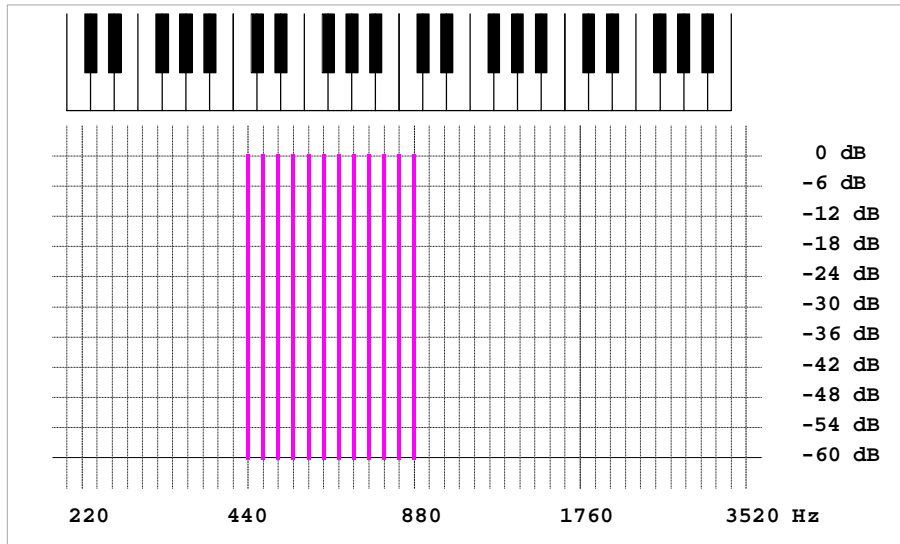


Abbildung: Spektrale Betrachtung von 12 unmodulierten Sinusgeneratoren

Die modulierten Sinusgeneratoren sind als Signal mit Bandbreite einer 1/12tel Oktave sichtbar. An der Grenze von einem zum nächsten Generator treffen sich beide Kurven bei -3dB .

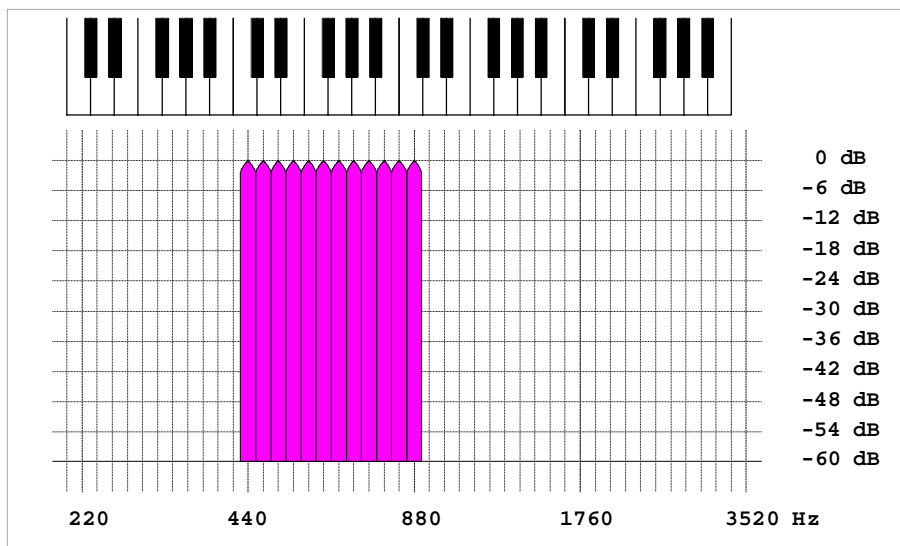


Abbildung: Spektrale Betrachtung von 12 modulierten Sinusgeneratoren

Man hört deutlich den Unterschied zwischen den beiden Testsignalen. Während im ersten Fall die Teiltöne ausgeprägte Tonalität darstellen, klingen die Teiltöne im zweiten Beispiel „verschwommen“.

Die Summe der einzelnen Teiltöne klingt im ersten Fall sehr tonal, während im zweiten Beispiel die Summe ähnlich wie ein breites Bandpass-Rauschen klingt.

Die nachfolgende Fourier-Analyse stellt das Hörergebnis graphisch dar. Im oberen Teil der Abbildung sieht man die spektrale Auflösung des Klanges, im unteren Teil seine Zeitfunktion.

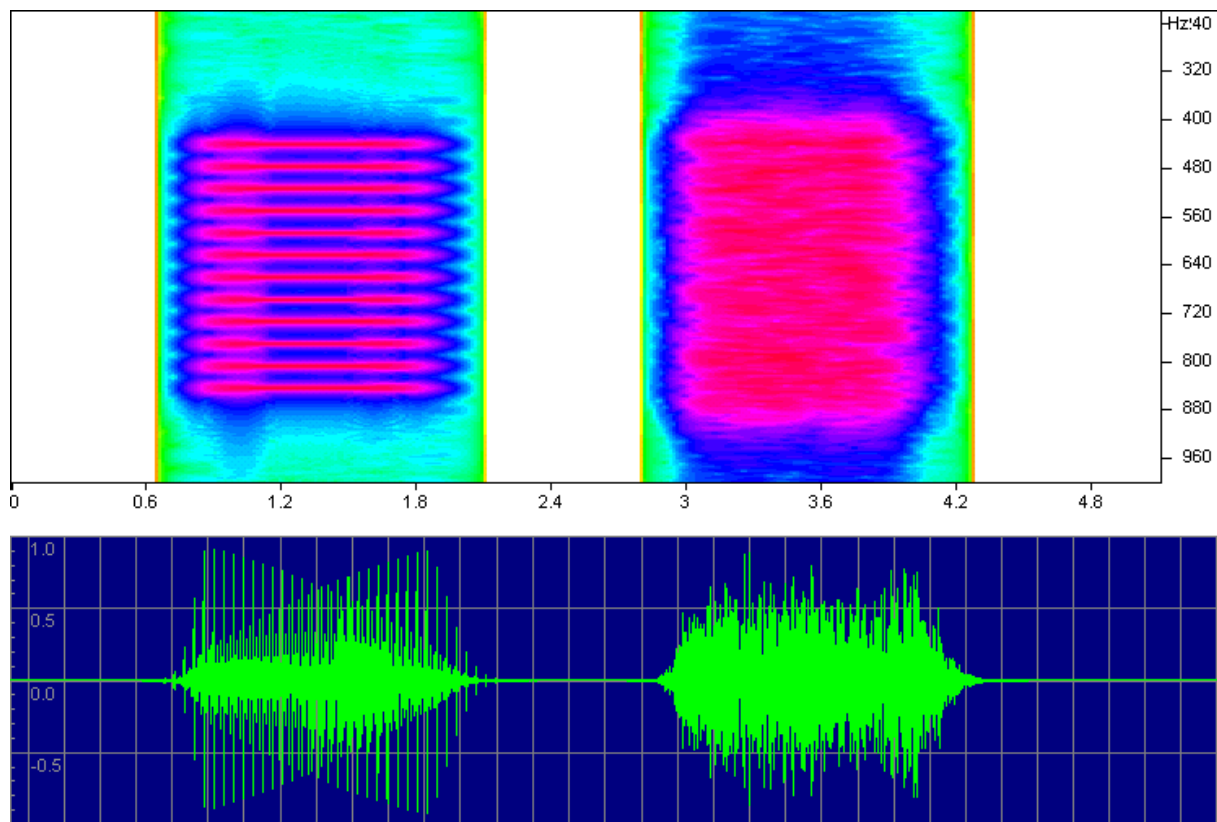


Abbildung: Fourier-Analyse von 12 reinen und modulierten Sinusgeneratoren

Das Spektrum ist in der Bandbreite von 200Hz bis 1000 Hz dargestellt. Deutlich zu erkennen ist links das gleichförmige Muster der Summe der unmodulierten Teiltöne. Rechts hingegen sieht man die Summe der modulierten Teiltöne. Dieses Signal ist spektral dichter als das linke. Sogar in der Zeitfunktion darunter kann man links ein regelmäßiges Muster erkennen, während rechts das Signal eher einem Rauschen ähnelt.

Die Fourier-Analyse wurde mit 32768 Samples pro Block durchgeführt. Diese hohe Anzahl ist notwendig um eine ausreichende Frequenzauflösung zu erzielen.

Das Ergebnis dieses Versuches zeigt, daß es möglich ist mit einer geringen Anzahl von Sinus-Generatoren eine dichtes Rauschsignal zu erzeugen.

Als nächstes sollen zwei Oktaven anstatt einer erklingen.

🎵 Klangbeispiel:

Vergleich zwischen 24 Sinus-Generatoren und 24 Sinus-Bandpässen (zwei Oktaven) in mono

BspTS02a.FAP BspTS02a.MOD BspTS02a.WAV / BspTS02b.FAP BspTS02b.MOD BspTS02b.WAV

Zunächst erklingen die 24 Töne der Oktave von 220Hz bis 880Hz in der gleichmäßigen Stimmung ohne Frequenz- und Amplituden-Modulation (ohne exponentiell abklingende Hüllkurve).

Darauf folgen die gleichen 24 Töne, diesmal mit Frequenz- und Amplituden-Modulation (ohne exponentiell abklingende Hüllkurve). Dabei sind die 24 Töne unterschiedlich laut.

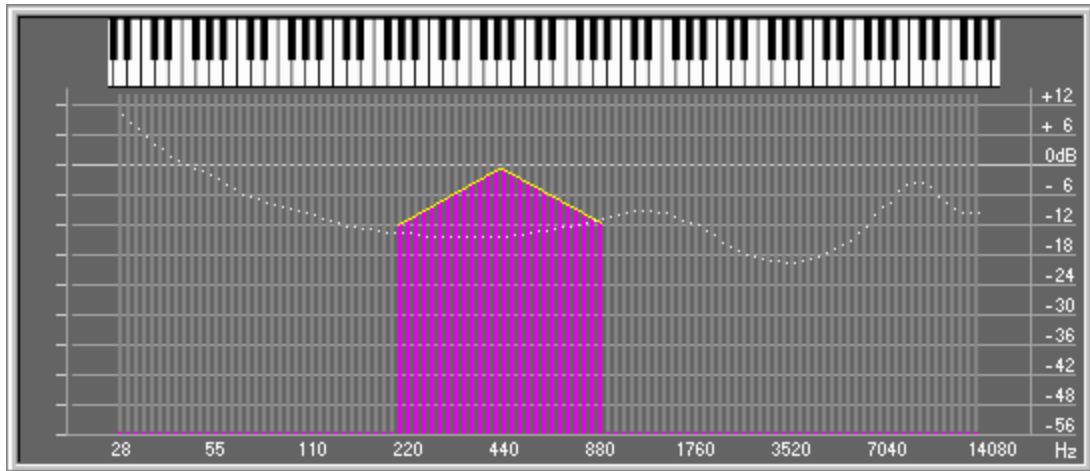


Abbildung Zwei Oktaven von 220Hz bis 880Hz

Im Beispiel hört man als erstes die unmodulierten 24 Teiltöne, danach deren Summe. Darauf folgen die 24 modulierten Teiltöne und deren Summe. Das ganze wird einmal wiederholt. Danach hört man abwechselnd die Summe der unmodulierten und er modulierten Teiltöne, dreimal wiederholt.

Die nachfolgende Fourier-Analyse stellt das Hörergebnis wieder graphisch dar. Im oberen Teil der Abbildung sieht man die spektrale Auflösung des Klanges, im unteren Teil seine Zeitfunktion.

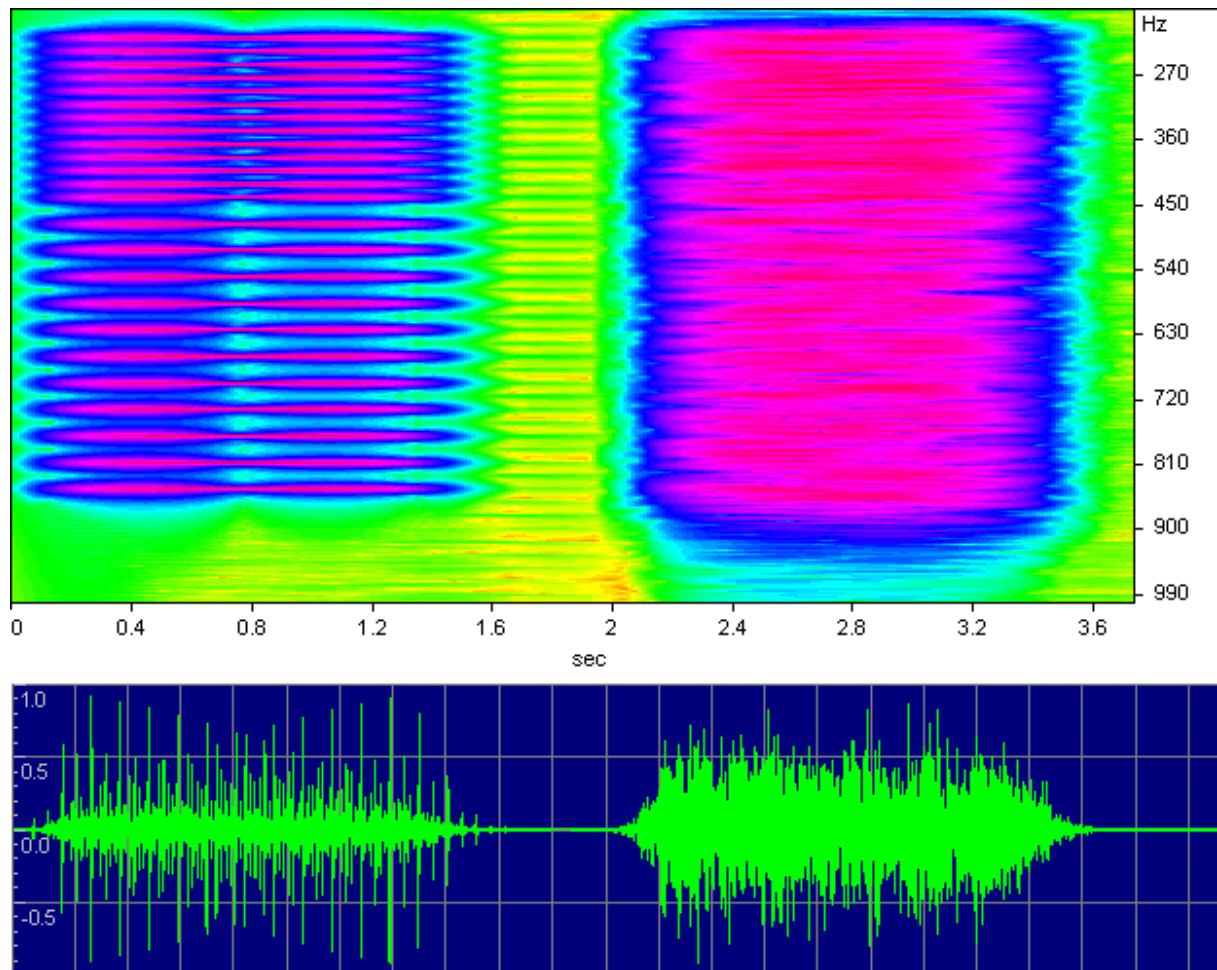


Abbildung: Fourier-Analyse von 24 reinen und modulierten Sinusgeneratoren

Hüllkurven

🎵 Klangbeispiel: CD1, Track 08

Vergleich zwischen 24 Sinus-Generatoren und 24 Sinus-Bandpässen (zwei Oktaven) in mono

BspHK01a.FAP BspHK01a.MOD BspHK01a.WAV / BspHK01b.FAP BspHK01b.MOD BspHK01b.WAV

Zunächst erklingen die 24 Töne der Oktave von 220Hz bis 880Hz in der gleichmäßigen Stimmung ohne Frequenz- und Amplituden-Modulation mit exponentiell abklingenden Hüllkurven.

Darauf folgen die gleichen 24 Töne, diesmal mit Frequenz- und Amplituden-Modulation mit exponentiell abklingenden Hüllkurven. Dabei sind die 24 Töne unterschiedlich laut und die Hüllkurven unterschiedlich lang.

Dieses Beispiel entspricht dem vorhergehenden, nur sind hier exponentiell abklingende Hüllkurven eingestellt. Als erstes hört man die unmodulierten 24 Teiltöne, danach deren Summe. Darauf folgen die 24 modulierten Teiltöne und deren Summe. Das ganze wird einmal wiederholt.

Danach hört man abwechselnd die Summe der unmodulierten und der modulierten Teiltöne, dreimal wiederholt.

Die Summe der modulierten Teiltöne klingt schon ähnlich dem Nachhall eines kleinen Raumes, nur daß überhaupt keine „Räumlichkeit“ zu vernehmen ist, weil das Signal ein Mono-Signal ist.

Die nachfolgende Fourier-Analyse stellt das Hörergebnis wieder graphisch dar. Im oberen Teil der Abbildung sieht man die spektrale Auflösung des Klanges, im unteren Teil seine Zeitfunktion.

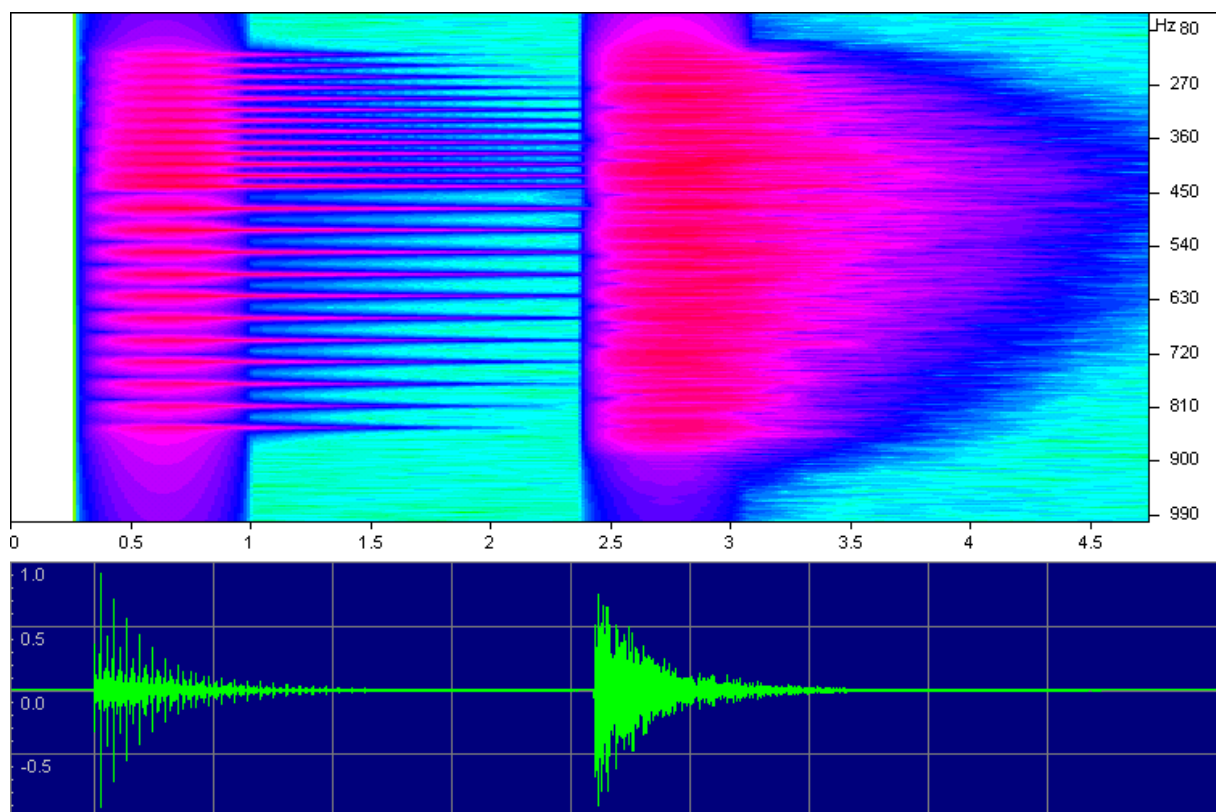


Abbildung: Fourier-Analyse von 24 reinen und modulierten Sinusgeneratoren

Das Spektrum ist in der Bandbreite von 200Hz bis 1000 Hz dargestellt. Deutlich zu erkennen ist links wieder das gleichförmige Muster der unmodulierten Teiltöne. Rechts hingegen sieht man die Summe der modulierten Teiltöne.

Aufgrund der linearen Abbildung der Fourier-Transformation erscheinen die Teiltöne der Oktave von 220Hz bis 440Hz dichter nebeneinander als in der darüberliegenden Oktave von 440Hz bis 880Hz.

Die Fourier-Analyse wurde wieder mit 32768 Samples pro Block durchgeführt.

Phasenmodulation

🎵 Klangbeispiel: CD1, Track 09

Ein Sinus-Bandpass um 440 Hz ohne PM gefolgt von einem Sinus-Bandpass um 440 Hz mit PM, beide ohne exponentiell abklingende Hüllkurve.

BspPM01a.FAP BspPM01a.MOD BspPM01a.WAV / BspPM01b.FAP BspPM01b.MOD BspPM01b.WAV

Während der monophone Klang mittig oder „im Kopf“ lokalisiert wird, bekommt der phasenmodulierte Ton eine hörbare Diffusität. Diese Diffusität wird im folgenden durch Summation weiter ausgebaut.

🎵 Klangbeispiel:

Vergleich zwischen zwölf Sinus-Bandpass (eine Oktave) in mono und denselben zwölf Sinus-Bandpass mit PM in stereo

BspPM02a.FAP BspPM02a.MOD BspPM02a.WAV / BspPM02b.FAP BspPM02b.MOD BspPM02b.WAV

Zunächst erklingen die 12 Töne der Oktave von 440Hz bis 880Hz in der gleichmäßigen Stimmung mit Frequenz- und Amplituden-Modulation, ohne Phasenmodulation und ohne exponentiell abklingende Hüllkurve.

Darauf folgen die gleichen 12 Töne, diesmal mit Frequenz-, Amplituden- und Phasen-Modulation ohne exponentiell abklingende Hüllkurve. Dabei sind alle 12 Töne gleich laut.

🎵 Klangbeispiel:

Vergleich zwischen 24 Sinus-Bandpass (2 Oktaven) in mono und denselben 24 Sinus-Bandpass mit PM in stereo

BspPM03a.FAP BspPM03a.MOD BspPM03a.WAV / BspPM03b.FAP BspPM03b.MOD BspPM03b.WAV

Zunächst erklingen die 24 Töne der Oktave von 220Hz bis 880Hz in der gleichmäßigen Stimmung mit Frequenz- und Amplituden-Modulation, ohne Phasenmodulation, aber mit einer exponentiell abklingenden Hüllkurve.

Darauf folgen die gleichen 24 Töne, diesmal mit Frequenz-, Amplituden- und Phasen-Modulation und einer exponentiell abklingenden Hüllkurve. Dabei sind die 24 Töne unterschiedlich laut und die Hüllkurven unterschiedlich lang..

Durch die Phasenmodulation erhält der Klang seine „Räumlichkeit“. Während im ersten Fall nur ein monophones Signal zu hören ist, erzeugt die Phasenmodulation den Höreindruck eines kleinen Raumes.

Mit den bisher erlangten Erkenntnissen wollen wir nun einen eigenen Nachhall programmieren. Dazu wird eine Software geschrieben, die in der Lage ist, die oben gefundenen Parameter einzustellen und zu verwalten. Um eine möglichst verständliche Übersicht zu bekommen, sollen in der Tontechnik bekannte Steuerelemente wie Drehknöpfe, Schieberegler oder ähnliches verwendet werden. Wie schon weiter oben erwähnt, ist eine Beschreibung der Software im Anhang zu finden.

Im weiteren Verlauf der folgenden Tests sind nur die relevanten Fenster und Einstellungen beschrieben.

Eigenversuch 1

Für die spektrale Komposition des Halles geben wir – frei gewählt – folgende Parameter ein:

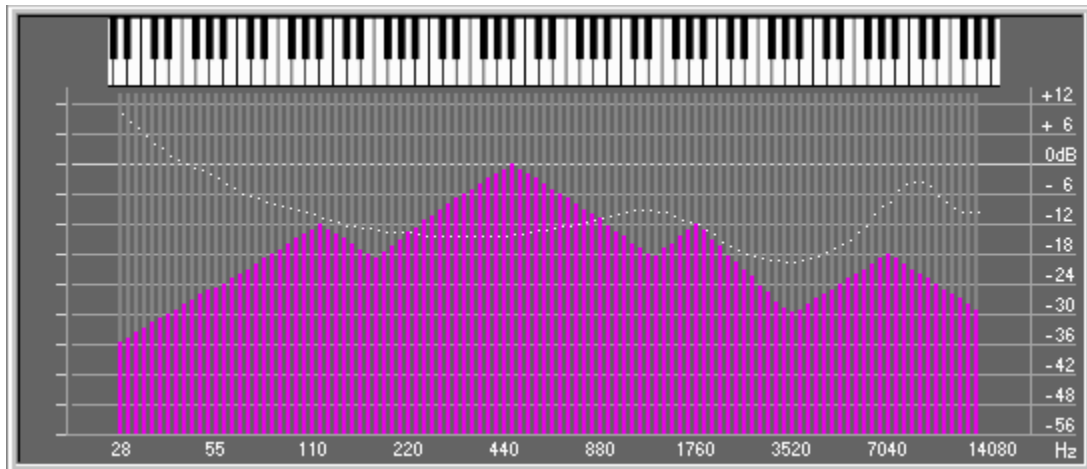


Abbildung: Eingabe des Nachhall spektrums (Nr. 1)

Diese Eingabe könnte einem realen Raum entsprechen. Für das Ausklingen der einzelnen Hüllkurven wird die exponentiell abklingende Envelope verwendet.

Die Dauer des Ausklingens kann pro Frequenz getrennt eingestellt werden.

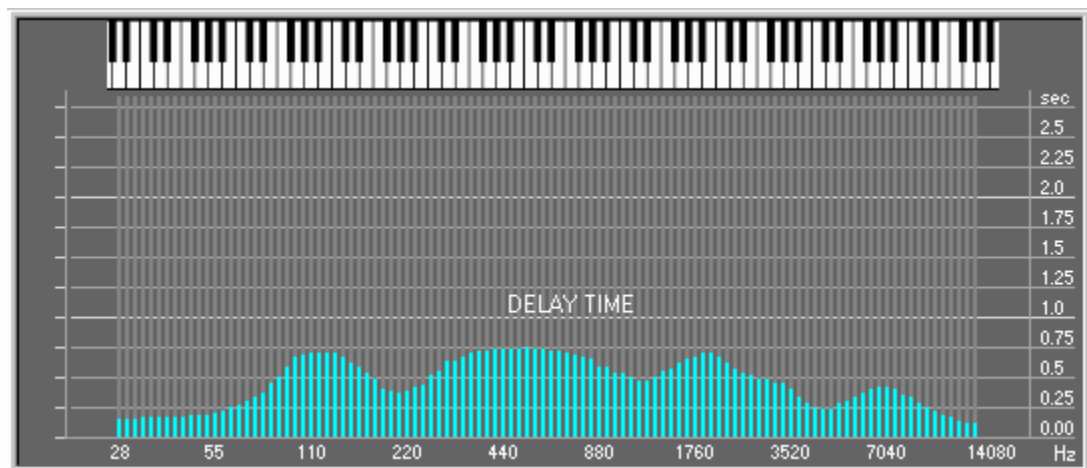


Abbildung: Eingabe der Abklingzeit (Nr. 1)

Auch hier wird eine Annahme getroffen. Die Frequenzen um 110Hz , 440Hz, 1760Hz und 7040Hz sollen länger nachklingen als die übrigen Frequenzen.

Daraus ergibt sich folgenden Gesamtbild:

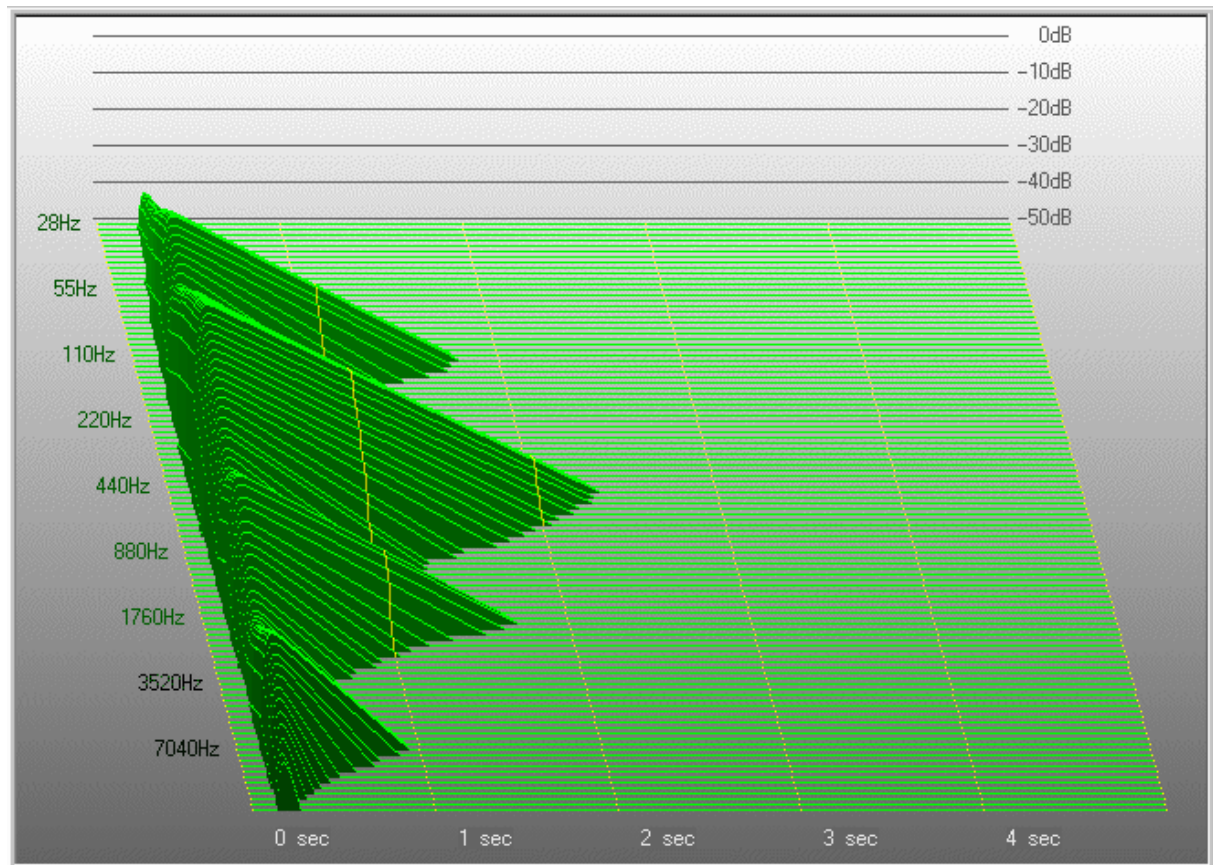


Abbildung: Wasserfall Diagramm des Nachhall Spektrums (Nr. 1)

🎵 Klangbeispiel: CD1, Track 10

erstes von Hand programmiertes Nachhallsignal – Schätzung einer simulierten Raumimpulsantwort.
 BspTS03.FAP BspTS03.MOD BspTS03.WAV

Es erklingt das simulierte Signal dreimal hintereinander.

Das Ergebnis entspricht einem realen Raum nur sehr unzureichend. Vorallem das Ausklingen der hohen Frequenzen paßt nicht zum Ausklingen der Mitten. Es klingt eher so wie wenn verschiedene Frequenzgruppen zusammengewürfelt worden sind. Es entsteht nicht der Eindruck eines dichten, „zusammengehörigen“ Nachhalles.

Auf diesen Aspekt wird im nächsten Versuch eingegangen.

Eigenversuch 2

Für die spektrale Komposition des Halles geben wir – wieder frei gewählt – folgende Parameter ein:

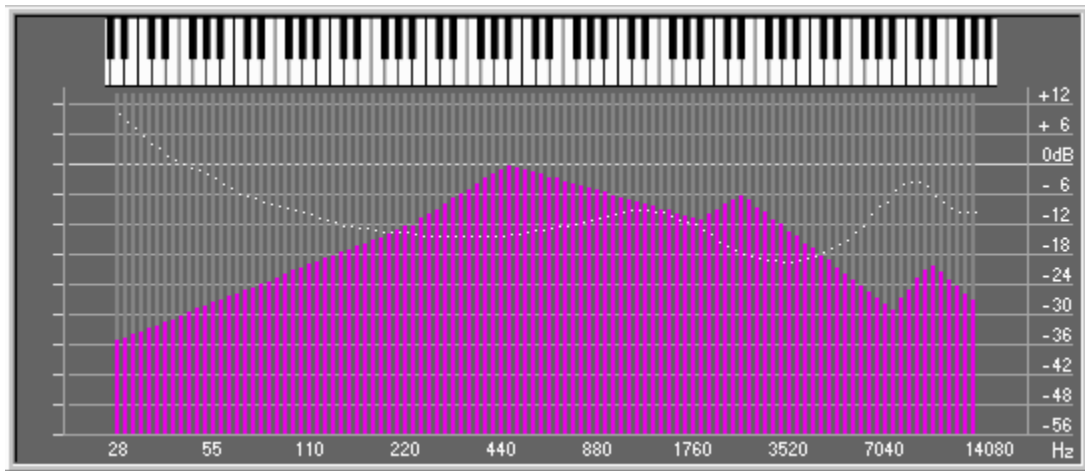


Abbildung: Eingabe des Nachhall spektrums (Nr. 2)

Diese Eingabe könnte einem realen Raum entsprechen. Für das Ausklingen der einzelnen Generatoren wird die exponentiell abklingende Hüllkurve verwendet.

Die Dauer des Ausklingens kann pro Frequenz getrennt eingestellt werden.

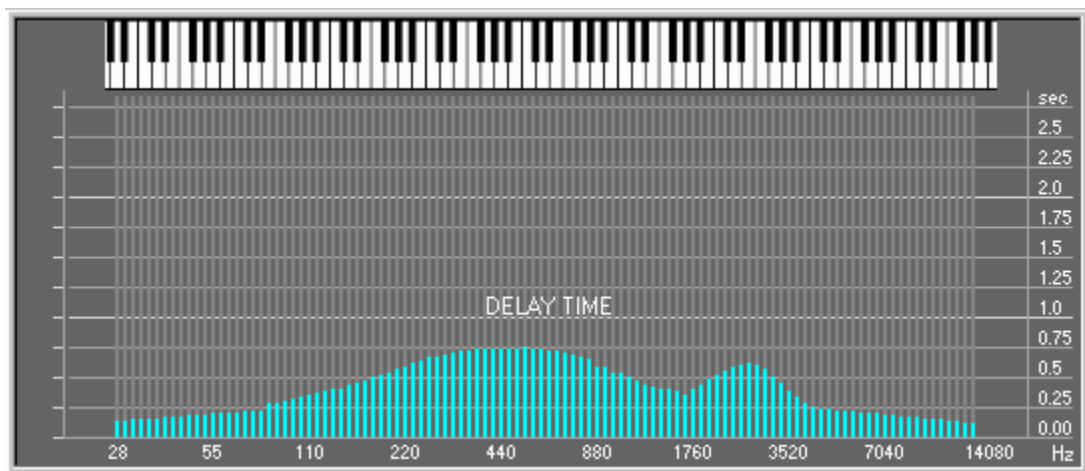


Abbildung: Eingabe der Abklingzeit (Nr. 2)

Auch hier wird eine Annahme getroffen. Die Frequenzen um 440Hz, und zwischen 1760Hz und 3520 Hz sollen länger nachklingen als die übrigen Frequenzen.

Daraus ergibt sich folgendes Gesamtbild:

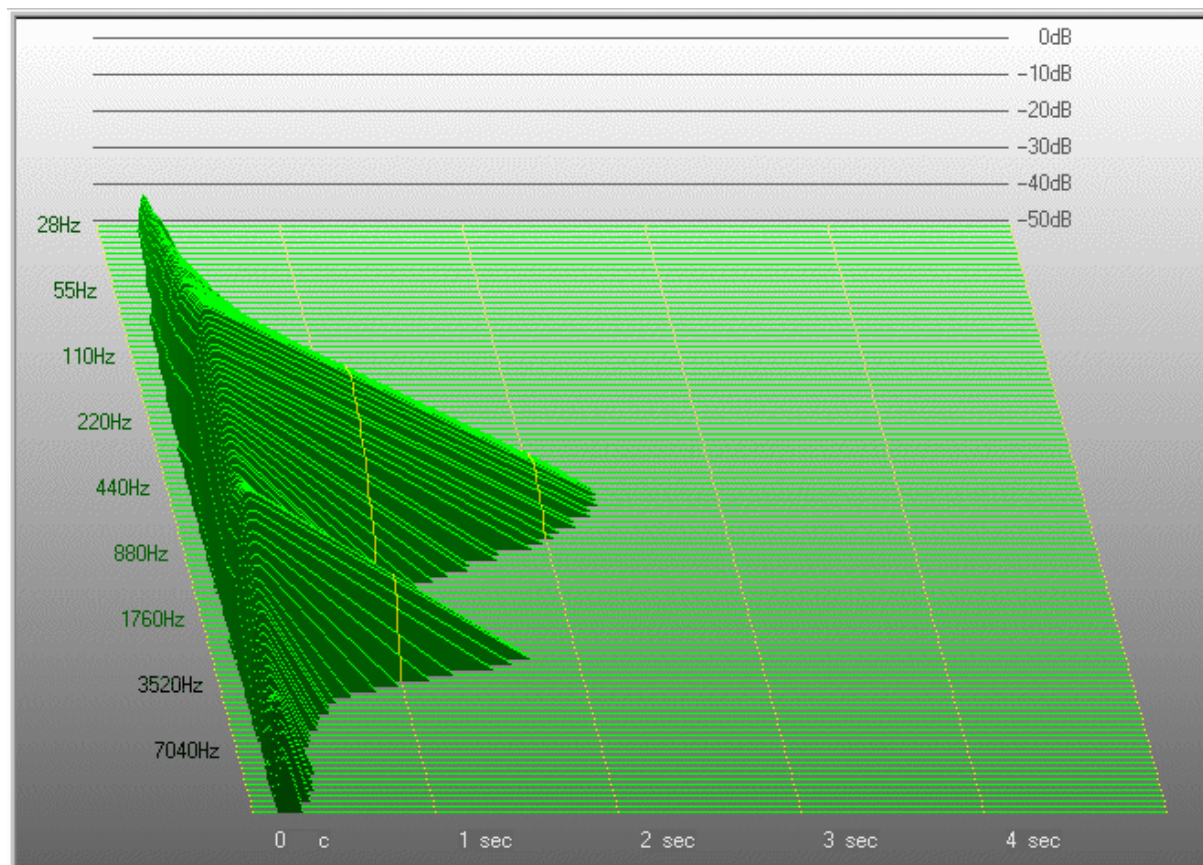


Abbildung: Wasserfall Diagramm des Nachhall Spektrums (Nr. 2)

🎵 Klangbeispiel:

zweites von Hand programmiertes Nachhallsignal – Schätzung einer simulierten Raumimpulsantwort.
Balco06.FAP Balco06.MOD Balco06.WAV

Es erklingt das simulierte Signal dreimal hintereinander.
Der Ergebnis entspricht schon eher einem realen Raum. Vorallem die Homogenität des Nachhallspektrums wurde verbessert. Dies hört man deutlich bei einem A/B Vergleich.

🎵 Klangbeispiel:

erstes und zweites Beispiel abwechselnd, drei mal wiederholt.
BspTS03.FAP BspTS03.MOD BspTS03.WAV / Balco06.FAP Balco06.MOD Balco06.WAV

Ergebnis

Die eingangs aufgestellte These einen Nachhall durch Summation diskret frequenter Sinussignale erzeugen zu können, hat bisher zu einem verwertbaren Ergebnis geführt. Das letzte Klangbeispiel zeigt, daß der erzeugte Nachhall eine hohe Ähnlichkeit zu einem realen Nachhall besitzen kann. Um eine größere Realitätsnähe des simulierten Nachhalles zu erlangen, muß die spektrale Darstellung verfeinert werden. Hier liegt der Schlüssel für ein akustisch plausibles Resultat. Um das bisher erreichte Ergebnis zu verbessern werden zunächst die notwendigen Grundlagen der Akustik dargestellt. Daraus soll das weitere Vorgehen erfolgen.

Voraussetzungen für das Klavierhall-Modell

Hörphysiologische Grundlagen

Die Eigenschaften des menschlichen Ohres

Im Anhang findet sich eine ausführliche Abhandlung über den Aufbau und die Funktionsweise des menschlichen Ohres. Für das Verstehen des Klavierhall-Algorithmus sind die wichtigsten Punkte zusammengefaßt:

Das monaurale (einohrige) Hören ermöglicht eine Intensitäts- und Phasenwahrnehmung. Die das Trommelfell in Schwingung versetzende Schallwelle wird über einen mechanischen Verstärker (Hammer, Amboß, Steigbügel) auf die Basilarmembran eingekoppelt, und löst dort eine Wanderwelle aus. In Abhängigkeit der Frequenz des Schalles baucht die Basilarmembran an einer bestimmten Stelle maximal aus. An dieser Stelle schwingt das Maximum auf und nieder und regt die unter der Basilarmembran liegenden Nervenfasern (Stereozilien) zum Feuern an. Die Fasern feuern nur wenn die Basilarmembran auf sie drückt. Schwingt die Basilarmembran weg von den Fasern, so feuern sie nicht. Die Feuer-Rate hängt davon ab, wie fest die Basilarmembran auf die Fasern drückt, d.h. wie laut der anregende Schall war.

Signal-Pulse-Kodierung

Die Basilarmembran bewirkt eine Frequenz-Orts-Transformation, die Fasern bewirken eine Einweg-Gleichrichtung der Basilarmembranschwingung. Sie können maximal 1000-mal pro Sekunde feuern. Das bedeutet, daß die Fasern bis zu einer Audio-Frequenz von 1000 Hz direkt folgen können, und die empfangene Schwingung synchron in eine Folge von Impulsblöcken umwandeln. Oberhalb dieser Frequenz kommen die Fasern nicht mehr nach, und es entsteht ein Art „Aliasing“, wie bei einer Abtastung mit zu geringer Abtastfrequenz.

Die Nervenimpulse (auch Pulsetrains genannt) werden über den nervus acusticus an das Gehirn weitergeleitet. Dieses verwendet die Impulsströme um daraus die Signalintensität und -qualität, sowie die Lokalisierung auszurechnen und als Wahrnehmung zu Bewußtsein zu bringen.

Monaurale Phasenbeziehungen

Bietet man einem Ohr eine einzelne feste Sinusfrequenz $s < 1\text{kHz}$ an, so kann bei monauralem Hören die Phasenlage nicht wahrgenommen werden. Es ist also gleichgültig, ob man einen Sinus mit Phasenlage 0 Grad, oder einen Sinus mit Phasenlage -180 Grad hört. Der Klangeindruck ist der gleiche. Bietet man einem Ohr zwei einzelne feste Sinusfrequenzen z.B. im Oktavabstand - 50 Hz und 100 Hz - an, so kann ein Phasenunterschied zwischen den beiden Frequenzen wahrgenommen werden. Der relative Phasenlagenunterschied macht sich in Form einer „Färbung“ bemerkbar. Dies ist mit obigem Wissen über die Signal-Pulse-Kodierung auch leicht erklärbar.

Binaurale Phasenbeziehungen

Bei binauralem Hören wird der Intensitätsunterschied, die Färbung und die Phasenlage, die ja einer Laufzeit entspricht, zur Richtungswahrnehmung verwendet. Audiosignale, die von der Seite auf den Zuhörer treffen, erzeugen in dem zu Signalquelle hingewandten Ohr ein anderes Klangspektrum als im abgewandten Ohr. Die bekannten Untersuchungen zu den sogenannten kopfbezogenen Übertragungsfunktionen (engl. Head related transfer functions, HRTFs) befassen sich damit; siehe H. Møller, Aalborg [147, 148, 149, 150]

Für den Nachhall werden HRTFs völlig außer Acht gelassen, weil Nachhall per se keine zusätzliche Lokalisierung erbringen soll. (siehe auch Vorteile des Klavierhall-Algorithmus)

Die kopfbezogenen Laufzeiten zwischen den beiden Ohren (interaural time delays, ITDs) ermöglichen dem Zuhörer eine auf 1 Grad genaue Winkelbestimmung; siehe J. Blauert, Räumliches Hören [25, 26]

Auch hier gilt: Für den Nachhall werden ITDs völlig außer Acht gelassen. (siehe auch Vorteile des Klavierhall-Algorithmus)

Diese für die Lokalisierung einer Signalquelle notwendigen Parameter treffen für den Nachhall nicht zu. Dieser soll ja eben nicht lokalisierbar sein. Deswegen muß bei der Erzeugung der Phasenlagen darauf geachtet werden, daß sie keine „Lokalisierungs“-komponente in den Nachhall mit einbringt. Das wird im vorliegenden Klavierhall-Algorithmus dadurch erreicht, daß für jeden Sinusgenerator getrennt die Phasenlage und Phasenmodulation berechnet wird, unabhängig von seinem Nachbarn. Diese Unabhängigkeit erzeugt den Höreindruck der Diffusität. Die Parametrisierung der Phasenbeziehungen in Startphasenlage, Modulationstiefe und Modulationsfrequenz ermöglicht es unterschiedliche Diffusionscharakteristiken zu realisieren.

Entwicklung des Klavierhall-Modells

Vergleich des Klavierhalls mit den anderen Modellen: Was ist besser ? Warum ist es besser ?
Aus der Analyse der Grundlagen der Akustik ergeben sich folgende Punkte zur Differenzierung des Klavierhall-Algorithmus gegenüber den herkömmlichen Ansätzen:

Echofreiheit

Der wesentliche Ansatz für das Klavierhall-Modell ist die echofreie Erzeugung des Nachhalls. Da keine Echos verwendet werden, verfälscht das Klavierhall-Modell die Lokalisierung der Signalquellen nicht. Echobasierte Hall-Algorithmen brauchen eine bestimmte Zeit bis sie zum Nachhall eingeschwingen sind. Die Analyse der bekannten Nachhall-Generatoren hat gezeigt, daß ein nicht unerheblicher Aufwand in die schnelle Erreichung einer hohen Echodichte gesteckt wird, (siehe Matrix-Hall von Jot) damit ein gleichmäßiger, resonanzfreier Nachhall erreicht wird.

Resonanzfreiheit

Grundlage des Klavierhall-Modells ist die Komposition des Gesamten aus spektralen Einzelkomponenten. Das Gesamtspektrum wird aus 108 Teilspektren zusammengefügt. Die diesem Ansatz zu Grunde liegende spektrale Struktur ist der Klaviatur nachempfunden. Dadurch wird eine dem Ohr sehr bekannte Struktur verwendet um den Klang des Halls modulieren zu können. Gleichzeitig wird durch die Klaviatureinteilung eine sehr präzise Beeinflussung des Halls möglich, wie sie bei keinem anderen bisher verfügbaren Hall-Algorithmus möglich ist. Das Klavierhall-Modell hat die Möglichkeit, bei entsprechender Einstellung, völlig gleichmäßigen Nachhall zu generieren. Natürlich kann der Tonmeister auch einen stark resonanten Nachhall programmieren, indem er gezielt einzelne Frequenzen überhöht und andere ausdünn.

Spektrales Einschwingen

Der Anhall ist ein wichtiger Parameter beim praktischen Arbeiten mit Nachhall. Bei Musikstücken mit hohem Tempo hört man sehr häufig nur den Anhall, weil der eigentliche Nachhall schon vom nächsten Akkord verdeckt wird. Um einen spektral dichten Anhall zu erlangen, müssen konventionelle Nachhallmodelle sehr kurze Echofolgen verwenden. Kurze Echoabstände bedeuten Eigenresonanzen im mittleren und oberen Frequenzbereich. Kurze Echoabstände erzeugen den Klangeindruck eines kleinen bzw. mittelgroßen Raumes.

Das Klavierhall-Modell kann jede seiner Frequenzen beliebig schnell einschwingen lassen. Es ist nicht an physikalische Begebenheiten gebunden. Es kann somit auch tiefe Frequenzen schnell einschwingen lassen und ermöglicht so auch die Darstellung eines kleinen, aber sehr tiefenfrequenten Raumes.

Das ist vorallem bei männlichen Gesangsstimmen von Vorteil.

Spektrales Ausschwingen

Das Ausschwingen des Nachhalls ist durch die freie Programmierbarkeit in weiten Grenzen variabel. Es kann ein „natürliches“ Verhalten (tiefe Frequenzen klingen länger aus als hohe) ebenso simuliert werden wie „unnatürliches“ Verhalten (hohe Frequenzen klingen länger aus als tiefe). Durch die sehr freie Einstellbarkeit der spektralen Hüllkurven können physikalisch unmögliche Nachhalle generiert werden.

Spektrale Zusammensetzung

Durch die Aufteilung des Nachhall-Spektrums in 12 Teilbänder pro Oktave und die Festlegung der Amplitude jeden Teilbandes mit maximal 256 Stützpunkten ist die spektrale Zusammensetzung des Nachhalls in weiten Grenzen frei definierbar. Es kann somit auch erreicht werden, daß sich die Struktur des Nachhalls während seines Ablaufs zeitlich ändert. Beispielsweise kann ein Teilband aus- und wieder eingebledet werden. Oder die hohen Frequenzen können „später“ kommen als die tiefen. Es lassen sich somit auch nichtreale Nachhalle erzeugen. Hiermit wird ein großer Freiraum für Experimente geschaffen. Einige Beispiele sind dazu im folgenden Kapitel aufgeführt.

Um einen Anhaltspunkt zu bekommen, wie die Parameter des Klavierhall-Algorithmus zu setzen sind, werden reale Nachhalle durch eine Fourier-Transformation in ihre spektrale Darstellung gebracht. Im folgenden Abbildung ist ein solcher Hallschuß dargestellt. Er stammt aus der Kapelle St.Lucia in Florenz/Italien und wurde mittels Starterpistole und Tonband aufgezeichnet.

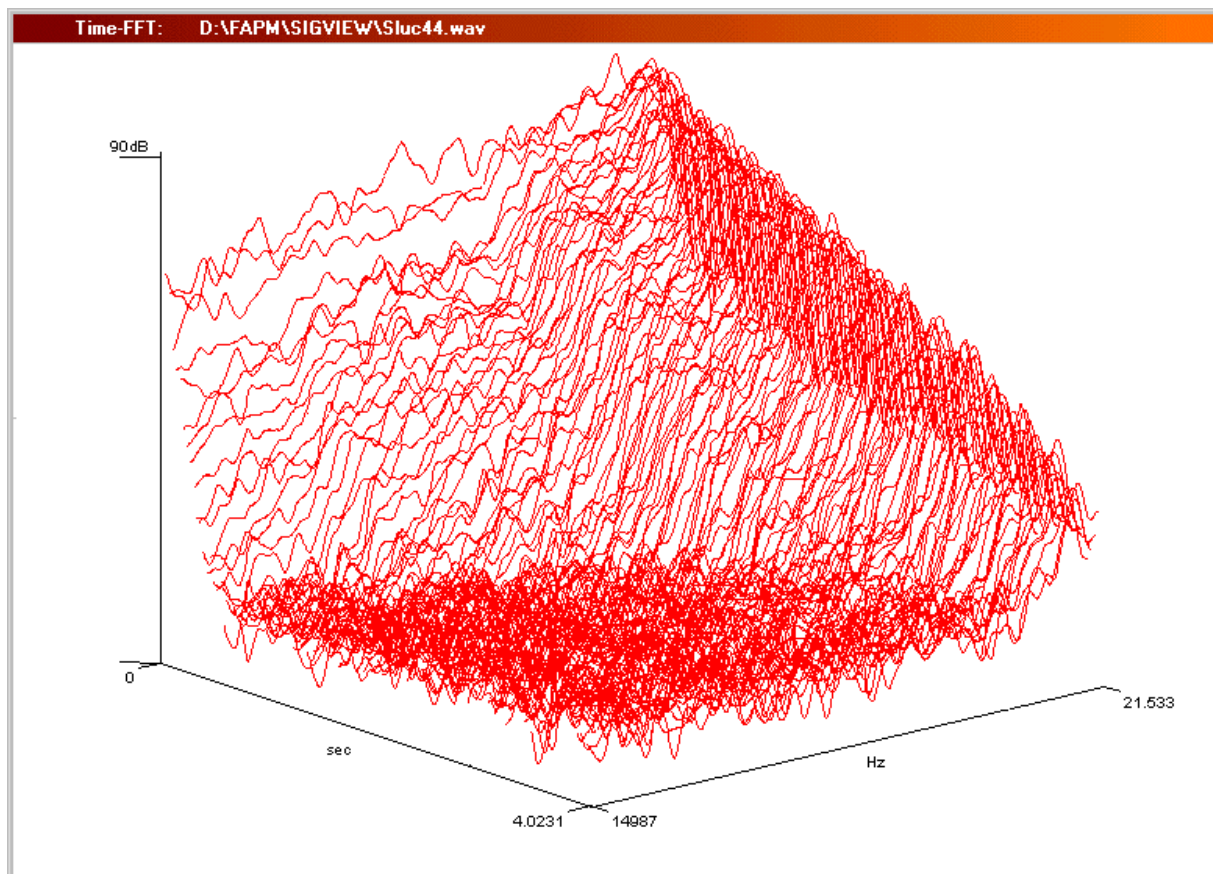


Abbildung: FFT-Analyse eines Hallschußes in St.Lucia

Für die Fourier-Transformation wird die Software SIGVIEW Version 1.81 verwendet. Diese ist in der Lage, die Analysedaten als Datei abzulegen. Aus dieser Analysedatei werden mit Hilfe einer dafür geschriebenen Software die Parameter für den Algorithmus gewonnen. Bestimmt werden die Werte für die 108 Amplituden und deren Hüllkurven. Die Parameter für die Phasenmodulation wurden von Hand gesetzt, da der originale Hallschuß nur in Mono vorliegt. Weitere Details der Parameterbestimmung sind im Anhang beschrieben.

Dieses Verfahren stellt eine praktikable Möglichkeit dar, Amplituden- und Hüllkurven-Parameter des Klavierhall-Algorithmus zu gewinnen. Die Eingabe aller Parameter von Hand stellt eine sportliche Aufgabe dar, die Geduld und Erfahrung verlangt, um einen plausiblen Nachhall zu generieren.

Software „Klavierhall“

Systemvoraussetzungen

PC Personal Computer, IBM kompatibel, min. PentiumII, besser Pentium IV oder Athlon 2500+
VGA Graphikkarte mit max. 32 MB Speicher, VESA Register kompatibel,
10 MB freier Harddiskspeicher für das Programm und die Graphiken,
100 MB freier Harddiskspeicher pro Raum, um eine Modenstruktur von 5 Sekunden Dauer anzulegen.
Betriebssystem: DOS 6.22, d.h es kann auch WIN98 verwendet werden, und das Programm dort unter DOS laufen. Folgende Betriebssysteme funktionieren nicht: Windows NT, Win2000, WinXP – Win ME besitzt noch das DOS 8.00, es ist aber nicht getestet.
Zum Anhören ist eine Soundblaster kompatible Soundkarte notwendig.

Das gesamte Programmpaket besteht aus folgenden Teilen:

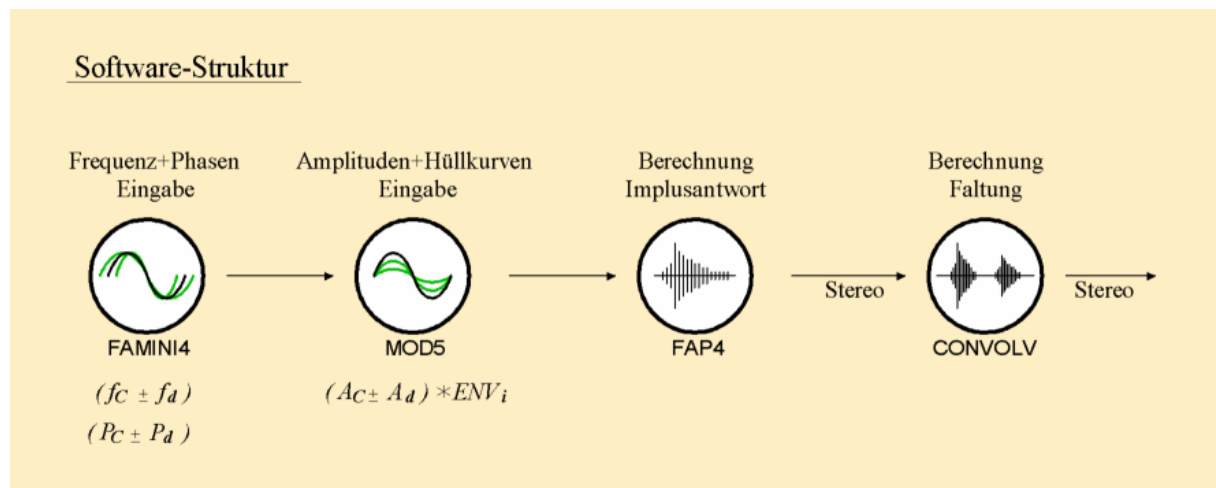


Abbildung: Software-Struktur des Klavierhall-Algorithmus

Die einzelnen Teile des Softwarepakets werden von einem übergeordneten Programm (STW1.EXE) aufgerufen.

Jedes Programmstück legt seine Ausgabeparameter in Dateiform auf der Festplatte ab. Das nachfolgende Programmstück greift darauf zu. Es verwendet diese Daten als Eingabe und fügt eigene Parameter hinzu, die es ebenfalls wieder auf Festplatte abspeichert.

Dieser etwas umständlich erscheinende Weg hat den großen Vorteil der leichteren Fehlerverfolgung. Wie die Praxis zeigt, steigt die Fehlerkomplexität mit dem Ansteigen der Parameterzahl mehr als linear an. Da es der Anspruch dieser Arbeit ist einen qualitativ hochwertigen Nachhall zu erzeugen, sind eine saubere Numerik und eine exakte Fehlerquellenanalyse unerlässlich. Die Erzeugung von Dateien mit Zwischenergebnissen der einzelnen Schritte ermöglicht es auch einen leichteren akustischen Zugang zum Thema Nachhall zu erlangen.

Wird das Software-Paket gestartet so erscheint folgender Startbildschirm:

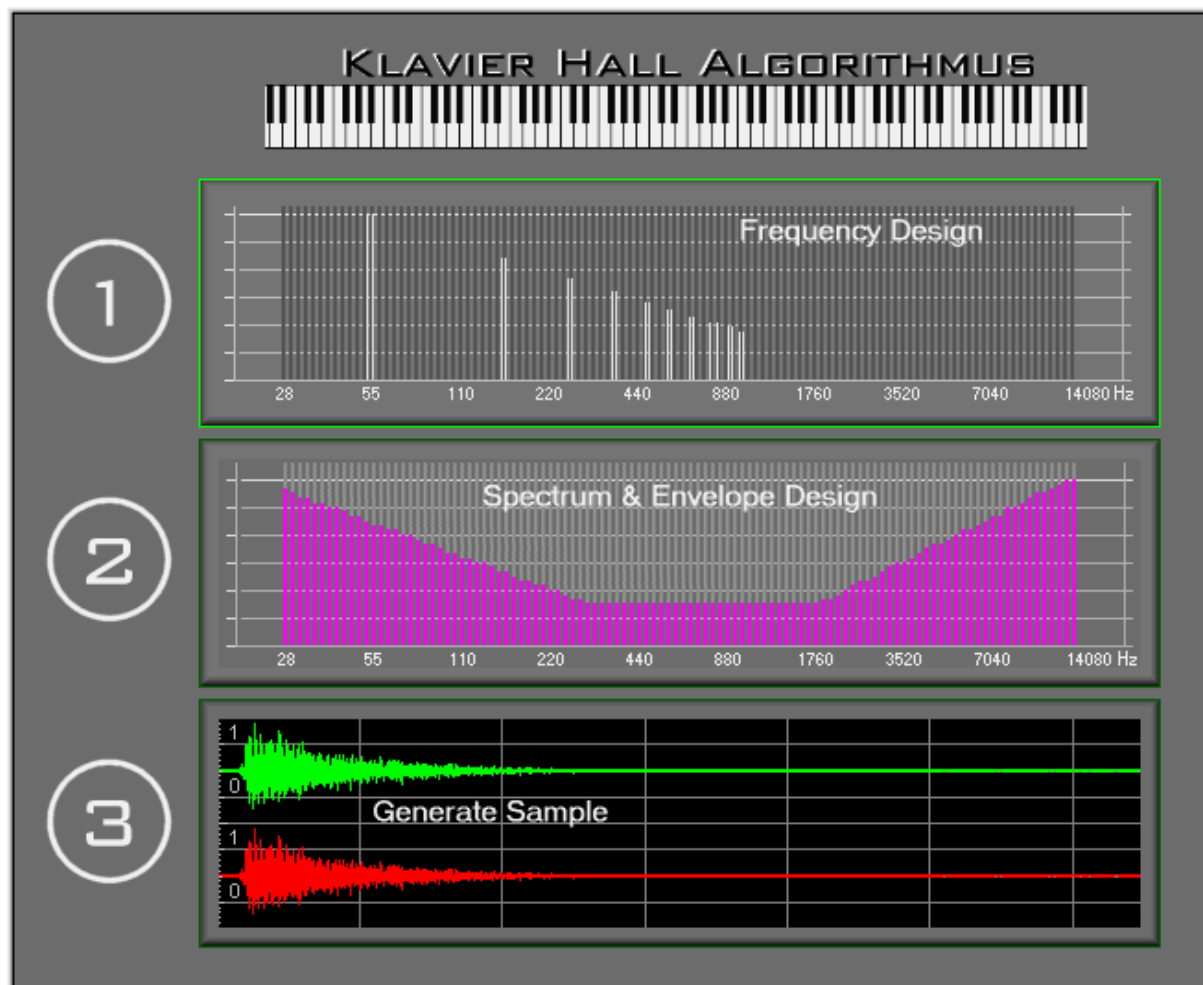


Abbildung: Startbildschirm

Mit dem Mauszeiger wählt man eines der drei Unterprogramme aus. Zweckmäßigerweise arbeitet man von oben nach unten.

Zunächst legt man also im „Frequency Design“ fest, welcher Frequenzbereich im Nachhall abgedeckt werden soll. Außerdem werden Frequenz-, Amplituden- und Phasenmodulation eingestellt.

Danach definiert man im „Spectrum & Envelope Design“ wie das spektrale Verhalten des Nachhalls sowie sein Ausklingen beschaffen sein sollen. Raum-Moden und Hüllkurven werden hier festgelegt. In nächsten Schritt, dem „Generate Sample“, wird der Nachhall berechnet. Dies kann je nach Nachhalldauer einige Minuten dauern.

Das errechnete Ergebnis liegt als Wave-Datei (.WAV) in 16 Bit Auflösung bei einer Samplingfrequenz von 44100 Hz vor. Das entspricht der CD-Qualität.

Mit Hilfe eines weiteren Programmstücks (CONVOLLV.EXE) kann eine Faltung des Nachhalls mit einem Audiosignal erfolgen. Diese Faltung ist auf maximal 65536 Stereo-Samples begrenzt. Das entspricht einer Halldauer von ca 1,5 Sekunden. Diese Faltung ist nicht echtzeitfähig. Sie wird im wesentlichen dazu eingesetzt, um kommerzielle Faltungsprogramme zu überprüfen.

Ein kommerzielles Faltungsprogramm ist z.B. von Christian Knufinke das Programm SIR [127]

Frequenz-Bestimmung

(siehe Source-Code FAMINI4.EXE)

Diese Software dient zum Festlegen der Frequenzstruktur des Raumes.

Systemvoraussetzungen: wie „Modenstruktur“, siehe unten

Die Parameter der Frequenzstruktur werden in Form von .FAP-Dateien gesichert, die Ausgabe der Frequenzstruktur werden in .INI-Dateien abgespeichert. Die INI-Dateien werden danach vom „Impulsantwort“-Generator (FAP4.EXE) weiterverarbeitet.

Eingabe der Frequenzstruktur

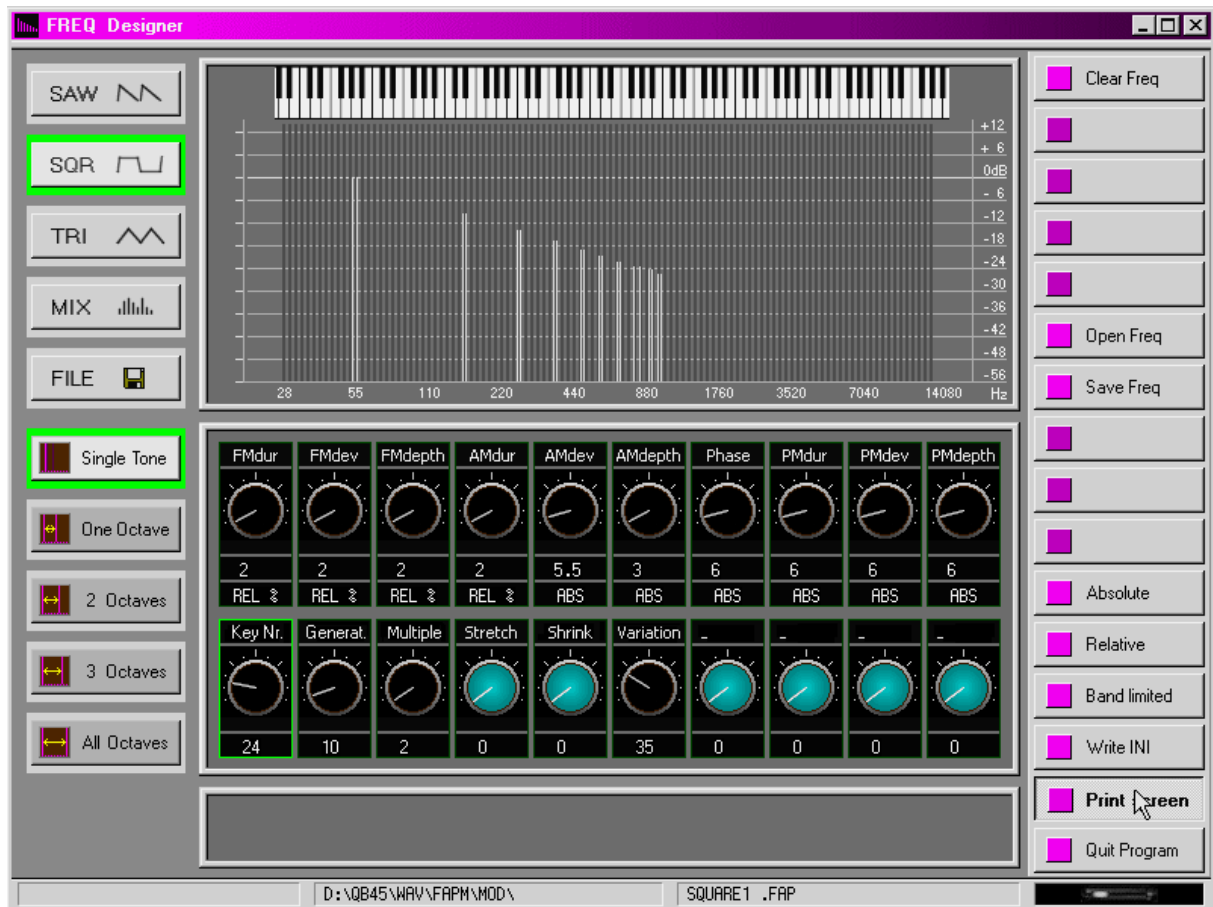


Abbildung: Frequenzstruktur Eingabe (Beispiel)

Nach dem Start dieses Programmstückes erhält man den Initialschirm. Die Bedeutung der Felder im Detail:

Linke Seite oben:

SAW: schaltet das Sägezahnspektrum ein. In Abhängigkeit der Grundfrequenz, die mit **Key Nr** angezeigt wird, wird das Spektrum der Sägezahnkurve eingestellt. Die Anzahl der Obertöne wird mit **Generat.** (Anzahl der Sinusgeneratoren) festgelegt

SQR: schaltet das Rechteckspektrum ein. In Abhängigkeit der Grundfrequenz, die mit **Key Nr** angezeigt wird, wird das Spektrum der Rechteckkurve eingestellt. Die Anzahl der Obertöne wird mit **Generat.** festgelegt

TRI: schaltet das Dreiecksspektrum ein. In Abhängigkeit der Grundfrequenz, die mit **Key Nr** angezeigt wird, wird das Spektrum der Dreieckskurve eingestellt. Die Anzahl der Obertöne wird mit **Generat.** festgelegt
MIX: Das Spektrum kann mit der Maus in das obere grosse Fenster (Tastaturfenster) gezeichnet werden. Es können beliebige Kombinationen gezeichnet werden.
FILE: noch nicht implementiert.

Linke Seite unten:

Single Tone: es wird nur eine Impulsantwort erzeugt.
One Octave: es werden ab dem Startwert Key Nr 12 Impulsantworten in chromatischer Folge erzeugt.
2 Octaves: es werden ab dem Startwert Key Nr 24 Impulsantworten in chromatischer Folge erzeugt.
3 Octaves: es werden ab dem Startwert Key Nr 36 Impulsantworten in chromatischer Folge erzeugt.
All Octaves: es werden ab dem Startwert Key Nr 108 Impulsantworten in chromatischer Folge erzeugt.

Alle zur Erzeugung notwendigen Parameter werden in eine INI-Datei geschrieben. Die Länge der INI-Datei wächst also mit der Anzahl der zu erzeugenden Impulsantworten.
Der Name der INI-Datei ist gleich dem aktuellen Dateinamen. Im obigen Beispiel lautet der Name der Parameterdatei SQUARE.FAP; somit würde die zugehörige INI-Datei SQUARE.INI heißen. Diese Zuordnung kann nicht geändert werden.
Die INI-Dateien werden nicht überschrieben, sondern sammeln auf. Wenn man also zuerst **Single Tone** wählt und Write INI anklickt und danach **One Octave** wählt und Write INI anklickt, dann enthält die INI-Datei beide Parametersätze und die nachfolgende Synthese würde einen Einzelton und eine Oktave nacheinander (wie in einem Batchjob) erzeugen.

Rechte Seite:

Clear Freq: Löscht alle bisher eingezeichneten Generatoren.
Open Freq: Öffnet eine Parameterdatei mit der Endung .FAP zum Einlesen
Save Freq: Speichert alle Parameter in eine Datei mit der Endung .FAP
Absolute: Der entsprechende Poti-Wert wird als absoluter Wert gerechnet
Relative: Der entsprechende Poti-Wert wird relativ zur Frequenz (Tonhöhe) gerechnet
Band limited: Der entsprechende Poti-Wert wird aus einer Datei entnommen, die gemäß des Klavier-Algorithmus die Werte für bandbegrenztes Rauschen enthält.
Write INI: Gibt die Anweisung neue Parametersätze in die aktuelle INI-Datei zu schreiben.
Print Screen: Speichert den Bildschirminhalt als .PCX-Datei auf die Festplatte.
Quit Program: Beendet das Programm

Die Potis im Potentiometerfenster geben die Parameter gemäß des Klavieralgorithmus an. Jedes Poti kann individuell geregelt werden.

Key Nr: legt den Grundton fest.
Generat.: legt die Anzahl der Generatoren fest.
Multiple: legt die Anzahl der Dupletten fest.
Stretch: schiebt die Einzeltöne nichtlinear auseinander
Shrink: schiebt die Einzeltöne nichtlinear zusammen
Variation: legt den Frequenzabstand der Dupletten fest.
Potis ohne Namen sind noch nicht belegt.

Spektrumsbestimmung

Diese Software dient zum Festlegen der Modenstruktur des Raumes. Sie dient nicht zur Bestimmung der Anregungsfunktion.

Die Modenstruktur wird in Form von Wave-Dateien abgespeichert, die Modenparameter werden in sog. .MOD-Dateien gesichert.

Eingabe der Modenstruktur

Manuelle Eingabe

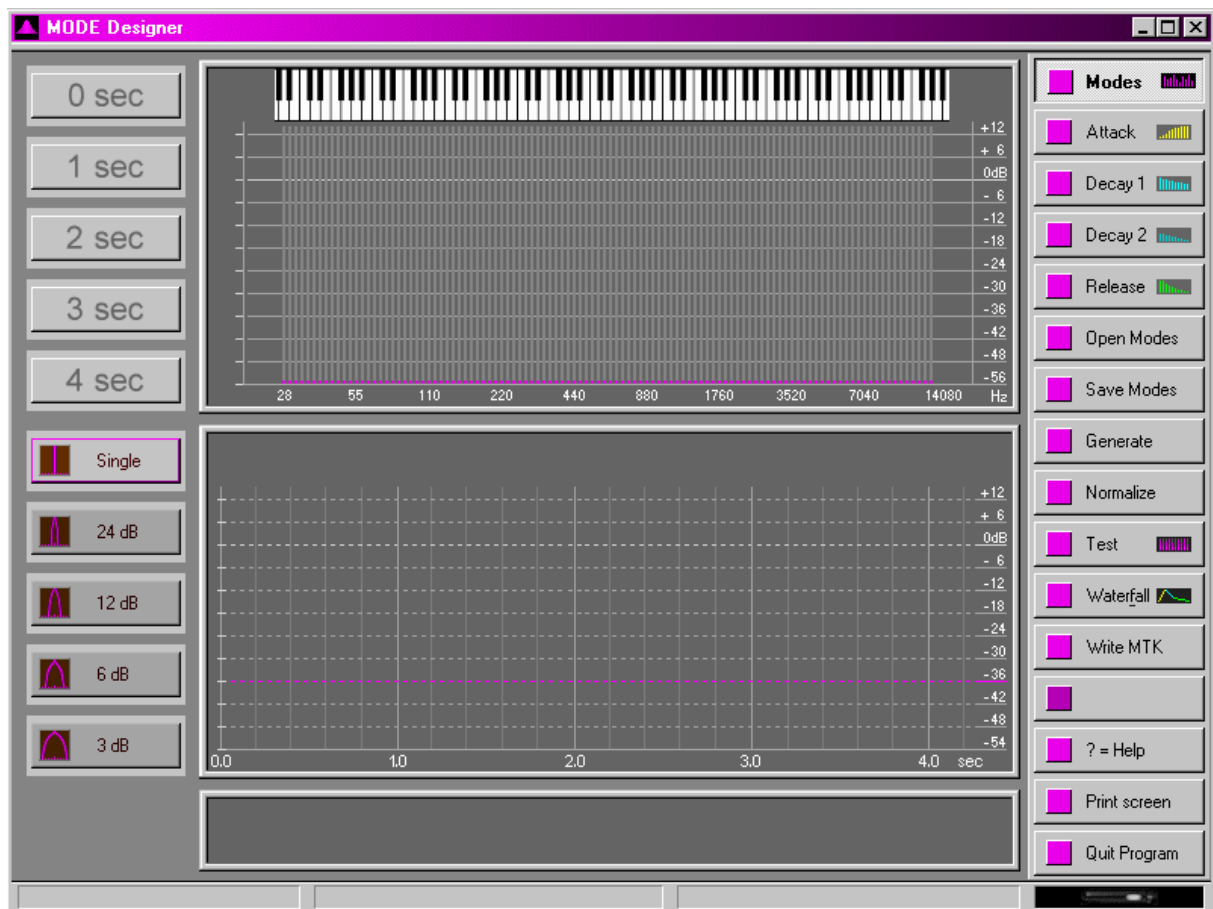


Abbildung: Moden Eingabe – leerer Schirm (Schirm nach Programmstart)

Nach dem Start dieses Programmstückes erhält man diesen Initialschirm. Die Bedeutung der Felder im Detail:

In der Bildschirmmitte befinden sich zwei große Fenster: Oben das Spektrumsfenster mit der Klaviatur und darunter das Zeitfenster, das die jeweilige Hüllkurve anzeigt.

Im **Spektrumsfenster** können die gewünschten Frequenzgänge von Hand gezeichnet werden.

Im Bereich 28 Hz bis 14080 Hz können über 9 Oktaven insgesamt 108 Einzelfrequenzen beeinflusst werden. Die Amplitude kann dabei von +12dB bis -54 dB umfassen.

Um eine Frequenz auszuwählen, fährt man mit dem Mauszeiger auf die entsprechende Frequenz und klickt mit der linken Maustaste bei der gewünschten Amplitude.

Auf diese Weise lassen sich recht mühsam die gewünschten Frequenzgänge erarbeiten.

Möchte man mehrere nebeneinander liegende Frequenzen beeinflussen, z.B. die Frequenzen von 28 Hz bis 220 Hz auf -12dB setzen, dann klickt man zuerst mit der linken Maustaste auf den Punkt 28Hz/ -12dB und anschließend mit der rechten Maustaste auf 220Hz/ -12dB und das Programm setzt alle dazwischen liegenden Frequenzen ebenfalls auf -12dB . Hierbei wird lineare Interpolation verwendet.

Im **Zeitfenster** wird die Hüllkurve der angewählten Frequenz dargestellt. Dieses Fenster ist ein reines Anzeigefenster. Es kann darin nichts beeinflusst werden.

Links oben, neben dem Spektrumsfenster stehen die **Zeitfelder 0 sec bis 4 sec**. Diese zeigen den spektralen Frequenzgangverlauf bezogen auf die Sekunde 0 bis Sekunde 4. In diesem Zeitraum läßt sich der Verlauf des Spektrums in Sekundenschritten festlegen.

Um den Inhalt des temporären Spektrumsfensters in ein Zeitfeld zu kopieren, klickt man mit der linken Maustaste auf das gewünschte Zeitfeld. Sofort wird das aktuelle Spektrum in das Zeitfeld kopiert. Möchte man den Inhalt eines Zeitfeldes in das Spektrumsfenster zurück-kopieren, dann klickt man mit der rechten Maustaste auf das gewünschte Zeitfeld. Sofort wird der Inhalt des Zeitfeldes in das aktuelle Spektrum kopiert. Das vorhergehende Spektrum wird überschrieben.

Unter den Zeitfeldern befinden sich die Schaltflächen „Single“ bis „3 dB“. Diese Schaltflächen legen den Zeichenmodus für das Spektrumsfenster fest. Es kann nur eine Schaltfläche aktiv sein.

Single: Durch Klicken der linken Maustaste wird im Spektrumsfenster jeweils eine Amplitude der ausgewählten Frequenz gesetzt. Vorherige Werte werden überschrieben. Wird die rechte Maustaste gedrückt, dann werden alle Frequenzen von linker Maustaste bis rechter Maustaste beeinflusst. Dieser Modus funktioniert nur bei Single, sonst nicht.

24dB: Durch Klicken mit der linken Maustaste wird im Spektrumsfenster eine Oktave links und rechts der gewählten Frequenz mit einer Flankensteilheit von 24dB/Oktave eingezeichnet.

12dB: Durch Klicken mit der linken Maustaste wird im Spektrumsfenster eine Oktave links und rechts der gewählten Frequenz mit einer Flankensteilheit von 12dB/Oktave eingezeichnet.

6dB: Durch Klicken mit der linken Maustaste wird im Spektrumsfenster eine Oktave links und rechts der gewählten Frequenz mit einer Flankensteilheit von 6dB/Oktave eingezeichnet.

3dB: Durch Klicken mit der linken Maustaste wird im Spektrumsfenster eine Oktave links und rechts der gewählten Frequenz mit einer Flankensteilheit von 3dB/Oktave eingezeichnet.

Das folgende Bild zeigt anhand eines Beispiels den Gebrauch dieser Zeichenfunktion.

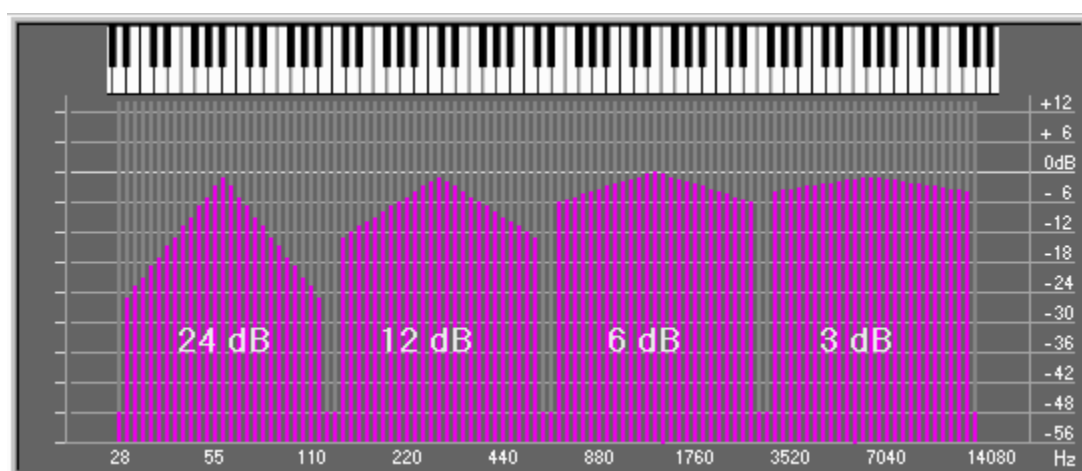


Abbildung: Eingabe des Spektrums mit Hilfe der Flankensteilheit/Oktave-Funktion

Rechts oben neben dem Spektrumsfeld sind die Schaltflächen Modes, Attack, Decay1, Decay2 und Release angeordnet. Es kann immer nur eine Schaltfläche aktiv sein.

Die Schaltfläche **Modes** schaltet das temporäre Spektrum auf das Spektrumsfenster. Die einzelnen Frequenzen werden in der Farbe Altrosa ||| angezeigt.

Beispiel:

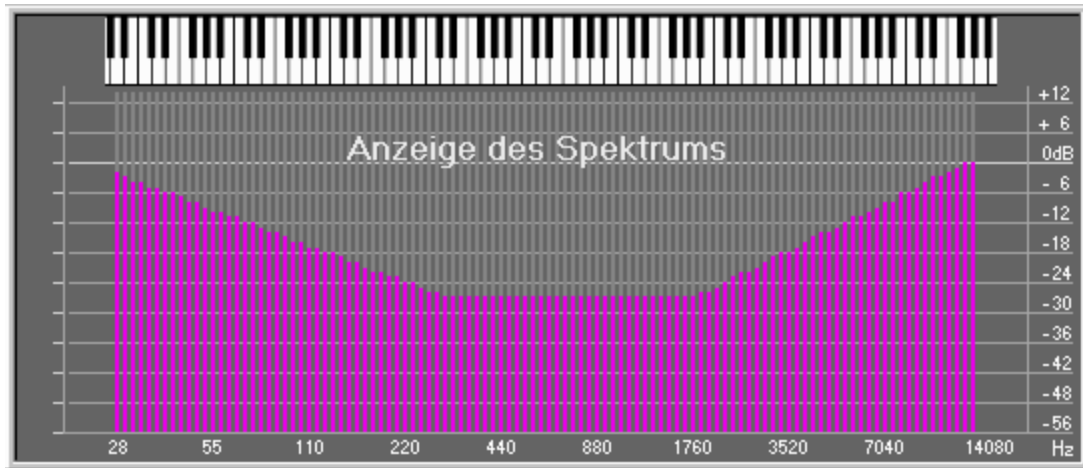


Abbildung: Beispiel für die Anzeige des temporären Spektrums

Die Schaltfläche **Attack** schaltet den Attack-Anteil in das obere Fenster. Hier wird nun die Attackzeit von jeder Frequenz in der Farbe gelb ||| dargestellt. Mit Hilfe der Maus können die Attack-Zeiten geändert werden. (siehe Single Modus bei Modes)

Beispiel:

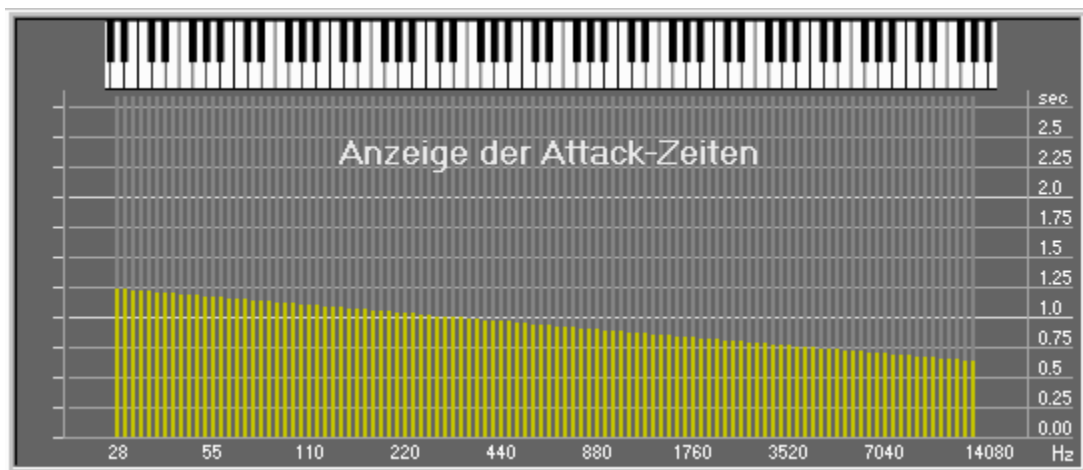


Abbildung: Beispiel für die Anzeige der Attack-Zeiten

Die Schaltfläche **Decay1** schaltet den Decay1-Anteil in das obere Fenster. Nun wird die erste Decay-Zeit von jeder Frequenz in der Farbe hellblau ||| dargestellt. Mit Hilfe der Maus können die Decay-Zeiten geändert werden. (siehe Single Modus bei Modes)

Beispiel:

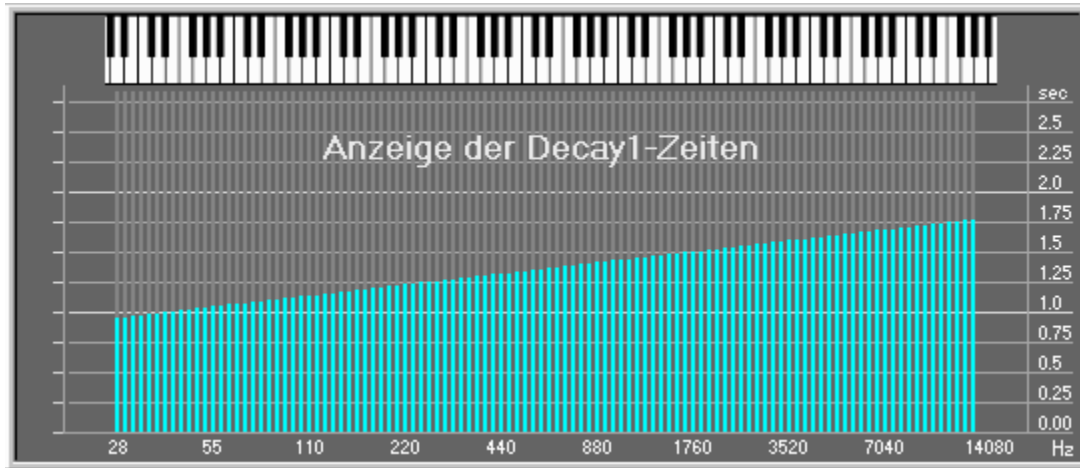


Abbildung: Beispiel für die Anzeige der Decay1-Zeiten

Die Schaltfläche **Decay2** schaltet den Decay2-Anteil in das obere Fenster. Nun wird die zweite Decay-Zeit von jeder Frequenz in dunklem Hellblau ||| dargestellt. Mit Hilfe der Maus können die Decay-Zeiten geändert werden. (siehe Single Modus bei Modes)

Beispiel:

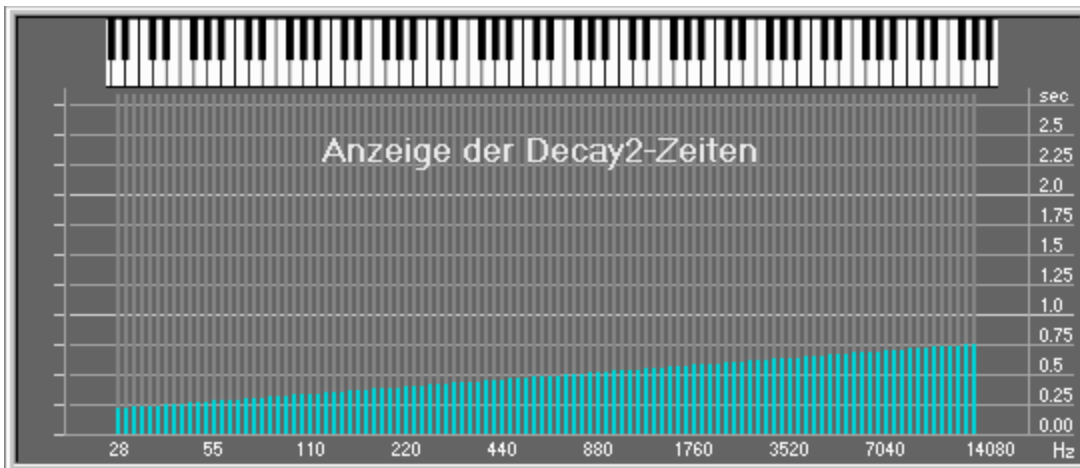


Abbildung: Beispiel für die Anzeige der Decay2-Zeiten

Die Schaltfläche **Release** schaltet den Release-Anteil in das obere Fenster. Nun wird die Release-Zeit von jeder Frequenz in der Farbe grün dargestellt. (siehe Single Modus bei Modes)

Beispiel:

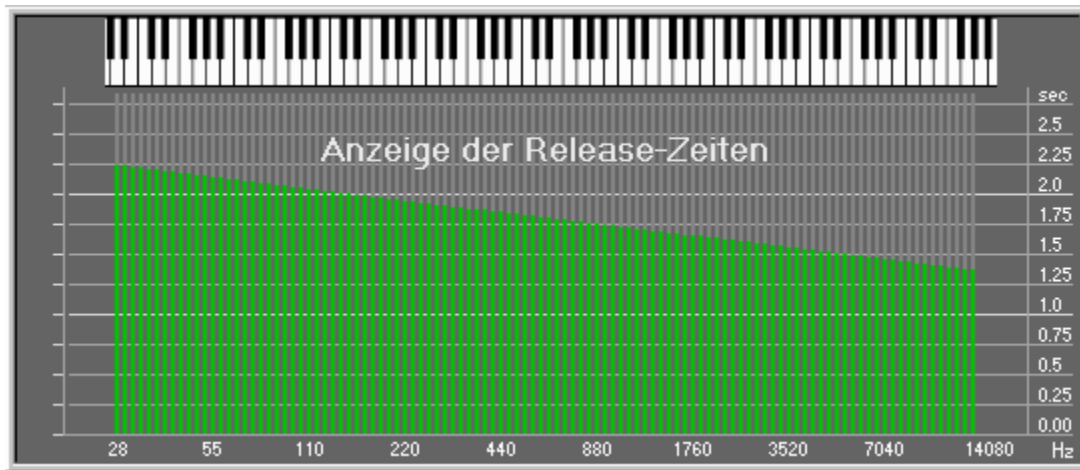


Abbildung: Beispiel für die Anzeige der Release-Zeiten

Ein typischer „Arbeits“-Bildschirm sieht dann so aus:

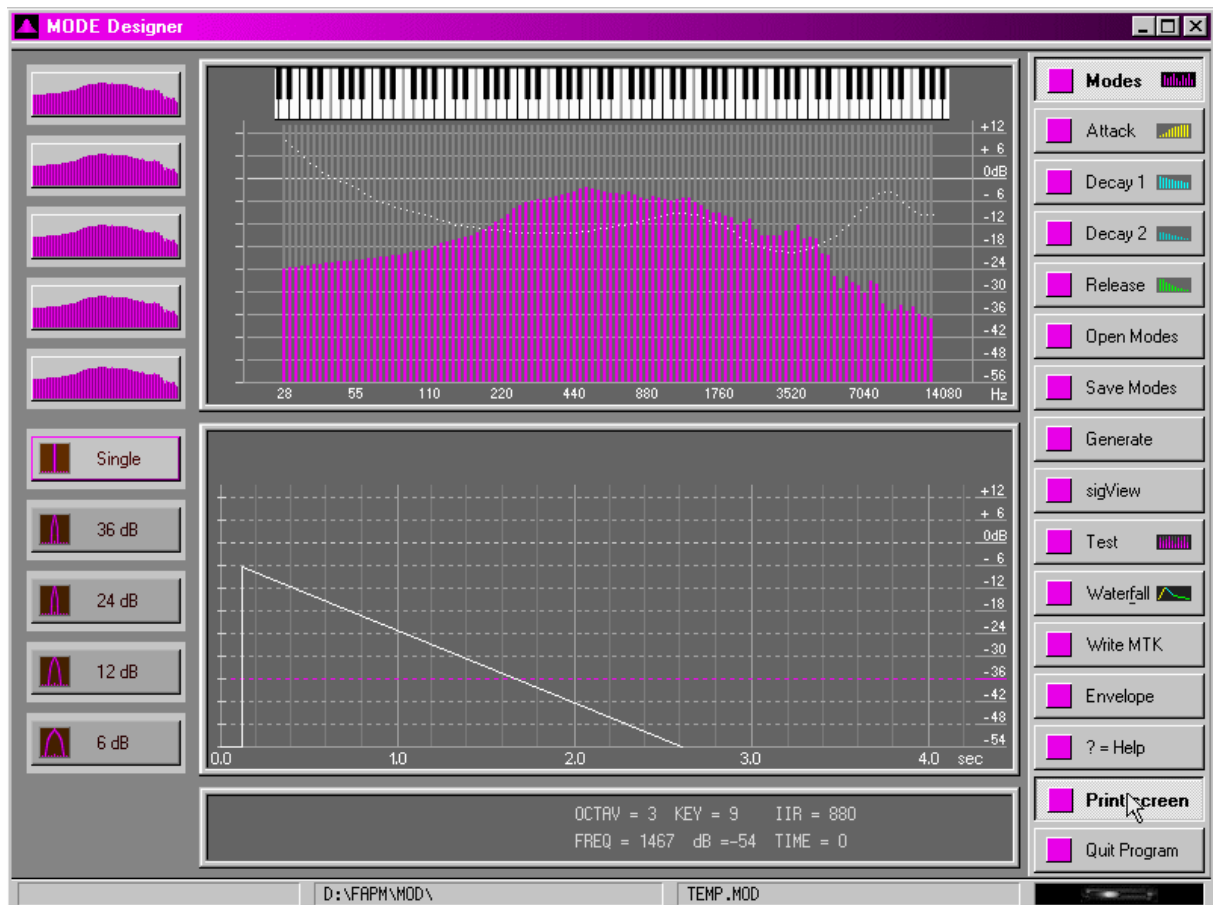


Abbildung: Beispiel für eine typische Bildschirmanzeige

Dieser Bildschirm zeigt an, daß die Zeitfelder 0 bis 4 besetzt sind mit jeweils unterschiedlichen Spektren. Dies kann so sein, muß es aber nicht. Es können auch alle 5 Zeitfelder das selbe Spektrum enthalten. Allerdings müssen alle Zeitfelder besetzt sein, leere Zeitfelder sind verboten. Im Zeitfenster wird die Hüllkurve der zuletzt angewählten Frequenz angezeigt.

Mit der Schaltfläche PRINT SCREEN, auf der die Maus gerade steht, wird ein Screenshot des aktuellen Bildschirms in das Verzeichnis C:\SCREEN geschrieben. Die Dateien heißen S0000.PCX, S0001.PCX und so weiter. Ein Zähler zählt pro Bild um eins hoch. Bei jedem Programmstart wird dieser Zähler auf Null gesetzt, und alle schon vorhandenen Screenshots werden überschrieben. Das Dateiformat PCX kann von jedem gängigen Bildverarbeitungsprogramm gelesen werden. Die Auflösung beträgt 800x600 Pixels mit 8 Bit Farbtiefe.

Eine übersichtliche Anzeige über alle EXPO-Hüllkurven erzeugt die **Waterfall**-Funktion. Dazu klickt man auf die Schaltfläche Waterfall oder drückt den Buchstaben f auf der Tastatur. Die Bildschirmanzeige wechselt dann zu einem Wasserfall-Diagramm:

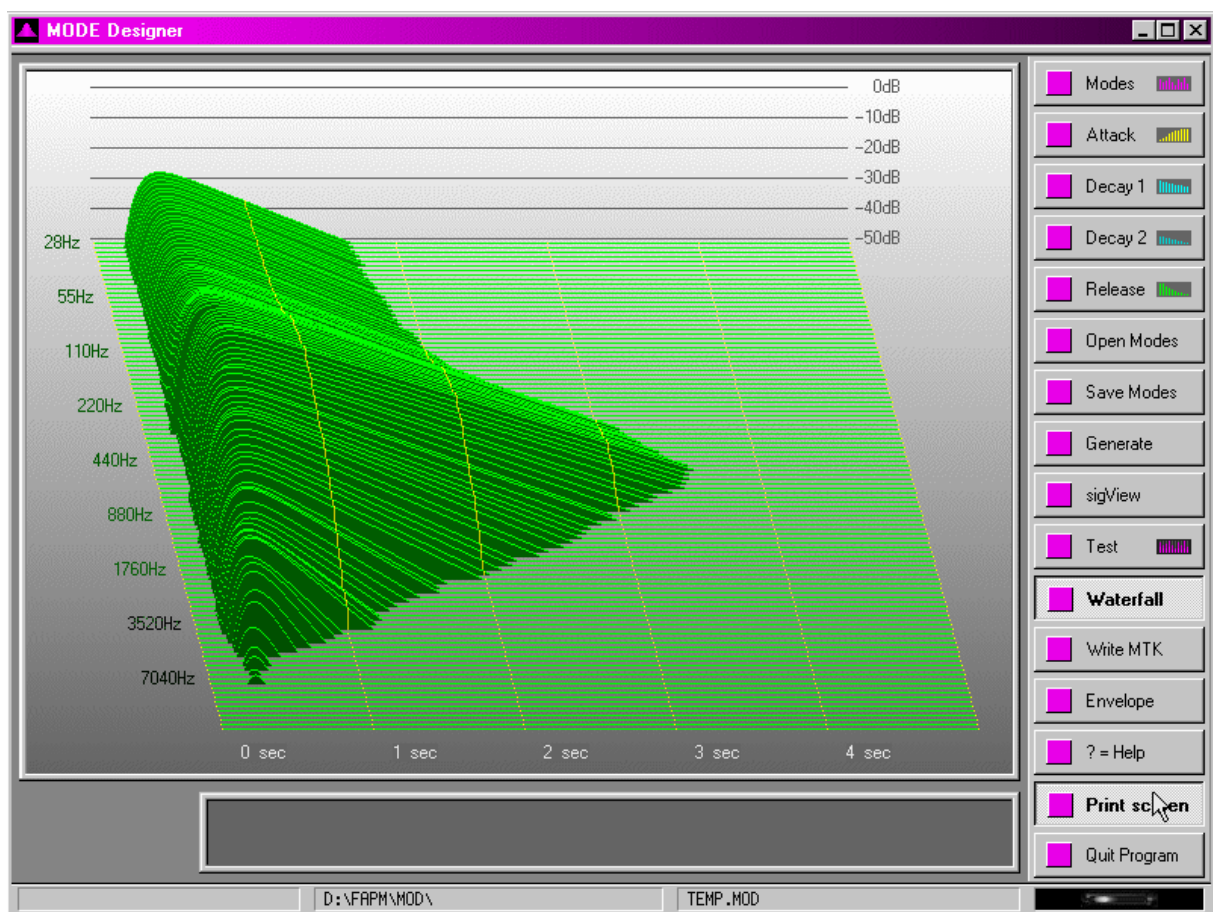


Abbildung: Wasserfall Diagramm zur Anzeige der EXPO-Hüllkurven

In dieser Darstellung kann nichts manipuliert werden. Sie dient lediglich der Anzeige der Hüllkurven. Um zum Spektrumsfenster zurückzukehren, klickt man mit der linken Maustaste auf die Schaltfläche **Modes**.

Eingabe per Raumgeometrie (Generate)

Eine weitere Möglichkeit ein temporäres Spektrum zu erzeugen ist die Generate-Funktion. Dazu klickt man auf die **Generate**-Schaltfläche oder drückt den Buchstaben **g** auf der Tastatur. Die Bildschirmanzeige ändert sich zu folgendem Bild:

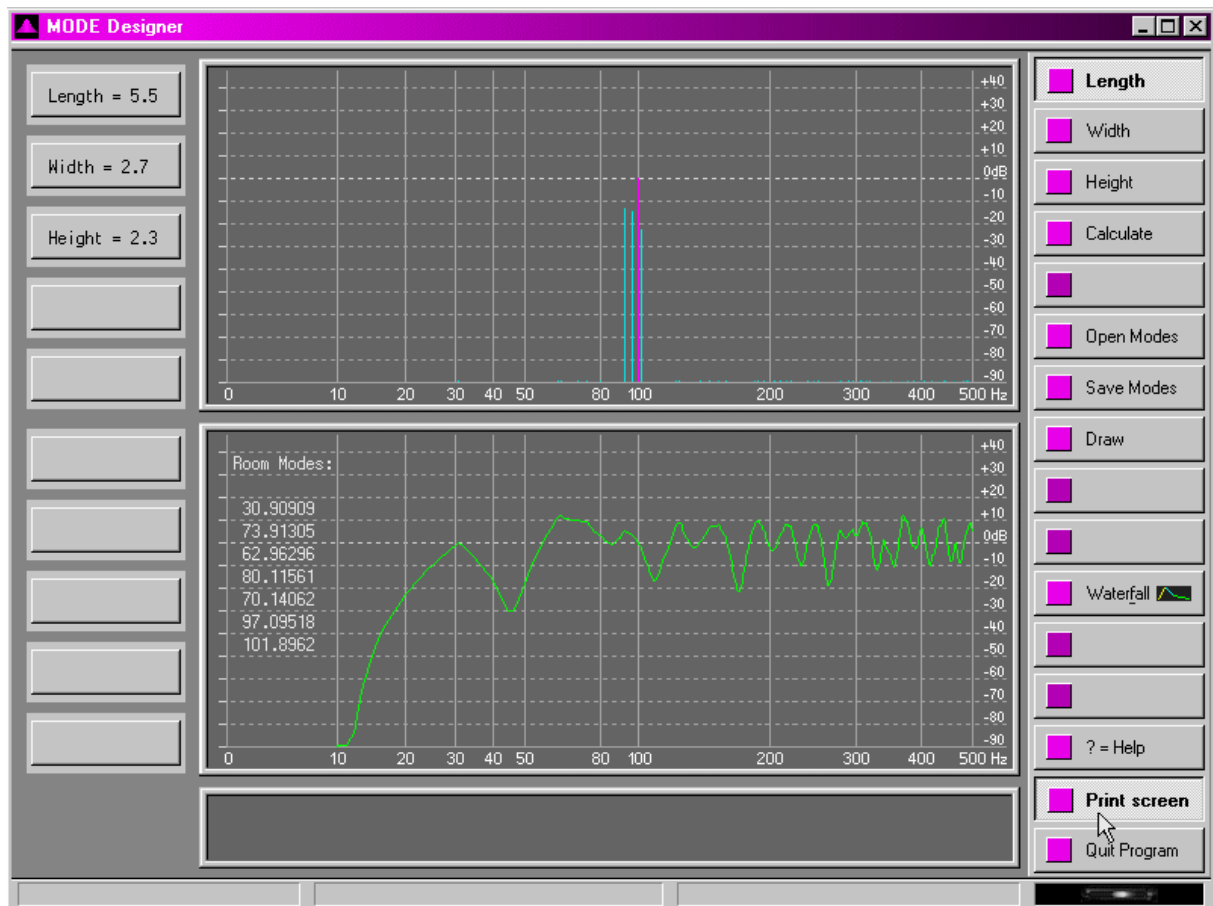


Abbildung: Modenbestimmung über Generate-Funktion

Mit Hilfe der Formel von Rayleigh werden die Moden für einen rechteckigen Raum berechnet. Die Raumgröße wird durch Länge (**L**ength), Breite (**W**idth) und Höhe (**H**eight) in [m] bestimmt. Die Moden werden bis zu einer Frequenz von 500 Hz berechnet. Die Grundmoden werden links im unteren Fenster in [Hz] angezeigt.

Durch Klicken mit der linken Maustaste auf die Schaltfläche **Length** oder durch Drücken der Taste **l** auf der Tastatur wird die Schaltfläche Length selektiert. Mit Hilfe der Pfeiltasten **↑** und **↓** wird die Länge der Raumes vergrößert oder verkleinert. Dies wird links oben im Statusfeld angezeigt. Gleiches gilt für **W**idth und **H**eight.

Durch Klicken der linken Maustaste auf die Schaltfläche **Calculate** oder durch Drücken der Taste **c** auf der Tastatur wird der Frequenzverlauf (grüne Kurve) neu berechnet.

Durch Klicken der linken Maustaste auf die Schaltfläche **Draw** oder durch Drücken der Taste **d** auf der Tastatur wird in den Zeichenmodus (manuelle Eingabe) zurückgeschaltet und die Frequenzkurve in das temporäre Spektrumsfenster übernommen.

Laden und Speichern

Das Laden von Moden-Dateien (mit der Endung .MOD) geschieht durch Klicken mit der linken Maustaste auf **Open** Modes oder Drücken der Taste **o** auf der Tastatur.

Das Abspeichern aller aktuellen Daten (incl. Hüllkurven und temporären Spektrum) geschieht durch Klicken mit der linken Maustaste auf **Save** Modes oder Drücken der Taste **s** auf der Tastatur.

Im Dateifenster werden alle bisherigen MOD-Dateien angezeigt.

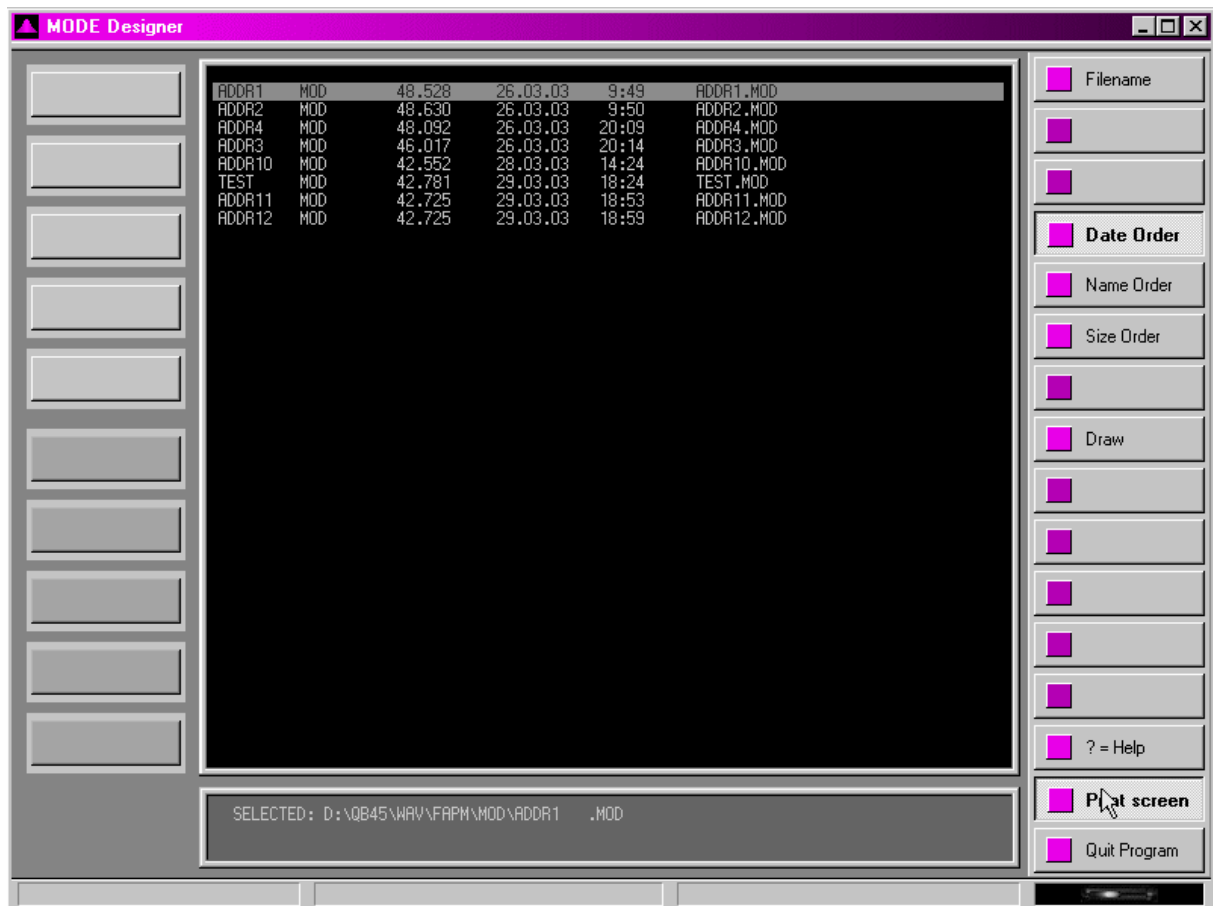


Abbildung: Dateifenster für Open/Save Modes

Die Auswahl einer Datei geschieht durch Anklicken mit der Maus oder mit den Pfeiltasten.

Die Schaltfläche **Filename** ermöglicht die Eingabe eines Dateinamens über die Tastatur.

Date Order zeigt die Dateien der Reihe nach Datum an.

Name Order zeigt die Dateien der Reihe nach Namen an.

Size Order zeigt die Dateien der Reihe nach Größe an.

Durch Anklicken der Schaltfläche Draw wird in den manuellen Eingabemodus zurück-gewechselt und die jeweilige Aktion (Open oder Save) ausgeführt.

Bei Save werden vorhandene Dateien ohne Rückfrage überschrieben.

Eingabe per Fourier-Analyse (Sigview / MOD5)

Durch die externe Signalanalyse-Software SIGVIEW kann ein Hallschuß spektral analysiert werden. Als Beispiel sei hier die Kirche St.Lucia in Italien gezeigt. Ein Hallschuß innerhalb des Kirchenschiffes zeigt folgendes spektrales Bild:

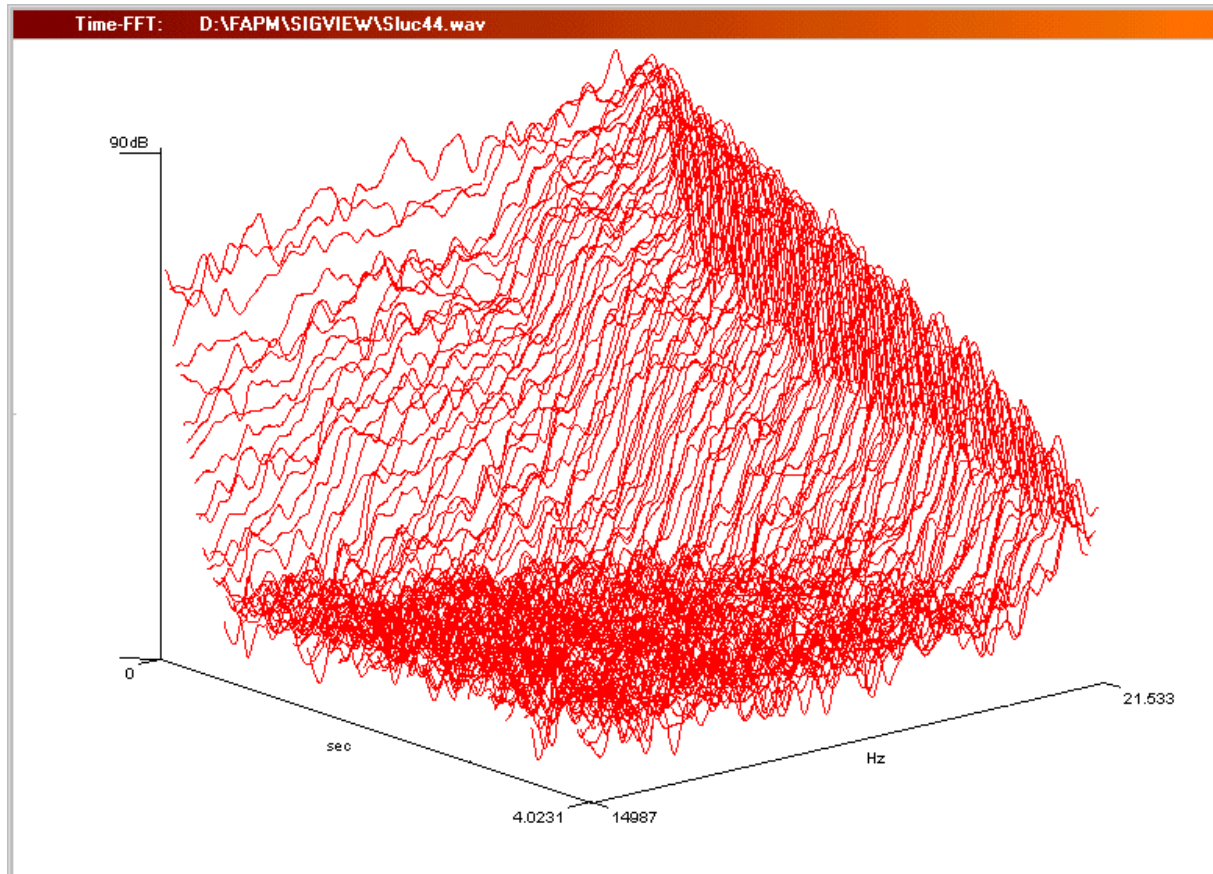


Abbildung: FFT-Analyse eines Hallschußes in St.Lucia

Die Achsen X und Y zeigen die Zeit in [sec] und die Frequenz in [Hz] an. Die analysierte Zeitspanne reicht von 0 sec bis 4.0231 sec, die analysierte Frequenz von 21.533 Hz bis 14987 Hz. Die Hochwert-Achse (Z-Achse) zeigt die Lautstärke in [dB] an

Deutlich erkennt man das schnelle Ausklingen der hohen Frequenzen, an der linken Seite aufgetragen. In den tiefen Frequenzen rechts zeigen sich Resonanzen, die nur langsam abklingen. Der Nachhall in den tiefen Frequenzen dauert länger als 4 Sekunden, während er in den Höhen weniger als eine Sekunde beträgt.

Für eine FFT-Analyse sind die unruhigen Kurvenformen typisch. Dieses Phänomen wird später noch diskutiert werden.

Der gleiche Hallschuß kann auch als Spektrogramm dargestellt werden:

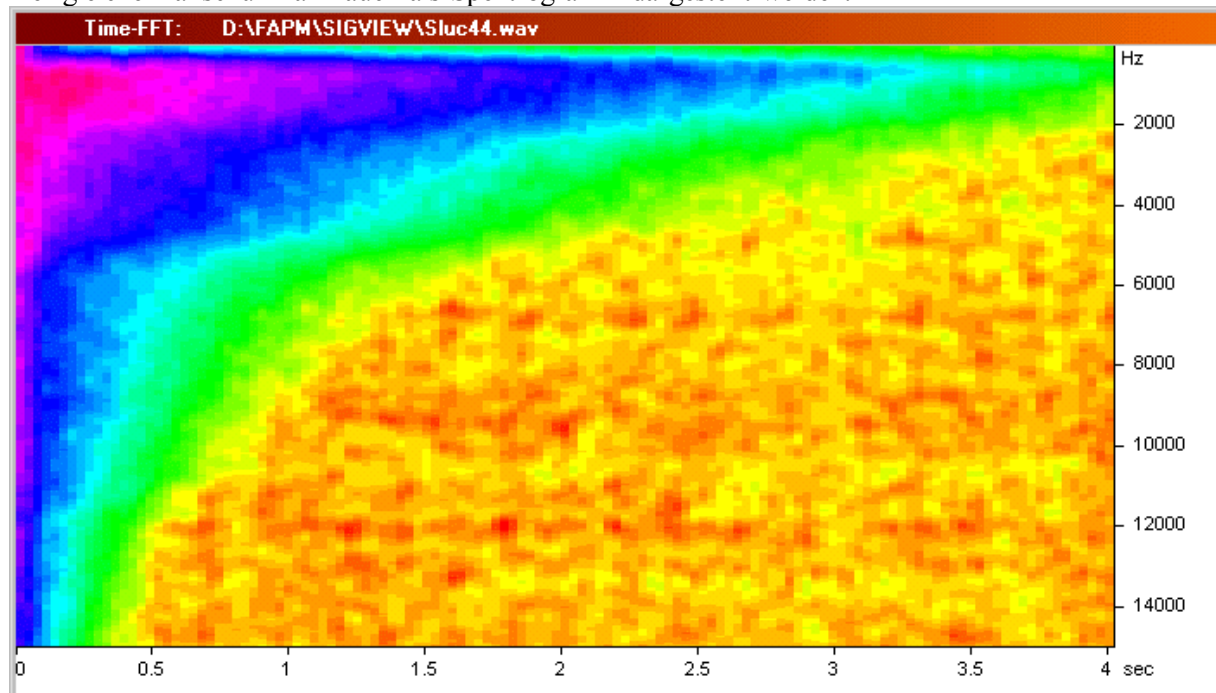


Abbildung: Spektrogramm des Hallschußes in St.Lucia

Dabei wurden folgende Parameter der SIGVIEW Signalanalyse bei „spectral analysis“ verwendet:



Abbildung: „spectral analysis“ Parameter in SigView

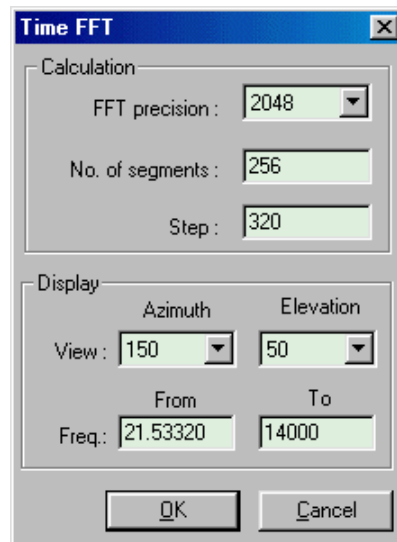


Abbildung: „time FFT“ Parameter in SigView

Die Daten der Analyse werden über das Menü „File – ASCII“ auf die Festplatte in das MOD5-Hauptverzeichnis „D:\FAPM\SIGVIEW“ abgespeichert. Dabei muß „Export 3D graphics (matrix)“ ausgewählt werden und die Endung der Datei „.TXT“ sein.

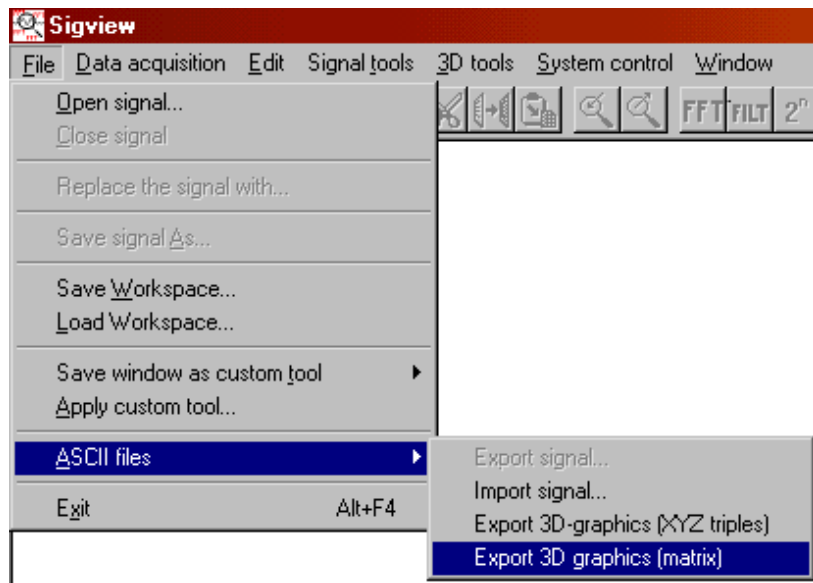


Abbildung: Abspeichern der Daten als Matrix in SigView

Nun kann die Analyse dieses Hallschusses als Grundlage für ein Raumspektrum verwendet werden: Dazu gibt es die Möglichkeit des Einlesens der Analysedaten mittels der SigView-Import-Funktion. Man klickt auf die sigView-Schaltfläche oder drückt den Buchstaben „v“ auf der Tastatur. Die Bildschirmanzeige ändert sich zu folgendem Bild:

FOLI128	TXT	747.496	19.04.04	17:35	foli128.txt
FOLI256	TXT	1.491.170	19.04.04	17:23	foli256.txt
FOLI44	TXT	2.980.016	19.04.04	16:26	foli44.txt
SLUC44	TXT	2.076.599	12.03.04	10:41	Sluc44.txt
SLUC2048	TXT	2.076.625	12.03.04	9:48	Sluc2048.txt
FOLI1024	TXT	813.748	27.02.04	11:47	Foli1024.txt
FOLILIN	TXT	808.571	14.02.04	15:07	Folilin.txt
SIN440	TXT	337.708	10.02.04	10:00	Sin440.txt
LUCI2048	TXT	836.536	09.02.04	22:07	luci2048.txt
SIG	TXT	492.864	27.01.04	9:54	SIG.TXT
FOLI1025	TXT	439.985	25.01.04	23:49	Foli1025.txt
FOLI2048	TXT	440.428	25.01.04	23:42	Foli2048.txt

SELECTED: D:\FAPM\SIGVIEW\FOLI128 .TXT

Abbildung: Dateiauswahl in Softwareteil MOD5

Mit Hilfe der Cursor-Tasten oder der Maus wird die zu importierende Datei ausgewählt. Es handelt sich dabei um eine Fourier-Analyse-Datei im Sigview-Matrix-Format. Das Dateiformat ist ASCII-Text. Die Dateiendung lautet „.TXT“. Aus den Daten werden die Parameter für Lautstärke, Attack-Zeit und Decay-Wert für eine exponentielle Hüllkurve bestimmt. Dazu werden alle von der FFT gelieferten Frequenzen analysiert.

Die folgende Abbildung zeigt den Analyse-Schirm für die eingelesene Frequenz 3574 Hz.

Die hellgraue gezackte Linie stellt die originalen Daten der FFT dar. Diese Kurve zeigt deutlich einen großen Nachteil der Fourier-Analyse. Da die Fourier-Analyse ein starres Frequenzraster verwendet, werden Frequenz-Schwabungen als Intensitätsschwankungen abgebildet. Schwabungen treten in der Akustik z.B. dann auf, wenn eine Raummode nicht exakt mit ihrer Eigenfrequenz angeregt wird, sondern mit einer Frequenz, die um ein paar Prozent davon abweicht. Das bedeutet, daß Fourier-Analysen von Schallschüssen keine „glatten“ Frequenzkurven erzeugen werden. Um eine glattere Kurve zu erzeugen, muß folglich eine Glättung eingerechnet werden. Diese Glättung ist erforderlich, um die Fehlerrate bei der Bestimmung der Hüllkurvenparameter möglichst gering zu halten. Hier wird die Glättung durch einen wählbaren IIR-Filter erster Ordnung berechnet.

Als Filterwerte stehen die Eckfrequenzen 110Hz, 220Hz, 440Hz, 880Hz, 1760Hz, 3520Hz und 7040Hz zur Auswahl.

Die hellblaue Kurve stellt die Glättung mit einem 3520Hz-IIR-Filter dar. Aus dieser Kurve wird der maximale Pegel (MAX, gelbes +) und der Pegel MAX-30dB (grünes +) bestimmt. Der Zeitpunkt des maximalen Pegels (TIME) bestimmt den Einsatzzeitpunkt der exponentiellen Hüllkurve, die Steigung der Kurve bestimmt den Grad des Ausklingsens. Da die Amplitude in der Abbildung logarithmisch aufgetragen ist, zeigt sich das exponentielle Ausklingen als Gerade.

Die Software zeigt die gefundenen Werte in Textform an. Dabei bedeutet MAX = maximaler Wert der geglätteten Hüllkurve, MIN = der nächste gefundene Wert kleiner MAX-30dB, und SLOPE = Steigung, aus diesen zwei Werten berechnet. In der Zeile darunter werden die jeweiligen Zeiten angegeben.

Die Software analysiert nun die von SigView ausgegebenen Werte iterativ, wobei jede Frequenzkurve ausgewertet wird.



Nach der Analyse wechselt man mit „m“ = Modes zum Hauptschirm, und sieht dort das Ergebnis der eingelesenen Datei in den Feldern MODES, ATTACK und DECAY1, sowie im Wasserfall-Diagramm.

Ein weiteres Problem galt es bei der Import-Funktion zu lösen: Das Frequenzraster der Fourier-Analyse ist äquidistant. Es ist im digitalen Bereich abhängig von der Samplingfrequenz f_s und der Länge des Analysefensters. Da der komplette Hallschuß i.a. zu lang ist, um in einer einzigen Analyse erfaßt zu werden, wählt man ein zeitlich kürzeres Fenster aus, über welches die Analyse stattfindet. Dieses Fenster wird dann um eine Anzahl x Samples weitergeschoben, und so der gesamte Hallschuß iterativ abgetastet.

Bei dem rechentechnisch sehr effizienten Fast-Fourier-Analyse Algorithmus (FFT) muß die Fensterlänge 2^n betragen. Die Länge des Analyse-Fensters muß also eine Zweipotenz sein. In diesem Beispiel ist die Länge auf 2048 Samples festgelegt. Damit ergibt sich bei einer Samplingfrequenz f_s von 44100 Hz ein festes Frequenzraster von 21.533 Hz über das gesamte Analyse-Spektrum. In den unteren Oktaven der Klaviatur ist dieses Frequenzraster sehr grob. Mit 21.53Hz, 43.1Hz, 64.5Hz, 86.1Hz, 107.7Hz, 129.1Hz, 150.7Hz 172.2Hz 193.8Hz, 215.3Hz 236.9Hz stehen in 3 Oktaven (27.5Hz-55Hz, 55Hz-110Hz, 110Hz-220Hz) nur 11 FFT-Frequenzen zur Verfügung. In der obersten Oktave von 7040Hz bis 14080Hz erhält man hingegen ($7040\text{Hz} / 21.533\text{Hz} =$) 327 FFT-Frequenzen. Während man also in den oberen Oktaven ausreichend Meßwerte erhalten kann, ist es in den unteren Oktaven erforderlich, durch Interpolation die fehlenden Meßwerte zu errechnen.

Durch eine Vergrößerung des Analyse-Fensters läßt sich das FFT-Frequenzraster verfeinern, allerdings nimmt die zeitliche Auflösung entsprechend ab. Die hier gewählte Fensterlänge stellt einen Kompromiß aus spektraler Güte und zeitlicher Präzision dar.

Evaluation

Im folgenden werden Resultate vorgespielt, die mit oben genanntem Eingabeverfahren erzeugt worden sind. Der simulierte Hallschuß von St.Lucia ist als drittes Beispiel „großer Raum“ zu hören.

Hörversuche zur Synthese realer Räume

Ein kleiner Raum

🎵 Klangbeispiel: Nachhall eines kleinen Raumes (z.B. ein holzgetäfelter Sitzungssaal) CD2, Track 02

Dieses Beispiel demonstriert die Simulation eines kleinen Raumes. (ALCO393.WAV)

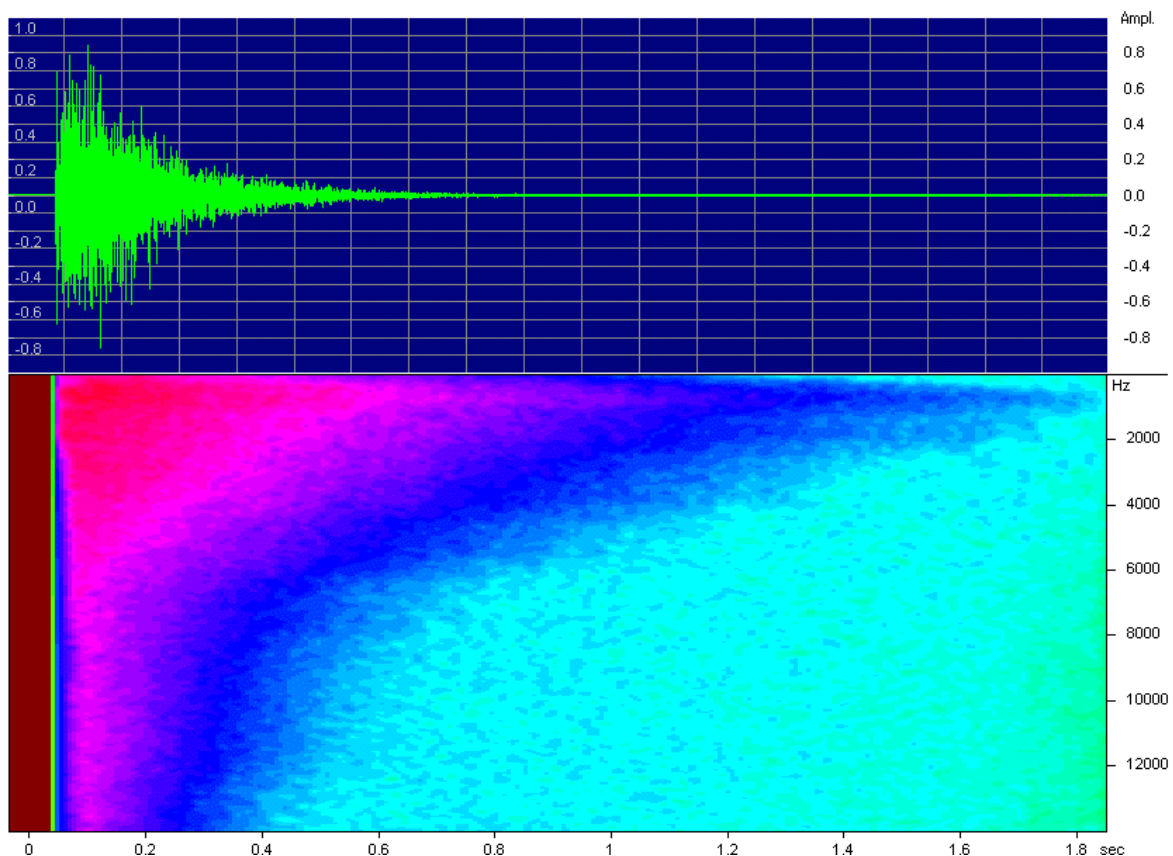


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm der Impulsantwort eines kleinen Raumes

Der Analysezeitraum beträgt 1,8 Sekunden. Die Nachhallzeit liegt bei ca. 0,6 Sekunden. Die Zeitfunktion stellt den „Hallschuß“ dar. Die X-Achse gibt die Zeit an, die Y-Achse gibt die Amplitude in linearem Maßstab an.

Das Farbschema des Spektrogramms zeigt mit rot die Stellen höchster Intensität an. Über blau, magenta, grün und gelb nimmt die Lautstärke immer weiter ab. Die Farbwertskala überstreicht mit den Regenbogenfarben einen Bereich von 100dB. Die X-Achse des Spektrogramms gibt die Zeit an, die Y-Achse gibt in linearem Maßstab die analysierte Frequenz an. Tiefe Frequenzen sind oben, hohe Frequenzen sind unten angetragen.

In obigem Spektrogramm erkennt man deutlich das schnelle Abklingen der hohen Frequenzen. Die tiefen Frequenzen klingen länger nach. Dieses Verhalten suggeriert dem Zuhörer einen realen Raum.

Im nächsten Beispiel wird ein mittelgroßer Raum simuliert. Auch hier wird durch eine geeignete Parametrisierung des Algorithmus eine plausibel klingende Raumimpulsantwort erzielt.

Ein mittelgroßer Raum

🎵 Klangbeispiel: Nachhall eines mittelgroßen Raumes (z.B. ein Konzertsaal)

Dieses Beispiel demonstriert die Simulation eines mittelgroßen Raumes. (CHIC203.WAV)

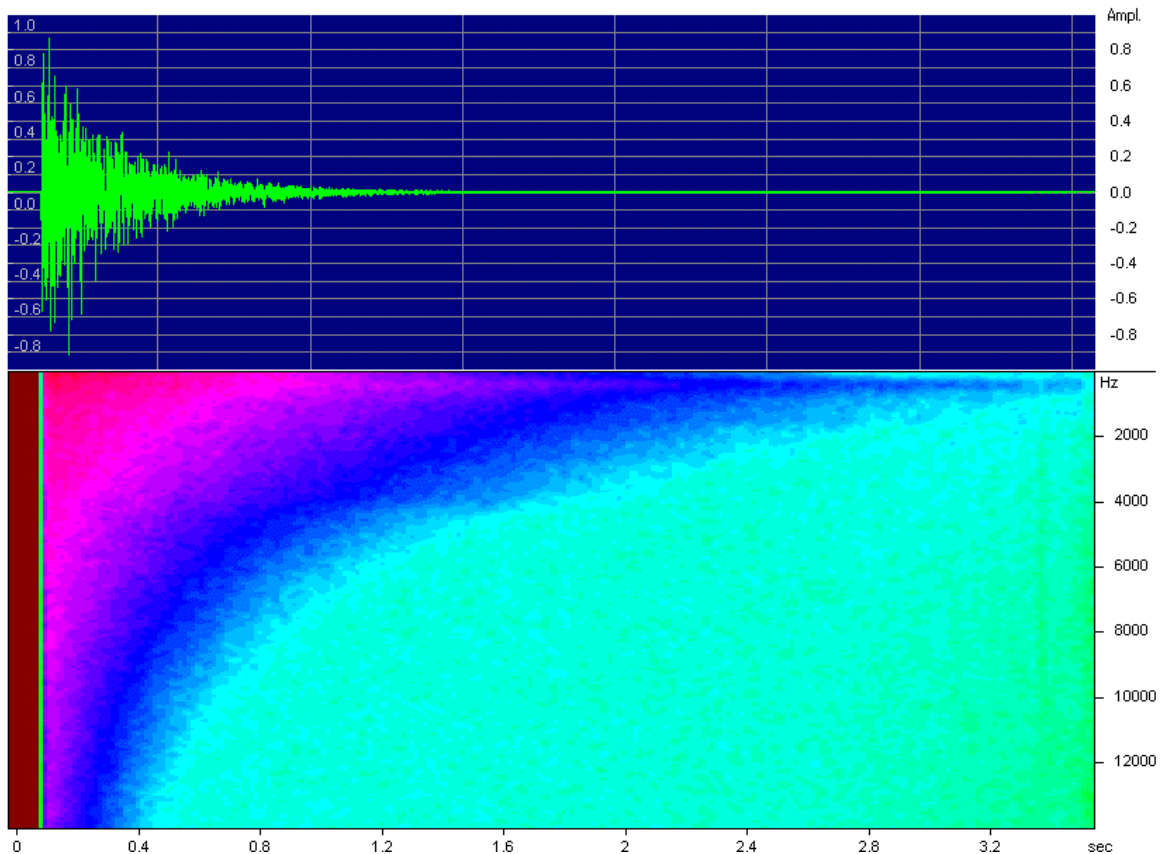


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm der Impulsantwort eines mittleren Raumes

Der Analysezeitraum beträgt nun 3,4 Sekunden. Die Nachhallzeit liegt bei ca. 1,2 Sekunden.

Durch Verlängern des Ausklingens der tiefen Frequenzen (gegenüber dem kleinen Raum um mehr als eine Sekunde) entsteht der Eindruck eines größeren Raumes.

Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel „kleiner Raum“ ist hier der deutlich vergrößerte Nachhall-Eindruck von Interesse.

Im folgenden Beispiel wird der Raumeindruck nochmals gesteigert. Man kann sich zum Beispiel vorstellen in einer sehr großen Kirche zu stehen.

Ein großer Raum

🎵 Klangbeispiel: Nachhall eines großen Raumes (z.B. Kathedrale St.Lucia, Italien)

Dieses Beispiel demonstriert die Simulation eines großen Raumes. (SLUC3484.WAV)

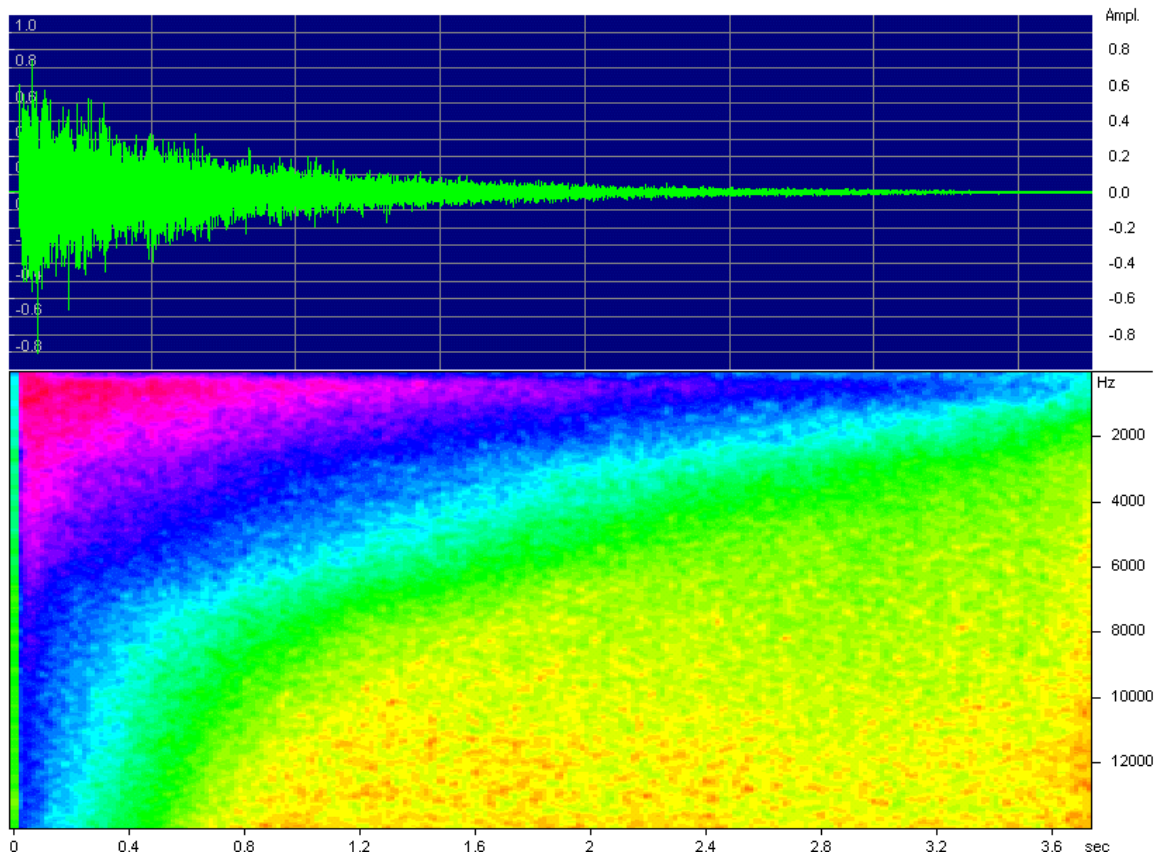


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm der Impulsantwort eines großen Raumes

Der Analysezeitraum beträgt 3,7 Sekunden. Die Nachhallzeit liegt bei ca. 2,4 Sekunden.

Hier ist durch das langsame Abklingen der Sinus-Hüllkurven der Eindruck eines sehr großen Raumes entstanden. Er eignet sich nur für spezielle musikalische Darbietungen wie z.B. Gregorianischen Choral o.ä. bei denen die Akkordfolge oder Melodieführung langsam vor sich geht.

Im folgenden werden Musiksignale, die im schalltoten Raum aufgenommen worden sind, mit den jeweiligen Nachhallen gefaltet, d.h. die Musiksignale werden verhallt.

Faltung mit Musiksignalen

Im folgenden werden die künstlich erzeugten Nachhalle zur Faltung mit einem Musiksignal herangezogen. Die zur Verfügung stehenden Signale sind kurze Aufnahmen, die im schalltoten Raum gemacht worden sind und in Mono vorliegen.

- Signal „*Gitarre*“ Konzertgitarre Solo, Mikrophon Neumann TLM170, 16 Bit, 44.1kHz
- Signal „*Duo*“ Querflöte & Gitarre, Mikrophon Beyer MCE93, 16 Bit, 44.1kHz
- Signal „*Rhythmus A*“ Drumcomputer Roland R5
- Signal „*Rhythmus B*“ Drumcomputer Roland R5

Das Signal „*Gitarre*“ ist ein Ausschnitt aus „Bouree“ von J.S.Bach. Es wurde eingespielt von Kurt Haun und aufgenommen von R. Bösnecker.

Das Signal „*Duo*“ ist ein Ausschnitt aus der Hamburger Sonata von C.P.E. Bach und wurde eingespielt vom *Duo Dulce* – das sind Mikael Ekholm, Querflöte, und Fredrik Runnström, Konzertgitarre. (siehe auch: http://home.swipnet.se/mikael_ekholm/duodolce.htm)

Beide Signale wurden im schalltoten Raum aufgenommen.

Diese Signale werden mit Hilfe des Programms CONVOLF.EXE gefaltet, d.h. das Mono-Musiksignal wird mit dem jeweiligen Stereo-Nachhall „verhallt“. Als Resultat ergibt sich ein Stereosignal. Das Faltungsprogramm wurde im Rahmen dieser Arbeit geschrieben und realisiert einen 64k Worte langen FIR-Filter. Die Faltung selbst läuft als Batch-Job ab, der mit Hilfe von Init-Dateien parametrisiert wird.

🎵 Klangbeispiel: *Gitarre* trocken („dry“) CD2, Track 03

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: *Gitarre* erklingt im Nachhall des kleinen Raumes

D:\FAPM\Result-Jan05\ALCO393\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: *Gitarre* erklingt im Nachhall des mittelgroßen Raumes

D:\FAPM\Result-Jan05\CHIC203\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: *Gitarre* erklingt im Nachhall des großen Raumes

D:\FAPM\Result-Jan05\SLUC3484\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander

D:\FAPM\Result-Jan05\WAV\SUMGUIT.WAV

Deutlich ist der Unterschied der verschiedenen Nachhalle zu hören. Mit Zunahme der Raumgröße wird das Gitarrensignal undeutlicher, quasi verwaschener. Bei den Faltungen ergibt sich das reine Effektsignal, das sogenannte „wet“-Signal. Im Studioalltag würde man das „dry“-Signal hinzumischen, um eine realitätsnahe Abbildung zu erreichen. Hier wird dies bewußt vermieden, um eine genauere Beurteilung des Nachhalles zu vereinfachen.

Nun folgt die Faltung mit dem Musikstück „Duo“.

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken
C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des kleinen Raumes
D:\FAPM\Result-Jan05\ALCO393\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des mittelgroßen Raumes
D:\FAPM\Result-Jan05\CHIC203\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des großen Raumes
D:\FAPM\Result-Jan05\SLUC3484\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander
D:\FAPM\Result-Jan05\WAV\SUMFLUTL.WAV

Auch hier ist der Einfluß der Raumgröße klar zu vernehmen. Die akustisch dominierende Querflöte prägt das Nachhallspektrum deutlich. Es treten keine Artefakte oder Mischöne (wie Klingeln o.ä.) auf. Der Nachhall klingt ohne Scheppern („shattering“) oder Flatterechos aus.

Als nächstes wird ein perkussives Ereignis verhallt:

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken
C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des kleinen Raumes
D:\FAPM\Result-Jan05\ALCO393\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des mittelgroßen Raumes
D:\FAPM\Result-Jan05\CHIC203\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des großen Raumes
D:\FAPM\Result-Jan05\SLUC3484\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander
D:\FAPM\Result-Jan05\WAV\SUMRYTMA.WAV

Perkussive Klänge stellen für jedes konventionelle Hallgerät eine Herausforderung dar, weil man an dieser Sorte Klang die Güte des Gerätes feststellen kann. Schlechte Hallgeräte neigen bei perkussiver Anregung zum sogenannten „shattern“, zu deutsch etwas Scheppern. Dieses wird hervorgerufen durch die Rückkoppelungsschleifen ihrer Delayelemente. Wie schon eingangs erwähnt besitzt der Klavier-Hallalgorithmus keine Delays – somit tritt auch bei schwierigen Signalen wie Snare, Hi-hat oder Bassdrum kein Scheppern auf.

Im nächsten perkussiven Beispiel werden tonale Klangerzeuger (Klanghölzer und Conga) eingesetzt.

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des kleinen Raumes

D:\FAPM\Result-Jan05\ALCO393\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des mittelgroßen Raumes

D:\FAPM\Result-Jan05\CHIC203\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des großen Raumes

D:\FAPM\Result-Jan05\SLUC3484\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander

D:\FAPM\Result-Jan05\WAV\SUMRYTMB.WAV

Auch hier ergibt sich das gleiche Ergebnis wie oben. Die Raumgröße ist deutlich wahr zu nehmen, ein Shattern tritt nicht auf. An den beiden perkussiven Beispielen läßt sich die hohe Güte des Algorithmus nachweisen.

Je nach Musiksignal und Gusto des Tonmeisters sind die gewählten Nachhalle mehr oder weniger passend. Für das **Duo** oder die **Gitarre** ist der lange Nachhall eher angemessen also für **Rhythmus A** und **Rhythmus B**. Für die perkussiven Signale ist i.A. ein kurzer, heller Nachhall zu bevorzugen, weil dieser das Signal nicht „verwaschen“ klingen läßt.

Es geht hier allerdings nicht um tonmeisterliche Aspekte des Nachhall-Einsatzes, sondern um die Frage, ob man die „künstliche“ Herstellung des Nachhalles heraushören kann.

Dazu dient das nächste Klangbeispiel: CD2, Track 04

In diesem Beispiel werden 4 Nachhalle nacheinander hörbar. Diese werden mit **Hall A**, **Hall B**, **Hall C** und **Hall D** bezeichnet. Zwei dieser Nachhalle sind echt, sie stammen aus realen Räumen bzw. Kirchen. Die anderen beiden Nachhalle sind Simulationen des Klavierhall-Algorithmus.

🎵 Klangbeispiel: die vier Nachhalle **Hall A**, **Hall B**, **Hall C** und **Hall D** nacheinander

D:\FAPM\Result-APR04\CDROM\ABCDf.WAV

Die Frage „welcher ist echt und welcher ist simuliert“ wird am Ende des Anhangs beantwortet.

Hörversuche zur Synthese irrealer Räume

Räume mit Frequenzmustern

Ausgehend vom Beispielraum St. Lucia und dessen Hallschuß werden unter Benutzung eines regelmäßigen Musters bestimmte spektrale Anteile weggelassen. Das vollständige Spektrum wird mit den verbleibenden Spektrallinien synthetisiert.

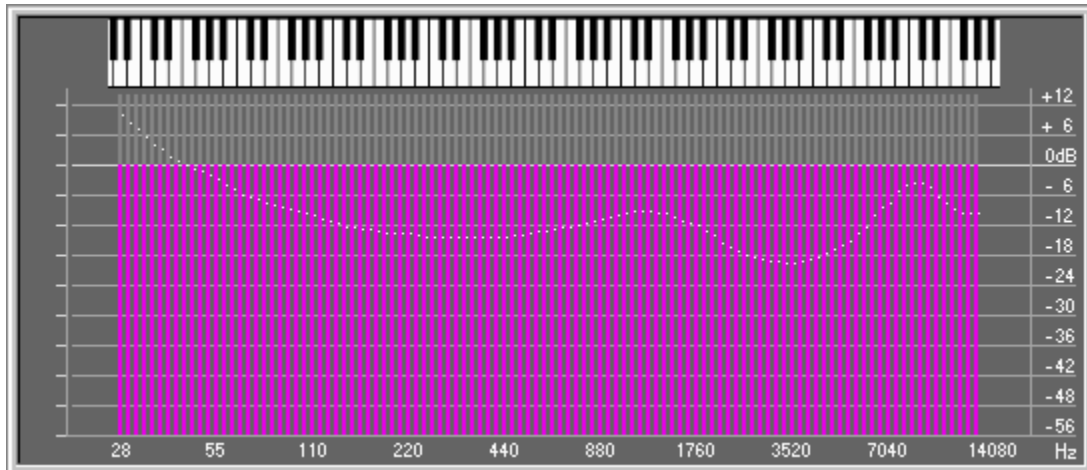


Abbildung: Vollständiges Spektrum „St. Lucia“

🎵 Klangbeispiel: Vollständiges Spektrum bei Nachhall „St.Lucia“, Schrittweite = 1 CD2, Track 05

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348S01\IMP0.WAV

Danach wird jede zweite Linie zu Null gesetzt und der Hall berechnet (Schrittweite = 2)

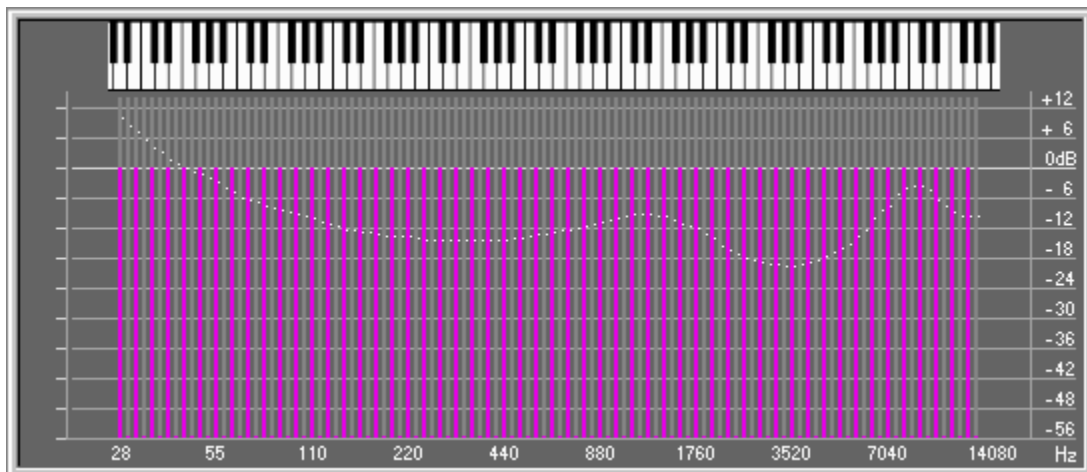


Abbildung: Teil-Spektrum „St. Lucia“, Schrittweite = 2

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“, Schrittweite = 2

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348S02\IMP0.WAV

Nun wird jede zweite und dritte Linie zu Null gesetzt und der Hall berechnet (Schrittweite =3)

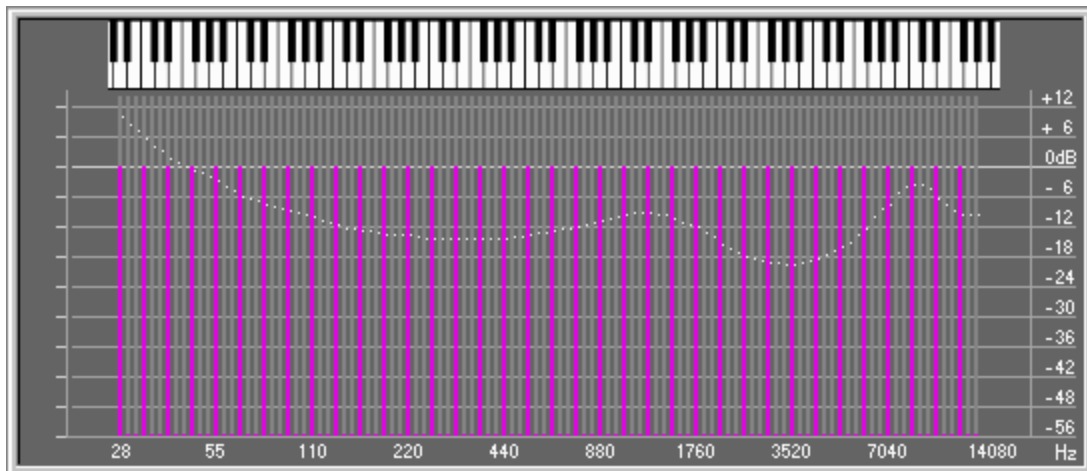


Abbildung: Teil-Spektrum „St. Lucia“, Schrittweite = 3

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“, Schrittweite = 3

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348S03\IMP0.WAV

Im nächsten Beispiel wird jede zweite, dritte und vierte Linie zu Null gesetzt und der Hall berechnet (Schrittweite =4)

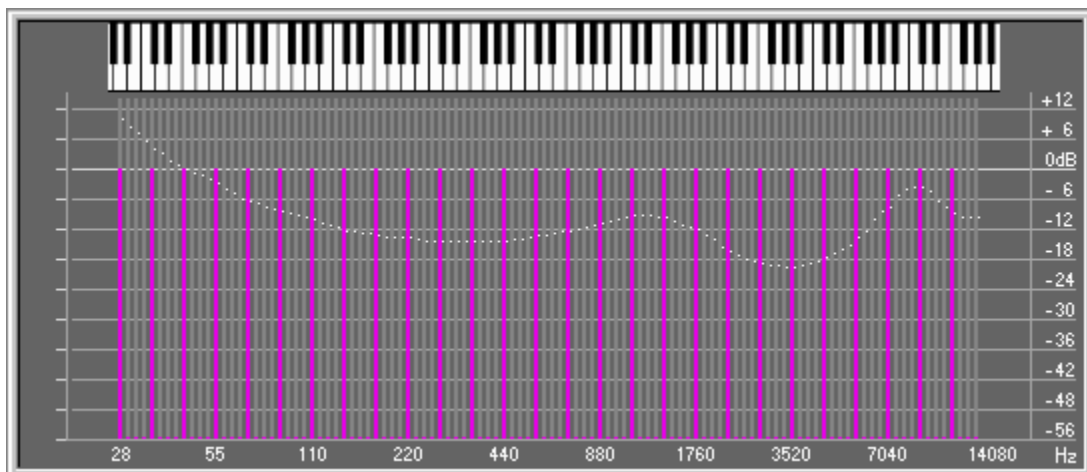


Abbildung: Teil-Spektrum „St. Lucia“, Schrittweite = 4

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“, Schrittweite = 4

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348S04\IMP0.WAV

Abschließend wird jede zweite, dritte, vierte und fünfte Linie zu Null gesetzt und der Hall berechnet (Schrittweite =5)

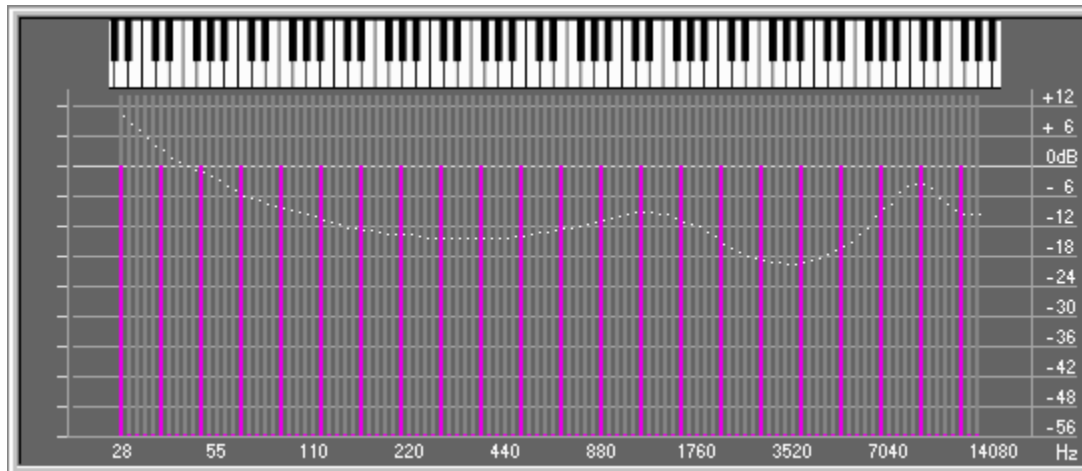


Abbildung: Teil-Spektrum „St. Lucia“, Schrittweite = 5

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“, Schrittweite = 5

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348S05\IMP0.WAV

Dieses Verfahren wird bis zur Schrittweite 12 fortgesetzt. Im folgenden Beispiel werden die Ergebnisse in der Reihenfolge mit Schrittweite=12 bis Schrittweite=1 nacheinander abgespielt. Dabei sind die einzelnen Klänge in der Lautstärke so angepaßt worden, daß sie gleichlaut klingen.

🎵 Klangbeispiel: Teilspektren bei Nachhall „St.Lucia“, Schrittweiten 12, 11, 10, ... 3, 2, 1

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348S01\SLSALL.WAV

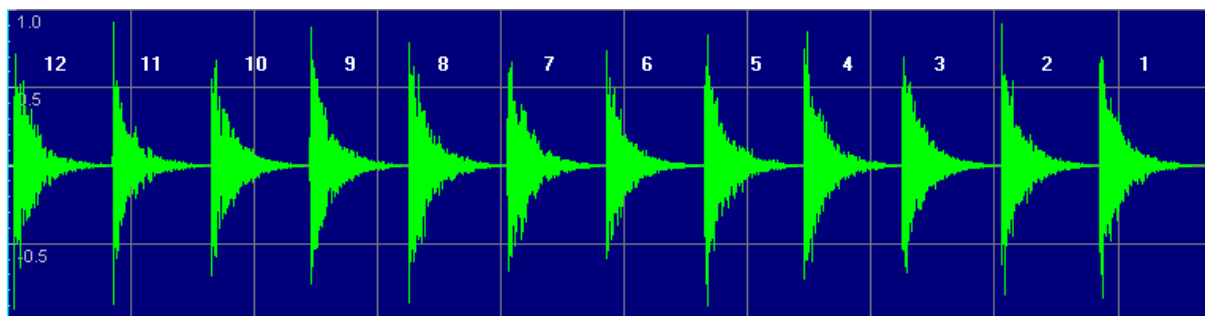


Abbildung: Teil-Spektren „St. Lucia“, Schrittweite = 12 bis 1

Faltung mit Musiksignalen

Im folgenden werden die oben erzeugten Nachhalle zur Faltung mit einem Musiksignal herangezogen. Die zur Verfügung stehenden Signale sind die gleichen wie die bei den realen Räumen verwendeten.

Signal „Gitarre“	Konzertgitarre Solo, Mikrophon Neumann TLM170, 16 Bit, 44.1kHz
Signal „Duo“	Querflöte & Gitarre, Mikrophon Beyer MCE93, 16 Bit, 44.1kHz
Signal Rhythmus A	Drumcomputer Roland R5
Signal Rhythmus B	Drumcomputer Roland R5

Auch hier werden diese Signale mit Hilfe des Programms CONVOLF.EXE gefaltet, d.h. das Mono-Musiksignal wird mit dem jeweiligen Stereo-Nachhall „verhallt“. Als Resultat ergibt sich wieder ein Stereosignal.

🎵 Klangbeispiel: Spektrum bei Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 1 CD2, Track 06

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 1

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 1

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\FLUTE.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 1

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 1

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 2

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 2

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S02\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 2

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S02\FLUTE.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 2

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S02\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 2

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S02\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 3

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 3

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S03\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 3

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S03\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 3

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S03\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 3

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S03\RYTHMB.WAV

🎵 Klangbeispiel: Teilspektrum bei Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 4

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 4

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S04\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 4

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S04\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 4

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S04\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken

C:\DATA\WAV\RYTHMB16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 4

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S04\RYTHMB.WAV

Es folgt nun ein Vergleich der einzelnen Signale nacheinander. Der Übersichtlichkeit halber wird eine verkürzende Schreibweise verwendet: **Gitarre(4)** bedeutet: „Gitarre im Nachhall „St.Lucia“ mit Schrittweite = 4“

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken, **Gitarre(1)**, **Gitarre(2)**, **Gitarre(3)**, **Gitarre(4)**

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\COMPG04.WAV

Bei diesem tonalen Signal hört man sehr deutlich wie mit zunehmender Schrittweite, also auch zunehmender Ausdünnung des Halles Frequenzen im Nachhall fehlen, d.h. der Nachhall arbeitet frequenzselektiv. Dieser Klangeindruck tritt auch bei dem Signal **Duo** deutlich auf.

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken, **Duo (1)**, **Duo (2)**, **Duo (3)**, **Duo (4)**

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\COMPD04.WAV

Bei perkussiven Klänge wie z.B. dem **Rhythmus A** verhält sich der selektive Nachhall anders. Er antwortet mit zunehmender Ausdünnung mit dem typischen Muster eines Orgelakkords.

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken, **A(1)**, **A(2)**, **A(3)**, **A(4)**

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\COMPA04.WAV

Auch beim Signal **Rhythmus B** wird dieses Verhalten hörbar. Auch hier wird aus dem Nachhall durch spektrale Ausdünnung ein orgelähnlicher Klang.

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken, **B(1)**, **B(2)**, **B(3)**, **B(4)**

D:\FAPM\Result-Jan05\SL348S01\COMPB04.WAV

Ergebnis:

Der mit Hilfe des Klavier-Algorithmus generierte Nachhall „St.Lucia“ erzeugt den Klangeindruck einer großen Kirche, wenn keine spektrale Manipulation vorgenommen wird.

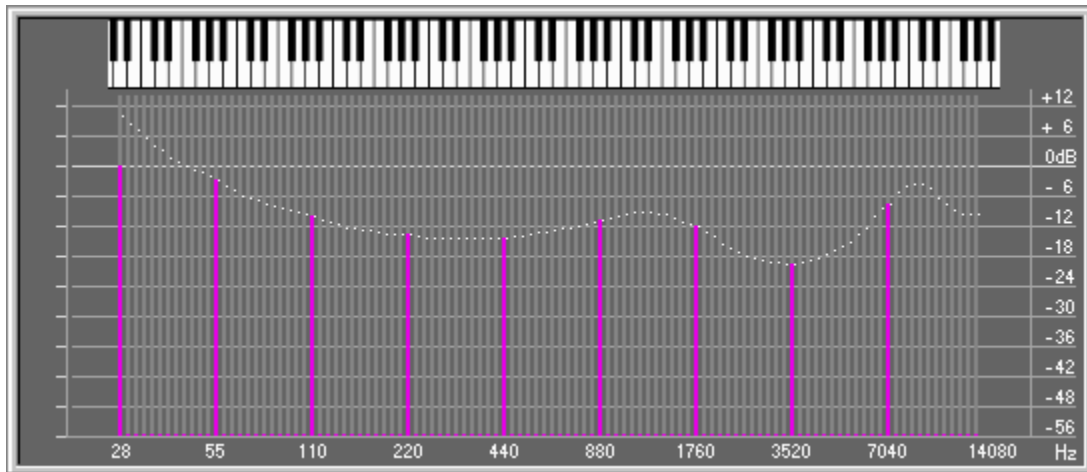
Für das Duo oder die Gitarre ist der Nachhall gerade noch angemessen, für Rhythmus A und B ist er zu lange. Es geht hier allerdings nicht um tonmeisterliche Aspekte des Nachhall-Einsatzes, sondern um die Frage, ob man die „Künstlichkeit“ des Klavierhall-Nachhalles heraushören kann.

Bei der oben gehörten spektralen Ausdünnung zerfällt der Raumeindruck sofort. An seine Stelle treten „musikalische“ Nachhalle, die es nahelegen, den Klavierhall-Algorithmus auch als Faltungssynthesizer einzusetzen. Dieses Gebiet ist jedoch nicht Thema dieser Arbeit und wird deswegen nicht weiter diskutiert.

Weitere angedachte Möglichkeiten Nachhall mit Frequenzmustern zu belegen:

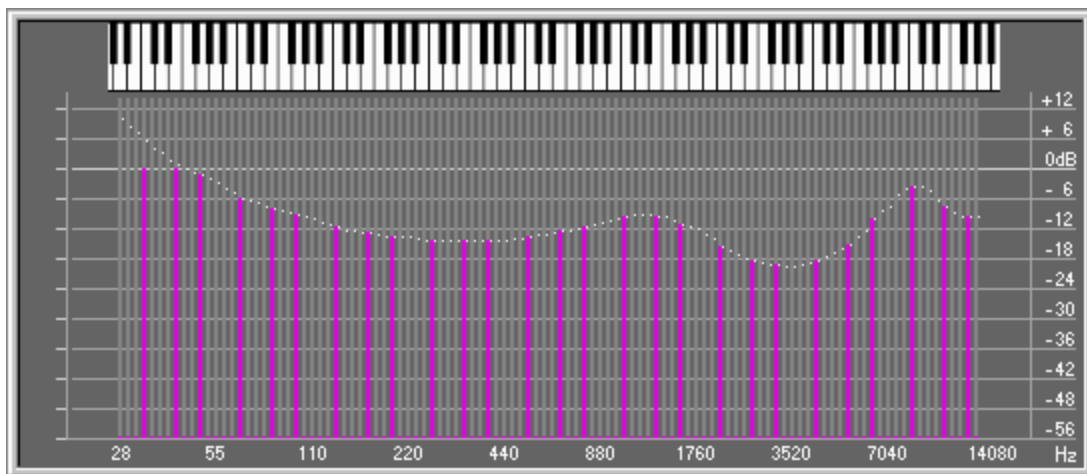
- Harmonisch gestimmte Räume

Beispiel: Oktavnachhall in A



D:\FAPM\Result-tbd\....WAV

Beispiel: Nachhall in C-Dur



D:\FAPM\Result-tbd\....WAV

- Frequenzinverses Ausklingen
d.h. hohe Frequenzen klingen länger als tiefe (unnatürliches Verhalten)
- Frequenzinverses Einschwingen
d.h. tiefe Frequenzen schwingen schneller an als hohe (ebenfalls unnatürlich)

Vergleich mit kommerziellen Hallgeräten

Um den Nachhall eines kommerziellen Hallgerätes abbilden zu können, wird ein Dirac-Impuls in das Gerät geschickt und sein Output-Signal gesampled. In einigen Fällen verfügen die Geräte über digitale Schnittstellen, sodaß ein Wandlerrauschen o.ä. ausgeschlossen werden kann. Das so gewonnene Signal dient nun als Vergleich zu den mit dem Klavierhall-Algorithmus erzeugten Nachhallen.

Folgende Geräte wurden analysiert:

- EMT250 Hallgerät von EMT
Das EMT250 kam als eines der ersten digitalen Hallgeräte 1976 auf den Markt. Dabei handelte es sich um eine Zusammenarbeit zwischen der amerikanischen Firma Dynatron, die den digitalen Hallprozessor entwickelt haben und der deutschen Firma EMT, die den übrigen Teil des Gerätes bauten. Zur Speicherung der Delays wurden über 80 Speicherbausteine verwendet; jeder Baustein speicherte damals nur 1 kBit an Daten. Das auffällige Gehäuse des Gerätes sowie seine an ein ausserirdisches Raumschiff erinnernde Bedienelemente brachten ihm im tontechnischen „Volksmund“ den Namen „Weltraumheizung“ ein. Hinzu kam, daß das Hallgerät mit rund 500 Chips und drei Lüftern bestückt war und nicht nur Nachhall sondern auch kräftig Wärme erzeugte.
- Yardstick Hallgerät von QUANTEC
Der Yardstick ist eine Weiterentwicklung des QRS-Hallgerätes der Münchner Firma Quantec. Ab 1982 wurde der QRS verkauft. Dabei war das Rechenwerk noch diskret-digital aufgebaut. Als DSPs ausreichend Leistung zur Verfügung stellten, baute Quantec seinen QRS-Algorithmus auf Basis des DSP56009 von Motorola neu auf und nannte das Hallgerät Yardstick, aufgrund seiner Einbautiefe von nur 38mm.
- PCM91 Hallgerät von LEXICON
Die Gründung von LEXICON geht auf das Jahr 1971 zurück, als Dr. Francis Lee und Chuck Bagnashi die Firma Data Sciences in Lexington gründeten. Diese Firma entwickelte zunächst Geräte für medizinische Anwendungen. Barry Blesser, bekannt geworden durch den Digitalhallprozessor EMT 250, ermunterte Dr. Francis Lee, Audiogeräte zu produzieren. Der Firmenname: LEXICON wurde abgeleitet vom Gründungsort "Lexington". 1978 stellten sie ihr erstes digitales Hallgerät, das Modell 224 vor, das von David Griesinger entworfen worden war. Er baute auch den Nachfolger 480L sowie die „kleineren“ Modelle PCM70, 80, 90 und 91.
- M3000 Hallgerät von TC Electronics
TC wurde 1976 von Kim and John Rishøj in Dänemark gegründet. Anfangs wurden analoge Bodeneffektgeräte für Gitarristen entworfen und gebaut. Es folgten Digital Delays und verschiedene Studioeffektgeräte. Mit dem M3000 Reverb kam im Oktober 1999 der Nachfolger des M2000 Reverb Delays auf den Markt. Der im M3000 verwendete „VSS“-Algorithmus (Virtual Space Simulation) beruht auf Simulationen des Raumsimulators Odeon. Dieses Auralisations-Software läuft auf Workstations und simuliert Impulsantworten von virtuellen Räumen, die mittels dem Zeichenprogramm AutoCAD eingegeben worden sind. Dabei verwendet Odeon das Schallstrahlenmodell (ray-tracing), um die Impulsantwort des zu generieren.
siehe auch: <http://www.dat.dtu.dk/~odeon/about.htm>

EMT250 EMT

🎵 Klangbeispiel: EMT250, Deutschland (01/1976): EMT250 CD2, Track 07

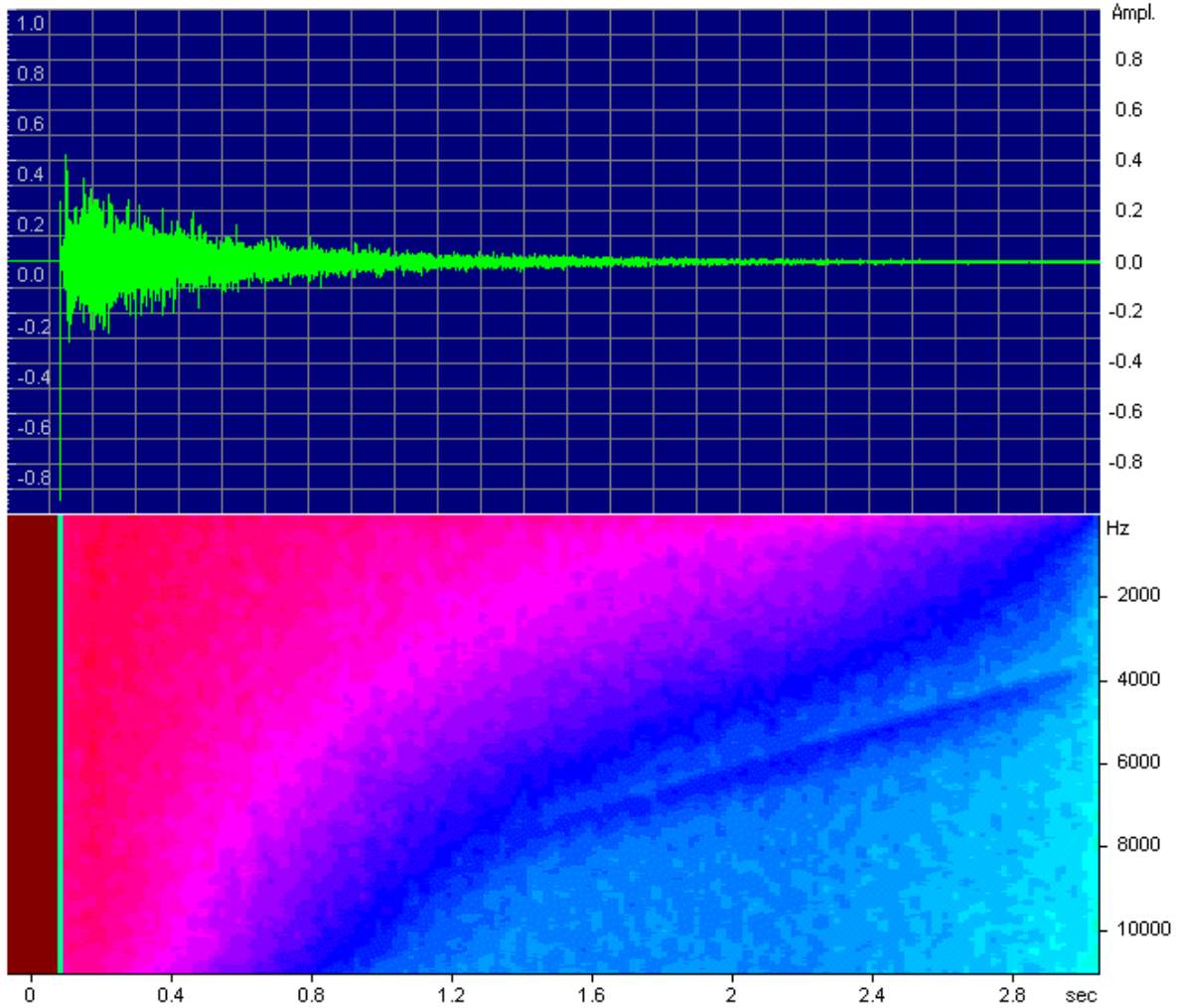


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm EMT250 „Long“-Programm



Abbildung: EMT250 („Weltraumheizung“)

QRS Yardstick Quantec

🎵 Klangbeispiel: Quantec, Deutschland (03/1997): Yardstick QRS Hallgerät

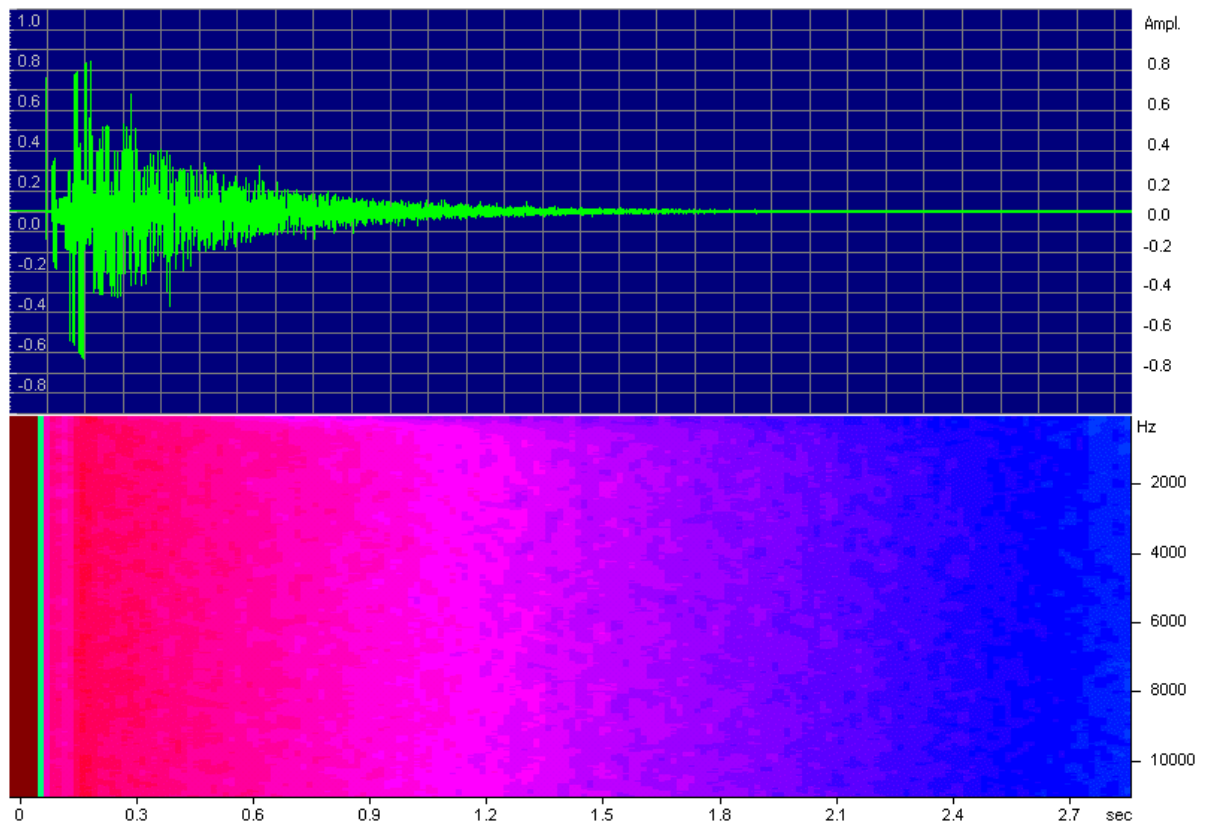


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm Quantec „Bad“-Programm



Abbildung: Quantec Yardstick

PCM91 Lexicon

🎵 Klangbeispiel: Lexicon, USA (07/1998): PCM91 Reverberator

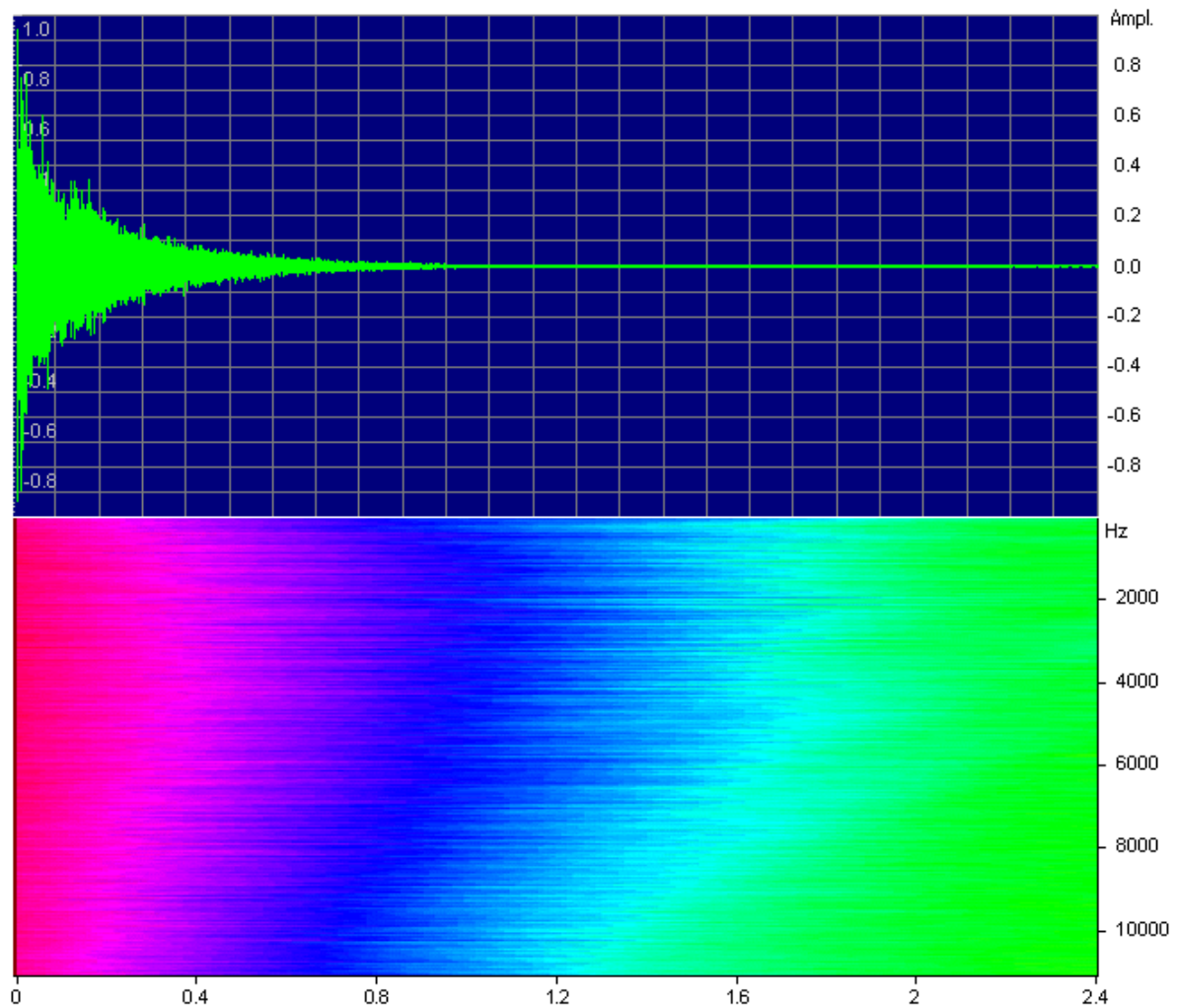


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm PCM91 „Great Hall“-Programm



Abbildung: PCM91

M3000 TC Electronics

🎵 Klangbeispiel: TC Electronics, Dänemark (10/1999): M3000 Hallgerät

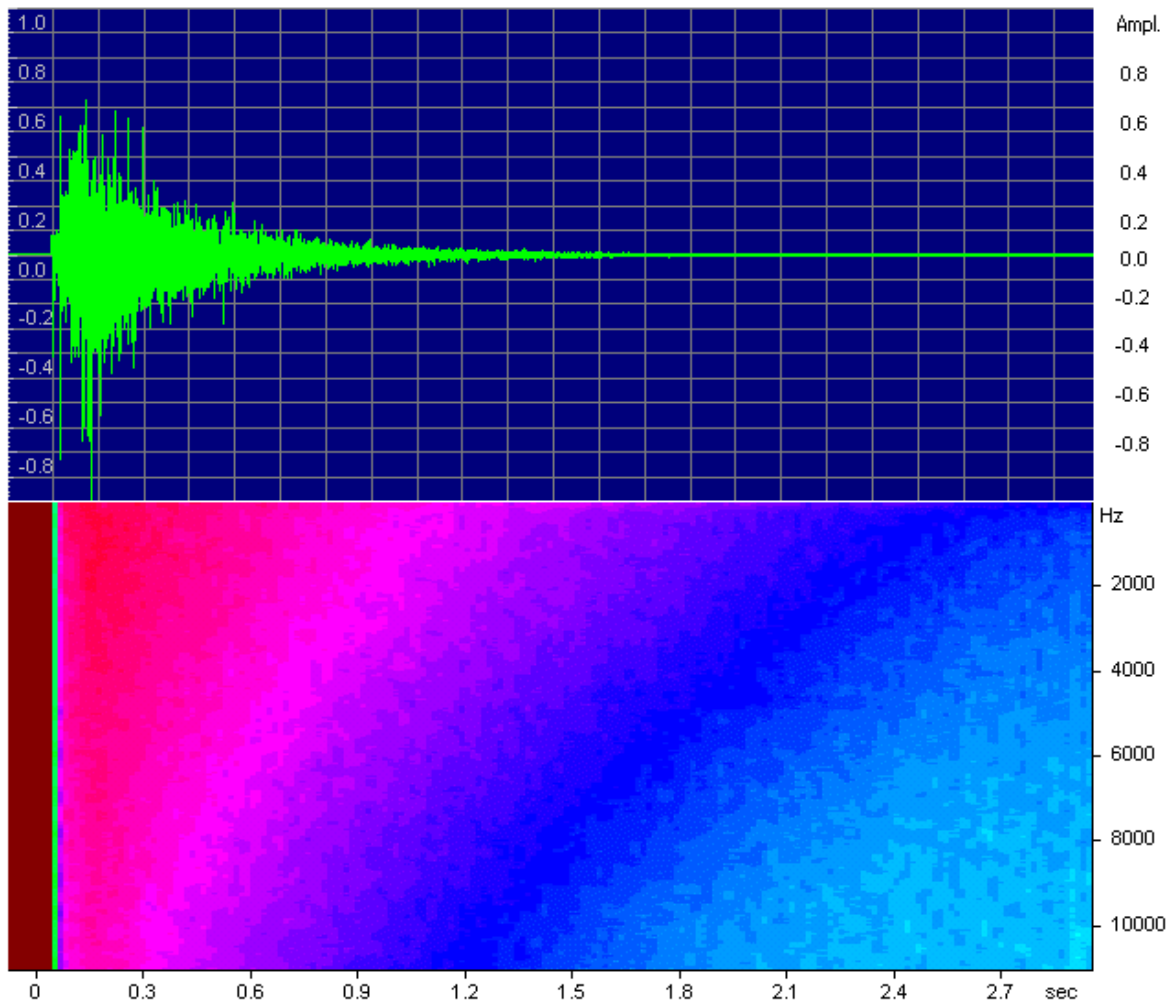


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm M3000 „Hall“-Programm



Abbildung: M3000

Faltung mit Musiksignalen

Im folgenden werden oben genannten Nachhalle zur Faltung mit einem Musiksignal herangezogen. Die zur Verfügung stehenden Signale sind die gleichen wie die bei den realen Räumen verwendeten.

Signal „Gitarre“	Konzertgitarre Solo, Mikrophon Neumann TLM170, 16 Bit, 44.1kHz
Signal „Duo“	Querflöte & Gitarre, Mikrophon Beyer MCE93, 16 Bit, 44.1kHz
Signal Rhythmus A	Drumcomputer Roland R5
Signal Rhythmus B	Drumcomputer Roland R5

Auch hier werden diese Signale mit Hilfe des Programms CONVOLF.EXE gefaltet, d.h. das Mono-Musiksignal wird mit dem jeweiligen Stereo-Nachhall „verhallt“. Als Resultat ergibt sich wieder ein Stereosignal.

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\GUITAR16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des EMT250

D:\FAPM\Result-Fe05\EMT250L\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des Quantec Yardstick

D:\FAPM\Result-Fe05\QUANTB\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des Lexicon PCM91

D:\FAPM\Result-Fe05\LEXIHALL\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Gitarre** erklingt im Nachhall des TC M3000

D:\FAPM\Result-Fe05\M3000H\GUITAR.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander

D:\FAPM\Result-Fe05\WAV\SUMGUIT.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\FLUTL16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des EMT250

D:\FAPM\Result-Fe05\EMT250L\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des Quantec Yardstick

D:\FAPM\Result-Fe05\QUANTB\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des Lexicon PCM91

D:\FAPM\Result-Fe05\LEXIHALL\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Duo** erklingt im Nachhall des TC M3000

D:\FAPM\Result-Fe05\M3000H\FLUTL.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander

D:\FAPM\Result-Fe05\WAV\SUMFLUT.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des EMT250

D:\FAPM\Result-Fe05\EMT250L\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des Quantec Yardstick

D:\FAPM\Result-Fe05\QUANTB\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des Lexicon PCM91

D:\FAPM\Result-Fe05\LEXIHALL\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus A** erklingt im Nachhall des TC M3000

D:\FAPM\Result-Fe05\M3000H\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander

D:\FAPM\Result-Fe05\WAV\SUMRHYA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** trocken („dry“)

C:\DATA\WAV\RYTHMA16.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des EMT250

D:\FAPM\Result-Fe05\EMT250L\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des Quantec Yardstick

D:\FAPM\Result-Fe05\QUANTB\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des Lexicon PCM91

D:\FAPM\Result-Fe05\LEXIHALL\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: **Rhythmus B** erklingt im Nachhall des TC M3000

D:\FAPM\Result-Fe05\M3000H\RYTHMA.WAV

🎵 Klangbeispiel: die vier Klänge nacheinander

D:\FAPM\Result-Febr05\WAV\SUMRHYA.WAV

Auffallend ist die deutliche „Schärfe“ der Nachhalle. Im Vergleich zu realen Räumen klingen die Hallgeräte sehr viel spitzer. Diese Hochtonlastigkeit kann wahrscheinlich durch Umprogrammierung der Geräte gemindert werden. Jedoch scheint sie beabsichtigt zu sein. Alle gewählten Hallprogramme stellen Werkseinstellungen dar. Offensichtlich soll der Klangeindruck so höhenlastig sein. Ursache könnte sein, das sich im Studioalltag „ein Nachhall im Mix durchsetzen muß“. Hochtonlastige Nachhalle werden deutlicher wahrgenommen. Vorallem bei Pop-Produktionen steht der Tonmeister vor der Notwendigkeit die Singstimme so deutlich wie möglich aus dem Gesamtmix hervorzuheben. Die dazu gängigen Methoden sind das Doppeln der Stimme und eben Nachhall. Damit der Nachhall deutlich hörbar wird, aber trotzdem die Stimme nicht „verwaschen“ klingt, bevorzugt man kurzen, hellen d.h. hochtonlastigen Nachhall. Diesem Wunsch haben offensichtlich die Hersteller der Hallgeräte entsprochen und passende Werks-Presets programmiert.

Der Anspruch auf realen Nachhall verdient im kommerziellen Bereich der U-Musik eher weniger Beachtung. Im Bereich der ernsten Musik wird häufig kein simulierter Nachhall eingesetzt, sondern soweit es möglich ist, ein akustisch passender Raum verwendet. Somit entfällt die Notwendigkeit nachverhalten zu müssen.

Die zunehmende Kommerzialisierung der E-Musik, d.h. der Versuch weltweit unter finanziell günstigsten Rahmenbedingungen zu produzieren, läßt auch hier den simulierten Nachhall Einzug halten. Die mittlerweile sehr leistungsfähig gewordenen General-Purpose-CPUen von intel, AMD, Sun und anderen ermöglichen das Verhalten in Echtzeit mittels langer Faltungen. Somit fehlen nun noch geeignete Raumimpulsantworten ...

Im nächsten Abschnitt werden die Grenzen des Klavierhall-Algorithmus betrachtet.

Grenzen des Algorithmus

In wie weit nehmen Reduzierungen von Parameterwerten Einfluß auf den Klang eines simulierten Nachhalls ? CD2, Track 08

Die folgenden Klangbeispiele geben einen Aufschluß darüber, wie sich Veränderungen der FM- und AM-Parameter auf den Klang auswirken.

Reduktion der Frequenzmodulationsstärke

Im folgenden Beispiel wird der simulierte Nachhall von St.Lucia als Basis hergenommen und der Anteil der Frequenzmodulation (FMdepth) verringert.

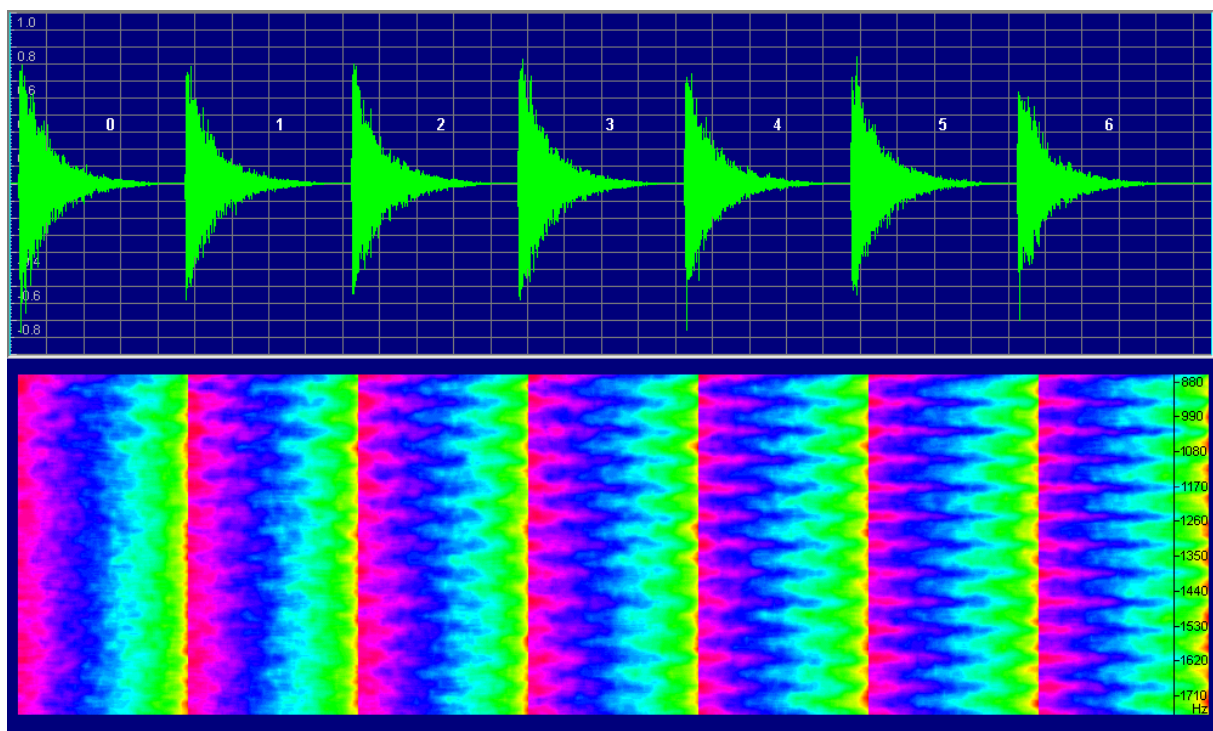


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der FM-Tiefe (2 Gen.)

Ausgehend von der vollen FM-Stärke (100%) in Nachhall "0" wird in 6 Schritten die FM-Stärke auf 0% verringert. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% FM-Stärke
- Nachhall 1 : 80% FM-Stärke
- Nachhall 2 : 60% FM-Stärke
- Nachhall 3 : 40% FM-Stärke
- Nachhall 4 : 20% FM-Stärke
- Nachhall 5 : 10% FM-Stärke
- Nachhall 6 : 0% FM-Stärke

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der FM-Stärke bei Nachhall „St.Lucia“ bei 2 Generatoren pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348R0\SLRall.WAV

Das Beispiel wird einmal wiederholt. Deutlich ist zu hören, wie mit zunehmender Reduktion der FM-Stärke der Klang metallischer wird. Durch die Reduzierung der FM-Stärke sind die einzelnen emulierten Bandpässe nicht mehr so breit, daß sie lückenlos aneinander angrenzen. Durch das Entstehen dieser Lücken – in der Abbildung deutlich zu sehen durch die kammförmig sich ausprägende Struktur im Spektrum – werden einzelne Frequenzen hörbar. In diesem Beispiel wurden 2 Sinus-Generatoren pro Bandpass verwendet.

Im folgenden Beispiel wird nur ein Sinus-Generator pro Bandpass eingesetzt. Es wird das gleiche Nachhallsignal („St.Lucia“) als Basis hergenommen und der Anteil der Frequenzmodulation (FMdepth) verringert.

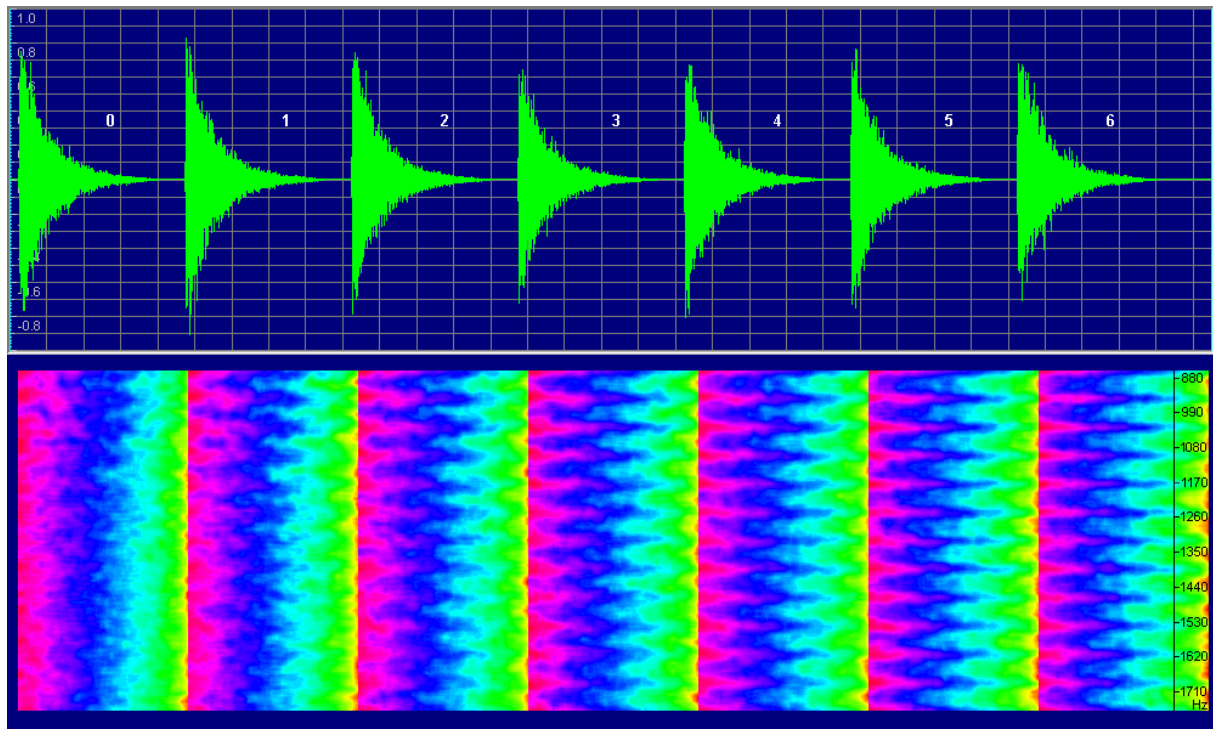


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der FM-Tiefe (1 Gen.)

Ausgehend von der vollen FM-Stärke (100%) in Nachhall „0“ wird in 6 Schritten die FM-Stärke auf 0% verringert. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% FM-Stärke
- Nachhall 1 : 80% FM-Stärke
- Nachhall 2 : 60% FM-Stärke
- Nachhall 3 : 40% FM-Stärke
- Nachhall 4 : 20% FM-Stärke
- Nachhall 5 : 10% FM-Stärke
- Nachhall 6 : 0% FM-Stärke

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der FM-Stärke bei Nachhall „St.Lucia“ bei 1 Generator pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Nov04\SL348I0\SLIa11.WAV

Das „metallisch Klingen“ setzt hier früher ein als beim vorangegangenen Beispiel. Ursache ist die Verringerung der Sinus-Generatoren von zwei auf eins pro Bandpass.

Ergebnis: Das Verringern der FM-Stärke wirkt sich kritisch auf den simulierten Nachhall aus. Schon kleine Veränderungen bewirken, daß der Nachhall metallisch klingt.

Reduktion der Frequenzmodulationsgeschwindigkeit

Im folgenden Beispiel wird der simulierte Nachhall von St.Lucia als Basis hergenommen und die Geschwindigkeit der Frequenzmodulation (FMdur) verringert. CD2, Track 09

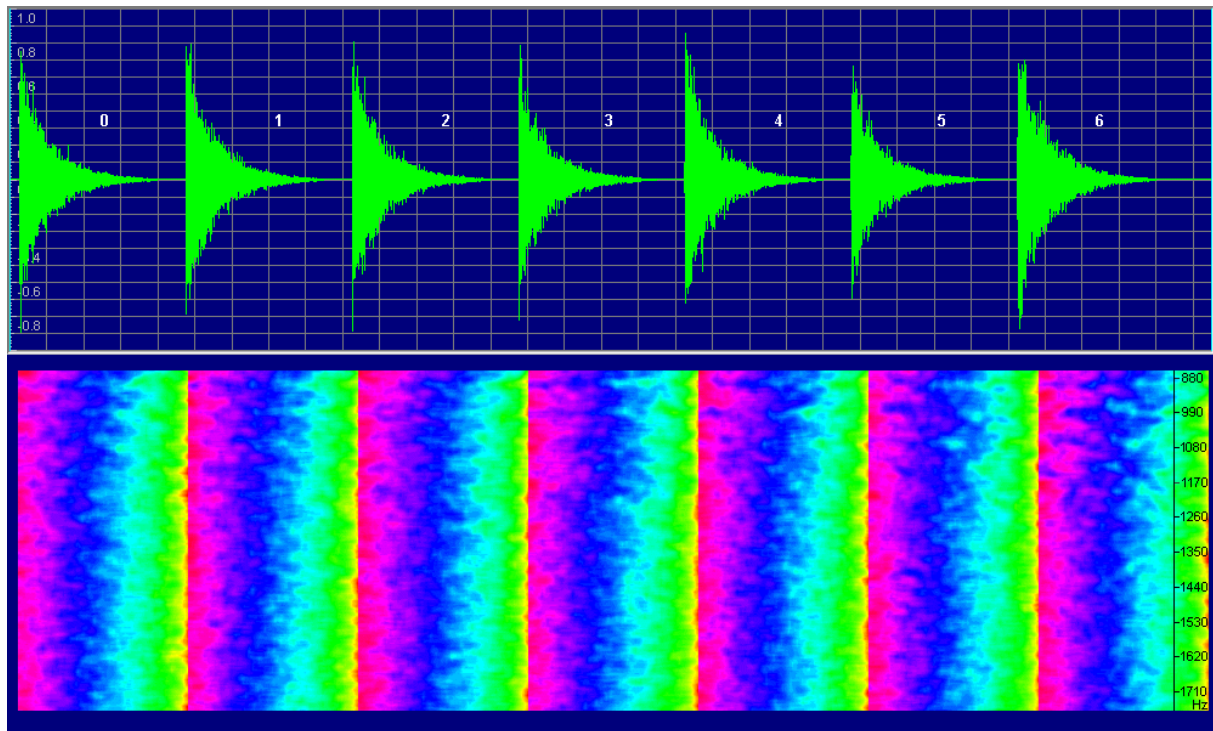


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der FM-Frequenz (2 Gen.)

Ausgehend von der vollen FM-Geschwindigkeit (100%) in Nachhall "0" wird in 6 Schritten die FM-Geschwindigkeit auf 50% verringert. Die Modulationsfrequenz wird somit bei allen Generatoren um den Faktor 2 langsamer. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 1 : 91% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 2 : 83% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 3 : 71% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 4 : 63% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 5 : 56% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 6 : 50% FM-Geschwindigkeit

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der FM-Geschwindigkeit bei 2 Generatoren pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Dez04\SL348F0\SLFall.WAV

Ergebnis: Der Klang ändert sich bei diesem Versuch nur wenig. Es tritt kein Jaulen auf, wie man es aufgrund der langsamer modulierten Sinusgeneratoren hätte erwarten können.

Es wird das gleiche Nachhallsignal (“St.Lucia”) als Basis hergenommen und der Anteil der Frequenzmodulationsgeschwindigkeit (FMdur) verringert.

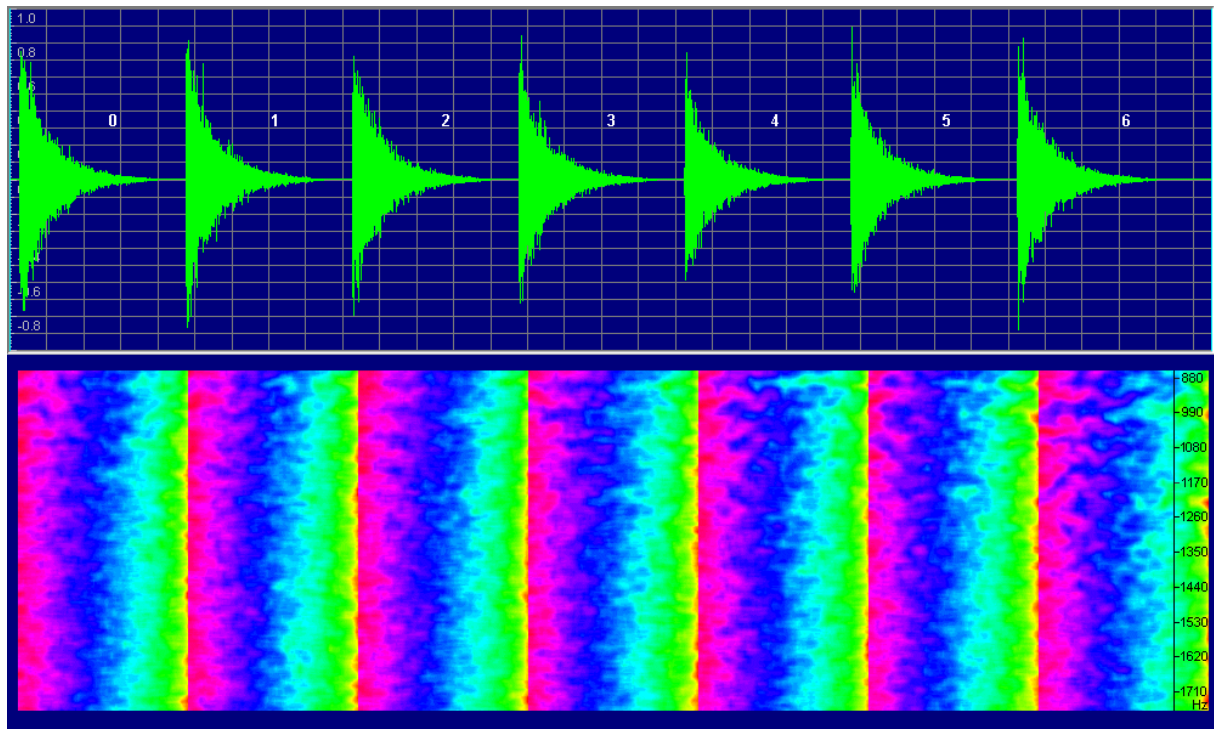


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der FM-Frequenz (1 Gen.)

Ausgehend von der vollen FM-Geschwindigkeit (100%) in Nachhall “0” wird in 6 Schritten die FM-Geschwindigkeit auf 50% verringert. Die Modulationsfrequenz wird somit bei allen Generatoren um den Faktor 2 langsamer. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 1 : 91% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 2 : 83% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 3 : 71% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 4 : 63% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 5 : 56% FM-Geschwindigkeit
- Nachhall 6 : 50% FM-Geschwindigkeit

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der FM-Geschwindigkeit bei 1 Generator pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Dez04\SL348G0\SLGall.WAV

Ergebnis: Der Klang verändert sich. Er klingt leicht „metallisch“, allerdings ist der Effekt nicht so stark wie bei der Reduktion der Frequenzmodulationsstärke.

Reduktion der Amplitudenmodulationsstärke

Im folgenden Beispiel wird der simulierte Nachhall von St.Lucia als Basis hergenommen und der Anteil der Amplitudenmodulation (AMdepth) verringert. CD2, Track 10

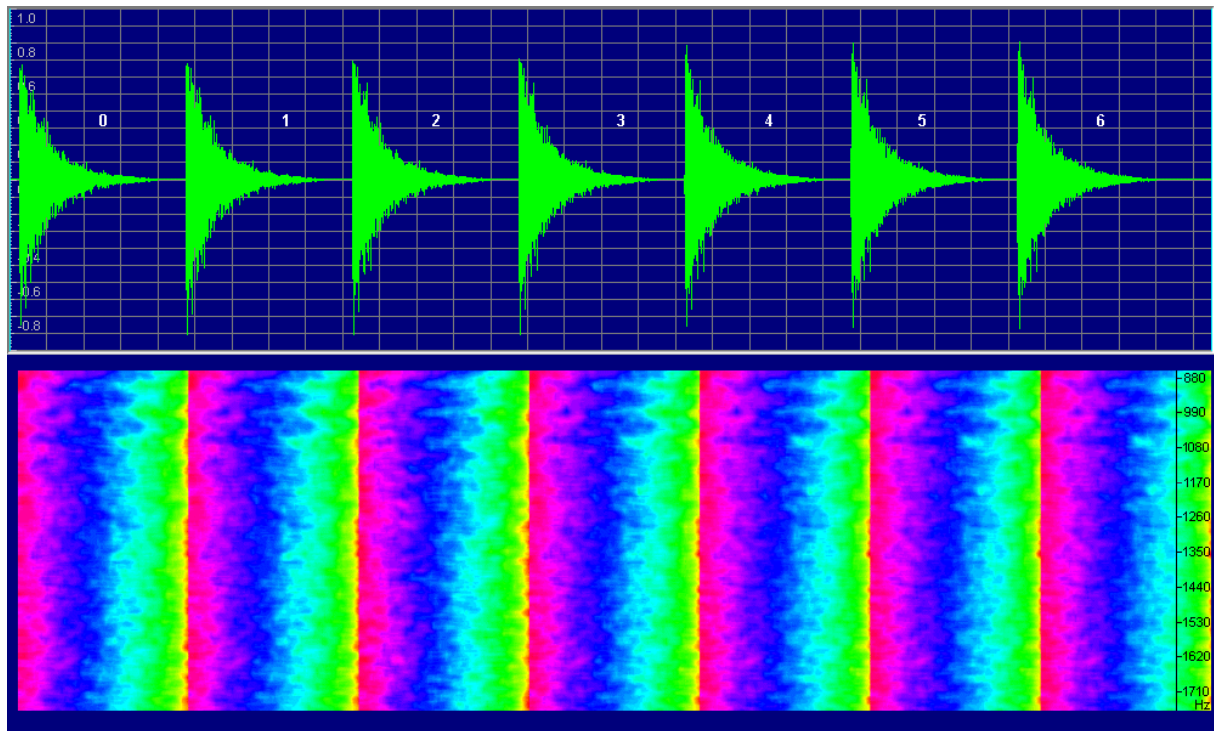


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der AM-Tiefe (2 Gen.)

Ausgehend von der vollen AM-Stärke (100%) in Nachhall „0“ wird in 6 Schritten die AM-Stärke auf 0% verringert. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% AM-Stärke
- Nachhall 1 : 80% AM-Stärke
- Nachhall 2 : 60% AM-Stärke
- Nachhall 3 : 40% AM-Stärke
- Nachhall 4 : 20% AM-Stärke
- Nachhall 5 : 10% AM-Stärke
- Nachhall 6 : 0% AM-Stärke

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der AM-Stärke bei Nachhall „St.Lucia“ bei 2 Generatoren pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Dez04\SL348A0\SLAall.WAV

Das Beispiel wird einmal wiederholt. Bei genauem Hinhören ist zu erkennen, wie mit zunehmender Reduktion der AM-Stärke der Klang „metallischer“ wird. Durch die Reduzierung der AM-Stärke sind die einzelnen emulierten Bandpässe nicht mehr so breit, daß sie lückenlos aneinander angrenzen. Durch das Entstehen dieser Lücken werden einzelne Frequenzen leichter hörbar. Dieser Effekt ist aber bei weitem nicht so ausgeprägt wie die Veränderung der FM-Stärke. Im abgebildeten Spektrogramm ist er nicht zu erkennen.

In obigem Beispiel wurden 2 Sinus-Generatoren pro Bandpass verwendet.
Im folgenden Beispiel wird nur ein Sinus-Generator pro Bandpass eingesetzt.

Es wird das gleiche Nachhallssignal („St.Lucia“) als Basis hergenommen und der Anteil der Amplitudenmodulation (AMdepth) verringert.

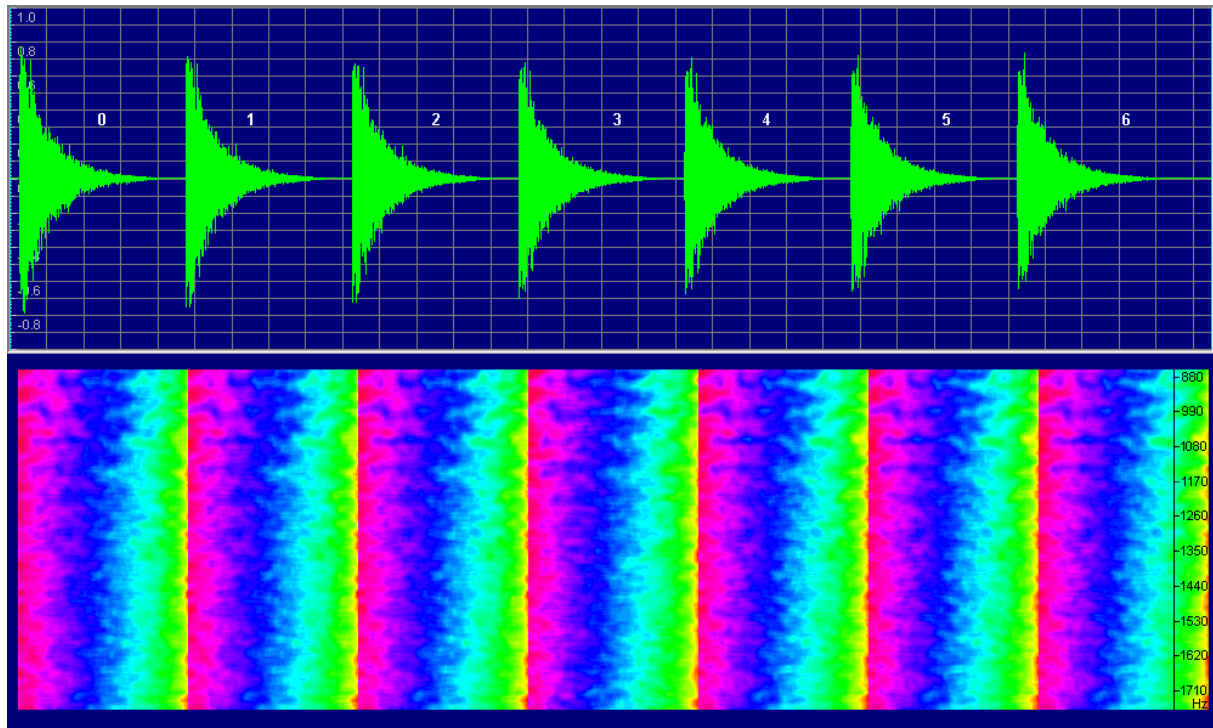


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der AM-Tiefe (1 Gen.)

Ausgehend von der vollen AM-Stärke (100%) in Nachhall „0“ wird in 6 Schritten die AM-Stärke auf 0% verringert. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% AM-Stärke
- Nachhall 1 : 80% AM-Stärke
- Nachhall 2 : 60% AM-Stärke
- Nachhall 3 : 40% AM-Stärke
- Nachhall 4 : 20% AM-Stärke
- Nachhall 5 : 10% AM-Stärke
- Nachhall 6 : 0% AM-Stärke

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der AM-Stärke bei Nachhall „St.Lucia“ bei 1 Generator pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Dez04\SL348B0\SLBall.WAV

Das „metallisch Klingen“ setzt hier früher ein als beim vorangegangenen Beispiel. Ursache ist die Verringerung der Sinus-Generatoren von zwei auf eins pro Bandpass.

Ergebnis: Das Verringern der AM-Stärke wirkt sich erst bei großer Verringerung auf den simulierten Nachhall aus. Kleine Veränderungen bewirken keine große Beeinflussung. Die Veränderung des Klanges ist im Spektrogramm nicht zu erkennen.

Reduktion der Amplitudenmodulationsgeschwindigkeit

Im folgenden Beispiel wird der simulierte Nachhall von St.Lucia als Basis hergenommen und die Geschwindigkeit der Amplitudenmodulation (AMdur) verringert. CD2, Track 11

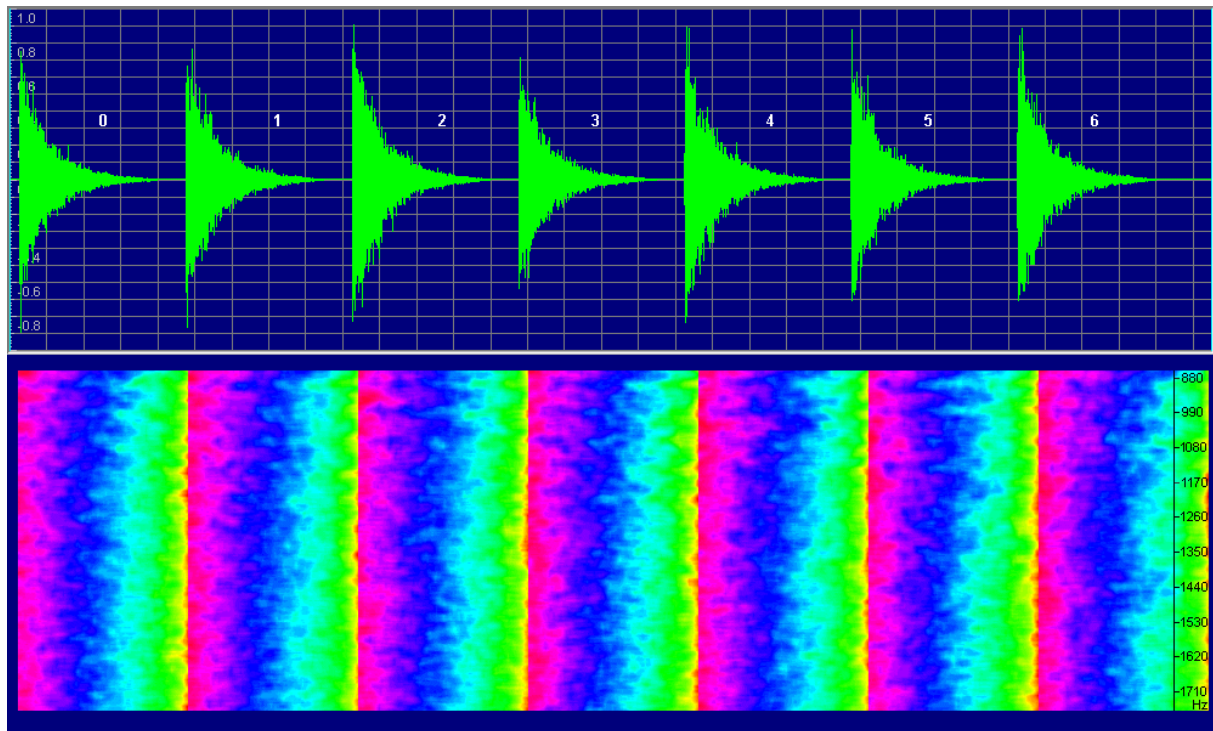


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der AM-Frequenz (2 Gen.)

Ausgehend von der vollen AM-Geschwindigkeit (100%) in Nachhall "0" wird in 6 Schritten die AM-Geschwindigkeit auf 50% verringert. Die Modulationsfrequenz wird somit bei allen Generatoren um den Faktor 2 langsamer. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 1 : 91% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 2 : 83% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 3 : 71% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 4 : 63% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 5 : 56% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 6 : 50% AM-Geschwindigkeit

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der AM-Geschwindigkeit bei 2 Generatoren pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Dez04\SL348D0\SLDall.WAV

Ergebnis: Auch hier tritt erst gegen Ende der Reihe eine Klangveränderung auf. Der Klang wird zunehmend metallischer.

Im nächsten Versuch wird die Anzahl der Sinusgeneratoren auf 1 pro Bandpass beschränkt.

Es wird das gleiche Nachhallsignal (“St.Lucia”) als Basis hergenommen und der Anteil der Amplitudenmodulationsgeschwindigkeit (AMdur) verringert.

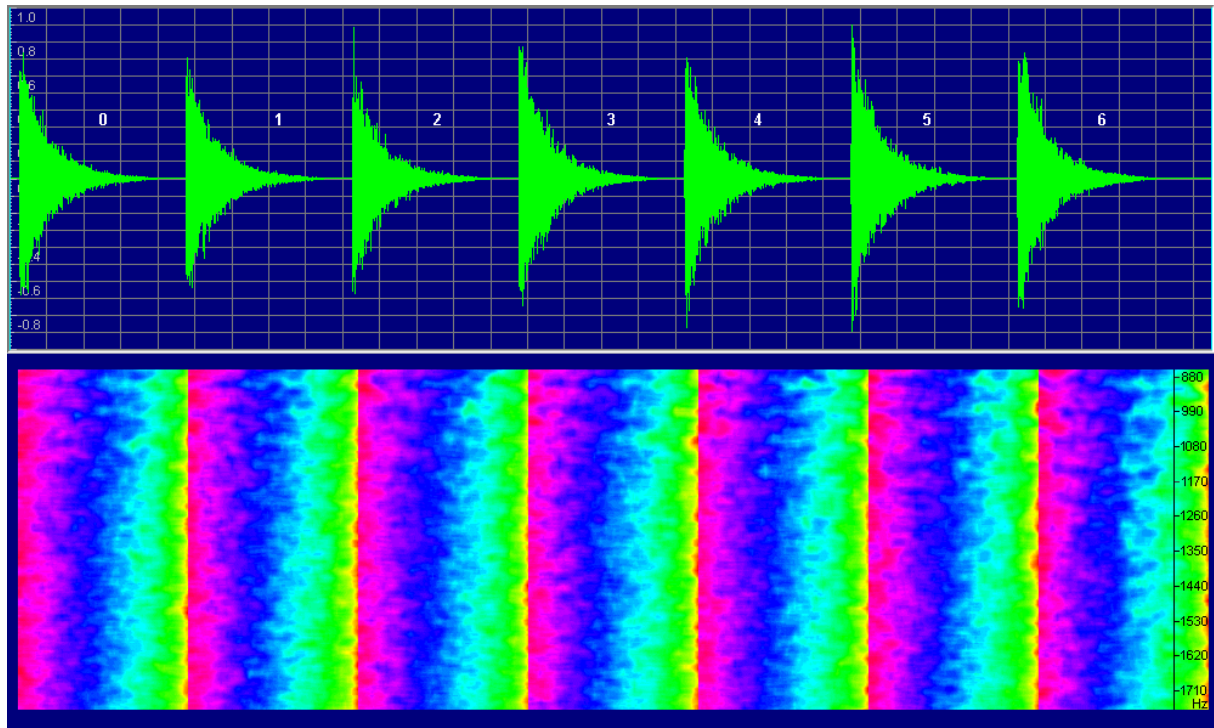


Abbildung: Zeitfunktion und Spektrogramm bei Reduktion der AM-Frequenz (1 Gen.)

Ausgehend von der vollen AM-Geschwindigkeit (100%) in Nachhall “0” wird in 6 Schritten die AM-Geschwindigkeit auf 50% verringert. Die Modulationsfrequenz wird somit bei allen Generatoren um den Faktor 2 langsamer. Dabei gilt:

- Nachhall 0 : 100% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 1 : 91% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 2 : 83% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 3 : 71% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 4 : 63% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 5 : 56% AM-Geschwindigkeit
- Nachhall 6 : 50% AM-Geschwindigkeit

🎵 Klangbeispiel: Reduktion der AM-Geschwindigkeit bei 1 Generator pro Bandpass

D:\FAPM\Result-Dez04\SL348E0\SLEall.WAV

Ergebnis: Der mittlerweile bekannte Effekt des Metallisch-klingens tritt auch hier wieder auf. In Summe bedeutet das für die Parametrisierung des Klavierhall-Algorithmus, das die empirisch gefundenen Werte für die Modulation der Sinusgeneratoren recht nahe an der Grenze zur Nicht-plausibilität liegen. Schon geringe Veränderungen lassen das Klangbild „kippen“. Die dann entstehenden Nachhalle klingen allesamt metallisch, d.h. spektral nicht dicht genug.

Evaluation mit Musiksignalen

Stellvertretende für alle „metallischen“ Nachhalle wird hier der Fall der Reduktion der FM-Modulationstiefe ausgewählt und zu Gehör gebracht. CD2, Track 12

Es wird der „Nachhall 0 : 100% FM-Stärke“ verglichen mit dem „Nachhall 5 : 10% FM-Stärke“. Der Unterschied zwischen 100% FM und 10% FM ist deutlich wahrnehmbar.

🎵 Klangbeispiel: ***St.Lucia 100% FM***

D:\FAPM\Result-Febr05\SL348R0\IMP0.WAV

🎵 Klangbeispiel: ***St.Lucia 10% FM***

D:\FAPM\Result-Febr05\SL348R5\IMP0.WAV

Nun werden die bekannten Musiksignale mit dem jeweiligen Nachhall gefaltet und verglichen.

🎵 Klangbeispiel: ***Gitarre*** erklingt im Nachhall der St.Lucia bei 100% FM und 10% FM

D:\FAPM\Result-Febr05\SL348R0\COMPG05.WAV

🎵 Klangbeispiel: ***Duo*** erklingt im Nachhall der St.Lucia bei 100% FM und 10% FM

D:\FAPM\Result-Febr05\SL348R0\COMPD05.WAV

🎵 Klangbeispiel: ***Rhythmus A*** erklingt im Nachhall der St.Lucia bei 100% FM und 10% FM

D:\FAPM\Result-Febr05\SL348R0\COMPA05.WAV

🎵 Klangbeispiel: ***Rhythmus B*** erklingt im Nachhall der St.Lucia bei 100% FM und 10% FM

D:\FAPM\Result-Febr05\SL348R0\COMPB05.WAV

Diskussion

Was wurde erreicht ?

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren vorgestellt, das es bei entsprechender Parametrisierung erlaubt einen virtuellen Nachhallschwanz zu berechnen, der in hohem Maße einem realen Nachhall entspricht. Der Nachhall sowohl großer als auch kleiner Räume kann simuliert werden, die spektrale Zusammensetzung des Nachhalls läßt sich dabei frequenz- und zeitmäßig in weiten Grenzen einstellen. Die berechneten Nachhalle werden unter Verwendung der Faltung auf die zu verhallenden Audiosignale aufgerechnet und ersetzen so die konventionellen Hallverfahren. Mit dem Klavierhall-Algorithmus steht dem Tonmeister ein flexibles und nutzbringendes Werkzeug zu Verfügung, um schnell und gezielt einen Nachhall für eine Stimme oder ein Instrument synthetisieren zu können. Anders als bei den bisherigen Algorithmen kann er nun quasi auf eine Klaviertaste genau das Hallspektrum bestimmen und das zeitliche Verhalten festlegen. Der Tonmeister kann nun einen „musikalischen“ Nachhall programmieren, der an das musikalische Ereignis angepaßt ist – er muß nicht an physikalischen Parametern wie Raumvolumen etc. drehen, sondern erzeugt den von ihm gewünschten Nachhall gleichsam per Klaviertastatur.

Im folgenden werden die in der akustischen Literatur bekannten Kenngrößen zur Beurteilung der Raumakustik und deren Wahrnehmung im Vergleich zum Klavierhall-Algorithmus diskutiert. Dabei werden die unterschiedlichen Termini angesprochen, mit deren Hilfe eine Einschätzung der Sprach- bzw. Musikwiedergabe erfolgt. Hierbei kann es sein, daß ein und derselbe Begriff je nach Literatur eine unterschiedliche Bedeutung hat. Die Begriffserklärungen stützen sich dabei auf Beranek [21], wobei sie aus aktueller Literatur mit Ergänzungen versehen sind (siehe auch Griesinger [91, 92]). Einige dieser Kenngrößen sind neben den akustischen Faktoren auch von musikalischen abhängig, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Eigenschaften

Nachhall, Nachhallzeit

Engl.: Reverberation oder liveness

Nachklingen eines Schalls nach Beendigung der Schallanregung. Die Nachhallzeit ist die Dauer der Wahrnehmbarkeit des Nachhalls. Sie kann einerseits durch eine Vergrößerung des Raumvolumens, andererseits durch Reduktion der gesamten Raumabsorption erhöht werden. ‘Liveness’ ist in erster Linie mit den Nachhallzeiten bei mittleren und hohen Frequenzen verknüpft, etwa ab 350 Hz.

Klavierhall: Die Nachhallzeit läßt sich für die 108 Frequenzen der 9 Oktaven einzeln einstellen. Damit ist sie unabhängig von Raumvolumen und –absorption. Durch diese Unabhängigkeit können in Realität existierende Zusammenhänge zwischen Volumen, Absorption und Hallverhalten umgangen werden. D.h. es ist möglich den Nachhall eines kleinen Raumes mit einem kurzen, kräftigen Bass auszustatten, wie es in Wirklichkeit nicht der Fall ist und sein kann.

Running Reverberation

Für Musik mit vielen kurzen Pausen ist nicht der gesamte Hallabfall hörbar. Hier wird der Hall-eindruck von dem ersten hörbaren Teil des Abfalls bestimmt. Dies wird „running reverberation“ genannt.

Klavierhall: Die Hallabfallkurve läßt sich für die 108 Frequenzen der 9 Oktaven einzeln einstellen. Das Nachklingen kann pro Frequenz durch verschiedene Hüllkurvenmodelle eingestellt werden. Dadurch können auch „unnatürliche“, d.h. in der Akustik unmögliche Nachhalle synthetisiert werden, die aber dem musikalischen Ereignis angepaßt sind. So kann durch eine geeignete Form der Nachhall-

Hüllkurven erreicht werden, daß die „running reverberation“ deutlich wahrnehmbar wird, der restliche Nachhall aber die Musik nicht stört oder verwaschen klingen läßt.

Raumeindruck

Mit der Entwicklung von mehrkanaligen Audio Systemen hat die Beschreibung der Qualität des entstehenden Raumeindrucks an Bedeutung gewonnen. Dabei haben sich zwei zentrale Begriffe gebildet: Die Einfallswerte (ASW) und die Einhüllung (LEV).

Einfallswerte

Engl.: Spaciousness: apparent source width (ASW)

Früher wurde „spacious“ mit ASW gleichgesetzt. In [92] bezieht Griesinger ASW jedoch nur auf die Schallquellenverbreiterung, und nicht auf „spaciousness“. Diese ist für ihn gleichbedeutend mit „envelopment“ (Einhüllung). Räumlichkeit entsteht, wenn der Zuhörer den Eindruck hat, daß die gespielte Musik aus einer größeren räumlichen Breite als der visuelle Eindruck kommt.

Einhüllung

Engl.: Spaciousness: listener envelopment (LEV)

LEV wird dann am höchsten bewertet, wenn der Nachhall am Zuhörerohr gleichmäßig aus allen Richtungen zu kommen scheint.

Bei Ahnert [1] findet sich folgende Definition: „Empfindung des Zusammenwirkens von Schallquellen mit ihrer räumlichen Umgebung einschließlich der Einbeziehung des Hörers darin.“ Sie bildet sich aus folgenden Parametern: Raumgrößeneindruck, Räumlichkeit, Halligkeit und Gleichverteilung des Raumschalls. Räumlichkeit entspricht hier ASW.

Klavierhall: Für den Raumeindruck sind die Phasenbeziehungen innerhalb des Nachhalles verantwortlich. Das vorliegende Stereomodell des Klavierhalles ist für binaurales Hören ausgelegt. Die Phasenbeziehungen (Phasenstartlage und Phasenmodulation) lassen sich beim Klavierhall für die 108 Frequenzen der 9 Oktaven getrennt einstellen. Damit ist es möglich die „Räumlichkeit“ des Raumes für jede Klaviertaste getrennt einzustellen. Die Startlage der Phase wird dabei benutzt um die Einfallswerte zu simulieren, die Phasenmodulation beschreibt die Räumlichkeit des Nachklingens.

Brillanz

Engl.: Brilliance

Ein klarer und heller Klang wird als brillant bezeichnet. Bei einem brillanten Klang sind die höheren Frequenzen dominant und klingen langsam ab. Das heißt, daß die hohen Frequenzen praktisch nur durch die Luftabsorption geschwächt werden. Ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen ist in Räumen für Musikdarbietungen erwünscht, da dies die geringere Empfindlichkeit des Gehörs bei tiefen Frequenzen ausgleicht.

Klarheit

Engl.: Clarity

Bezeichnet das Ausmaß, zu welchem die einzelnen akustischen Bestandteile einer musikalischen Darbietung diskret wahrgenommen werden. Die Klarheit hängt dabei sowohl von den raumakustischen Qualitäten des Saales, als auch von den musikalischen Faktoren und dem Können der Musiker ab.

Intimität

Engl.: Intimacy oder presence

Eine Halle wird als akustisch intim bezeichnet, wenn die darin gespielte Musik den Eindruck erweckt, dass die Halle klein sei. In der Sprache der Tontechniker wird dies „Präsenz“ genannt.

Wärme

Engl.: Warmth

Wärme wird in der Musik durch die Lebendigkeit des Basses bzw. die Fülle der Basstöne (zw. 75 und 350 Hz) in Relation zu den mittleren Frequenzen (350-1400Hz) definiert. Sind die Bässe zu dominant oder die hohen Frequenzen zu stark gedämpft, wird ein Saal von Musikern gerne als „dunkel“ (‘dark’) bezeichnet.

Lautstärke

Engl.: Loudness

Dieser Parameter wird durch die Leistung der Schallquelle (W), die Distanz zum Zuhörer (r) und dem Raumabsorptionsgrad bestimmt. Der Raumabsorptionsgrad ist dabei erheblich größer, wenn der Saal besetzt ist.

Klavierhall: Der Frequenzgang des Nachhalles läßt sich für die 108 Frequenzen der 9 Oktaven einzeln einstellen. Durch die entsprechende Wahl der Hüllkurven können Brillianz, Klarheit, Intimität, Wärme und Lautstärke eingestellt werden.

Brillanz läßt sich durch das Absenken der tiefen und Anheben der hohen Frequenzen erreichen. Da der Klavierhall bis 14kHz reicht, lassen sich sehr hochtonreiche Nachhalle herstellen. Allerdings sollte darauf geachtet werden, daß der Nachhall nicht zu spitz klingt.

Klarheit läßt sich durch ein geeignetes Verhältnis von Direktsignal und Hallsignal erreichen. Wenn ein hohes Maß an Brillanz eingestellt ist, dann sollte der Nachhall gut 6dB leiser sein als das Nutzsignal. Dadurch wird für das Ohr eine eindeutige Ortung möglich, ohne daß der Raumeindruck verschwindet.

Intimität wird durch Absenkung der hohen und Anheben der tiefen Frequenzen erreicht. Hier muß darauf geachtet werden, daß der Nachhall nicht zu mumpfig und basslastig wird.

Wärme wird durch das Verhältnis der mittleren Oktaven zu den tiefen Oktaven erzeugt. Der Tonmeister muß auch hier darauf achten, daß der Mittenanteil nicht leiser als 6dB gegenüber dem Bassanteil ist, um einen dumpfen Raumeindruck zu vermeiden.

Um das Einstellen des Hallspektrums zu erleichtern, ist in der Benutzer-Oberfläche der Klavierhall-Software im Spektrumsfenster die Isophone (auch Fletcher-Munson-Kurve genannt) von 80dB eingezeichnet. Der Tonmeister hat dadurch die Möglichkeit, sein gewünschtes Nachhallspektrum an der hörphysiologischen Lautstärkeempfindung zu orientieren.

Flimmern

Engl.: Acoustic glare

Frühen Reflexionen mit einer harten Klangqualität können entsprechend dem optischen Flimmern ein akustisches Flimmern erzeugen. Verhindert wird akustisches Flimmern durch kleinformatige Unregelmäßigkeiten auf den Oberflächen oder geeignete Krümmungen (vgl. akustisches Barock).

Klavierhall: Frühe Reflexionen oder Echos sind in diesem Modell nicht implementiert. Deswegen erzeugt es auch kein Flimmern.

Balance

Engl.: Balance

Die akustische Balance ist unausgewogen, wenn das Bühnenhaus oder andere Oberflächen in der Nähe der Musiker bestimmte Bereiche hervorhebt oder die Solisten nicht ausreichend unterstützt. Im Opernhaus ergibt sich die Balance zwischen Sängern und dem Orchester durch das Bühnendesign, bühnennahe Reflektorflächen für frühe Reflexionen und die Form des Orchestergrabens.

Abstimmung

Engl.: Blend

Die Abstimmung ist definiert als die Mischung der Klänge der einzelnen Instrumente zu einem harmonischen Ganzen. Die Abstimmung hängt neben der Aufstellung des Orchesters sehr stark von schallreflektierenden Flächen in der Nähe der Bühne und vom Bühnenhaus ab.

Zusammenspiel

Engl.: Ensemble

Das Zusammenspiel eines Orchesters hängt auch davon ab, ob die einzelnen Musiker das Spiel ihrer Kollegen hören können. Schallreflektierende Oberflächen sollen den Schall von einer Seite der Bühne zu der anderen Seite befördern. Ist kein ausgewogenes Zusammenspiel gegeben, so leidet darunter auch die Balance.

Klavierhall: Da sich der Klavierhall-Algorithmus auf die virtuelle Hallerzeugung bezieht, liegen Balance, Abstimmung und Zusammenspiel außerhalb des Anspruchs dieses Modells.

Unverzögliche Antwort

Engl.: Immediacy of response (attack)

Vom Standpunkt der Musiker aus soll die Halle den Musikern das Gefühl geben, dass die Halle unmittelbar auf einen Ton reagiert. Die 'Immediacy of response' hängt mit der Art und Weise zusammen, in der die ersten Reflexionen aus der Halle die Ohren der Musiker erreichen. Falls die Reflexionen zu spät kommen, werden sie als störende Echos empfunden, falls sie nur aus dem unmittelbar umgebenden Bühnenbereich gehört werden, wird der Musiker die Akustik der Halle nicht wahrnehmen können.

Klavierhall: Die unverzügliche Antwort des Raumes kann im Klavierhall-Algorithmus durch die Attack-Zeit der Hüllkurven eingestellt werden. Somit ist es möglich, das Spektrum des erzeugten Halles in seinem zeitlichen Muster frei zu bestimmen. Der Tonmeister entscheidet letztendlich nach seinem Gehör darüber.

Textur

Engl.: Texture

Textur ist der subjektive Eindruck, den ein Zuhörer aus dem Muster, in dem die Sequenzen der frühen Reflexionen sein Ohr erreichen, ableitet. In einer ausgezeichneten Halle folgen die frühen Reflexionen dem Direktschall in einer mehr oder weniger uniformen Abfolge. Gute Textur erfordert eine große Anzahl an frühen Reflexionen, gleichförmig, aber nicht exakt voneinander getrennt, und vor allem ohne einzelne Reflexionen, die die anderen dominieren (eine sehr starke Reflexion verdeckt kurz darauffolgende schwächere Reflexionen).

Klavierhall: Frühe Reflexionen oder Echos sind in diesem Modell nicht implementiert. Deswegen ergibt sich in diesem Modell auch keine Realisierung einer Textur. Interessant ist allerdings die Forderung nach einer großen Anzahl von Reflexionen, um eine gute Textur zu erreichen. Eine große Anzahl von Reflexionen bedeutet eine hohe spektrale Dichte. Diese Forderung kann der Klavierhall-Algorithmus in sofern erfüllen, als er in der Lage ist, sofort und von Anfang des Halles an die maximale Dichte über den gesamten Hörbereich zu liefern. Soll also eine gute Textur erreicht werden, so muß der Tonmeister die Hüllkurven so programmieren, daß sie von Anfang „mitlaufen“. Damit kann er die Textur des Raumes nachbilden.

Echofreiheit

Engl.: Freedom from echo

Sehr hohe oder fokussierende Deckenflächen können Echos hervorrufen. Sie können auch aus langen, hohen und gekrümmten Rückwandflächen kommen, deren Brennpunkt auf oder nahe der Bühne liegt. Die Neigung zu störender Echobildung ist in Sälen mit kurzen Nachhallzeiten größer als in solchen mit langen Nachhallzeiten.

Klavierhall: Da der Klavierhall-Algorithmus nicht auf Echos beruht, können keine störenden Echos entstehen. Die Echofreiheit ist somit inherent gegeben.

Störeffekte auf die Klangqualität

Engl.: 'Extraneous effects on tonal quality'

Die Klangqualität kann durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst werden, z.B. durch Rasseln in einer metallischen Oberfläche, durch das Mitschwingen von Lüftungsrohrleitungen bei gewissen Frequenzen etc.. Kleinformatige Unebenheiten auf glatten Oberflächen können diese Effekte vermindern.

Ein anderer Störeffekt ist jener der Schallquellenverschiebung ('shift of source'). Eine spezielle schallreflektierende Fläche fokussiert einen beträchtlichen Schallanteil auf einen bestimmten Teil der Zuhörer. Dort scheint der Schall aus dieser Fläche zu kommen und nicht aus dem Orchester.

Klavierhall: Störeffekte können nur durch Fehlprogrammierung erzeugt werden, liegen aber gänzlich außerhalb des Anspruchs dieses Modells.

Gleichmäßigkeit

Engl.: Uniformity of sound

Angestrebt wird eine gleichmäßige Klangqualität in der gesamten Halle. Die Qualität leidet, wenn Teile der Halle einer minderwertigen Akustik ausgesetzt sind, z.B. unter einem tiefen überhängenden Balkon oder wenn in bestimmten Bereichen Reflexionen Echos produzieren, oder die musikalische Information nur verschwommen mit einem Mangel an Klarheit gehört wird. Ziel eines elektroakustischen Systems kann es nun z.B. sein, eine gleichmäßige Klangqualität in der gesamten Halle zu erzeugen

Klavierhall: Da sich der Klavierhall-Algorithmus auf die Erzeugung eines virtuellen Nachhalles bezieht, kann die Gleichmäßigkeit eines Nachhalles über einen vorgegebenen Raum durch entsprechende Programmierung erreicht werden. Sollen also verschiedene virtuelle „Hörpositionen“ in einem virtuellen Raum mit Nachhall versehen werden, so braucht man nur die Parameter einer Position auf die anderen Positionen anwenden, und erhält einen vollkommen gleichmäßigen Nachhall.

Fazit

Der Vergleich zwischen den in der realen Akustik auftretenden Begriffen und deren möglicher Nachbildung im Klavierhall-Algorithmus zeigt folgendes:

- 1.) Begriffe, die Nachhallqualität und –quantität beschreiben, können durch den Klavierhall-Algorithmus abgedeckt werden. Hier liegen die Stärken des Verfahrens.
- 2.) Begriffe, die Eigenschaften früher Reflexionen beschreiben, können nur teilweise im Klavierhall-Algorithmus beschrieben werden. Vor allem spektrale Aspekte, also z.B. Klangverfärbungen durch frühe Reflexionen, sind simulierbar, Effekte durch Echos können durch den Algorithmus nicht dargestellt werden.
- 3.) Begriffe, die das subjektive Zusammenspiel von Instrumenten beschreiben, können ebenfalls nicht durch die aktuelle Version des Klavierhall-Algorithmus realisiert werden, weil dieser momentan nur eine „Hallposition“ kennt.

Anwendungsgebiete

Verhallen von trockenen Aufnahmen

Der Klavierhall eignet sich als Ersatz eines konventionellen Hallgerätes im Studioalltag. Das Verhallen von trockenen Aufnahmen ist bei Verwendung einer geeigneten Software (Faltung) problemlos möglich. Er eignet sich auch dazu, um bestimmte Hallanteile einer schlecht verhallten Aufnahme hinzuzufügen. Ist beispielsweise der Nachhall bei einer Gesangsaufnahme zu „dumpf“ geraten, so kann man durch gezielte Vorgabe des Hallspektrums mit dem Klavierhall-Algorithmus einen zusätzlichen „hellen“ Nachhall hinzufügen, und somit das Klangbild ausgleichen.

Ein praktisches Beispiel: In den 60'er Jahren des letzten Jahrhunderts waren elektronische Hallgeräte noch unbekannt. Zum Verhallen einer Singstimme verwendete man z.B. Hallräume. Diese Hallräume waren mit einem Lautsprecher und mehreren Mikrofonen bestückt. Der trockene Klang wurde über den Lautsprecher in den Hallraum gesendet. Per Mikrophon wurde dann der echte Nachhall aufgenommen und zu der Stimme hinzugemischt. Da die Hallräume üblicherweise nicht sehr groß waren, produzierten sie einen mittenlastigen Nachhall. Satte Bässe oder seidige Höhen waren nicht ihre Stärke. Selbst nach der Erfindung der Mehrspur-Tonbandtechnik dauerte es noch gut 10 Jahre bis zum Erscheinen brauchbarer digitaler Hallgeräte.

Nun werden heutzutage häufig alte Aufnahmen restauriert. Ein Problem dabei ist der Nachhall. Bislang gibt es noch keine Verfahren, eine verhallte Aufnahme zu enthallen.

Es bleibt als Alternative also nur den vorhandenen Nachhall spektral zu ergänzen um das Klangbild auf einen modernen, d.h. aktuellen Sound zu trimmen. Durch eine spektrale Analyse wird zunächst herausgefunden, in welchem Frequenzbereich der „alte“ Nachhall wirkt. Dieser Bereich wird beim Klavierhall ausgeblendet. Danach bestimmt der Tonmeister welche Frequenzbereiche neu hinzugefügt werden sollen. Diese gibt er im Spektrumsfenster des Klavierhalles ein. Anhand der Hüllkurven legt er fest, wie lange die einzelnen Teilfrequenzen ausklingen sollen. Der so parametrisierte Nachhall wird errechnet und einer Faltung als Funktion vorgegeben. Der Tonmeister ist nun in der Lage, der „alten“ Aufnahme einen „neuen“ Nachhall hinzuzufügen, wobei der „alte“ Nachhall den „neuen“ nicht moduliert oder anregt, weil der „neue“ Nachhall keine spektralen Anteile des „alten“ Nachhalles enthält. Somit ergänzt der „neue“ Nachhall den „alten“ ohne daß sich beide stören.

Ein weiterer Vorteil des Klavierhalles sind die fehlenden Reflexionen.

Hörbarmachen von virtueller Akustik

Der Klavierhall läßt sich auch für Auralisationsaufgaben einsetzen. Vorallem in der Bautechnik und Architektur ist es interessant zu hören, wie ein geplanter Raum (z.B. ein Konzertsaal) klingt, bevor er in Realität gebaut wird. Für diesen Einsatzfall müßte allerdings noch ein Werkzeug (Software) entwickelt werden, die aus den vorgegebenen Konstruktionsdaten (meist aus einem CAD-System stammend) in die Parameter des Klavierhalles umsetzt. Unter zu Hilfenahme der physikalischen Eigenschaften der Raumgrenzen (z.B. Holz, Beton, Kacheln uvm.) und deren akustischen Parametern (wie z.B. Absorptionsverhalten, Reflexionsgrad etc.) können sich die Parameter für das Ein- und Ausschwingen der Hüllkurven gewinnen lassen. Aus der Raumgröße und den vorhandenen Raummoden kann sich der Frequenzgang abschätzen lassen. Ein Abgleich der künstlich gewonnenen Parameter mit den realen Nachhallen existierender Räume wird allerdings unabdingbar sein. Dies könnte jedoch ein weiteres Thema einer Dissertation werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Verbesserungsvorschläge

Mehrkanalige Aufnahme

Von der Solostimme zum Orchester

In der derzeitigen Fassung erzeugt der Klavierhall-Algorithmus einen Nachhall aus der Vorgabe des Spektrums, des zeitlichen Verlaufes und der Phasenbeziehungen. Dies entspricht in der Realität der Situation von Solostimme und Zuhörer. Genauer: ein Zuhörer hört einer Solostimme in diesem virtuellen Raum zu. Eine zweite Stimme, die sich ja nicht am selben Platz befinden kann wie die erste, würde folglich einen anderen Nachhall erzeugen, weil sich durch die veränderte Position auch das Spektrum und die Phasenbeziehungen verändert haben. Um eine virtuelle akustische Szene korrekt zu beschreiben, muß also für jede Stimme in Abhängigkeit ihrer Position ein eigener Nachhall generiert werden. Dieser ist dann jeder Stimme zugeordnet.

Unter Verwendung moderner Mehrspurtechnik ist es kein Problem, für jede Stimme einen eigenen Nachhall zu verwalten. Der Aufwand steigt natürlich deutlich an, will man ein 80 Mann starkes Orchester korrekt verhallen. Doch der Aufwand läßt sich noch sehr leicht steigern.

Obige Betrachtung gilt nämlich nur, wenn der Zuhörer ortsfest ist. Wandert der Zuhörer im Raum herum, oder sitzen mehrere Zuhörer verteilt im Raum, so ergibt sich die Notwendigkeit auch für jede Zuhörerposition einen eigenen Nachhall pro Stimme zu erzeugen. In Summe müßte nun pro Stimm- und pro Zuhörerposition eine Nachhall generiert werden.

In der täglichen Studio-Praxis wird man eher pragmatisch und weniger mathematisch vorgehen. Um eine weit vom Zuhörer entfernte Schallquelle zu simulieren, verwendet man einen hochtonarmen Nachhall, der sehr laut zu einem eher leisen Originalklang hinzugemischt wird. Aus diesem Verhältnis – wenig Originalklang, viel Nachhall – erkennt das Ohr die „gefühlte“ weite Entfernung. Befindet sich der Zuhörer nahe an der Schallquelle, dann wird man einen hellen Nachhall verwenden, der relativ leise zum Originalklang hinzugemischt wird.

Aufgrund dieser praktischen Erfahrungen sind in dieser Arbeit keine Anstrengungen unternommen worden einen Multi-Source-Nachhall zu erarbeiten.

Höchstens für Auralisationsaufgaben im Bereich der Architektur, d.h. Hörbarmachung eines noch nicht gebauten Raumes oder Konzertsaaes wäre obiger Ansatz verschiedener Nachhallpositionen vertretbar.

Mehrkanalige Wiedergabe

Vom Stereo-Modell zur Mehrkanaligkeit

Ein bedeutender Trend in der virtuellen Akustik ist der Weg in die Mehrkanaligkeit. Weit verbreitet sind 6 Kanal Systeme unter den Markennamen Dolby oder dts, die eine Surround-Rekonstruktion eines akustischen Ereignisses ermöglichen. Die 5 Hauptkanäle nennen sich Left, Center, Right, Surround-Left und Surround-Right. Auf diesen 5 Kanälen wird der Frequenzbereich von 20Hz bis 20kHz abgedeckt. Ein weiterer Kanal, Sub genannt, übernimmt die Frequenzen unter 20 Hz, und deckt damit den Subbassbereich ab. Der Zuhörer ist umgeben von fünf Hauptlautsprechern, wie in der Abbildung gezeigt.

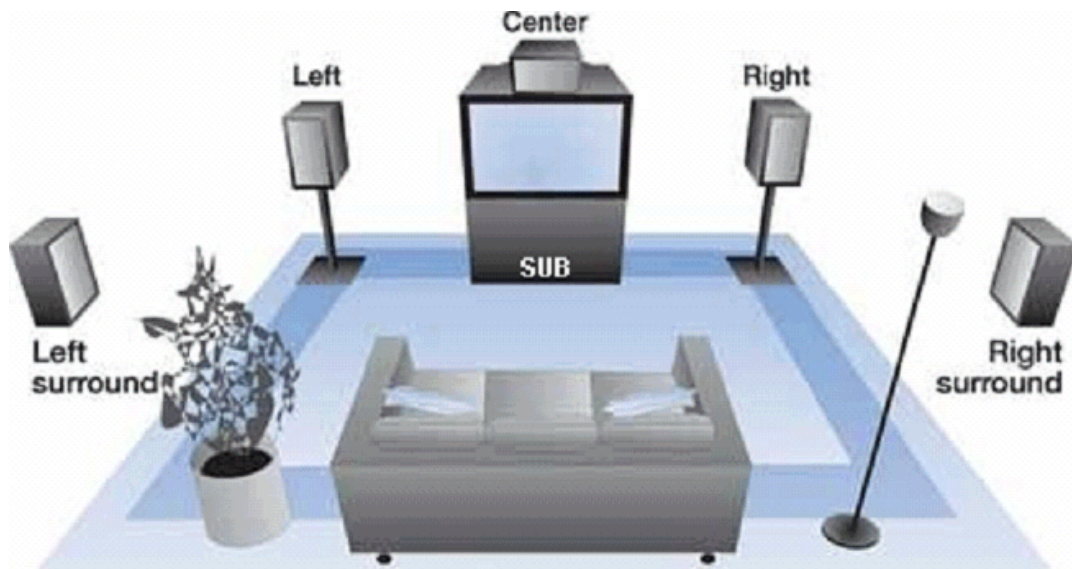


Abbildung: Anordnung der Lautsprecher bei einem 5.1 Surround System

Eine interessante Weiterentwicklung des Klavierhall-Algorithmus wäre eine 5.1 Variante, die zur Erzeugung von Nachhallen in 5.1 Systemen zum Einsatz kommen könnte. Folgende Erweiterungen des bisherigen Algorithmus wären erforderlich, um eine hohe Klang-Flexibilität zu ermöglichen:

- a.) Pro Kanal ein Hallspektrum.
Dadurch läßt sich eine räumliche Verteilung des Hallspektrums erreichen. So kann z.B. ein Nachhall dargestellt werden, der vorne heller klingt als hinten.
- b.) Pro Kanal ein Hallverlauf
Dadurch läßt sich die zeitliche Verteilung des Hallspektrums erreichen. So kann z.B. ein Nachhall erzeugt werden, der hinten länger ausklingt als vorne.
- c.) Phasenkoppelung zwischen ausgewählten Kanälen.
Wie schon im Stereo-Modell gezeigt, ist die Phasenbeziehung zwischen linken und rechten Kanälen entscheidend für den Räumlichkeitsanteil des Halles. Insofern wird erwartet, daß auch im mehrkanaligen Umfeld die Phasenbeziehungen der einzelnen Kanäle den Nachhall prägen werden. Diese Vermutung muß aber erst noch durch entsprechende Experimente belegt werden.

Nicht-reale Erweiterungen

Eingaben von Hand

Ohne Rücksicht auf die physikalischen Eigenschaften der Raumakustik zu nehmen, kann der Klavier-Algorithmus folgendermaßen erweitert werden:

- **Spektrale Konzentration auf musikalische Maxima / Minima**
Beispielsweise kann das Spektrum des Nachhalles mit einem „echten“ Raumspektrum beginnen und danach zu einem Dur-Akkord werden, dadurch daß alle Frequenzbänder, die nicht dem Dur-Akkord angehören sehr viel schneller zum Ausklingen gebracht werden, als die Frequenzbänder die zum Dur-Akkord gehören.
Aus diese Weise läßt sich z.B. ein Nachhall in A-Dur erzeugen. Natürlich funktioniert auch jeder andere Akkord.
- **Spektraler Zerfall als Funktion der Zeit**
Die Umkehrung funktioniert natürlich auch. Aus einem Dur-Akkord-Nachhall kann durch Zerfall desselben ein Übergang zu einem „realen“ Nachhall geschehen. In wie weit sich musikalischer Nachhall auf den Höreindruck auswirkt, hängt sicherlich stark von der Komposition ab. Die Komposition muß dem Nachhall genügend Raum lassen, um überhaupt als Teil des musikalischen Geschehens verstanden werden zu können.
- **Phasen-Konzentration und Zerfall**
Wie schon im Verlauf der Arbeit angedeutet, bestimmen die Phasenbeziehungen den Räumlichkeitseindruck des Nachhalles. Eine mögliche Erweiterung wäre nun auch die Phasenlagen und –modulationsstärken mit Hüllkurven zu versehen und damit eine zeitliche Veränderung der Phasenbeziehungen zu ermöglichen. Es wäre dann möglich, z.B. den Nachhall mit viel Räumlichkeit beginnen zu lassen, und mit wenig Räumlichkeit zu beenden (Konzentration). Der Zerfall wäre dann der umgekehrte Weg.
In wie weit diese Möglichkeit das musikalische Geschehen bereichern würde, ist nicht bekannt. Es ist zu vermuten, daß auch hier spezielle Kompositionen gefordert sind. Diese müßten viele Pausen enthalten, um dem Zuhörer die Chance zu geben, diese Phasenmodulationen überhaupt wahrzunehmen.
- **Amplituden- Konzentration und Zerfall**
Bisher wurden exponentiell abklingende Hüllkurven verwendet, um den Nachhall eines Raumes zu simulieren. Dies entspricht den physikalischen Abläufen beim Ausschwingen eines angeregten Raumes. Im Klavierhall-Algorithmus lassen sich aber auch andere Hüllkurven einstellen. So ist es beispielsweise möglich, Hüllkurven zu erzeugen, die nicht abklingen, sondern auf einem bestimmten Wert verharren (Sustain) und nach einer gegebenen Zeit erst abklingen. Diese Konzentration auf einen bestimmten Lautstärkewert können auch mehrere Hüllkurven gleichzeitig bewerkstelligen. Damit entstehen im Spektrum „orgelhafte“ Klänge, die nichts mit realem Nachhall mehr gemein haben. Der Verwendungszweck dieser Nachhalle ist noch im Unklaren.
- **Zeitliche Veränderung des Nachhalles, dynamischer Nachhall**
Ausgehend von der ersten Erweiterung (Dur-Akkord-Nachhall) läßt sich ein Hall-Klavier ableiten. Wie auf einer echten Klaviatur „spielt“ der Komponist seinen Nachhall ein. Der Nachhall würde so Takt für Takt, oder Note für Note veränderlich sein und der Komposition folgen. Er wäre nicht mehr länger statisch, sondern nun dynamisch.

Modulationsmodelle

Anders als bei den Eingaben von Hand werden hier Möglichkeiten vorgestellt, wie die aus akustischen Eingangssignalen gewonnenen Parameter verwendet werden können, um eine Nachhall-Modulation zu bewirken.

- Perkussive Instrumente als Signalquelle (z.B. die Halltrommel)
Schlaginstrumente haben aufgrund ihrer Bauform immer eine abklingende Lautstärkehüllkurve. Bei entsprechender Spielweise (Einzelschlag) ähnelt die Hüllkurve derer eines Nachhallschusses. Das Spektrum ist jedoch davon verschieden. Nun kann man unter zu Hilfe-nahme einer Spektraltransformation (z.B. Fourier-Transformation) aus dem Klang des Schlag-instrumentes dessen Frequenzkomponenten mit den dazugehörigen Hüllkurven berechnen. Diese Ergebnisse werden nun als Parameter des Klavierhall-Algorithmus benutzt. Dabei werden beispielsweise die spektralen Hüllkurven den Hüllkurven des Klavierhalls zugeordnet. Somit wird quasi der Klang des Schlaginstrumentes zu einem Nachhall umgerechnet. Es ist zu erwarten, daß tiefe Trommeln einen „großen Raum“ erzeugen werden. Hoch gestimmte Trommeln werden einen „kleinen Raum“ hervorbringen. Welchen Raumeindruck Becken, Zimbeln oder andere metallische Schlaginstrumente generieren werden, kann nicht vorher-gesagt werden. Hier sind Klangexperimente erforderlich.
- Monophone Instrumente als Signalquelle (z.B. das Hall-Cello)
Melodieführende Instrumente haben den Nachteil, daß sie meistens keine abklingenden Lautstärke-Hüllkurven besitzen, sondern im Gegensatz zu den Schlaginstrumenten liegende Töne erzeugen. Diese sind als Ausgangspunkt für einen Nachhall ungeeignet. Abhilfe schafft hier nur eine geeignete Spielweise. Werden die Töne z.B. staccato gespielt, dann kommt das der Hüllkurve eines Nachhalls schon näher. Andererseits stellt sich die Frage, wie denn ein „liegender“ Nachhall klingt. Unser Ohr kennt diesen Nachhall-Typus nicht, weil er in der Realität nicht auftritt. Auch hier ist experimentelles Vorgehen angesagt.
- Polyphone Instrumente als Signalquelle (z.B. die Hall-Orgel)
Wie schon im vorherigen Punkt beschrieben, eignen sich polyphone Instrumente aufgrund ihrer liegenden Töne nicht als Nachhall-Parameter-Vorgabe. Natürlich kann auch hier durch eine geeignete Spielweise der Versuch unternommen werden ein hallähnliches Ausklingen zu erzeugen. Interessant ist nun aber auch die Möglichkeit durch entsprechendes akkordisches Spielen gezielt das Spektrum vorzugeben. So ließe sich beispielsweise ein Dur-Hall erzeugen, oder ein Moll-Hall. Die Vorgehensweise ist ähnlich zu den oben genannten „Eingaben von Hand“, nur daß dieser Ansatz hier einfacher – quasi spielerisch – zu bewerkstelligen ist. Bei den monophonen wie auch bei den polyphonen Instrumenten würde durch eine Spektral-Transformation der aufgezeichnete Klang in sein Spektrum und die dazugehörigen Hüllkurven zerlegt werden. Die so ermittelten Parameter werden als Eingabe für den Klavierhall-Algorithmus verwendet, und somit wird ein Nachhall aus dem aufgezeichneten Klang entstehen.
Vorallem der polyphone Ansatz, also einen Nachhall aus einem polyphonen Akkord zu erzeugen ermöglicht wahrscheinlich interessante Ansätze in der Komposition. Ein „Akkord-Raum“ würde nur auf die Töne dieses Akkords nachhallen. Bei Anregung mit z.B. weißem Rauschen würde der „Akkord-Raum“ nicht mit Rauschen antworten, sondern mit seinem Akkord.

Die angegebenen Beispiele sind sicherlich nur der Einstieg in einen völlig neuen Weg Nachhall zu verwenden. Es wird allerdings erforderlich sein, für diesen neuen Weg auch neue Kompositionen anzufertigen, da die bekannten Werke allgemein auf physikalischen, statischen Nachhall zugeschnitten sind. „Musikalischer“ Nachhall ist bislang nicht erzeugbar gewesen, somit öffnet sich mit dem Klavierhall-Algorithmus ein weites Feld des Experimentierens.

Literaturangaben

[1]

Ahnert W., Reichert W.
Grundlagen der Beschallungstechnik, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1981

[2]

Ahnert W., Steffen F.
Beschallungstechnik. Grundlagen und Praxis, S. Hirzel, Stuttgart 1993

[3]

Ahnert W., Feistel R.
EASE, <http://www.ada-acousticdesign.de/easewindows/>

[4]

Albrecht F.-W., Mayer-Fasold C., Veit I.
Beschallungstechnik, Kontakt & Studium Band 194, expert Verlag 1989

[5]

Allen J. B., Berkley D. A.
Image method for efficiently simulating small-room acoustics, Journal of the Acoustical Society of America, 65(4):943–950, April 1979

[6]

Alton E. F.
The Master Handbook of Acoustics, McGraw-Hill 2001

[7]

Ando Y
Architectural Acoustics, Sprinter, AIP Press, 1998

[8]

Ando Y.
Concert Hall, Acoustics Springer Verlag, Berlin 1985

[9]

Ando Y. Noson D. (Editors).
Music & Concert Hall Acoustics, Proceedings from MCHA 1995. Academic Press, London 1997

[10]

Apfel, R.
Deaf Architects and Blind Acousticians? A Guide to the Principles of Sound Design.
New Haven, Connecticut: Apple Enterprises Press, 1998

[11]

Applied Acoustics.
Applied Science Publishers Ltd. London

[12]

Aschoff V.
Hörsaalplanung. Grundlagen und Ergebnisse der Auditorologie. Empfehlung für den Bau von Hörsälen.
Vulkan Verlag 1971

- [13]
Aschoff V.
über die Beschreibung des Echos durch Aristoteles, Fabri Verlag, Ulm/Donau 1993
- [14]
Backus, John
The Acoustical Foundation of Music, London, 1977
- [15]
Bagnal H., Wood A.
Planning for Good Acoustics, London, 1931
- [16]
Ballou, G. (Editor).
Handbook for Sound Engineers, The New Audio Cyclopedia. SAMS, USA, 1991
- [17]
Barron M.
Auditorium Acoustics and Architectural Design, E & FN SPON, London, (2005) 1993
- [18]
Baumann D., Breh K. Flury R., Godel A., Jecklin J.
Mono - Stereo – Quadro, Radio DRS, 1986
- [19]
Begault D,
3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia. Academic Press, Cambridge, Mass., USA, 1994
- [20]
Begault, D. R.
3D Sound for Virtual Reality and Multimedia, AP Professional. Boston 1994
- [21]
Beranek L.
How they Sound - Concert and Opera Halls, Acoustical Society of America, 2nd edition, 2004
- [22]
Beranek L.
Music, Acoustics & Architecture, John Wiley & Sons, New York 1962
- [23]
Berkhout
A Holographic Approach to Acoustic Control, Journal of the AES Vol 36, # 12, Dec 1998
- [24]
Beyer R. T.
Two hundred years of acoustics, Springer, 1999
- [25]
Blauert J.
Räumliches Hören / Räumliches Hören. Nachschrift, S. Hirzel Verlag, Berlin, 1974 und 1985

- [26]
Blauert J.
Spatial Hearing, the Psychophysics of Human Sound Localization. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1997
- [27]
Bobran H., Bobran I.
Handbuch der Bauphysik, Vieweg Braunschweig 1995
- [28]
Borucki, H.
Einführung in die Akustik, Mannheim-Wien-Zürich 1973
- [29]
Breton, Gaelle.
Theater, Karl Krämer Verlag Stuttgart + Zürich 1990
- [30]
Brockhaus, Riemann
Musiklexikon, Piper Schott, Mainz, 1979
- [31]
Brüderlin R.,
Akustik für Musiker. Eine Einführung, Gustav Bosse Verlag, Regensburg.1978, 4.Auflage 1990
- [32]
Campbell M., Greate C.
The Musician's Guide to Acoustics, J.M. Dent & Sons Ltd London, 1987
- [33]
Cavanaugh W. J.
Architectural Acoustics, Principles and Practice, John Wiley & Sons, 1998
- [34]
CD
Dave Moulton's Golden Ear. CD-based audio eartraining course for musicians, engineers and producers
4 Volumes 8 CDs, DELTA Acoustics and Vibration Division, DK-2800 Lyngby Denmark
- [35]]
CD
Auditory Demonstrations IPO - NIU – ASA, Philips 1126-061
- [36]
CD
Audio Demo 3, SUVA, Bereich Akustik, Luzern
- [37]
CD
Anechoic Orchestral Music Recording, Denon PG-6006
- [38]
CD
Music for Archimedes, Bang & Olufson CD B&O 101

- [39]
CD
EBU - Parameters for the subjective Evaluation of the Quality of Sound programme material.
EBU, CH-1218 Grand-Saconnex
- [40]
CD
Max Adam.
Beispiele zur Raum- und Bauakustik, Schweizer Baudokumentation, Blauen, 1985
- [41]
CD
Sethares W. A.,
Tunig, Timbre, Spectrum, Scale, Springer 1997
- [42]
Cowan J.
Architectural Acoustics Design Guide, MCGraw-Hill, 2000
- [43]
Cremer L., Müller H. A.
Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, 2 Bände, S. Hirzel-Verlag, Berlin, 1978
- [44]
Crocker M. J. (Editor).
The Handbook of Acoustics, John Wiley & Sons, New York 1998
- [45]
Crocker M. J. (Editor).
Encyclopedia of Acoustics, Vol. 1 - 4. John Wiley & Sons, New York 1997
- [46]
D&B Audiotechnik
Grundzüge der Akustik und Beschallung, D5400.D.00, 1998
- [47]
D'Antonio P., Cox T.
Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application, Spon Press 2004
- [48]
Dahl L.
A reverberator based on absorbent all-pass filters, in Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00), Verona, Italy, December 2000
- [49]
Dalenbäck B.-I.
CATT-Acoustic. CATT. <http://www.catt.se/>, February 2002
- [50]
Dalenbäck B.-I., Kleiner M., Svensson U. P.
Auralization, virtually everywhere,
In Preprint NO. 4228 of the 100th AES Convention, Copenhagen, Denmark, May 1997
- [51]
Davis D., Davis C.
Sound System Engineering, Second Edition. Howard W. Sams & Co., USA 1987

- [52]
Dickreiter M.
Mikrofon-Aufnahmetechnik, S. Hirzel Verlag Stuttgart, 3. Auflage, 2003
- [53]
Dickreiter M.
Handbuch der Tonstudioteknik, Band 1 & 2 K.G. Saur, München 1987
- [54]
Dickreiter R.
Musikinstrumente. Moderne Instrumente. Historische Instrumente. Klangakustik, dtv/Bärenreiter, 1987
- [55]
DIN 15906.
Tagungsstätten. 2003-05
- [56]
DIN 15996.
Elektronische Laufbild und Tonbearbeitung in Film.
Video- und Rundfunkbetrieben. Anforderungen an den Arbeitsplatz.
- [57]
DIN 18041.
Hörsamkeit in kleinen bis mittleren Räumen.
- [58]
DIN EN ISO 9921
Ergonomie - Beurteilung der Sprachkommunikation (ISO 9921:2003)
- [59]
Diverse Autoren.
Die Physik der Musikinstrumente, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1988
- [60]
Diverse Autoren.
Räume zum Hören, arcus. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1989
- [61]
Diverse Autoren.
Räume für Musik, db deutsche bauzeitung 5/89.
- [62]
Diverse Autoren.
Musik und Raum, GS-Verlag, Basel, 1986
- [63]
Diverse Autoren.
Der hörbare Raum, Daidolos, 1985
- [64]
Diverse Autoren.
Computer Modeling and Auralisation of Sound Fields in Rooms,
Applied Acoustics 38(1993) p. 89-355

- [65]
Diverse Autoren.
Auralisation, J. Audio Eng. Soc. Vol. 41, No 11, Nov. 1993
- [66]
Eargle J., Foreman C.
Audio Engineering for sound reinforcement, Hall Leonard Corporation, USA 2002
- [67]
EBU Tech. 3276 E.
Listening Conditions for the Assessment of Sound Program Material: Monophonic and Two-Channel Stereophony
- [68]
EBU Tech. 3286 E.
Assessment methods for the subjective evaluation of the quality of sound programme materials.
European broadcast union, CH-1218 Grand-Saconnex
- [69]
Ecophone
Don't limit your senses, St. Gobain Ecophone AB 2002
- [70]
Ecophone
Akustik und das moderne Büro AB 1998
- [71]
Eggenschwiler K.,
EMPA Dübendorf, Abteilung Akustik, Vorlesung Raumakustik, Studiengang Architektur, ETH Zürich, 2004
- [72]
EN 12343-6.
Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften
- Teil 6: Schallabsorption in Räumen.
- [73]
EN 60268-16 .
Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2003)
- [74]
EN ISO 11654 * SIA 181.087
Akustik – Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden – Bewertung der Schallabsorption (ISO 11654:1997)
- [75]
EN ISO 17624
Akustik - Leitfaden für den Schallschutz in Büros und Arbeitsräumen durch Schallschirme.
- [76]
EN ISO 3382:2000
Akustik - Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter (ISO 3382:1997)

- [77]
Fasold W., Veres E.
Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, Verlag für Bauwesen, 2003
- [78]
Fasold, W., Kraak, W., Schirmer, W. (Hrsg.)
Taschenbuch Akustik. 2 Bände, VEB-Verlag Technik, Berlin 1984
- [79]
Forsyth M.
Auditoria. Designing for the Performing Art, Mitchell, London, 1987
- [80]
Forsyth M., Dickreiter R. & M.
Bauwerke für Musik. Konzertsäle und Opernhäuser, Musik und Zuhörer vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart, Saur, München 1991
- [81]
Forum Acousticum.
Convention of the European Acoustics Association - EAA.
- [82]
Fuchs H., Zha X., Babuke G.
Schallabsorber und Schalldämpfer, Springer, Berlin 2004
- [83]
Furrer W., Lauber A.
Raum- und Bauakustik, Birkhäuser 1972
- [84]
Gardner W.
Virtual acoustic room. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, 1992
- [85]
Gardner W.
Efficient convolution without input-output delay. Journal of the AES, 43(3):127–136, 1995
- [86]
Gardner W.
Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1998
- [87]
Gardner W.
3-D Audio Using Loudspeakers. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998
- [88]
Gerzon M.
Periphony: Width-height sound reproduction. Journal of the AES, 21(1/2):2–10, 1973
- [89]
Gibbs B. M., Jones D. K.
A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure, Acoustica, 26:24–32, 1972

- [90]
Glogau H.-U.
Der Konzertsaal. Zur Struktur alter und neuer Konzerthäuser, Georg Olms Verlag, Hildesheim, 1989
- [91]
Griesinger D.
Improving room acoustics through time variant synthetic reverberation, homepage-Griesinger
- [92]
Griesinger D.
Spaciousness and envelopment in musical acoustics, homepage-Griesinger
- [93]
Grueneisen P.
Soundspace, Architektur für Ton und Bild, Birkhäuser 2003
- [94]
Haase K., Senf M.
Materialien zur Hörsaalplanung, HIS, Hannover 1995
- [95]
Hall, D. E.
Musikalische Akustik, Schott, 1997
- [96]
Ham R.
Theatres. Planning Guidance for Design and Adaptation, Butterworth Architecture, London, 1988
- [97]
Hanus K.
Raumakustik, Werner Verlag, Düsseldorf 1959
- [98]
Heckl, M.; Müller, H. A
Taschenbuch der Technischen Akustik
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1994
- [99]
Hellbrück J.
Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie, Hogrefe, Göttingen 1993
- [100]
Henle H.
Das Tonstudio Handbuch, GC Carstensen Verlag, München, 2001
- [101]
Huber L., Kahlert J., Klatte M. (Hg)
Die akustisch gestaltete Schule: Auf der Suche nach dem guten Ton, Edition Zuhören Band 3,
Vandenhoeck & Ruprecht, 2002.
- [102]
Hunt F. V.
Origins in Acoustics. The Science of Sound from the Antiquity to the Age of Newton, London, 1978

- [103]
ICA. Internationaler Kongress für Akustik Meeting of the ASA.
Acoustical Society of America, American Institute of Physics, New York
- [104]
Ingard, U.
Sound Absorbing Technology, Noise Control Foundation, Poughkeepsie, NY, 1994
- [105]
internoise.
International Congress on Noise Control
- [106]
Irvine L.K., Richards R.L.
Acoustics and Noise Control Handbook for Architects and Builders, Krieger Publishing, 1998
- [107]
ISO 354.
Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [108]
ISO/FDIS 14257:2001.
Akustik - Messung und Parametrisierung von Schallausbreitungskurven in Arbeitsräumen zum Zweck der Beurteilung der akustischen Qualität der Räume.
- [109]
ISO/TR 4870:1991
Acoustics - The construction and calibration of speech intelligibility tests.
- [110]
Izenour G.C.
Theatre Design, Yale University Press, 1996
- [111]
Jecklin J.
Theorie der Tontechnik, Skriptum, Universität für Musik, Wien, 2003
- [112]
Jordan V.L.
Acoustical Design of Concert Halls and Theatres, Applied Science Publishers, London, 1980
- [113]
Jot J.-M., Warusfel O.
A spatial processor for musicians and sound engineers, in Proceedings of Colloquium on Musical Informatics, Ferrara, Italy, May 1995
- [114]
Jot J-M.
Real-time spatial processing of sounds for music, multimedia and interactive human-computer interfaces. Multimedia Systems, 7:55–69, 1999

- [115]
 Jot J-M.
 An analysis/synthesis approach to real-time artificial reverberation.
 In IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 1992, pages II 221–II 224, San Francisco, California, USA, 1992
- [116]
 Jot J-M.
 Efficient models for reverberation and distance rendering in computer music and virtual audio reality, in Proceedings of the International Computer Music Conference, Thessaloniki, Greece, September 1997
- [117]
 Jot J-M., Chaigne A.
 Digital delay networks for designing artificial reverberators. In AES preprint 3030 (E-2). Presented at the 90th AES Convention, pages 1–14, Paris, 1991
- [118]
 Jot J-M., Larcher V., Warusfel O.
 Digital signal processing issues in the context of binaural and transaural stereophony, presented at the 98th AES convention., AES preprint 3980 (I6), Paris, February 1995
- [119]
 Jot J-M., Warusfel O.
 A real-time spatial sound processor for music and virtual reality applications, in Proceedings of the International Computer Music Conference, pages 294–295, Banff, Canada, September 1995
- [120]
 Jouhaneau J.
 Acoustique des salles et sonorisation, TEC & DOC Lavoisier, Paris 1997
- [121]
 Kalawsky R. S.
 The Science of Virtual Reality, Addison-Wesley. Wokingham, England, 1993
- [122]
 Kang J.,
 Acoustics of long spaces, Thomas Telford Publishing, 1998
- [123]
 Karlen R., Honegger A., Zelger-Vogt M.
 Ein Saal in dem es herrlich klingt. Hundert Jahre Tonhalle Zürich, Verlag Neue Zürich Zeitung, 1995
- [124]
 Keibs, L., Kuhl, W.,
 Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig, Acustica 9, 1959, S.365
- [125]
 Klotz, H.
 Das Buch von der Orgel, Bärenreiter-Verlag, Kassel, 1938, 1994
- [126]
 Knudsen H.
 Acoustical Designing in Architecture, John Wiley & Sons, New York 1968

- [127]
Knufike Ch.
<http://www.knufinke.de/sir/>
- [128]
Koh, Hyo-In
Hörbarkeit veränderter Raum-Impulsantworten, Magisterarbeit TU Berlin Fb01, 2001
- [129]
Kuttruff H.
Room Acoustics, Applied Science Publishers, 4th Edition, London 2000
- [130]
Kuttruff H.,
Akustik - Eine Einführung., Hirzel, Stuttgart 2004
- [131]
Kuttruff K. H.
Auralization of impulse responses modeled on the basis of raytracing results.
Journal of the AES, 41(11):876–880, 1993
- [132]
Lips, W.
Akustik für den Heizungs-, Lüftungs- und Klimaingenieur,
Anhang A: Tabelle Schallabsorptionskoeffizienten. Eigenverlag, W. Lips, Emmenbrücke
- [133]
Loewer V.
ULYSSES, <http://www.ifbcon.de/software/ulysses/>
- [134]
Lokki T.
Physically-based Auralization: Design, Implementation, and Evaluation.
PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, November 2002
- [135]
Lokki T., Hiipakka J., Savioja L.
A Framework for evaluating virtual acoustic environments,
in Preprint No. 5317 of the 110th AES Convention., Amsterdam, Netherlands, May 2001
- [136]
Lottermoser W.
Orgeln, Kirchen und Akustik, Band 1 und 2, Verlag das Musikinstrument, Frankfurt, 1983
- [137]
Lyngé C.
ODEON Room Acoustics Software. Brüel & Kjaer,
<http://www.dat.dtu.dk/odeon/>, October 2001
- [138]
Mackenzie R. (Editor).
Auditorium Acoustics, Applied Science Publishers Ltd, London 1975
- [139]
Maekawa Z., Lord P.y
Environmental and Architectural Acoustics, E&FN Spon, London 1994

- [140]
Malham D.G., Myatt A.
3-D sound spatialization using ambisonic techniques, *Computer Music Journal*, 19(4):58–70, 1995
- [141]
McCue E., Talaske R. H. (Editors)
Acoustical Design of Music Education Facilities, ASA, 1990
- [142]
Mechel, F.P.
Schallabsorber.
Band 1: äussere Schallfelder, Wechselwirkungen, S. Hirzel, Stuttgart 1989
Band 2: Innere Schallfelder – Strukturen, S. Hirzel, Stuttgart 1995
Band 3: Anwendungen, S. Hirzel, Stuttgart 1998
- [143]
Mehta M., Johnson J., Rocafort J.
Architectural Acoustics. Principles and Design, Prentice Hall, 1999
- [144]
Meyer J.
Akustik und musikalische Aufführungspraxis, Verlag das Musikinstrument, Frankfurt am Main, 3.Auflage 1995
- [145]
Meyer, J.
Kirchenakustik, Bochinski 2002
- [146]
Meyer, J.
Raumakustik und Orchesterklang. Zur Aufführungspraxis der Sinfonien Joseph Haydns, *Acustica* 41, 1978, 145-162
- [147]
Møller H.
Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36:171–214, 1992
- [148]
Møller H., Hammershøi D.
HRTFs for binaural synthesis
Proceedings of NORSIG'98 : 3rd IEEE Nordic Signal Processing Symposium, June 8-11, 1998
- [149]
Møller H., Hammershøi D.
Precise measurement of HRTFs for better auralization
Proceedings of International Symposium on Simulation, ASVA 97, April 2-4, 1997
- [150]
Møller H., Jensen C., Hammershøi D., Sørensen M.
Evaluation of artificial heads in listening tests
Proceedings of 102nd AESociety Convention, Munich, Germany, March 22-27, 1997
preprint 4404, pp. 1-32.

- [151]
Moore F. R.
A general model for spatial processing of sounds. *Computer Music Journal*, 7(3):559–568, 1983
- [152]
Moore J. E.
Design for Good Acoustics and Noise Control, MacMillan Education Ltd, 1988
- [153]
Moorer J. A.
About this reverberation business. *Computer Music Journal*, 3(2):13–28, 1979
- [154]
Morfey, Ch.
Dictionary of Acoustics, Academic Press, London 2001
- [155]
Müller, G., Möser M. (Hrsg.),
Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer-Verlag, Berlin 2004. 3., erweiterte Auflage
- [156]
N. H. Fletcher, T. D. Rossing
The Physics of Musical Instruments. Springer, New York, 1991.
- [157]
Neufert, E.
Bauentwurfslehre, 37. Auflage, Vieweg, 2003
- [158]
Oppenheim, Schafer
Digital Signal Processing, Prentice-Hall, 1975
- [159]
Oppenheim, Schafer
Zeitdiskrete Signalverarbeitung, Oldenbourg, München Wien, 1999
- [160]
Pierce J.R.
Klang. Musik mit den Ohren der Physik, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1985
- [161]
Polack J.-D., Meynial X., Grillon V.
Auralization in scale models: Processing of impulse response, *Journal of the AES*, 41(11):939–945, 1993
- [162]
Pulkki V., Lokki T., Savioja L.
Implementation and visualization of edge diffraction with image-source method, in Preprint No. 5603 of the AES 112th Convention, Munich, Germany, May 2002
- [163]
Reichhardt W.
Gute Akustik aber wie?, Verlag Technik, Berlin, 1979

- [164]
Rieländer
Reallexikon der Akustik, 1982
- [165]
Rocchesso D., Smith J. O.
Circulant and elliptic feedback delay networks for artificial reverberation. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 5(1):51–63, January 1997
- [166]
Rocchesso D., Smith J. O.
Connections between feedback delay networks and waveguide networks for digital reverberation. In Proceedings of the International Computer Music Conference, pages 376–377, 1994
- [167]
Rocchesso, Smith
Circulant Feedback Delay Networks for Sound Synthesis and Processing, ICM Proceedings 1994
- [168]
Roederer, J. G.
Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik, Springer Verlag, 2000
- [169]
Römer C.
Schall und Raum, Eine kleine Einführung in die Raumakustik, vde verlag, Berlin, 1994
- [170]
Sabine W. C.
Collected Paper on Acoustics, Peninsula Publishing, Los Altos, California 1992
- [171]
Sàenz A.L., Arranz A.M. (Editors).
Proceedings of the International Conference on Acoustical Quality of Concert Halls. State of the Art and Research Trends, Spanish Acoustical Society, 1994
- [172]
Salter Ch. M. Assoc. Ing.
Acoustics. Architecture - Engineering - The Environment, William Stout Publishers. San Francisco 1998
- [173]
Savioja L.
Modeling Techniques for Virtual Acoustics, PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, December 1999
- [174]
Savioja L., Huopaniemi J., Lokki T., Väänänen R.
Virtual environment simulation – Advances in the DIVA project. An International Conference on Auditory Display (ICAD'97), November 1997
- [175]
Schlu M.
Kompositionstechnik und Aufführungspraxis mehrhöriger Werke der venetianischen Spätrenaissance dargestellt am Beispiel Giovanni Gabrielis in San Marco/Venedig
Überarbeitete Staatsarbeit, Bonn 1984/2000

- [176]
Schmidt H.
Schalltechnisches Taschenbuch, VDI Verlag, Düsseldorf 5. Aufl.1996
- [177]
Schneider, W.
Sinn und Un-Sinn. Umwelt sinnlich erlebbar gestalten in Architektur und Design.
Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1987
- [178]
Schricker, R.
Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer, DVA, Stuttgart 2001
- [179]
Schricker, R.
Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer, DVA, Stuttgart 2001
- [180]
Schroeder M. R.
Natural sounding artificial reverberation.
Journal of the AES, 10(3):219–223, 1962
- [181]
Schroeder M.R., Logan B.F.
Colorless artificial reverberation
IRE Transactions, vol. AU-9, pp. 209-214, 1961
- [182]
Schroeder M. R., Atal B. S.
Computer simulation of sound transmission in rooms, in IEEE International Convention Record (7).
New York: IEEE Press.
- [183]
Schroeder, M. R.
Diffuse sound reflection by maximum-length sequences.
J. Acoust. Soc. Am. 57, 1975
- [184]
Schroeder, M. R.
Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion.
J. Acoust. Soc. Am. 65, 1979
- [185]
Sendra J. J. (Editor)
Computational Acoustics in Architecture, WIT Press 1999
- [186]
SGA.
Beschallungsanlagen für Sprache. Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften.
Schweizerische Gesellschaft für Akustik, 2001
- [187]
Shea M., Alton E. F.
How to Build a Small Budget Recording Studio, McGrawHill, 2002

- [188]
Skoda R.
Das Gewandhaus Leipzig, Ernst, Leipzig 1986
- [189]
SUVA
Raumakustische Richtwerte für Arbeitsräume.
SUVA, 6002 Luzern. Nr. 86048/1
- [190]
SUVA
Akustische Richt- und Grenzwerte II.
SUVA, 6002 Luzern. Nr. 86048/2.
- [191]
Talaske R. H., F R. E. (Editors).
Theatres for Drama and Performance, Recent Experience in Acoustical Design.
Acoustical Society of America, 1989
- [192]
Talaske R. H., Wetherill E. A., Cavanaugh W. J. (Editors)
Halls for Music Performance Two Decades of Experience 1962-1982 ASA, 1982
- [193]
Taylor Ch.
Der Ton macht die Musik. Die Wissenschaft von Klängen und Instrumenten, Vieweg, Braunschweig
1994
- [194]
Templeton, T. (Editor)
Acoustics in the Built Environment, Advice for the Design Team, Butterworth Architecture, Oxford
1993
- [195]
Terhardt, E.
Grundlagen der akustischen Kommunikation, Springer 1998
- [196]
The Journal of the Acoustical Society of America (JASA).
Acoustical Society of America, American Institute of Physics, New York Building Acoustics Multi
Science Publishing, Brentwood Essex
- [197]
Thiele G., Plenge G.
Localization of lateral phantom sources. Journal of the AES, 25(4):196–200, April 1977
- [198]
Thompson E.
The soundscape of modernity, MIT Press Cambridge, Massachusetts, 2000
- [199]
Tohyama, M, Suzuki Y., Ando Y.
The nature and technology of acoustic space, Academic Press, San Diego CA, 1995

- [200]
Ullmann D.
Chladni und die Entwicklung der Akustik von 1750-1860, Birkhäuser, Basel 1996
- [201]
VDI 2569
Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro. 1990
- [202]
VDI 3760
Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen. 1996
- [203]
VDI.
Schallausbreitung in Werkhallen; Schallschutz durch raumakustische Massnahmen, VDI-Bericht Nr. 860, VDI-Verlag 1990
- [204]
VDI.
Neue Technologien und Materialien zum Schallschutz, VDI-Bericht Nr. 437. VDI-Verlag 1982
- [205]
Veit, I.
Technische Akustik, Würzburg, 1988
- [206]
Webers J.
Tonstudioteknik, Franzis-Verlag, München, 1987
- [207]
Weinzierl S.
Beethovens Konzerträume, Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis. Bochinsky 2001
- [208]
Wiedefeld J.
Akustik in Mehrzwecksälen, Schrifttum Holz, Düsseldorf 1961
- [209]
Wisniewski E.
Die Berliner Philharmonie und ihr Kammermusiksaal, Gebr. Mann Verlag Berlin 1993
- [210]
Xiang N., Blauert J.
Binaural scale model for auralization and prediction of acoustics in auditoria,
Applied Acoustics, 38:267–290, 1993
- [211]
Zollner M, Zwicker E.
Elektroakustik, Hochschultexte, Springer-Verlag, 1993
- [212]
Zwicker E.
Psychoakustik, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1982

[213]

Zwicker E., Feldtkeller R.

Das Ohr als Nachrichtenempfänger, Hirzel-Verlag, Stuttgart, 1967

Danksagung

Mein großer und herzlicher Dank gilt Prof. Dr. Manfred Krause, der mir die Chance gegeben hat, bei ihm promovieren zu dürfen. Ich habe ihn im Herbst 1989 in Berlin kennengelernt und ihm meine Ideen zum Thema virtuelle Akustik und Klangverarbeitung vorgetragen. Seine Antwort war kurz und einprägsam: „Sie treten offene Türen ein, fangen Sie an“. Nach etlichen nicht fruchtbaren Ansätzen und intensiven Diskussionen kam die Idee zum Klavierhall erst im Frühling 1997 bei einem Besuch in seinem „Häuschen“ in Nienhagen. Nachdem Ausräumen der numerischen (Rauschen) und topologischen Probleme in der Softwaresimulation kamen Ende Mai 2003 die ersten wirklich brauchbaren Nachhalle zu Tage. „Mensch, das is‘ es doch!“ rief er mir zu, „schreiben Sie zusammen.“ Voller Euphorie machte ich mich ans Werk um noch größere Räume und Kirchen zu simulieren, als am 17. Juni 2003 seine Abschieds-Email vollkommen unerwartet bei mir eintraf. Ich hatte noch das Glück ihn am 2. August 03 in Berlin besuchen zu können. Obwohl es für ihn sehr anstrengend war, sprachen wir nur über das Klavierhall-Thema und was man noch daraus machen könnte. Einen Tag später verstarb er in seiner Wohnung.

Professor Krause hatte für mich stets ein offenes Ohr für die diversen akustischen Probleme. Und er hatte immer einen Rat oder eine Idee, was ich anstellen sollte, um diese Probleme zu umgehen. Er hat den Begriff „Doktorvater“ ausgesprochen wörtlich genommen. Somit bedanke ich mich ganz herzlich für die „Vater“-rolle bei meiner Doktorarbeit. Es war eine anstrengende Zeit, aber auch die kreativste Zeit, die ich bisher erlebt habe. Nochmals vielen Dank für die zusammen verbrachten Tage.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei Frau Dr. Hanna Krause bedanken, die bei unseren Nienhagener Treffen dafür gesorgt hat, daß wir ausreichend Nahrung und Sauerstoff zu uns genommen haben, und außer den „dienstlichen“ Gedanken auch die Dinge um uns herum (Natur, Garten, Blumen etc.) wahrnehmen durften. Die Nienhagener „brainstormings“ vermisse ich schon jetzt.

Nach seinem Tod hat Frau Prof. Dr. de la Motte die Weiterführung der Arbeit ohne Zögern übernommen, wofür ich mich sehr herzlich bei ihr bedanke. Zusammen mit dem Nachfolger von Prof. Krause, Herrn Prof. Dr. S. Weinzierl schließe ich die Arbeit ab. Für seine Bereitschaft als Gutachter zu wirken, bedanke ich mich auch bei ihm sehr herzlich.

Bei meiner Frau Monika und meinen Eltern bedanke ich mich dafür, daß sie mir den Rücken freigehalten haben, wenn ich arbeitswütig war, und daß sie mir selbigen gestärkt haben, wenn die Sache wieder einmal nicht weitergehen wollte.

Robert D. Bösnecker

Anhang

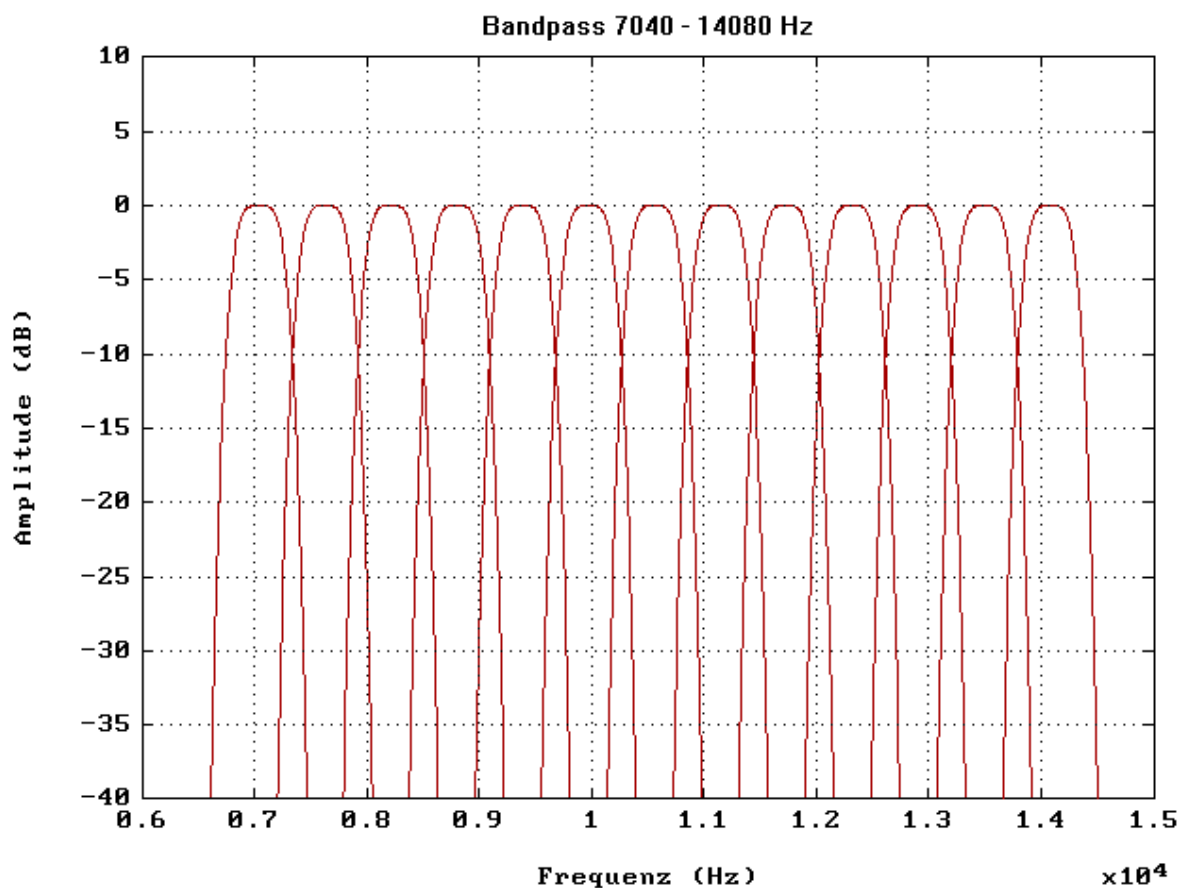
Verwendete Untermodule der Signalverarbeitung

Bandpass Filterbank

Um für die Frequenz- und Amplituden-Modulation die entsprechenden Parameter zu finden, wird zunächst weißes Rauschen durch eine Filterbank geschickt. Die Filterbank teilt die Oktave in 12 gleichmäßige Bänder auf.

Das Eingangssignal (weißes Rauschen) liegt in Mono mit einer Auflösung von 16 Bits vor. Die Samplingfrequenz beträgt 44100 Hz.

Dieses Originalsignal wird durch folgende Filterbank geschickt:

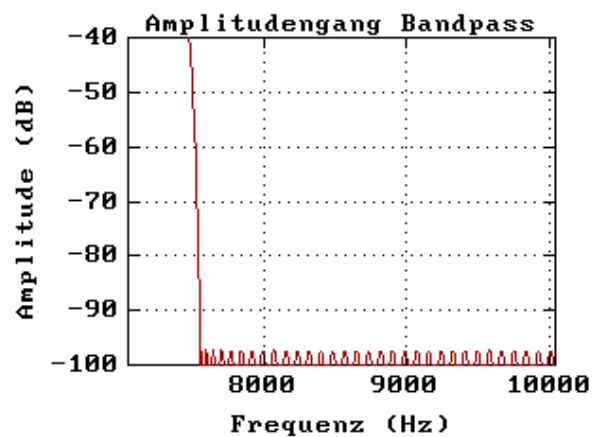
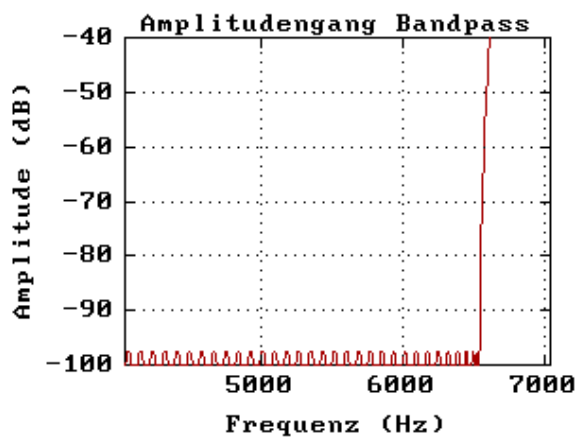
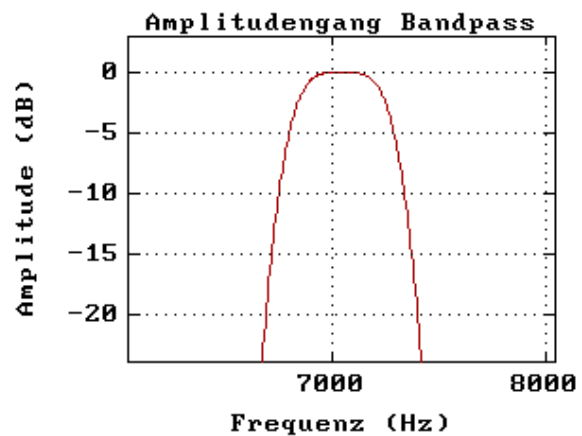
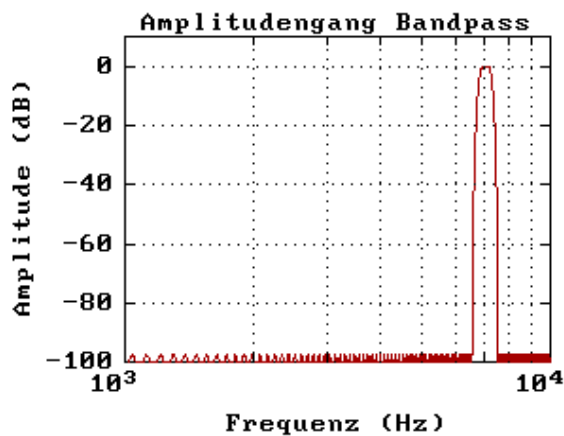


Die 12 Bandpässe stehen in äquidistantem Abstand zueinander und teilen die Oktave von 7040 Hz bis 14080 Hz in 12 Teile ein. Dabei wird weder die reine Stimmung noch die temperierte Stimmung herangezogen. Die Centerfrequenzen der Bandpässe richten sich rein nach der mathematischen Einteilung der Oktave in 12 Teile. Somit ergeben sich die Centerfrequenzen wie folgt:

Centerfrequenzen der Filterbank:

Tonhöhe	mathematisch	rein	temperiert	
A	7040	7040	7040	Hz
B	7627	7600	7459	Hz
H	8213	7920	7902	Hz
C	8800	8448	8372	Hz
Cis	9387	8800	8870	Hz
D	9973	9504	9397	Hz
Dis	10560	10144	9956	Hz
E	11147	10560	10548	Hz
F	11733	11264	11175	Hz
Fis	12320	11744	11840	Hz
G	12907	12672	12544	Hz
Gis	13493	13504	13290	Hz
A'	14080	14080	14080	Hz

Beispiel für den Bandpass A bei 7040 Hz:



Die Trennschärfe ist bei diesem und allen anderen BandpassFiltern besser als 90 dB.

Aus der höchsten Oktave werden die Bandpässe der niederen Oktaven abgeleitet.

	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
	8	4	2	1	0	A	B	C	D
A ^c	55	110	220	440	880	1760	3520	7040	14080
GIS	53	105	211	422	843	1687	3373	6746	13493
G	50	101	202	403	807	1613	3227	6454	12907
FIS	48	96	192	385	770	1540	3080	6160	12320
F	46	92	183	367	733	1467	2933	5866	11733
E	44	87	174	348	697	1393	2787	5574	11147
DIS	41	82	165	330	660	1320	2640	5280	10560
D	39	78	156	312	623	1247	2493	4986	9973
CIS	37	73	147	293	587	1173	2347	4694	9387
C	34	69	138	275	550	1100	2200	4400	8800
H	32	64	128	257	513	1027	2053	4106	8213
B	30	60	119	238	477	953	1907	3814	7627
A	28	55	110	220	440	880	1760	3520	7040

Tabelle der Bandpass-Centerfrequenzen:
(Alle Frequenzen gerundet in [Hz])

Das Hall-Klavier umfaßt mit dem Frequenzbereich von 28Hz bis 14080Hz also 9 Oktaven mit insgesamt 108 Tönen.

Nachdem die 108 Bandpassfilter das weiße Rauschen in 108 Teiltöne zerlegt haben, wird empirisch die Parameterbestimmung für die FM- und AM-Modulation vorgenommen.

In zahlreichen Hörversuchen wird der Abgleich zwischen Bandpass-Rauschen und Sinus-Synthese vorgenommen. Das Ergebnis wird in einer Tabelle abgelegt und der Synthese-Software als Grundlage zur Verfügung gestellt.

FM/AM Modulations-Parameter

Die für die FM/AM-Modulation der Sinusgeneratoren Parameter sind in Tabellenform dargelegt. Im folgenden ist ein Ausschnitt aus dieser Tabelle gezeigt. Die Parameter wurden empirisch ermittelt.

```

FRQ  nnn  sss  sinus.seek  sinus.freq  sin.dev  FMdur  FMdev  AMdur  AMdev  Amplitu
.
.
FRQ  002  000  00200.0000  206.600000  0.250  5800  2400  2980  1600  1.00000
:      001  00200.0000  206.775600  0.250  5800  2400  2980  1600  1.00000
.
.

```

Diese Zeilen bestimmen die Parameter eines Sinusbandpasses um 206 Hz. Die Einheit für die Duration (dur) und die Deviation (dev) sind [Samples] bezogen auf 44.1kHz Abtastfrequenz. Alle anderen Zahlen sind Absolutwerte. Die Software bezieht aus dieser Tabelle die Einstellung zur Simulation eines „Sinus-basierten“ Bandpasses. Im obigen Beispiel werden zwei Generatoren verwendet um einen Bandpass bei 206Hz zu simulieren (nnn=002).

Sinus-Interpolation

Zur Modulation der Frequenz, der Amplitude und der Phase wird die Sinus-Interpolation verwendet. Die Parameter der Modulation sind

- die Frequenz (angegeben als Zeitdauer in [Samples])
- die Frequenzabweichung (angegeben als Zeitdauer in [Samples])
- die Stärke (angegeben als Wert zwischen 0 und 1)

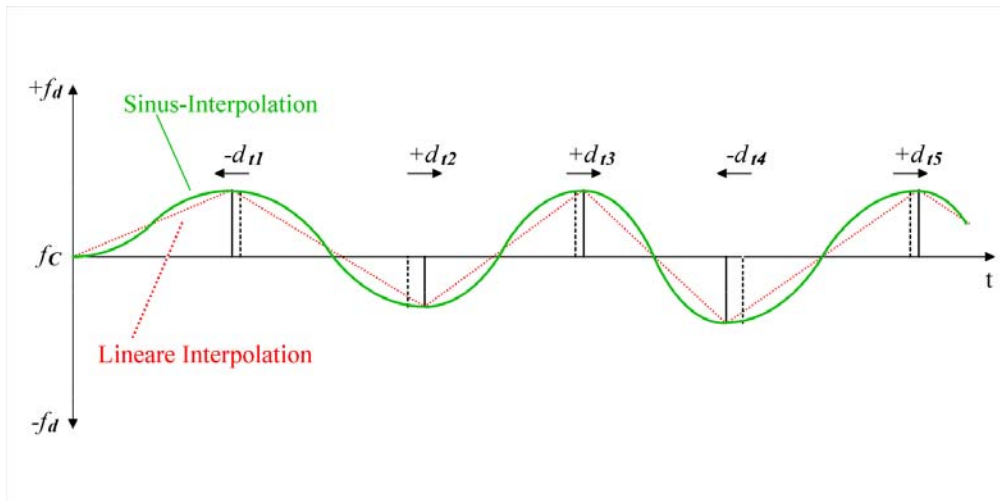


Abbildung: Vergleich zwischen linearer und Sinus-Interpolation

Die Sinus-Interpolation ist eine einfache Möglichkeit vollkommen knackfrei zwischen zwei Stützwerten zu interpolieren.

Bei der linearen Interpolation tritt an jeder Stützstelle eine Nicht-Linearität auf, da die Steigung der ankommenden und abgehenden Hüllkurve ungleich ist. Diese „kleinen“ Knackser sind bei einer einzigen Hüllkurve in Abhängigkeit der Stützstellenfolge als leises Knistern zu hören. Bei gleichzeitiger Verwendung vieler Hüllkurven summiert sich das Fehlersignal zu einem deutlich wahrnehmbaren Rauschen.

Abhilfe schafft hier eine Funktion, deren Steigung an den Stützstelle gleich Null sein kann. Der Sinusbogen zwischen $-\pi/4$ und $+\pi/4$ leistet dies. Mit Hilfe skalierten Sinusbögen ist es möglich eine Interpolation ohne Knackser zu erzeugen. Auch bei der Summation vieler Hüllkurven tritt das Interpolationsrauschen nicht auf.

Hüllkurven Folger

Dieser Algorithmus wurde entwickelt, um das Nutzsignal eines Audiosample spektral zu zerlegen, und danach die Hüllkurve der Teilbänder zu bestimmen. Diese Hüllkurven sollten als zeitbestimmende Elemente der Sinus-Generatoren des Klavierhalls dienen und den Nachklang steuern.

Dieses Verfahren stellt jedoch eine zu hohe Anforderung an die Rechenleistung dar und ist deswegen (zu Gunsten der Faltung) nicht um Einsatz gekommen.

Statt dessen werden die Hüllkurven des Klavierhalls direkt pro Sinusgenerator in das Nachhall-Sample gerechnet. Die anschließende Faltung mit dem Nutzsignal (z.B. Stimme, Instrumente etc.) errechnet dann das Ausgangssignal.

Der Hüllkurvenfolger (GEV-Algorithmus, GEV = Gated Envelope)) wird an einem Beispiel erklärt und arbeitet wie folgt:

Zuerst wird das zu verhallende Nutzsignal (hier ein kurzes Audio-Sample) mit Hilfe der Oktavfilterbank in 9 Oktaven zu je 12 Einzelbändern aufgespalten.

Das Audiosample „Drums“ ist ein kurzer 4/4 Beat, gespielt von einer Bassdrum, einer Snare und einer Hi-hat. Das Sample ist trocken (ohne Effekte) aufgenommen.

Envelope Berechnung

Am Beispiel dieses Samples wird der GEV Envelope Algorithmus erklärt.

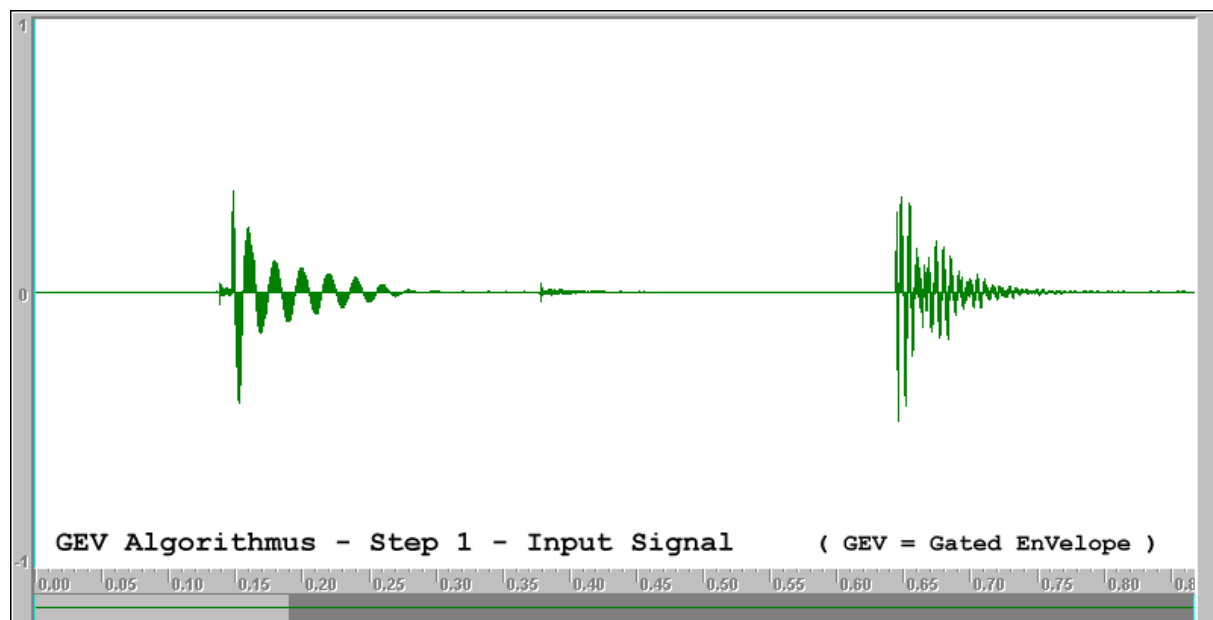


Abbildung: Eingangssignal in Mono (Bassdrum, Hi-hat, Snare)

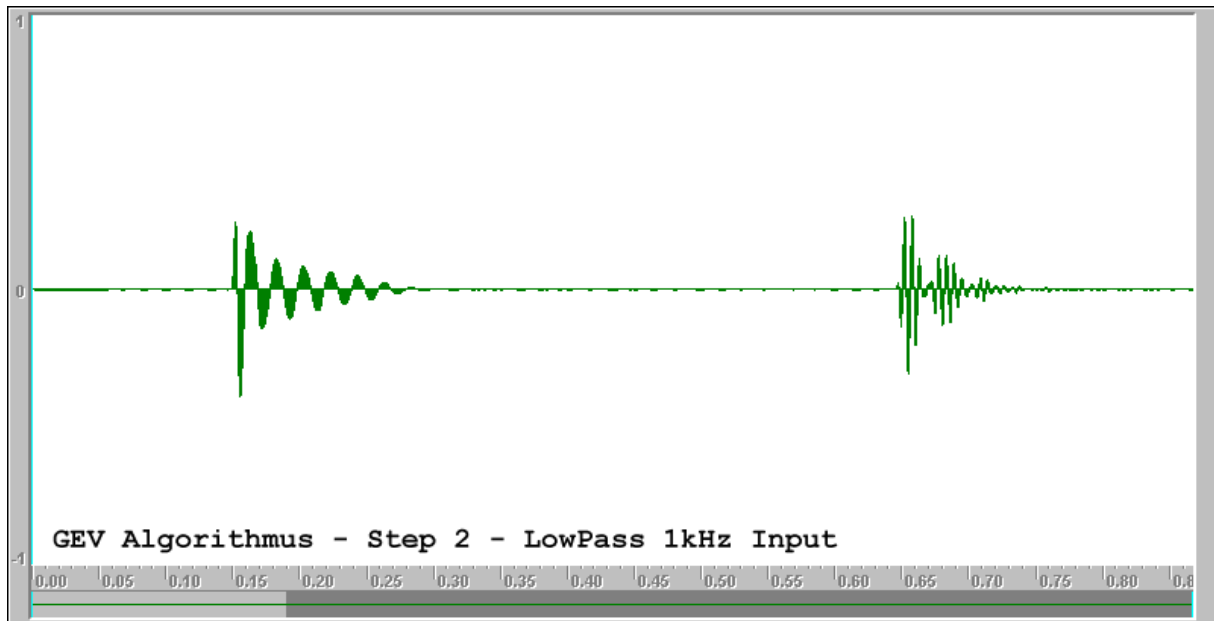


Abbildung: Tiefpass Filterung

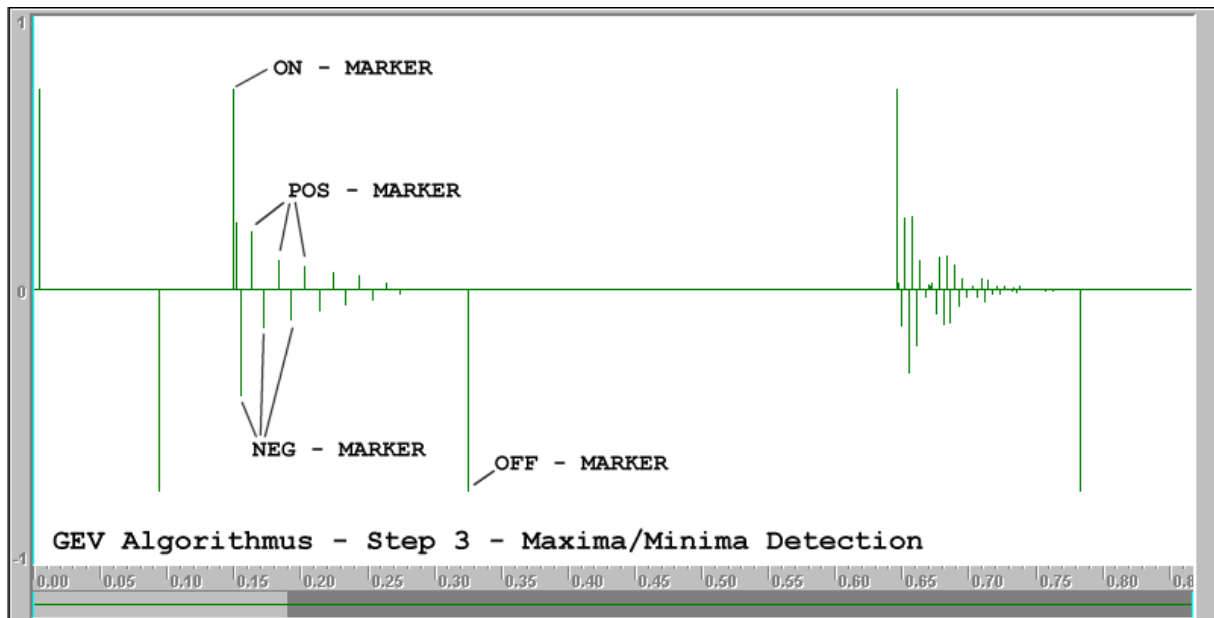


Abbildung: Maxima/Minima Detektion anhand erster Ableitung
Zusätzlich Gate um Störsignale zu unterdrücken.

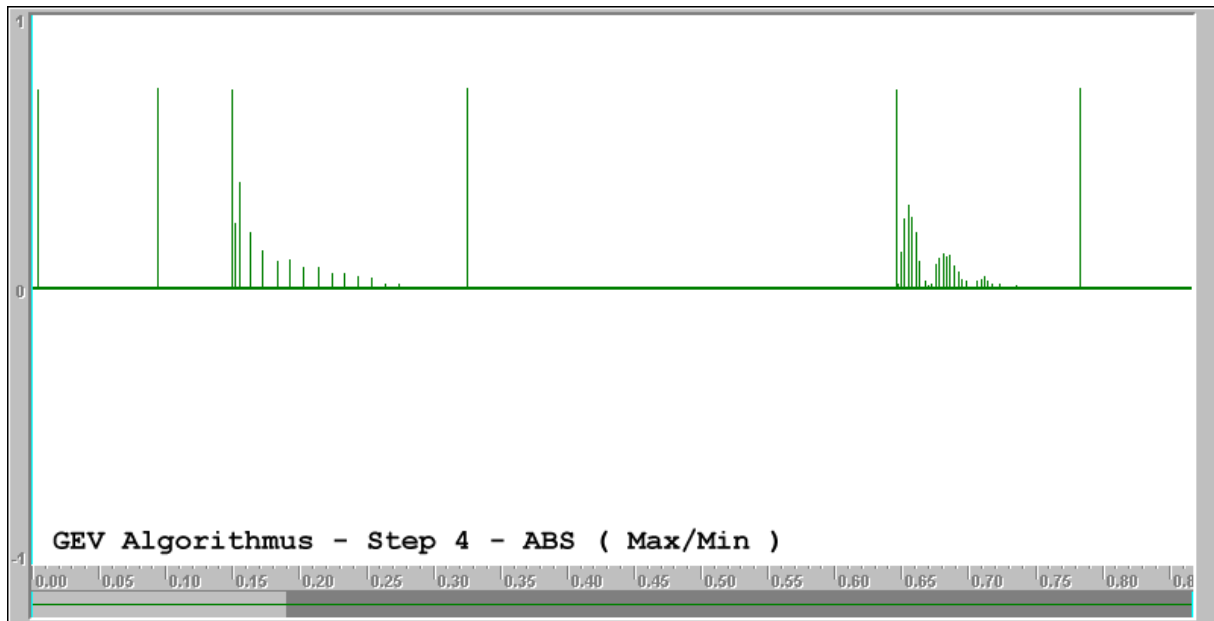


Abbildung: Absolut-Betragsbildung

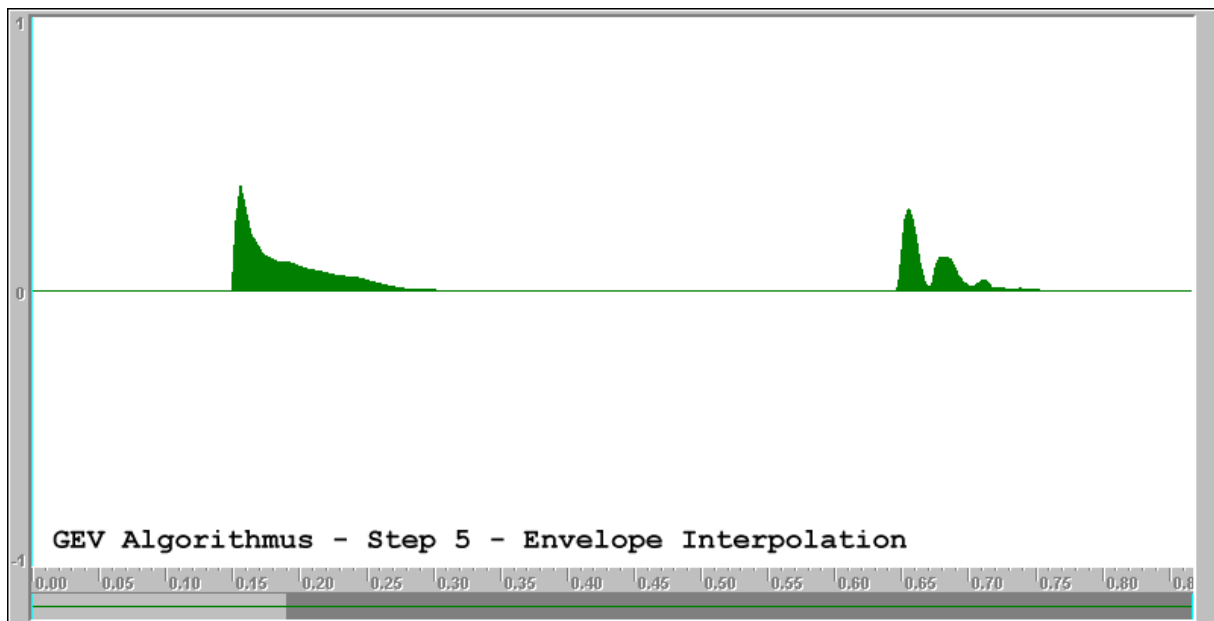


Abbildung: Lineare Interpolation zwischen den Maxima/Minima

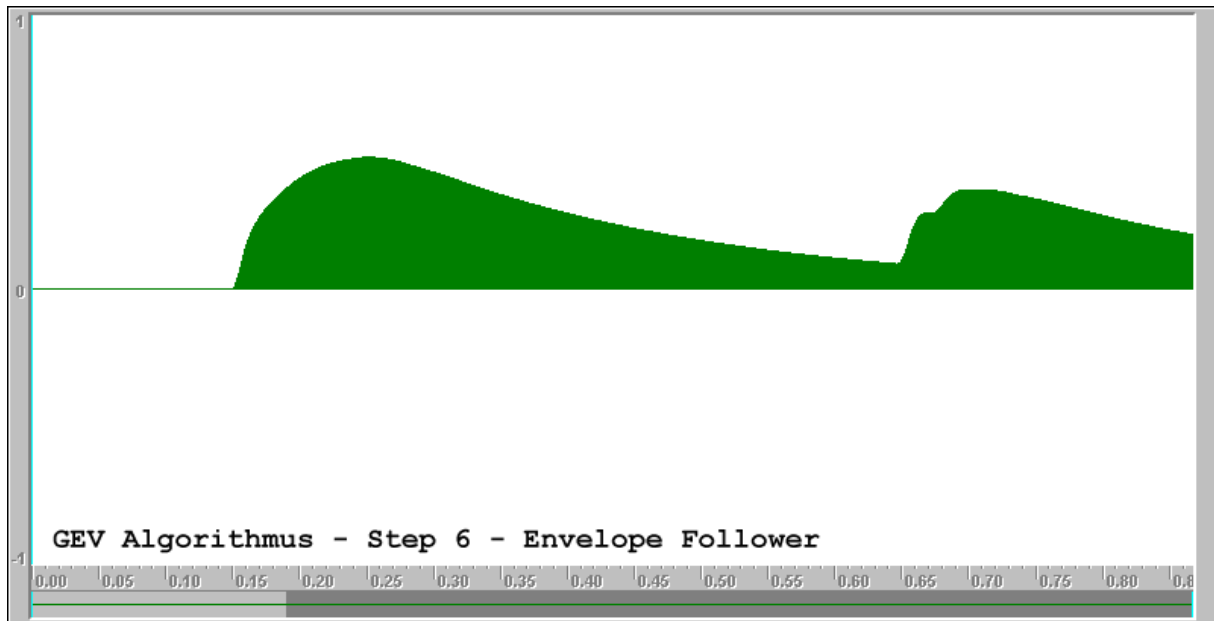


Abbildung: Hüllkurven-Folger (lange)

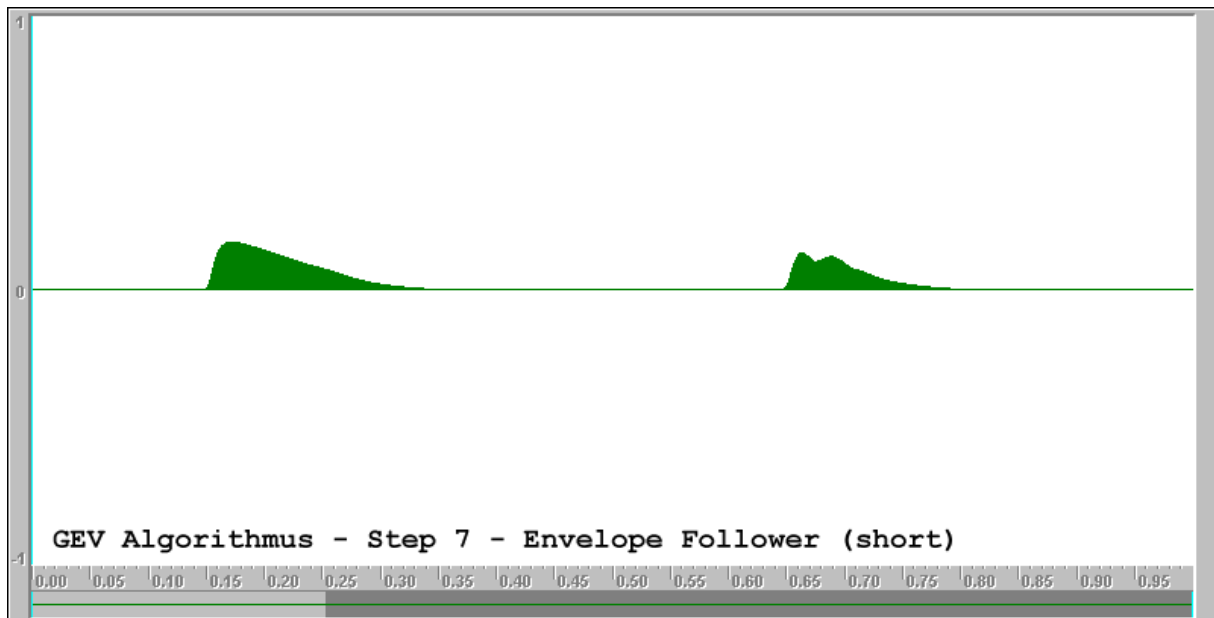


Abbildung: Hüllkurven-Folger (kurze Zeitkonstante)

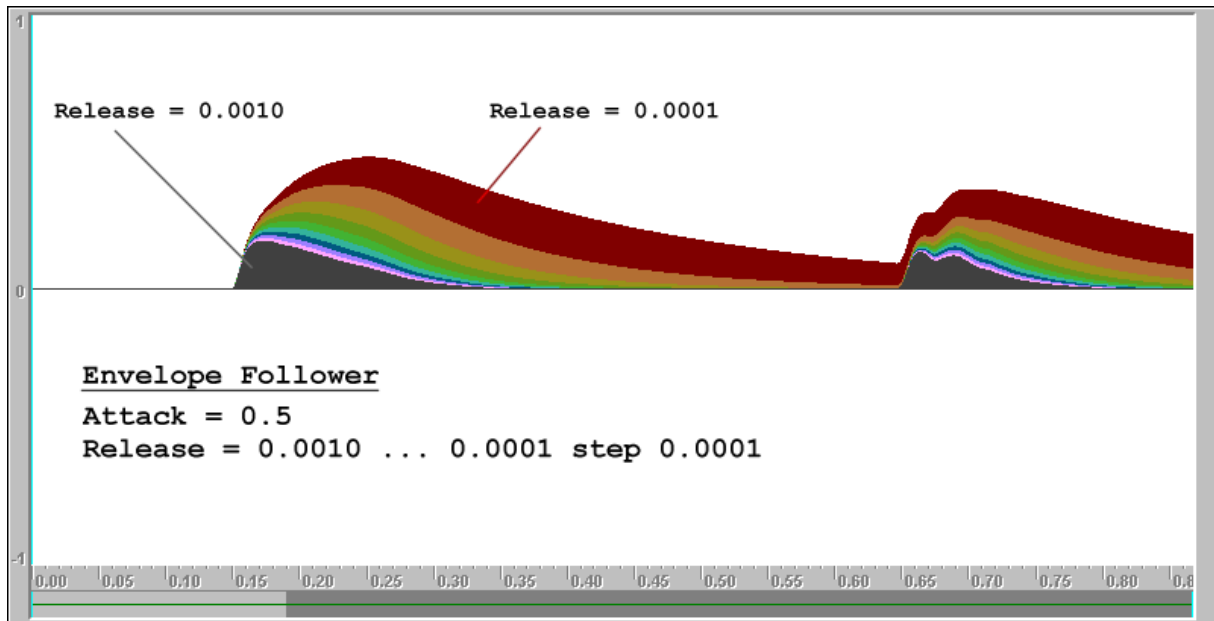


Abbildung: Hüllkurven-Folger (verschiedene Zeitkonstante)

IIR-Filter

Für den Twinpass-Algorithmus werden IIR-Filter der Ordnung 1 bis 4 zu Verfügung gestellt. Diese Menge an Filter-Koeffizienten-Daten ist in einer Datei angelegt. Das Dateiformat besteht aus Schlüsselworten und den zugeordneten Werten. Die gesamte Datei für Tiefpass- bzw. Hochpass-Filter ist im Textformat abgelegt. Die Dateien sind ASCII-Dateien mit der Endung .COE (für Coefficients)

Datensatz

Hier ein Auszug aus der Datei LOWPASS.COE

```
** LOWPASS 1ST ORDER *****
BUTTER 1
LOWPASS 19947.0
RIPPLE 0.0
A 1.0000000000
A 0.7376668488
B 0.8688334244
B 0.8688334244
CHEBY 1
LOWPASS 19947.0
RIPPLE 0.5000000000
A 1.0000000000
A 0.8998132404
B 0.9499066202
B 0.9499066202
...
** LOWPASS 2ND ORDER *****
BUTTER 2
LOWPASS 19947.0
RIPPLE 0.0
A 1.0000000000
A 1.5808682546
A 0.6546097208
B 0.8088694939
B 1.6177389877
B 0.8088694939
...
** LOWPASS 3RD ORDER *****
BUTTER 3
LOWPASS 19947.0
RIPPLE 0.0
A 1.0000000000
A 2.4027574425
A 1.9710428416
A 0.5479099527
B 0.7402137796
B 2.2206413388
B 2.2206413388
B 0.7402137796
...
** LOWPASS 4TH ORDER *****
BUTTER 4
LOWPASS 19947.0
RIPPLE 0.0
A 1.0000000000
A 3.2182862421
A 3.9461361669
A 2.1776545250
```

```

A 0.4554133939
B 0.6748431455
B 2.6993725820
B 4.0490588730
B 2.6993725820
B 0.6748431455
...

```

Schlüsselworte

```

BUTTER [Ordnung]
LOWPASS [Eckfrequenz in Hz]
RIPPLE [Welligkeit in dB]
A [Koeffizienten A0, A1, ... ]
B [Koeffizienten B0, B1, ... ]

```

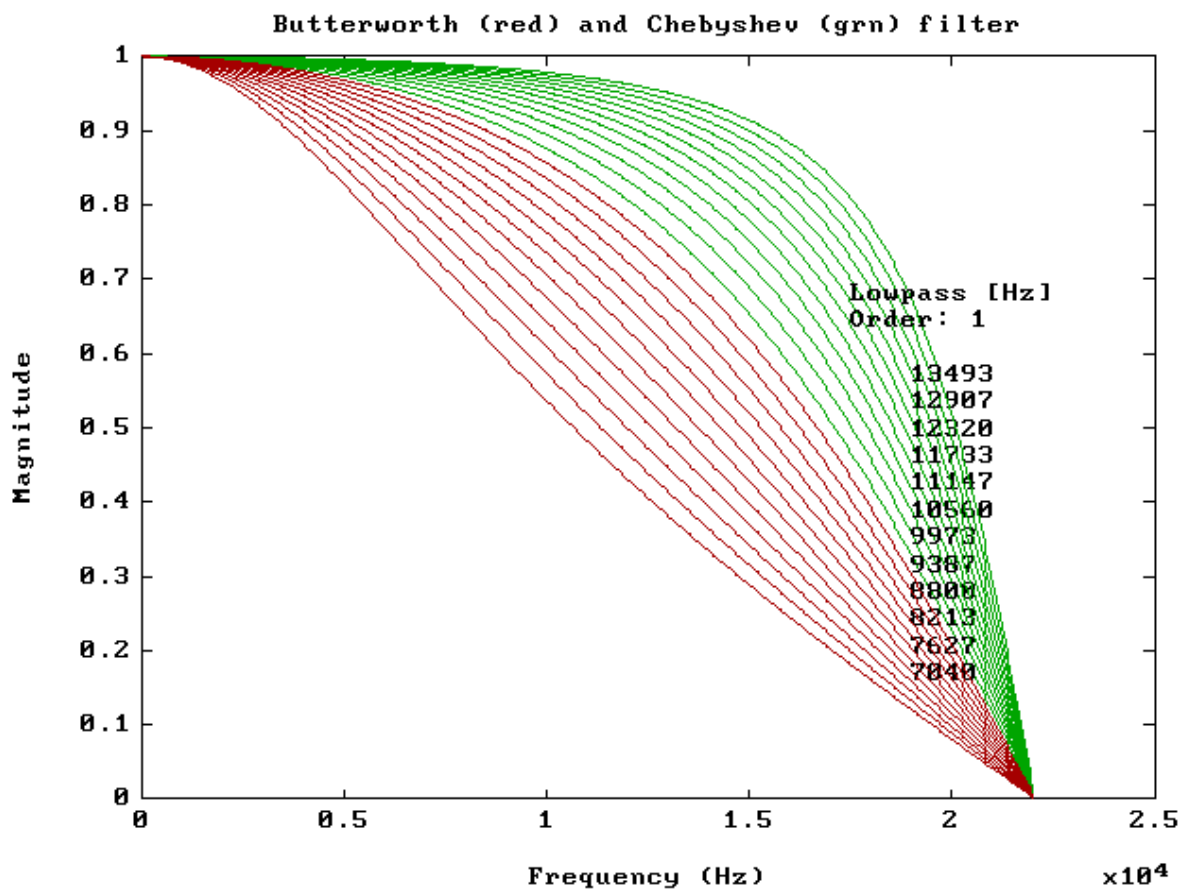


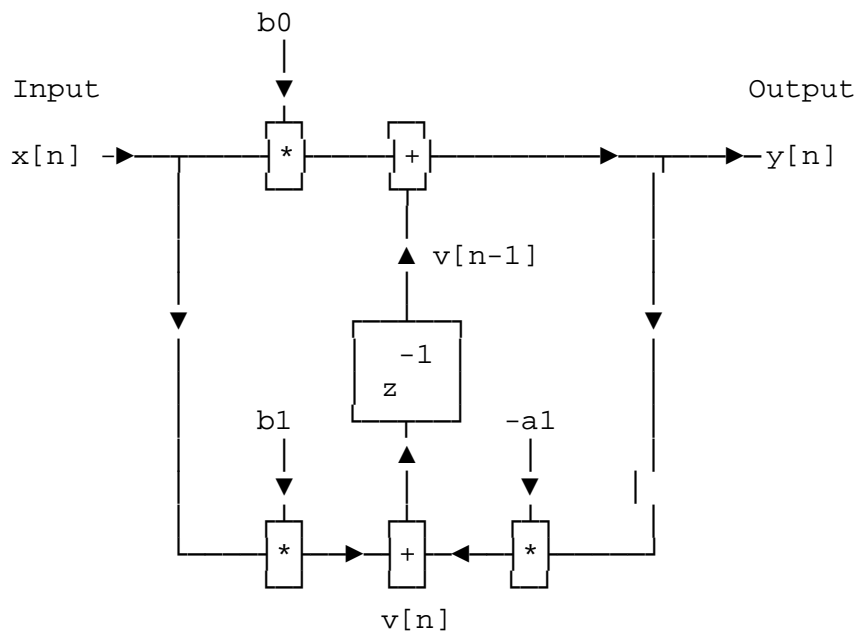
Abbildung Vergleich Bessel und Chebyshev Tiefpass in der oberen Oktave

Die höchste Eckfrequenz beträgt 19947 Hz, die tiefste Eckfrequenz ist 14 Hz.

Realisierung

Die IIR-Filter wurden in der „TRANSPONED DIRECT FORM II“ implementiert. Diese transponierte IIR-Form hat den Vorteil, daß auf das Delay-Element z^{-1} nur einmal zugegriffen werden muß. Dies bringt bei einer möglichen Implementierung in DSP-Prozessoren einen Laufzeitvorteil.

IIR Filter 1.ST ORDER TRANSPONED DIRECT FORM II



$$v[n] = -a1*v[n-1] + x[n]$$
$$y[n] = b0*w[n] + b1*v[n-1]$$

Abbildung Implementierung der IIR-Filter-Struktur des Twinpass-Algorithmus

Parameter des „KlavierHall“-Algorithmus

Jeder Nachhall besteht aus einer Reihe von Sinustönen. Dabei wird jeder Sinuston von einem eigenen Sinusgenerator berechnet. Die Parameter für die Berechnung sind in einer Initialisierungsdatei (mit der Endung .INI) abgelegt. Die .INI-Dateien werden von dem Unterprogramm „Frequenzeingabe“ angelegt, nach Vorgabe durch den Benutzer.

Der Aufbau jeder .INI-Datei besteht aus Schlüsselworten und Parametersätzen. Folgende Schlüsselwort sind z.Z. implementiert:

PATH: Arbeitspfad, in dem die Dateien erzeugt werden sollen

FILE: Dateiname, der zu erzeugenden Datei

LEN: Länge des Nachhalles in Sekunden

MTK: Hüllkurvendatei, enthält 108 Amplituden-Envelopes

GEN: definiert einen SinusGENERator, siehe unten

RUN: startet Berechnung der Sinusgeneratoren

Jeder GENERator hat folgende Parameter:

```
***
*** nnnnn ch sssss Sinus.freq S.depth FMdur FMdev Amplitude A.depth AMDur AMdev Phase P.depth PMdur PMdev Oct Key
*** +---+ ++ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+ +---+
***
GEN 1 0 0 27.68751 .035774 7223 2408 1 .921055 4595 1532 0 0 44100 0 8 1
GEN 1 0 1 28.31602 .035774 7223 2408 1 .921055 4595 1532 0 0 44100 0 8 1
RUN
```

nnnnn

Versionsnummer des Generators, derzeit n=1

ch

channel-number, bezeichnet die Kanalnummer des Ausgabekanals, derzeit ist ein Stereokanal vorgesehen, deswegen ist ch=0

sssss

Sinus-Nummer, zählt die Nummer des Sinus-Generators, Gültigkeitsbereich von 0 bis 127

Sinus.freq

gibt im Double-Float-Format die Centerfrequenz f_C des Sinusgenerators an.

S.depth

gibt im Single-Float-Format die Modulationstiefe für die Frequenz an. Gültigkeit liegt im Bereich [0,0 ... 1,0]

FMdur

gibt die Modulationsfrequenz in [Samples] an. Gültigkeit liegt im Bereich [2 .. 99999]

FMdev

gibt die Abweichung der Modulationsfrequenz in [Samples] an. FMdev muß immer kleiner FMdur sein. Gültigkeit liegt im Bereich [2 .. FMdur]

Amplitude

A.depth

gibt im Single-Float-Format die Modulationstiefe für die Amplitude an. Gültigkeit liegt im Bereich [0,0 ... 1,0]

AMdur

gibt die Modulationsfrequenz in [Samples] an. Gültigkeit liegt im Bereich [2 .. 99999]

AMdev

gibt die Abweichung der Modulationsfrequenz in [Samples] an. AMdev muß immer kleiner AMdur sein. Gültigkeit liegt im Bereich [2 .. AMdur]

Phase

P.depth

gibt im Single-Float-Format die Modulationstiefe für die Phase an. Gültigkeit liegt im Bereich [0,0 ... 1,0]

PMdur

gibt die Modulationsfrequenz in [Samples] an. Gültigkeit liegt im Bereich [2 .. 99999]

PMdev

gibt die Abweichung der Modulationsfrequenz in [Samples] an. PMdev muß immer kleiner PMdur sein. Gültigkeit liegt im Bereich [2 .. PMdur]

Oct

gibt die Oktavnummer an, auf die sich die Sinusfrequenz bezieht.
Gültigkeit liegt im Bereich [8 .. 0]

Key

gibt die Tastennummer innerhalb der Okatve an, auf die sich die Sinusfrequenz bezieht.
Gültigkeit liegt im Bereich [1 .. 12]

Eine typische .INI-Datei sieht z.B. so aus:

```
*****
***
*** Test 04-11-2004 / 11:59:40 (v3)
***
*** 04-11-2004 11:59:40
***
*****
PATH D:\FAPM\SL3E71\*.WAV
FILE 0027.WAV
LEN 4
MTK D:\FAPM\MTK\SL3E7.WAV
***
*** nnnnn ch ssss Sinus.freq S.depth FMdur FMdev Amplitude A.depth AMdur AMdev Phase P.depth PMdur PMdev Oct Key
*** +---+ ++ +---+ +-----+ +-----+ +---+ +---+ +-----+ +-----+ +---+ +---+ +-----+ +-----+ +---+ +---+ +---+
***
GEN 1 0 0 27.68751 .035774 7223 2408 1 .921055 4595 1532 0 0 44100 0 8 1
GEN 1 0 1 28.31602 .035774 7223 2408 1 .921055 4595 1532 0 0 44100 0 8 1
RUN
***
```

Hier werden zwei niederfrequente Sinusse um 28Hz erzeugt und unter D:\FAPM\SL3E71\0027.WAV im Microsoft .WAV-Format abgespeichert. Dies ist eine Datei von 108 Dateien, die zusammenaddiert eine Raumimpulsantwort ergeben.

Aufgrund der großen Datenmenge wird der Übersichtlichkeit halber auf einen kompletten Ausdruck der .INI-Datei verzichtet.

Audio CD mit Klangbeispielen

Disk 1

Track 01 : Lead In Disk 1	[00:23]	IN01.WAV
Track 02 : Twinpass Algorithmus – kleiner dumpfer Raum	[02:56]	TA01.WAV
Track 03 : Twinpass Algorithmus – kleiner heller Raum	[02:58]	TA02.WAV
Track 04 : Twinpass Algorithmus – großer heller Raum	[03:41]	TA03.WAV
Track 05 : Eigener Ansatz: Reduktion des Faltungsaufwandes	[03:08]	TA04.WAV
Track 06 : FM und AM zur Bandpass Emulation	[03:57]	TA05.WAV
Track 07 : Teiltonsummutation – 1 Oktave und 2 Oktaven	[05:52]	TA06.WAV
Track 08 : Einsatz von Lautstärke-Hüllkurven	[04:13]	TA07.WAV
Track 09 : Hinzunahme von PM	[03:40]	TA08.WAV
Track 10 : Eigenversuch 1 und 2 zur Hallsynthese	[02:45]	TA09.WAV
Track 11 : Lead Out Disk 1	[00:08]	EX01.WAV

Disk 2

Track 01 : Lead In Disk 2	[00:21]	IN02.WAV
Track 02 : Resultate des Klavierhall-Algorithmus	[02:00]	TA10.WAV
Track 03 : Faltung mit Musiksignalen	[08:46]	TA11.WAV
Track 04 : Test: Realer und synthetisierter Nachhall	[01:05]	TA12.WAV
Track 05 : Irreale Räume mit Frequenzmustern	[03:03]	TA13.WAV
Track 06 : Faltung mit Musiksignalen	[10:57]	TA14.WAV
Track 07 : Vergleich mit kommerziellen Hallgeräten	[08:18]	TA15.WAV
Track 08 : Grenzen des Klavierhall-Algorithmus	[03:28]	TA16.WAV
Track 09 : Reduktion der FM Geschwindigkeit	[02:52]	TA17.WAV
Track 10 : Reduktion der AM Stärke	[03:53]	TA18.WAV
Track 11 : Reduktion der AM Geschwindigkeit	[03:05]	TA19.WAV
Track 12 : Faltung mit Musiksignalen	[02:23]	TA20.WAV
Track 13 : Lead Out Disk 2	[00:24]	EX02.WAV

Ende des Anhangs.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt gegenüber der Fakultät 1 der Technischen Universität Berlin, daß die vorliegende, dieser Erklärung angefügte Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind kenntlich gemacht.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "R. Jesuich". The signature is written in a cursive style with a large, stylized initial "R" and a long, sweeping underline.