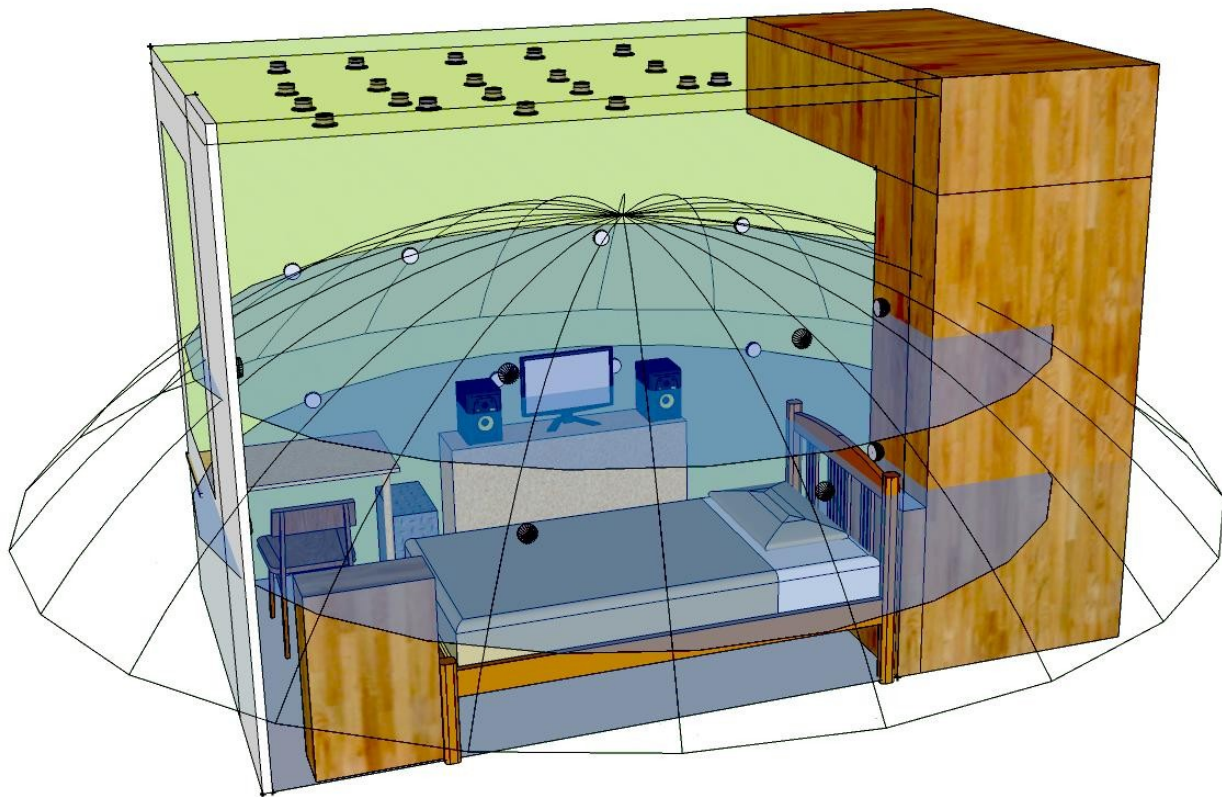


“MUMUTHino”

(Ein kleines Raumakustikprojekt)



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	4
Ziele des Projekts	4
1. MUMUTHino	
1.1 Technische Voraussetzungen	5
1.2 Wahl der Lautsprecher	6
1.3 Basslautsprecher	7
1.4 Lautsprecher Entzerrung	7
1.5 Laufzeitkorrektur	8
1.6 Raumakustik	9
1.7 Software und Routing	11
1.8 Wiedergabe	11
1.9 Hörerfahrung	12
2. Raumsimulation	13
2.1 Routing (aktuell)	14
2.2 Positionierung der Mikrofone	16
2.3 Routing (in Planung)	17
2.4 Hörerfahrung	19

3.	Erstellung von Presets	20
3.1	Raumakustische Besonderheiten	20
3.2	Wasserfalldiagramme	21
3.3	Benötigte Rechenleistung	24
3.4	Realisierung mit USB Audio-Sticks	24
4.	Entwicklung eines portablen, multifunktionalen Systems für die Live-Beschallung	26
4.1	Mikrofone	26
4.2	Digitale Signalverarbeitung	27
4.3	Routing	28
4.4	Sytemverkabelung	29
4.5	Lautsprecherentwicklung	30
4.5.1	Chassis	30
4.5.2	Gehäuse	31
4.5.3	Bassreflex System	33
4.6	Aktivelektronik	35
4.6.1	Stromversorgung	35
4.6.2	Verstärker	36
4.6.3	NF Eingang	37
4.7	Anwendungsbeispiele	39
4.7.1	Variable Raumakustik	39
4.7.2	Groundstack	39
4.7.3	Geflogener Aufbau	40
5.	Schlussbemerkung	41

Vorwort

Seit Beginn meines Elektrotechnik-Toningenieur-Studiums war ich von der Technik im sog. Cube begeistert. Die Möglichkeit verschiedene Räume akustisch nachzubilden, diese Räume durch Knopfdruck umschalten, und das auch bei live-Konzerten einsetzen zu können faszinierte mich.

Für größere Veranstaltungen steht der György-Ligeti-Saal des MUMUTH zur Verfügung.

Im Rahmen der Lehrveranstaltung “Studiomesstechnik” wurde uns das beeindruckende Potenzial des Saals demonstriert.

Mir drängte sich daher die Frage auf, ob man nicht auch private Räume – entsprechende Hardware vorausgesetzt – akustisch variabel gestalten kann.

Nach ausführlichen Recherchen in Büchern und dem “www” wurde mit der Planung begonnen und ein Konzept erarbeitet.

Ziele des Projekts

- Wiedergabe von 2-6- kanalgem Material (CD, MP3,DVD etc.) über das System
- Erschaffung eines akustischen Raumes
- Veränderung der Raumakustik auf Knopfdruck (auch fernsteuerbar)
- Verringern des Rechenaufwands für Anwendung an einem standard Laptop und kaskadierten USB Soundchips
- Entwicklung eines portablen, skalierbaren Konzepts für die Livebeschallung

1. MUMUTHino

1.1 Technische Voraussetzungen

vorhanden:

Hardware

- Intel Core i7 950 PC (4x 3,3GHz; 12Gb Ram)
- M-Audio Profire Lightbridge + 2x ADA 8000
- 2x KRK Rockit 5
- 2x the T.Bone EM700 kleinmembran Kondensatormikrofon
- MXL 9000 großmembran Röhrenmikrofon
- ECM8000 Messmikrofon

Software

- Carma (Audionet) Messsoftware + Mikrofonentzerrung
- Sequenzer Reaper 3.75 (lizensiert)
- Gliss-EQ (Voxengo), dynamischer Equalizer (lizensiert)
- SIR 2 (Knufinke), latenzfreier Faltungshall (lizensiert)
- ARC (IK Multimedia) (leihweise)

nicht vorhanden:

- 16 aktive Breitbandlautsprecher
- 32 passive Breitbandlautsprecher (Decke)
- 2-Kanal Verstärker (Decke)

Da ich in der glücklichen Lage bin, einen sehr gut ausgestatteten Audio-PC zu besitzen, sollte die Rechenleistung für die Echtzeitbearbeitung von bis zu 60 Audiospuren mehr als ausreichen.

1.2 Wahl der Lautsprecher

Als Lautsprecher sollten nur breitbandige Typen zum Einsatz kommen. Diese haben im Vergleich zu Mehrwegsystemen ein besseres Phasen- und Abstrahlverhalten.

Als günstig würde sich auch eine runde Gehäuseform erweisen, sodass der Frequenzgang off-axis richtungsunabhängig ist. Für den im Projekt zu beschallenden Raum genügt eine Leistung von 2 Watt pro Lautsprecher, ein Wirkungsgrad von 82dB/W/m und lineare Wiedergabe von 130Hz bis 18kHz (+/- 1dB).

Die Wahl für die Surround Lautsprecher fiel auf aktive PC-Lautsprecher von "Pollin" zu je 7€ /Paar.

Technische Daten laut Hersteller:

Stromversorgung: 5V

Eingang: Unsymmetrisch über Stereoklinke

Frequenzbereich: 125-18000Hz

Leistung: 2x3W RMS

Wirkungsgrad: 81dB/W/m

Zu erwartender Spitzenschalldruck bei 2W Eingangsleistung, 16 Lautsprechern und 2m Entfernung: 93dB

Für die Deckenlautsprecher wurden 32 passive Mitteltöner (400-12000Hz) mit passendem Gehäuse und 32Ohm Impedanz geordert. (4 8Ohm-Ketten bilden 2x4 Ohm Gesamtimpedanz an einem 2x10W an 4Ohm Verstärker)

1.3 Basslautsprecher

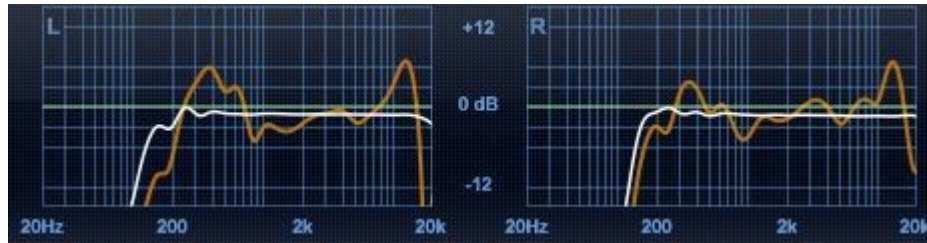
Die Breitbandlautsprecher arbeiten bis zur Grenzfrequenz von 130 Hz überwiegend linear. Von dort an übernehmen die Stereolautsprecher (Rockit 5) den Tieftonbereich bis 45 Hz. Die Flankensteilheit beträgt jeweils 18dB/Oct. Für Frequenzen unterhalb von 45 Hz ist ein geschlossener Subwoofer von Focal Audio zuständig. Er arbeitet nach dem URPS Prinzip (Under Resonanz Prinzipal Subwoofer). Obwohl dieses Prinzip bezüglich Klirr-Verhalten und benötigter Verstärkerleistung eher kritisch gesehen wird, findet es oft Anwendung. Es macht sich die Tatsache zu Nutze, dass ein Tieftonlautsprecher in einem zu kleinen Gehäuse unterhalb seiner Resonanzfrequenz mit 12dB/Oct abfällt. Hebt man nun unter $f(\text{res})$ das Signal mit 12dB/Oct an, ist es theoretisch möglich bis zur Hörschwelle linear wiederzugeben. In kleinen Räumen wie diesem lohnt es sich, den absoluten Tiefton bis 20Hz durch dieses Prinzip darzustellen. Zum Einsatz kommen 2 Focal Audio Chassis (6,5 Zoll) in einem 10l Gehäuse an jeweils 500W mono.

1.4 Lautsprecherentzerrung

Da man von so billigen Geräten weder erwarten kann, dass sie gut klingen noch, dass 2 Lautsprecher akustisch nahezu identisch sind, sollten diese linearisiert werden. Die Entzerrung der LS mit Carma/Gehör und dem reapeireigenen Equalizer hat sich als äußerst schwer herausgestellt, weswegen ich einen Kollegen um die Leihgabe der ARC Software von IK Multimedia bat. Diese ermöglicht das raumbezogene Einmessen und Frequenzgang-Linearisieren eines Lautsprecherpaares.

Im Vergleich zur “manuellen” Entzerrung, welche pro LS je nach Position und Entfernung bei 40 aktiven Bändern ca. 1 Stunde benötigt und klanglich nicht überzeugen konnte, setzt die ARC Software nach 15 Messpunkten pro LS-Paar bis zu 200 aktive Filter und korrigiert den Frequenzgang (fast) nach Belieben binnen 2 Stunden für alle 8 LS-Paare. Auf das Feature der Laufzeitkorrektur wurde bei der Einrichtung der Software verzichtet. Dazu mehr im nächsten Abschnitt. In der folgenden Grafik sei das veranschaulicht. (Abbildung 1: Orange der Originalfrequenzgang des LS; Weiß der korrigierte FG) Auffällig sind die Einbrüche unterhalb von 200Hz beim linken Lautsprecher. Sie sind meiner Ansicht nach auf eine Resonanz im Gehäuse zurückzuführen.

Abbildung 1:



Der Nachteil der Software ist im Vergleich zur manuellen Entzerrung die Latenz von 2ms für die Berechnung der 200 Filter. Dafür bekommt der Nutzer allerdings Amplituden und Phasenkorrigierte Ergebnisse. Da ansonsten nur latenzfreie Plugins benutzt werden, bleibt die Gesamtlatenz von Ein- zu Ausgang bei minimal 4, maximal 9ms, was nicht zu hören ist. Es verlangt dennoch den Einsatz des ARC Plugins in allen Kanälen um keine Laufzeitfehler zu produzieren.

1.5 Laufzeitkorrektur

Die Abmessungen des Testraumes (2,2m x 4,1m) erlauben kein Aufstellen in einem Kreis oder einer Hemisphäre, ohne die Nutzung als normales Studentenzimmer zu verhindern.

Ich entschied mich deshalb auf eine akustisch weniger gute aber funktionelle Montage an den parallelen Wänden. Die Lautsprecher wurden somit in 2 Ebenen (auf Ohrhöhe und 70cm darüber) um den Sweet Spot platziert. Die Decke erhielt eine Matrix aus 4x8 Mitteltönern(s.o.). Um keine Laufzeitunterschiede zu generieren wurde jeder Lautsprecher zum Hörplatz individuell verzögert. Als Ausgangsgröße wurde der am weitesten entfernte Lautsprecher gewählt und alle anderen auf die gleiche Entfernung vom Hörplatz gebracht. Kammfiltereffekte, die durch rückwertige Reflexionen an der Wand entstehen müssen in diesem Fall in Kauf genommen werden.

Die Laufzeitdifferenzen wurden nach der üblichen Formel (Abbildung 2) ermittelt:

Abbildung 2:

$$\frac{(RLS-LSE)/100cm}{\text{Schallgeschwindigkeit [m/s]}} * 1000ms = Delaytime[ms]$$

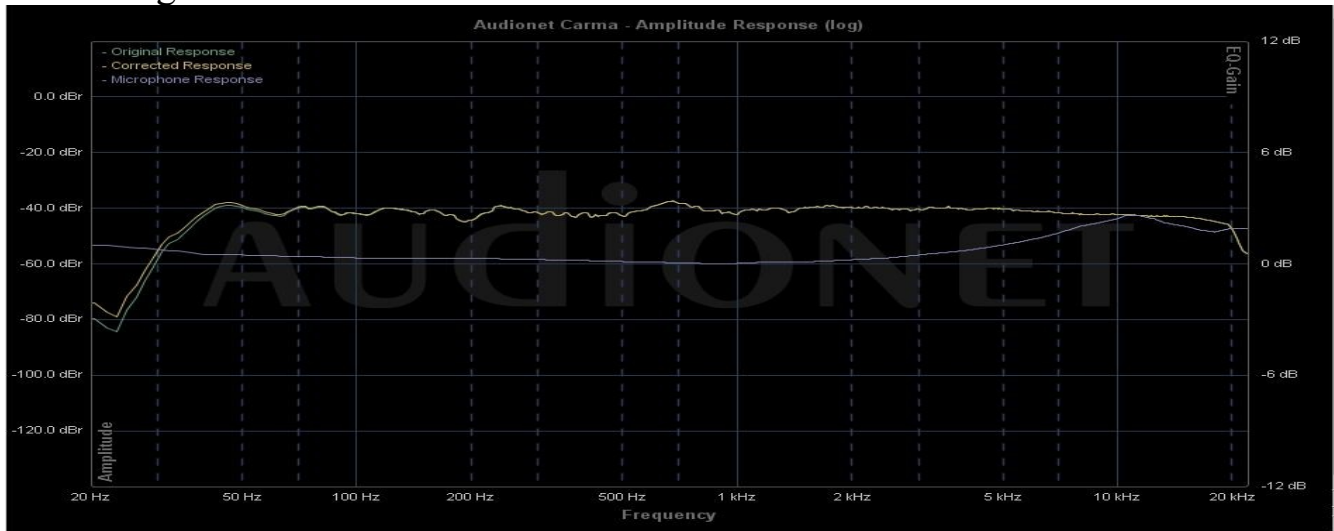
(Referenzlautsprecher- Entfernung = RLS ; Lautsprecher-Entfernung= LSE)

1.6 Raumakustik

Die im Raum sehr stark ausgeprägten Flatterechos werden mit viel Noppenschaumstoff (6 bzw. 12cm) ab 800Hz aufwärts wirkungsvoll unterdrückt. Trotzdem entsteht nicht der Eindruck eines schalltoten Raumes. Die bedämpfte Fläche beträgt 10% der Gesamtfläche. 

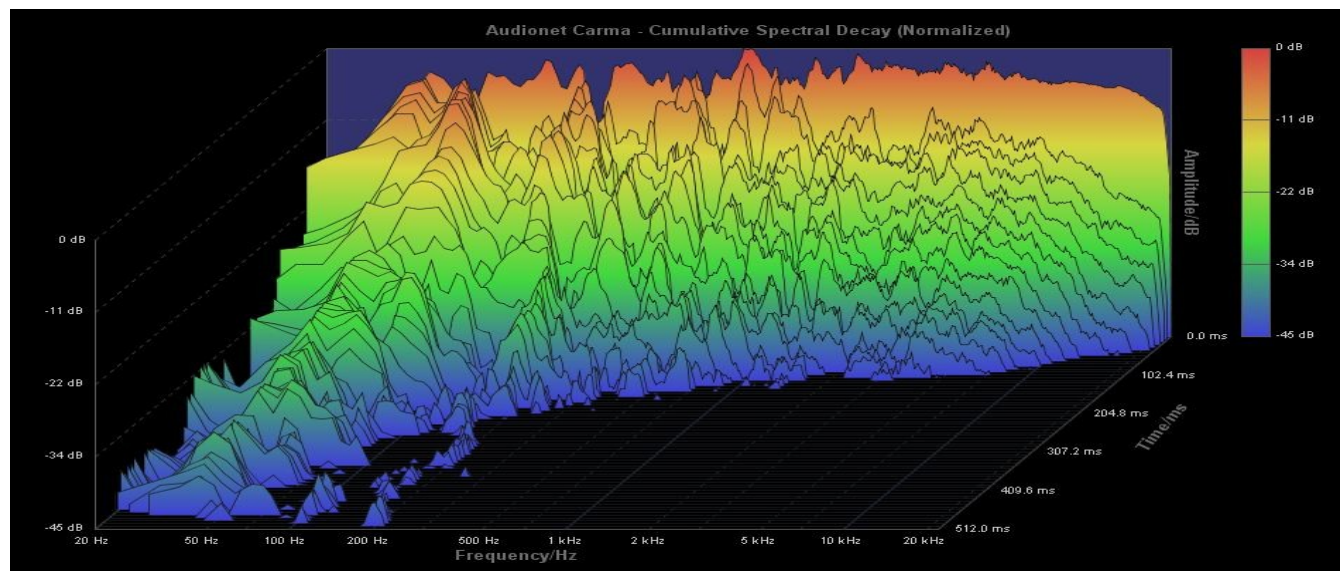
Der Raum ist dennoch akustisch lange nicht optimal. Die folgenden Diagramme wurden mit Carma erstellt. Der Messaufbau bestand aus einer KRK Rockit 5, welche durch ARC linearisiert wurde (Abbildung 3) und einem Behringer ECM8000, welches in Carma durch eine Korrekturdatei ebenso linearisiert wurde. Abbildung 4 zeigt einen relativ gleichmäßigen Abfall ab 800Hz, doch darunter wären sicherlich noch einige Bassabsorber notwendig, um einen linearen Frequenzgang anzustreben. Dies steht vom Kosten-Nutzen Faktor leider in keinem Verhältnis, sodass hier dezent darauf verzichtet wird. Es handelt sich hauptsächlich um eine axiale Raummode bei 61Hz, welche in 3.1 auch für die Verfälschung der Wasserfalldiagramme verantwortlich ist. Die Problematik ist also bekannt, wird hier aber nicht weiter verfolgt.

Abbildung 3:



(FFT-Size 32768; Oktaveband smoothing 1/3 Oct)

Abbildung 4:



(FFT-Size 8192; Octaveband smoothing 1/3)

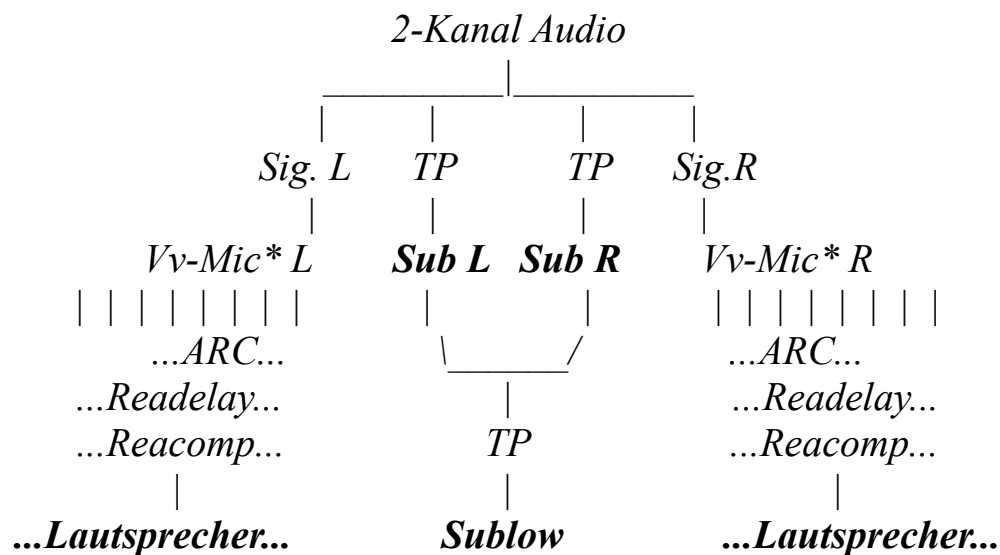
1.7 Software und Routing

Als Grundlage für das Projekt wählte ich die Sequenzersoftware “Reaper”(v.3.75), da sie eine der flexibelsten Lösungen für die Audiotbearbeitung darstellt und z.B. von Acousmodules.free.fr (VST Plugins für Surroundbeschallung) explizit als “optimale Lösung für Multitrack-Verarbeitung” genannt wird.

Ein testweiser Aufbau in einem Cubase SX3 System scheiterte schon an den zur verfügung stehenden Tracks pro Spur und Pre-Fader einsetzbaren Plugins.

1.8 Wiedergabe

Bei der Wiedergabe von 2-6 spurigem Audiomaterial wird dieses zuerst in linke und rechte Kanäle aufgeteilt. Nach der Aufteilung durchlaufen sie folgende DSP's: (Beispiel für 2 Kanäle)



*Vv-Mic, ein VST Plugin (= Visual virtual Mic), welches aus einer AB-stereophonen Aufnahme bis zu 8 Signale decodiert, eignet sich hervorragend, um die Signale von L und R in jeweils 8 Verschiedene aufzuteilen und somit einen rundum-Klang zu erzeugen. Damit lässt sich (Abhängig von der Güte der Aufnahme) auf der Vorderseite eine Bühne generieren, und aus den hinteren

Lautsprechern zusätzliche räumliche Information gewinnen. Nach der Aufteilung folgt das o.g. ARC Plugin, ein Delay und vor dem Lautsprecher ein als Limiter fungierender Kompressor, um schädliche Lautstärken zu verhindern. Dieser ist zur Zeit noch mit einem festen Threshold Wert eingestellt, wird aber bald Schallpegelbezogen (Mit Messmikrofon im Side-Chain) arbeiten. Je mehr Spuren zur Verfügung stehen, desto mehr LS werden direkt angesprochen und nicht simuliert.

1.9 Hörerfahrung

Als ich das System bis zu diesem Punkt spielbereit hatte, ging es daran, die Ohren an die Anlage zu gewöhnen. Man darf schon alleine wegen des Materialpreises keinen highfiden Klang erwarten. Dennoch ist es beachtlich, was diese kleinen Breitbänder zu Leisten vermögen. Der Klang breitet sich über das ganze Zimmer aus. Es ist keine scharfe Mitte zu erkennen, wie man sie sich bei Studiomonitoren wünscht. Viel mehr kann man zwischen “vorne” und “hinten” unterscheiden und sich ein Instrument an einen bestimmten Platz auf die “Bühne” stellen. Fieldrecordings werden erschreckend realistisch dargestellt. Da das System aber nicht vorwiegend für die Musikkwiedergabe konzipiert ist, wird der klaren Bühnendarstellung nicht mehr Aufmerksamkeit gewidmet.

2. Raumsimulation

Da dieser kleine Raum nicht, wie das Mumuth oder der Cube, einen eigenen Nachhall erzeugt, die Mikrofone im Raum sehr nahe bei den Lautsprechern hängen (überwiegend im Hallradius) und derer nur 3 Stück vorhanden sind, muss hauptsächlich auf eine externe Hallerzeugung zurückgegriffen werden.

Hier muss gesagt werden, dass die zur Zeit verwendeten Kleinmembraner aus dem untersten Preissegment stammen. Der Klang der Mikrofone ist daher als schlecht einzustufen. Für die ersten Testzwecke sollte er dennoch ausreichen.

Sie werden nach Abschluss einiger Tests durch AKG Perception 100 Mikrofone ergänzt. Um den EM700 die Schärfe in den Höhen zu nehmen und eine möglichst lineare Wiedergabe zu erzielen, wurde eine – zur Mikrofonkennlinie inverse – EQ-Funktion entwickelt. Abbildung 5 zeigt die Übertragungsfunktion des Mikrofons, Abbildung 6 die inverse Funktion.

Abbildung 5:

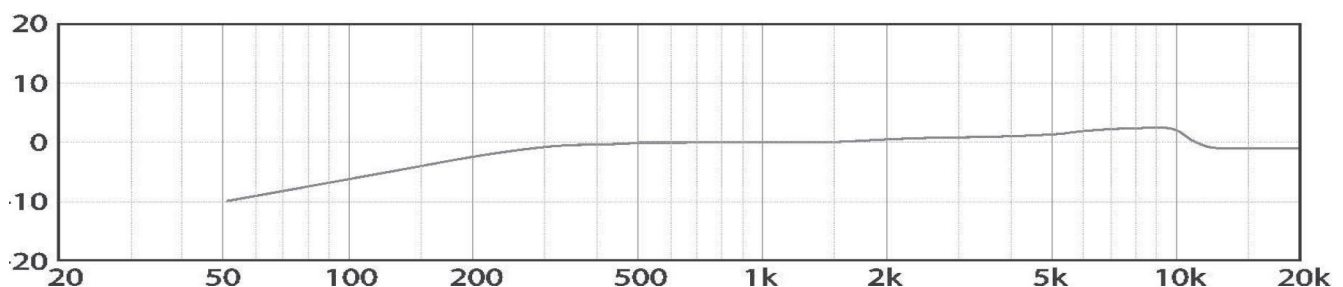
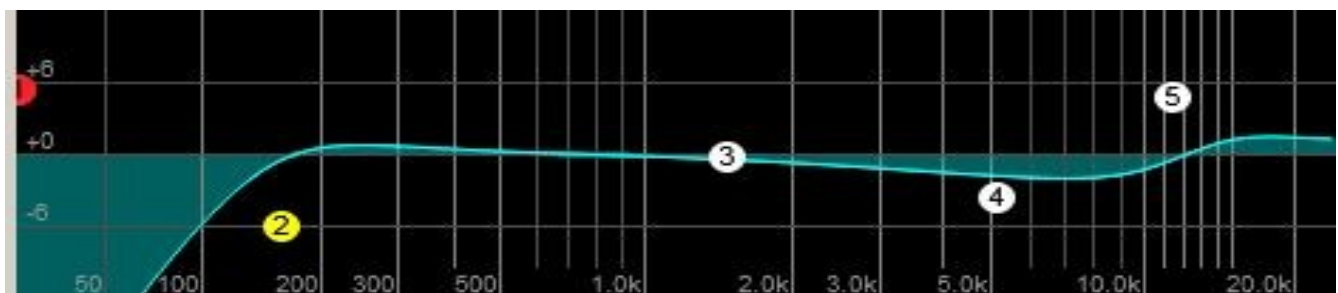


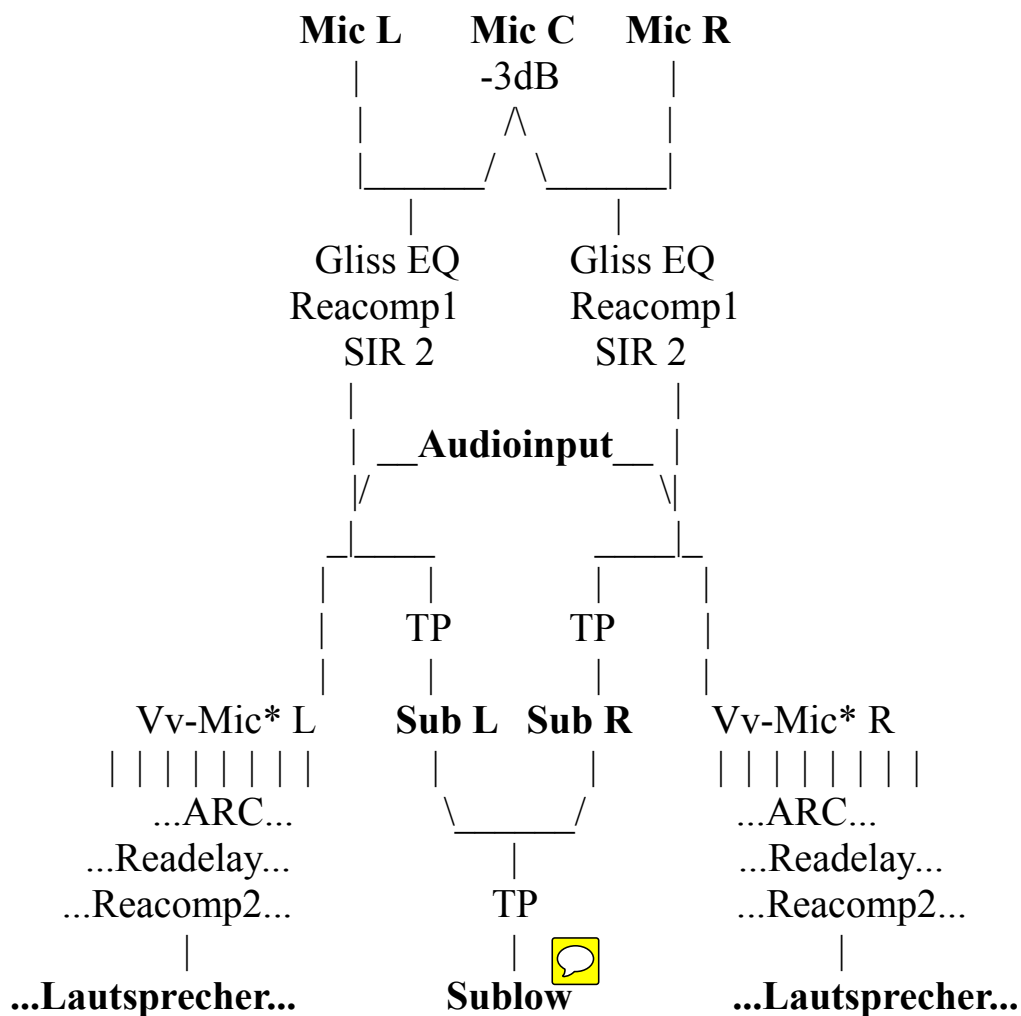
Abbildung 6:



Bei der Erstellung eines Presets ohne externes Hallgerät wurde die Rückkopplungsgrenze sehr schnell erreicht. Zwar bot die Summierung 3er Mikrofone an 3 unterschiedlichen Orten eine Anhebung der Rückkopplungsgrenze um etwas mehr als 3dB, was aber trotzdem nicht zum gewünschten Erfolg führte. Von Herrn Knufinke wird seit längerer Zeit ein Faltungshall SIR 1 kostenlos zur Verfügung gestellt. Er benötigt ca. 8000 Samples Berechnungszeit und ist somit nicht geeignet. Für Studenten gewährt Herr Knufinke einen Discount von 20%

auf seine Artikel, sodass der latenzfreie Faltungshall SIR 2 geordnet wurde. Geliefert wird SIR 2 mit einer Sammlung hochwertiger Raumantworten. Die True Stereo Verarbeitung bildet Räume mit bisher unerreichter Klangtreue nach.

2.1 Routing (aktuell)



Der **Gliss EQ** ist ein von Voxengo angebotener dynamisch, parametrischer Equalizer.

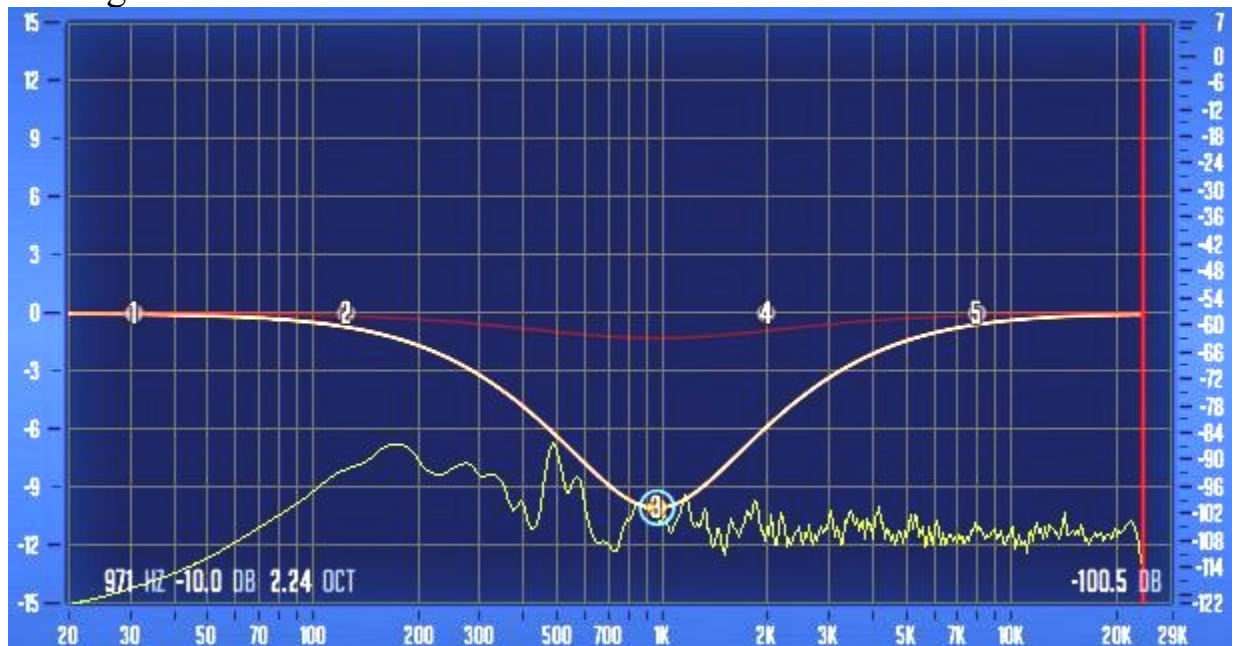
Er senkt gesetzte Filter in Abhängigkeit der Eingangslautstärke ab oder hebt sie an. Bei richtiger Einstellung eignet er sich gut für die Feedback Unterdrückung.

Sofern das Eingangssignal leise bleibt, wird es ohne bzw. mit geringem Eingriff in den Frequenzverlauf weitergeleitet. Bei einem lauterem Signal, welches nahe an der Rückkopplungsgrenze liegt, wird die koppelnde Frequenz nur solange abgesenkt, bis keine Gefahr für Rückkopplungen mehr besteht.

Hierdurch entsteht kein permanenter Eingriff in den Frequenzverlauf bei kopplungsgefährlichen Frequenzen, sodass nicht mit engen Notch-Filtern, welche Phasenverschiebungen zur Folge haben, gearbeitet werden muss. Das Signal wird demnach ausschließlich breitbandig und bei Bedarf abgesenkt, was viel natürlicher und unverfälscht klingt.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für eine dynamische EQ-Kurve. Der Noisefloor, welcher sich bei ca -90dBFs befindet bildet ein schwaches Signal, welches Band 3 nur um 1,5dB absenkt(rote Kurve). Die maximale Absenkung bei 0dBFs Eingangspegel beträgt -10dB(weiße Kurve). Die senkrechte, rote Linie beschreibt die maximal darstellbare Frequenz bei 48kHz Samplerate. Die Integrationszeit des Noisefloor kann variiert werden, um z.B. nicht nur kurzfristige Peaks, sondern auch Frequenzen, welche dauerhaft überhöht sind darstellen zu können.

Abbildung 7:



Reacomp2 ist ein als Limiter arbeitender Kompressor, welcher extrem kurze attack- und release Zeiten aufweist und dessen Kennlinie nicht an RMS Werten, sondern an Peaks ansetzt. Er hält kurze, laute Pegelspitzen von der restlichen Signalkette ab. Damit wird verhindert, dass sie in den SIR2 gelangen und verhallt werden.

SIR 2 teilt das Mono Signal durch True Stereo in 2 verschiedene Raumantworten auf. Somit erhält man bei dem vorliegenden Routing aus einem Stereosignal insgesamt 4 inkohärente Hallfahnen.

2.2 Positionierung der Mikrofone

In Anlehnung an das MUMUTH und den Cube wurden an der Decke Kleinmembran Mikrofone mit Nierencharakteristik aufgehängt. Der Abstand der 2 Mikrofone beträgt ca. 1,2m. Da es in dem Testraum nicht möglich ist, die Nachhallzeit nur durch Diffusschall zu erhöhen, wurde im Sinne der Ortbarkeit und räumlichen Aufteilung ein Großmembranmikrofon mittig platziert. Dessen Signal wird nach einer 3dB Absenkung sowohl dem linken, als auch rechten Kanal zu gleichen Teilen zugemischt. Durch die akustische Summierung erhält man am Ende +3dB, also ausgewogene Pegelverhältnisse.

Um nun sowohl die Rückkopplungsgrenze als auch den Hallpegel erhöhen zu können, werden in weiteren Testabläufen andere bzw. mehr Mikrofone zum Einsatz kommen (AKG Perception 100 s.o.).

Ziel ist es, eine Mikrofonmatrix aus 4 EM700 an die Decke zu hängen, die Signale zu summieren und die Ortbarkeit durch 3 an der Frontwand montierte Großmembranmikrofone sicherzustellen. Durch die Summierung der 4 Mikrofone erhält man laut dem Artikel des IEM "Elektroakustische Systeme" pro Verdopplung der Mikrofonanzahl +3dB an Headroom für Hall bzw. eine Erhöhung der Rückkopplungsschwelle von +3dB. In diesem Fall ergibt das eine Erhöhung um etwas mehr als 6dB, da zu der Matrix aus 4 Mikrofonen noch 3 weitere dazu addiert werden.

2.3 Routing (in Planung)

7+x Mikrofone:

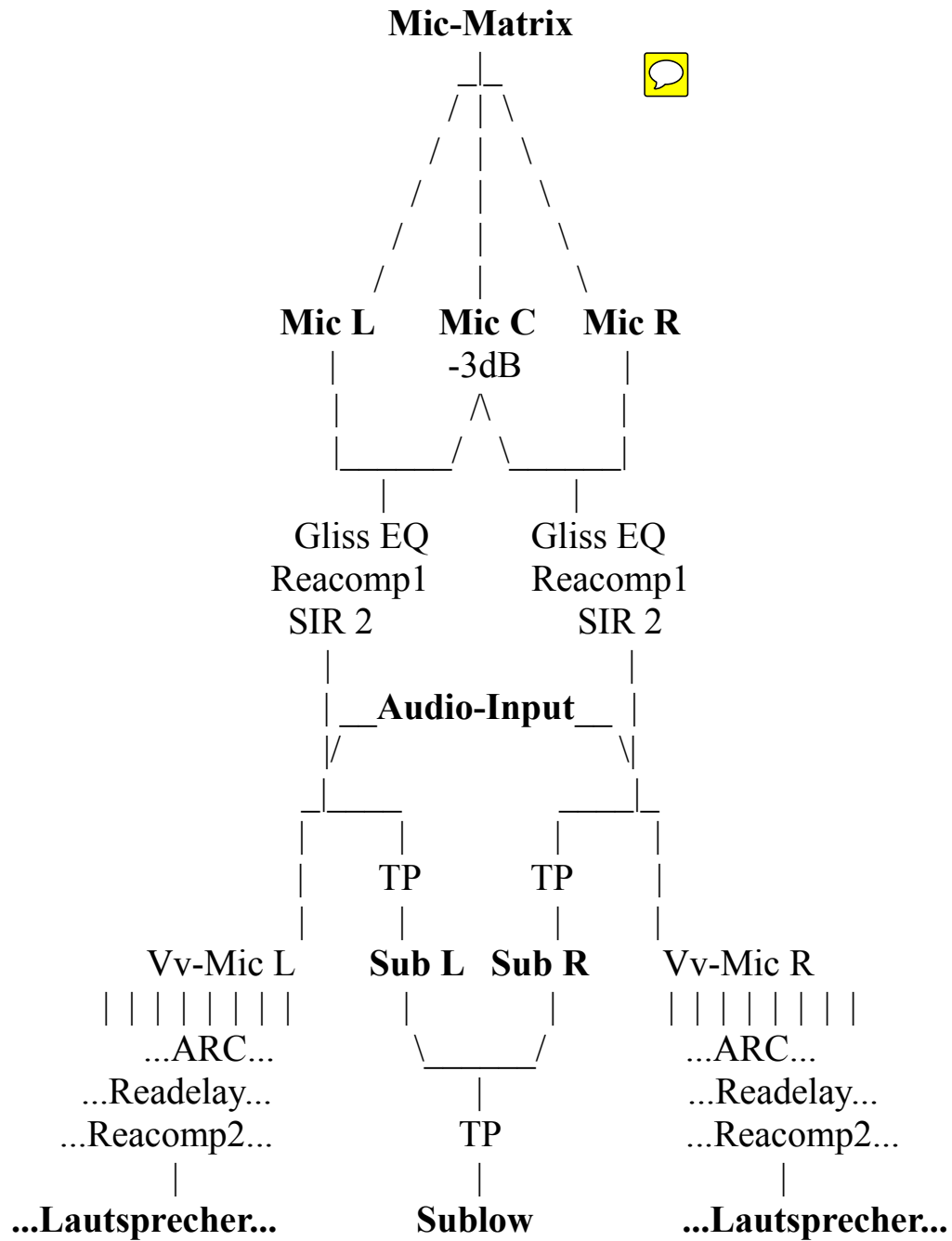


Abbildung 8 zeigt die Umsetzung im Sequenzer Reaper. Dank der Möglichkeit, bis zu 64 Audiospuren in einem Kanal unabhängig voneinander verarbeiten zu können bleibt die Übersicht erhalten. Theoretisch wäre es möglich, im Sinne der Bedienfreundlichkeit bis auf 3 Fader (Master Audio Input, Master Mikrofone, Master Audio Output) zu reduzieren und den Rest im Hintergrund ablaufen zu lassen.

Abbildung 8:



2.4 Hörerfahrung

Einem solch günstig aufgebauten System stand ich von vornherein natürlich skeptisch gegenüber. Im Gegensatz zum Cube oder MUMUTH wo dies für viel Geld angeschafft und eingerichtet wurde, ist im “Mumuthino” von Anfang an das Prinzip des besten Preis-Leistungs Verhältnisses gegangen worden. Sowohl Mikrofone, als auch Wandler und Software waren schon vorher vorhanden. Ausschließlich die 50 Lautsprecher (Surround und Decke) und die Verkabelung wurden nach reiflicher Überlegung für verhältnismäßig wenig Geld gekauft.

Vor der Linearisierung der Lautsprecher war an ein gutes Ergebnis nicht zu denken. Rückkopplungen und undifferenzierter Klang verhinderten jedes Einschläusen von Hall.

Danach allerdings gelang es fast mühelos Klänge und Hallräume zu erzeugen, die entweder subtil den real Vorhandenen ergänzen, oder extrem in die reale Raumakustik eingreifen.

Durch die Erstellung von Presets ist es nun auch möglich mit nur einem Mausklick die Raumakustik von einer kleinen Studioatmosphäre zu einem “großen gemauerten Kellerraum” (Zitat einer Testperson), oder einer Kathedrale zu ändern. Je größer der Raum, desto irrealer wird die Darstellung.

Von mir eingeladene Testpersonen haben oft nur gemerkt, dass die Raumakustik verändert wurde, als die Lautsprecher gemuted wurden.

Eine Fernsteuerung ist mit einer einfachen Software per LAN bzw. WLAN problemlos möglich.

Die Latenz liegt bei 4,6ms im Eingang, als auch im Ausgang. Die Gesamtlatenz von Ein- zu Ausgang ist mit 9,2 ms bei 128 Samples gerade noch akzeptabel. In größeren Räumen dürfte sie keinerlei Problem darstellen. Durch Verringern der Buffersize auf 64 Samples, können auch 4,5ms insgesamt erreicht werden, was aber unverhältnismäßig mehr Rechenleistung benötigt.



3. Erstellung von Presets

3.1 Raumakustische Besonderheiten

Leider wurden die folgenden Wasserfalldiagramme durch Raum- Moden (v.a. axial. 61Hz) stark verfälscht. Mir steht leider kein Messprogramm zur Verfügung, welches mehrere Messergebnisse mittelt. Die folgende Tabelle (Abbildung 10) zeigt axiale, tangentielle und oblique Raum-Moden. Der Berechnung (Abbildung 9) liegt ein idealer rechteck-Raum und die Formel

Abbildung 9:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2}$$

(f = Frequenz der Mode in Hz

c = Schallgeschwindigkeit 343 m/s bei 20 °C

n_x = Ordnung der Mode Raumlänge

n_y = Ordnung der Mode Raumbreite

n_z = Ordnung der Mode Raumhöhe

L, B, H = Länge, Breite und Höhe des Raums in Meter)

zu Grunde. Diese wird auf der Homepage <http://sengpielaudio.com/Rechner-raum-moden.htm> zur Verfügung gestellt.

Abbildung 10:

Axiale Raum-Moden:

41.32530 Hz	76.90582 Hz	61.03202 Hz	82.65060 Hz	153.8116 Hz	122.0640 Hz
123.9759 Hz	230.7174 Hz	183.0960 Hz	165.3012 Hz	307.6233 Hz	244.1281 Hz
206.6265 Hz	384.5291 Hz	305.1601 Hz	247.9518 Hz	461.4349 Hz	366.1921 Hz
289.2771 Hz	538.3408 Hz	427.2241 Hz	330.6024 Hz	615.2466 Hz	488.2562 Hz
371.9277 Hz	692.1524 Hz	549.2882 Hz			

Tangentiale Raum-Moden:

87.30571 Hz	73.70677 Hz	98.18052 Hz	174.6114 Hz	147.4135 Hz	196.3610 Hz
261.9171 Hz	221.1203 Hz	294.5415 Hz	349.2228 Hz	294.8271 Hz	392.7220 Hz
436.5285 Hz	368.5338 Hz	490.9026 Hz	523.8342 Hz	442.2406 Hz	589.0831 Hz
611.1399 Hz	515.9474 Hz	687.2636 Hz	698.4456 Hz	589.6542 Hz	785.4441 Hz
785.7513 Hz	663.3609 Hz	883.6247 Hz			

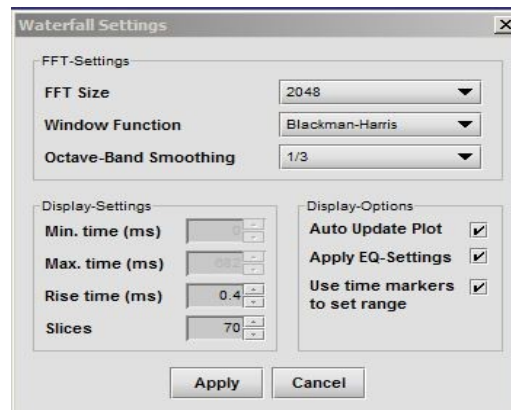
Oblique Raum-Moden:

106.5232 Hz	213.0464 Hz	319.5696 Hz	426.0928 Hz	532.6160 Hz	639.1392 Hz
745.6625 Hz	852.1857 Hz	958.7089 Hz			

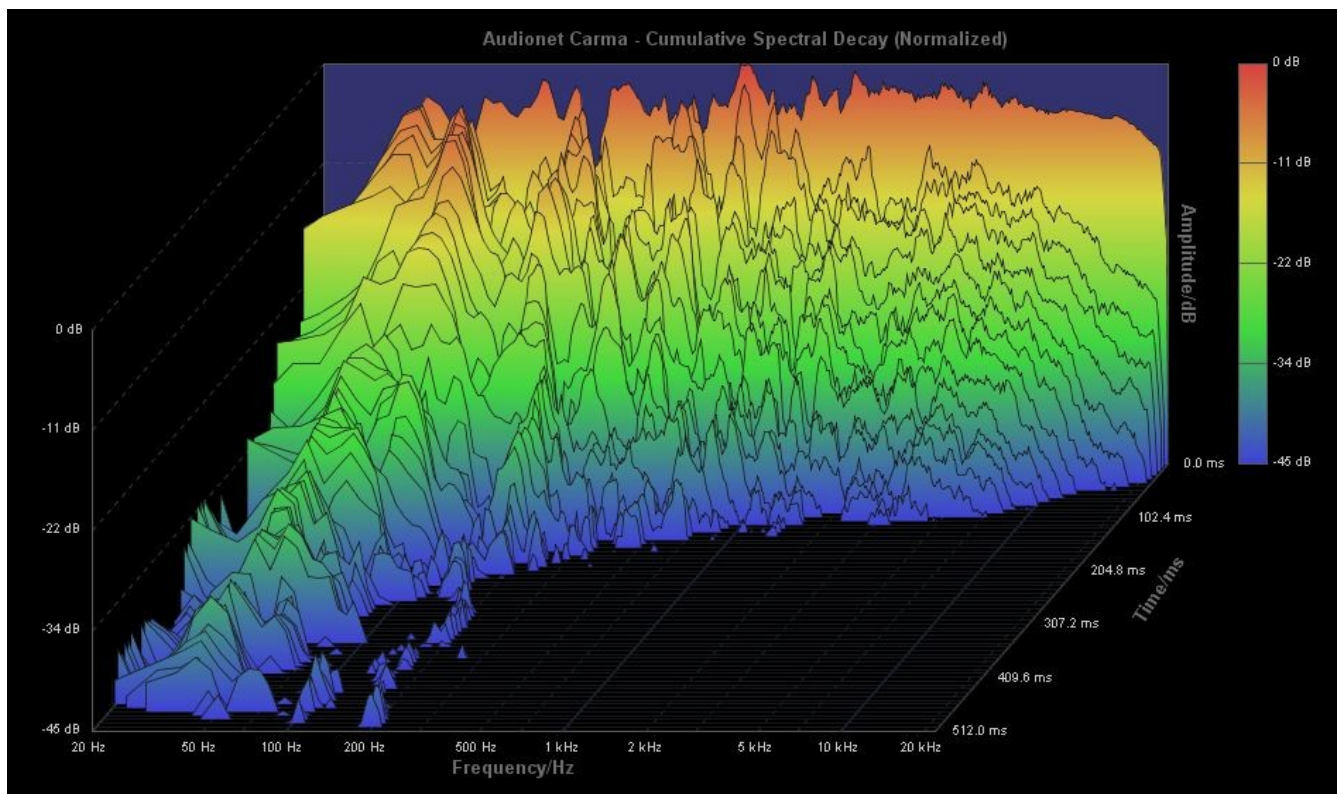
3.2 Wasserfalldiagramme

Die Wasserfalldiagramme wurden mit folgenden Einstellung erstellt:

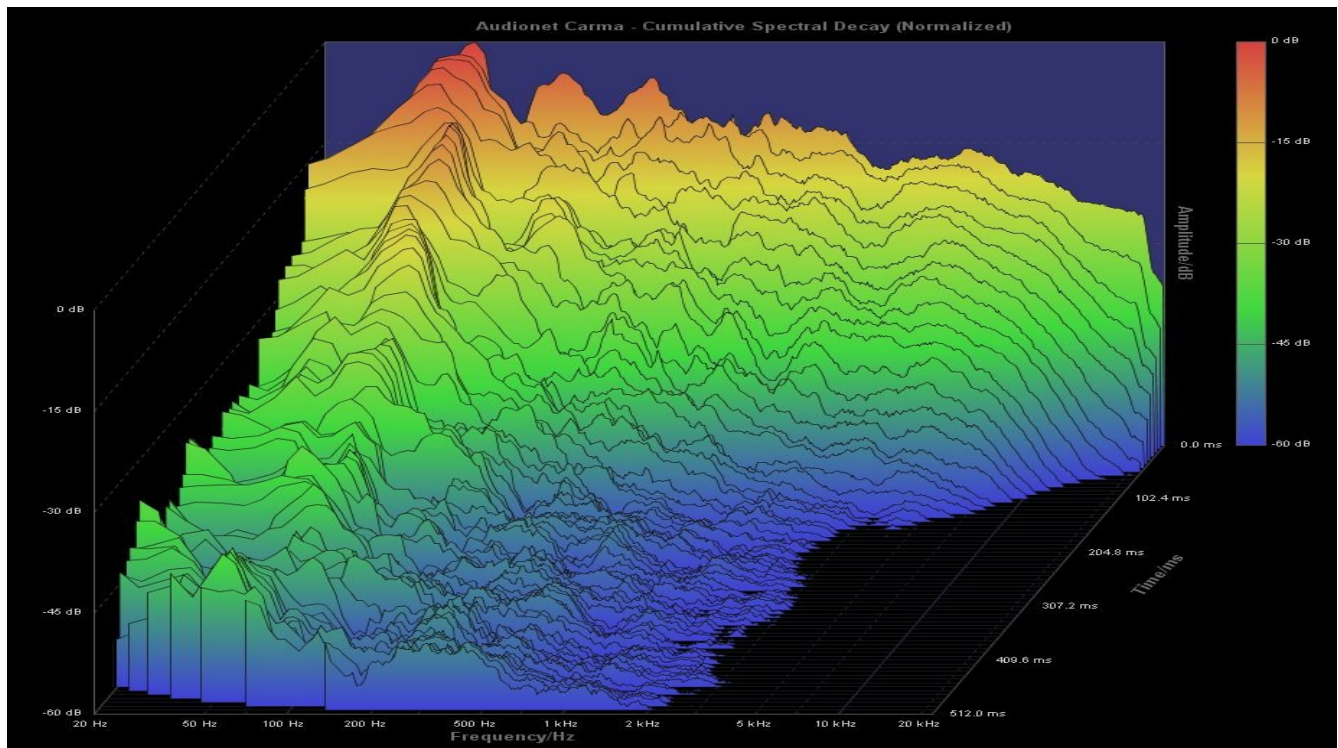
Abbildungen 11-16:



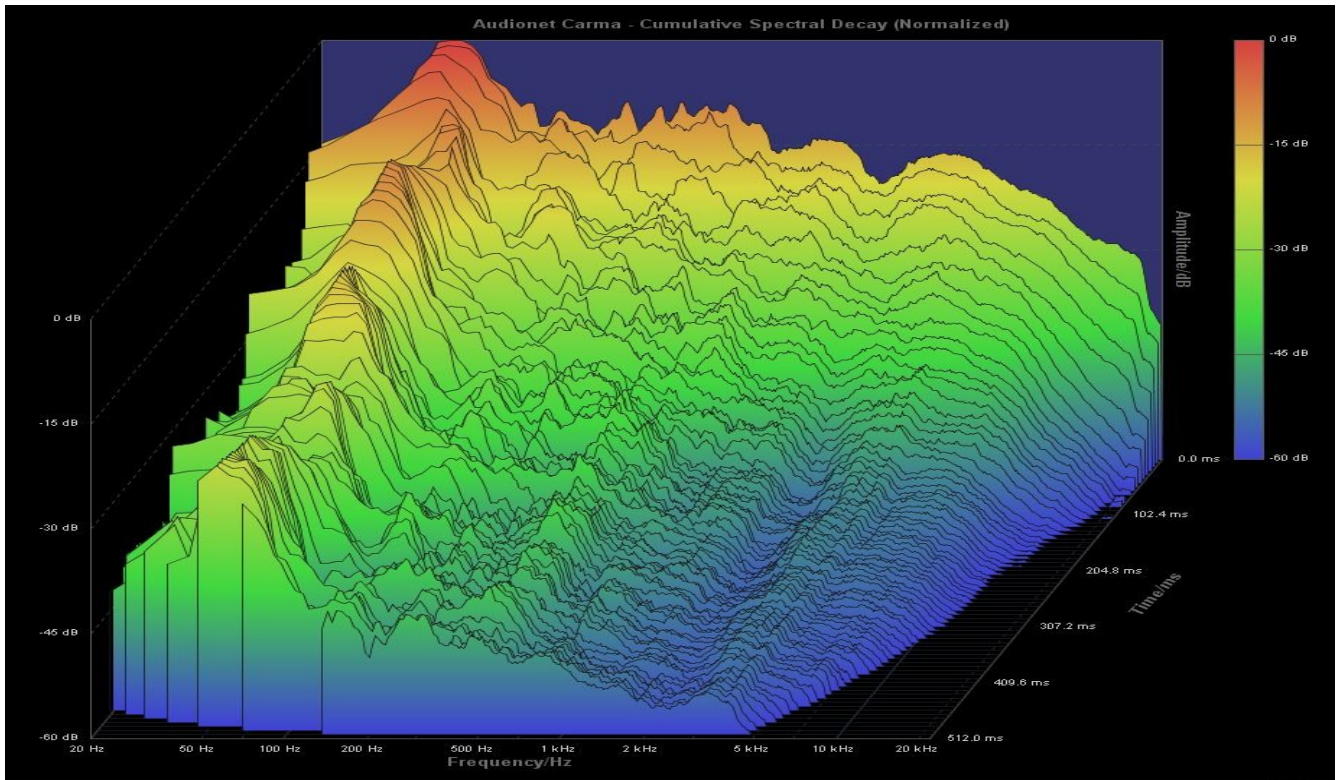
Wasserfalldiagramm ohne Verhallung:



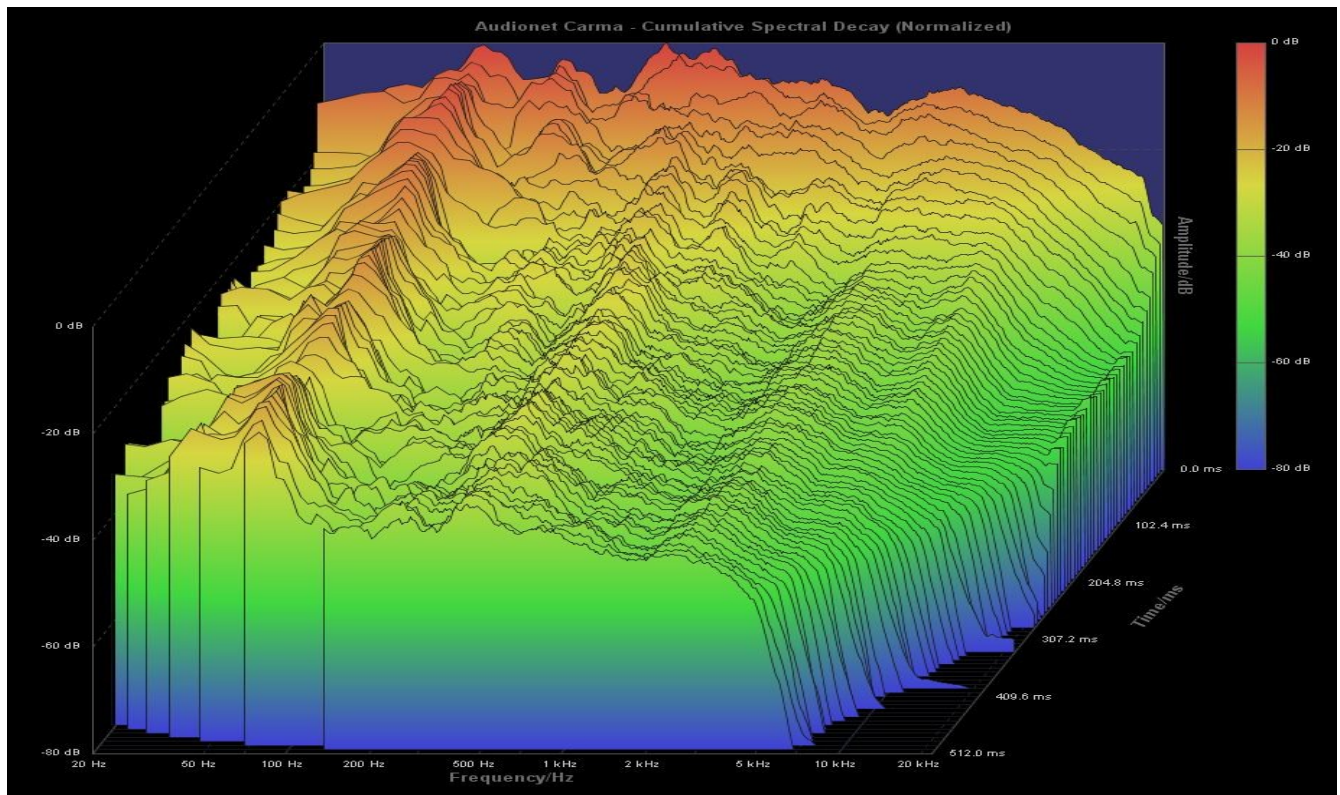
Jazz-Chamber:



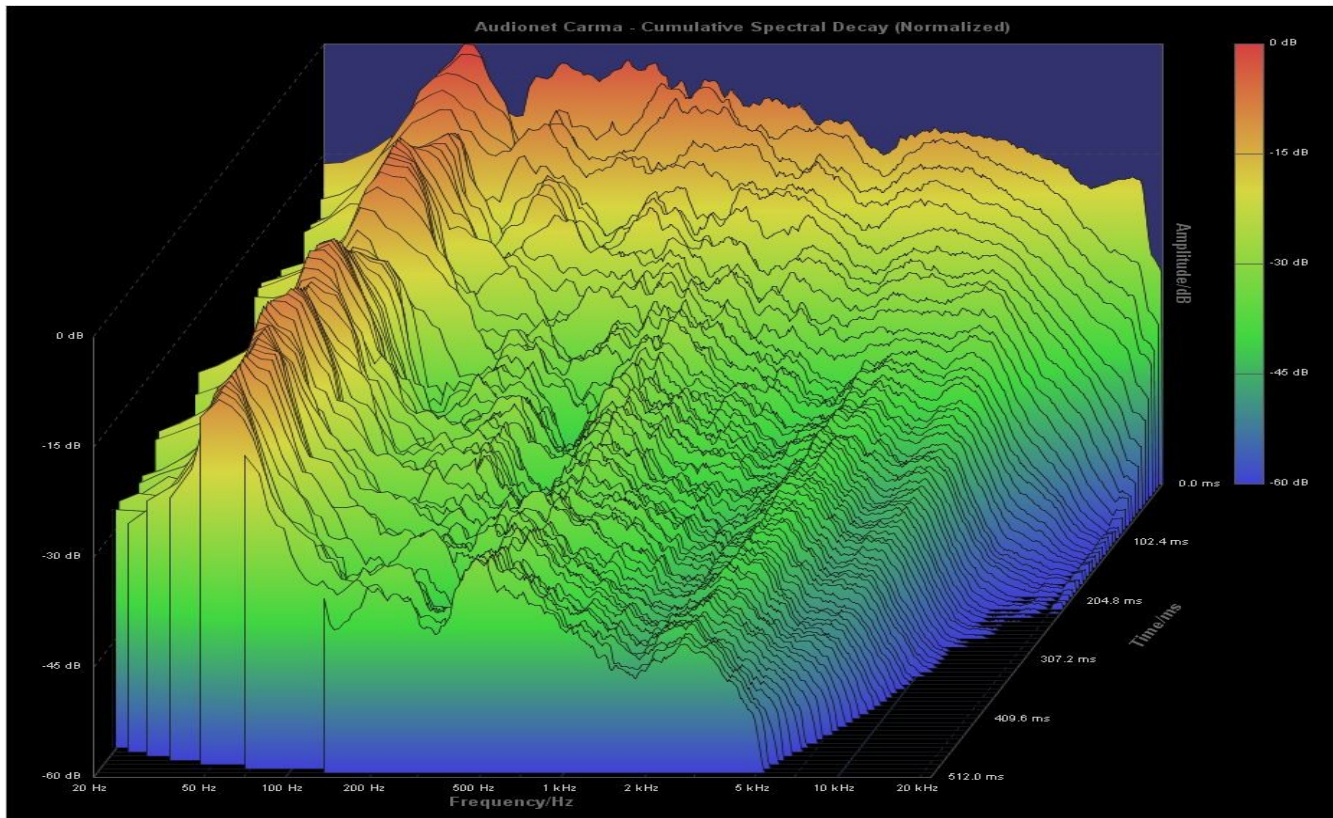
Kellerraum:



Großer Aufnahmerraum:



Kirche:



3.3 Benötigte Rechenleistung

Entgegen aller Erwartungen liegt die benötigte Rechenleistung in einem Rahmen, der von einem Standard Laptop bewältigt werden kann. Im aktuellen System benötigt es mit aktiver Wiedergabe einer 5.1 Audio/Videospur gerade 900Mb RAM und 1,8GHz. Auf einem Standard Laptop läuft es knackfrei.

3.4 Realisierung mit USB Audio-Sticks

Um das Projekt im finanzierbaren Rahmen halten zu können ist theoretisch die Realisierung mittels Netbook, USB Audio-Sticks und USB-Multi-Hubs möglich. Latenzen bis minimal 15ms wurden bei einem Test erreicht. Allerdings ist die Umsetzung um einiges komplexer, da sowohl an Hard- als auch Software teils tiefgreifende Modifikationen nötig sind.

Bevor es nun an die Entwicklung eines Systems für die Live-Beschallung geht, zeigt Abbildung 17 das fertig ausgebaute System „MUMUTHino“. Der Name wurde von einer Freundin ins Leben gerufen, als sie zum Probehören zu Besuch war. Ich fand ihn passend, und habe ihn deshalb als Titel für dieses Projekt ausgewählt. In der Hoffnung dadurch keine Urheberrechte zu gefährden, wird dieser Name im privaten Gebrauch weiter geführt.

Abbildung 17:



4. Entwicklung eines portablen, multifunktionalen Systems für die Live-Beschallung

In den folgenden Abschnitten soll die Entwicklung eines portablen Systems für die Live-Beschallung beschrieben werden. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf :

- Leistung
- Portabilität
- Qualität
- Preis-Leistung
- Servicefreundlichkeit

gelegt werden. Die portable Anlage soll für kleine (Klassenzimmer) bis größere Veranstaltungen (1-Fach Turnhalle) ausgelegt sein.

Die Reihenfolge der Entwicklung ist der des Signalflusses ident.

4.1 Mikrofone

Mit Kleinmembranern der Firma Rode wurden bisher nur positive Erfahrungen gemacht. Laut Datenblatt (http://images6.thomann.de/pics/prod/154595_datasheet.pdf) und Testberichten ist das NT-5MP in der unteren Preisklasse unübertroffen.

Niedriges Grundrauschen, ausgeglichene Richtcharakteristik über den gesamten Frequenzbereich und – falls man Testberichten Glauben schenken kann – ein ausgewogener Klang zeichnen das Mikrofon aus.

Minimale Anzahl an Mikrofonen: 6 (Matrix 2x3)

Maximale Anzahl an Mikrofonen: 12 (Matrix 3x4)

4.2 Digitale Signalverarbeitung

Das Frontend der Signalverarbeitung bilden Behringer ADA8000. Durch eine Messung dieses Wandlers mit einem Messplatz von Audio-Precision wurde die außergewöhnliche Linearität und Rauscharmut nachgewiesen (s. Abbildung 18 und Abbildung 19)



Abbildung 18:

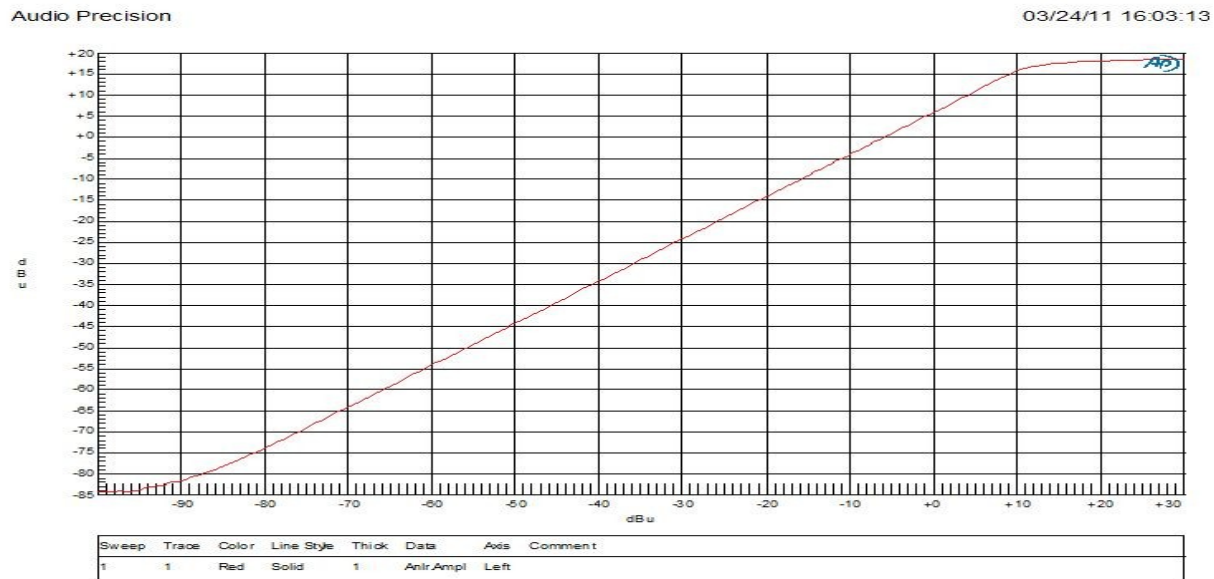
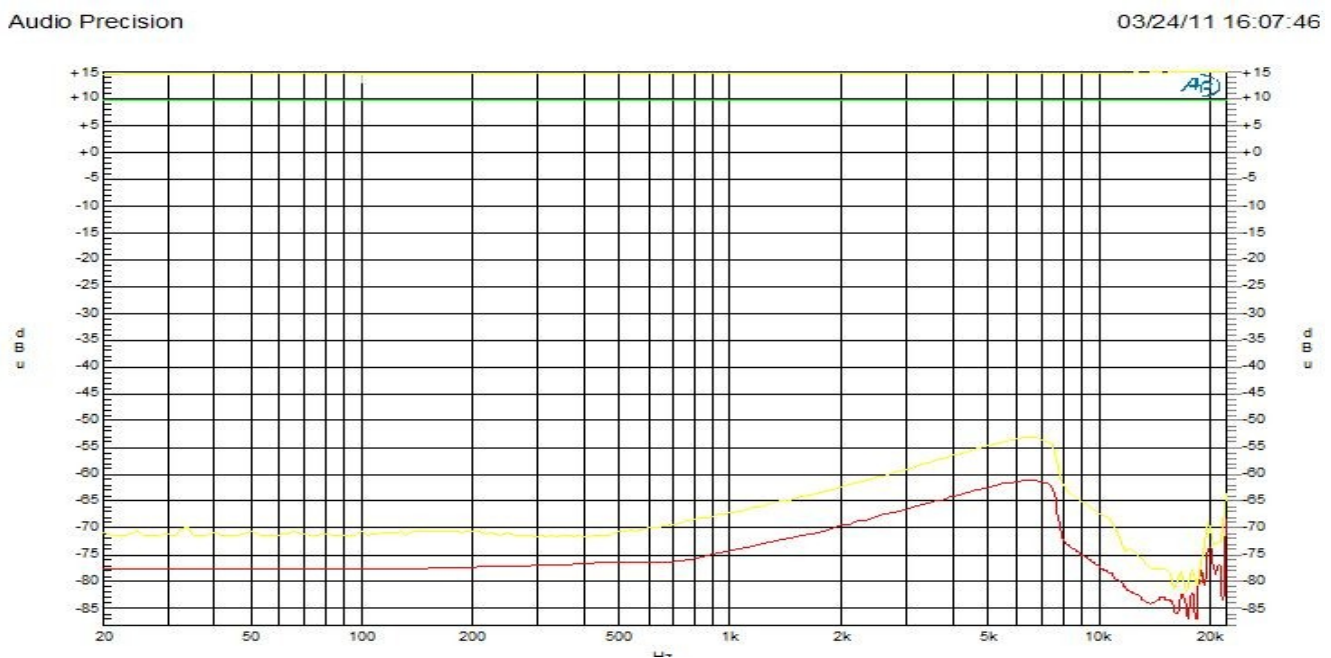
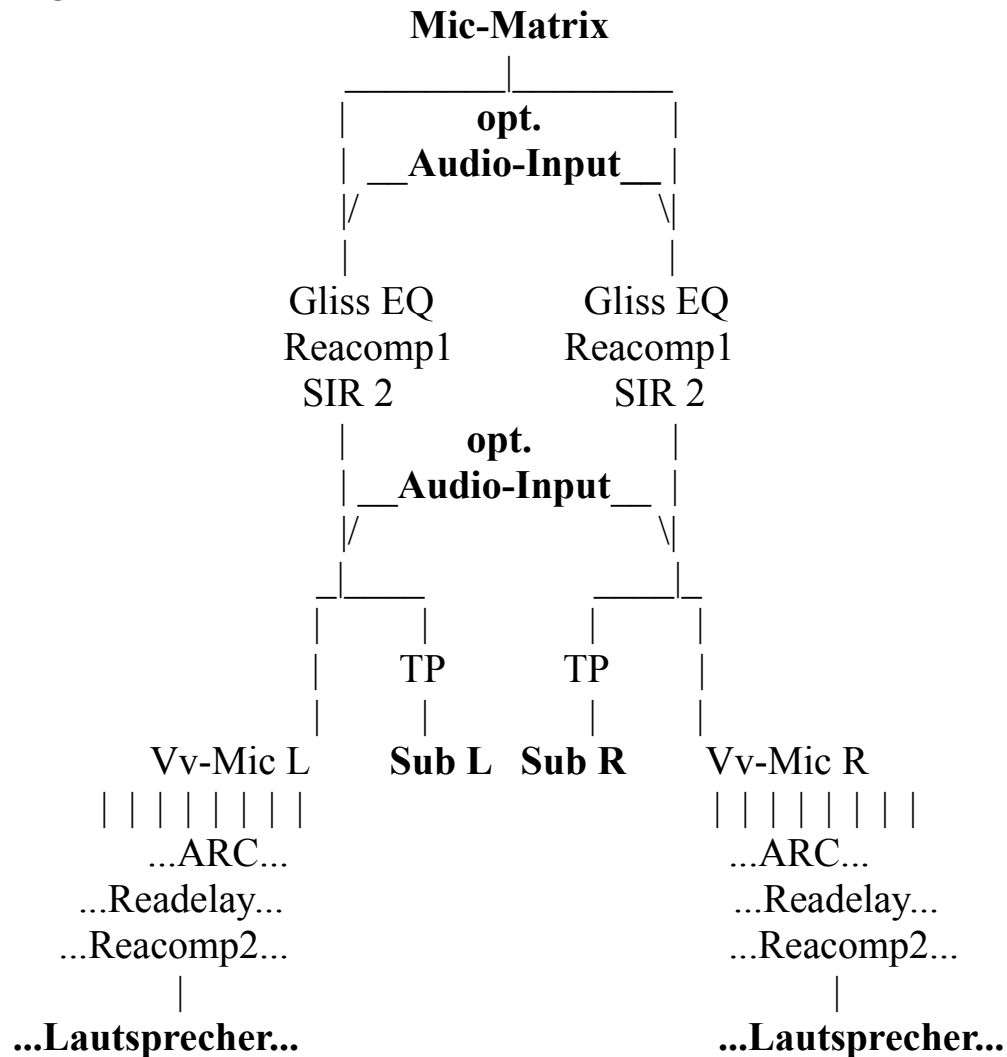


Abbildung 19:



Nach der A/D Wandlung gelangt das Signal per ADAT, wie im obigen Projekt durch eine M-Audio Profire Lightbridge in den Audio PC. Das Routing und die Signalverarbeitung sind dem obigen Projekt ähnlich. Jedoch wird in diesem Fall zur Erhöhung der Flexibilität und verbesserten Haptik ein Digitalpult (Behringer DDX3216, Yamaha 01V96, LS9, Tascam i.a.) eingesetzt werden. Das Folgende bezieht sich auf ein Setup mit DDX32 16. Das Pult ist in 4 Ebenen zu je 16 Motorfädern aufgebaut, sodass 4 unabhängige Bereiche gesteuert werden können. Die Zuweisung ist hierbei frei wählbar und kann auf jeder Ebene sowohl Audio, als auch Steuerbefehle (Midi, Midi-Sys-Ex) enthalten. Nach der Signalverarbeitung werden die Audiodaten über die Behringer ADA8000 ausgegeben.

4.3 Routing:



4.4 Systemverkabelung

Bei einer erwarteten Anzahl von bis zu 24 Audiospuren (=Lautsprecher) kommt nur eine Systemverkabelung in Frage. Es stellt sich nun die Frage des Übertragungssystems:

- passiv
- ELA
- aktiv

Im Folgenden sollen kurz Vor- und Nachteile dargelegt und eine Wertung abgegeben werden.

Passiv:

<i>Pro</i>	<i>Contra</i>
günstiger LS Kabel	Lange, verlustbehaftete Signalwege
Einfache Anschlusspaneele	Dämpfungsfaktorverlust bei langen Kabelstrecken
Standardsteckverbindungen	Unübersichtliche Kabel am Verstärker (Farbliche Codierung nötig)
Zentrale Verstärker	Parallele statt serielle Verkabelung

ELA:

<i>Pro</i>	<i>Contra</i>
Kaum Verluste durch lange Kabel	Verluste durch Übertrager
Zentrale Verstärker	Unübersichtliche Kabel am Verstärker (Farbliche Codierung nötig)
Günstige LS Kabel	Parallele statt serielle Verkabelung
Einfache Anschlusspaneele	Anzahl der Übertrager
Standardsteckverbindungen	Spezielle Verstärker

Aktiv:

<i>Pro</i>	<i>Contra</i>
Hoher Dämpfungsfaktor	Komplexer Aufbau eines aktiven LS
Serielle Verkabelung	Spezielle Kabel nötig
Günstige Systemverkabelung	
Freie Zuweisung eines Kanals zu einem bestimmten LS	

Viele Argumente sprechen für die einfacher zu bauenden Varianten Passiv und ELA. Das Signal wird jedoch entweder durch eine unübersichtliche Verkabelung übertragen oder übermäßig verfälscht, sodass die Entscheidung zu Gunsten des Aktiven Systems gefällt wird.

Natürlich ist auch ein passiver Aufbau mit Abzügen in Klangqualität und Variabilität möglich, was für Verleiher sinnvoll ist, welche schon mit einer ausreichenden Stückzahl von Breitband oder Koaxiallautsprechern ausgerüstet sind. Ein Beispiel hierfür ist der RCF MQ 80P-B. Im Folgenden wird mit der Entwicklung eines aktiven Lautsprechers fortgefahren.

4.5 Lautsprecherentwicklung

4.5.1 Chassis

Die unübersichtliche Marktsituation bei Wirkungsgrad-starken Mitteltönern im 4-6 Zoll Segment erleichtert die Entscheidung für ein Chassis nicht wirklich.

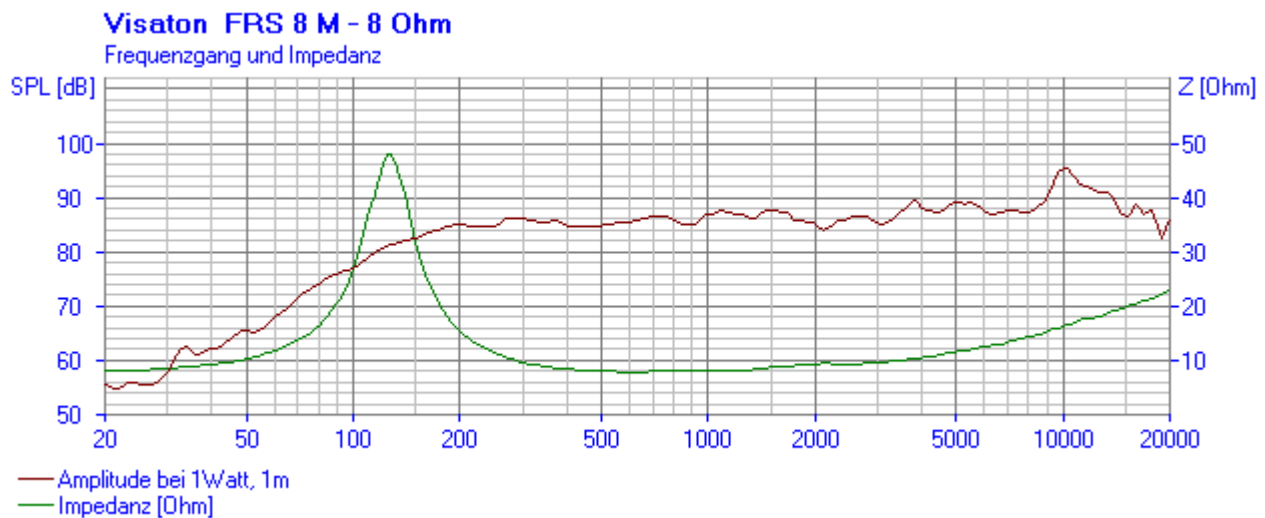
Mit Chassis von Visaton wurden bisher durchweg positive Erfahrungen gemacht. Durch die Software „Boxim“, welche von Visaton kostenlos zur Verfügung gestellt wird, sind Simulationen verschiedener Chassis möglich.

Nach dem Vergleich einiger LS fiel die Entscheidung auf das Chassis FRS8 M. Es stellt einen Kompromiss zwischen Größe, Frequenzgang und Schalldruck dar.

Durch Zufall konnte ich schon Erfahrungen mit diesem Chassis sammeln.

Der Peak im Frequenzband um 10kHz war das einzig störende Band und kann ohne Probleme durch aktive Filter linearisiert werden.

Abbildung 20:



Für den Tieftonbereich wird kein Lautsprecher entwickelt, sondern auf wirkungsgradstarke PA Subwoofer zurückgegriffen.

Da Frequenzen unterhalb von 150Hz nicht geortet werden können, reichen wenige, qualitativ hochwertige Lautsprecher aus.

Bei der Verwendung weniger Lautsprecher muss genauestens auf die Aufstellung geachtet werden. Hier wird nicht näher auf verschiedene Theorien der Bassaufstellung eingegangen, da es auch sehr vom Einsatzort abhängt.

4.5.2 Gehäuse

Die Gehäuseform wird multifunktional ausgelegt. Im Live-Betrieb macht es wenig Sinn, ein System für nur einen bestimmten Anwendungsbereich anzuschaffen.

Wünschenswert ist ein Gehäuse, welches sich für den oben genannten Fall z.B. auf günstige Mikrofonständer oder Theaterhaken montieren und für die normale Frontbeschallung auch als Groundstack verwenden lässt. Auch Flugbetrieb darf nicht ausgeschlossen werden. Es soll einerseits genügend Platz bieten, um die Elektronik und Chassis aufnehmen zu können, andererseits klein und leicht genug sein um auf einem Standard Mikrofonständer stabil montiert werden zu können.

Für den Lautsprecher sind 3l ideal. Außenmaße von(LxBxH) 15x15x15cm  scheinen realistisch und lassen genügend Platz für Bassreflex Öffnungen. Dennoch soll das Gehäuse nach hinten konisch auf eine Breite von 13cm zulaufen um im

Flugbetrieb ein Curving möglich zu machen. Bei einer Abstimmungsfrequenz von 110Hz erreicht man entgegen einer geschlossenen Box einen Pegelanstieg von 10dB bei 100Hz. Wie bei Bassreflex Lautsprechern üblich, fällt der Pegel unterhalb der Abstimmungsfrequenz steil ab. Der Maximalpegel beträgt 105dB in 1 Meter Entfernung. Abbildung 21 zeigt eine geschlossene, Abbildung 22 eine Bassreflex Box mit 110Hz Abstimmungsfrequenz:

Abbildung 21:

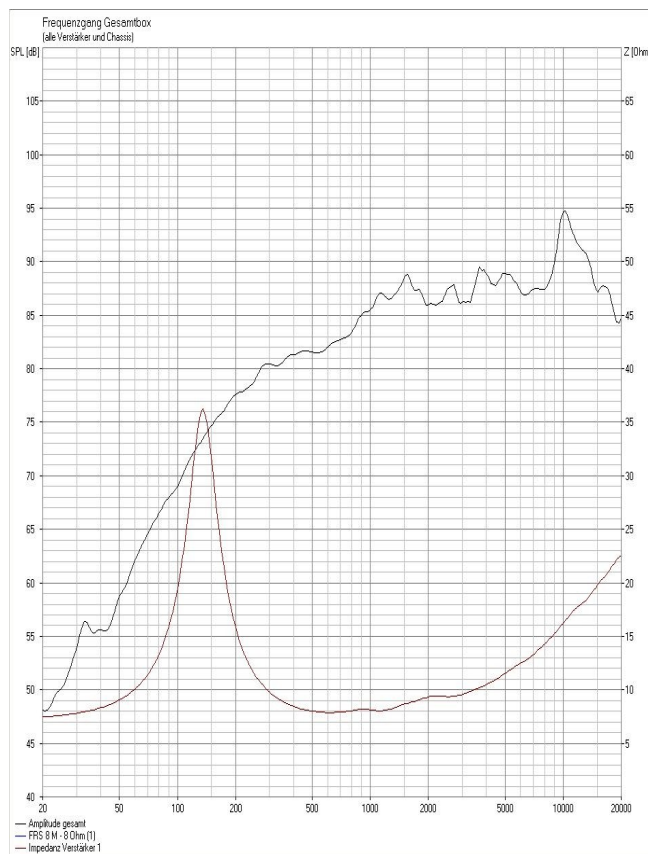
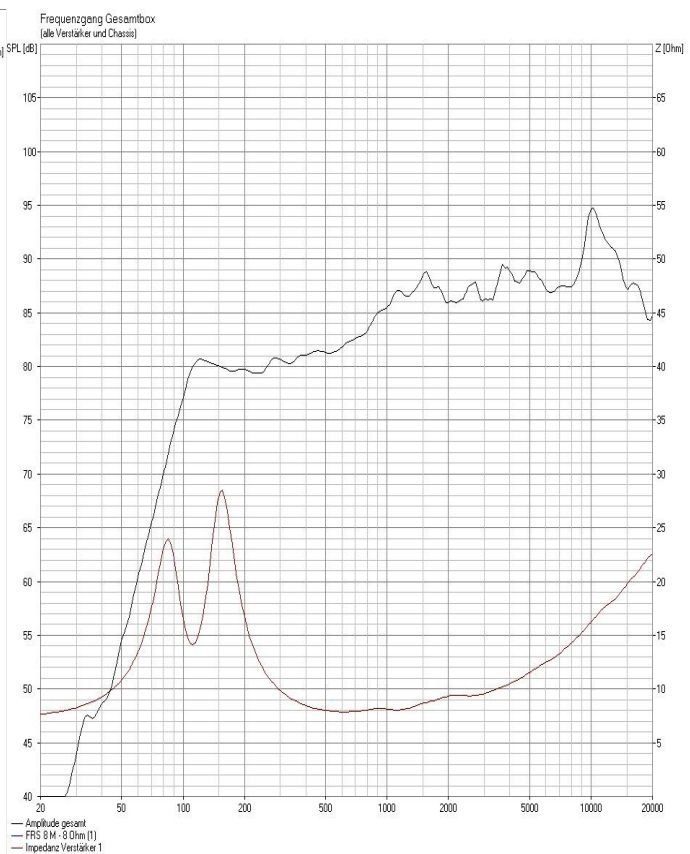


Abbildung 22:



4.5.3 Bassreflex System

Um eine gleichmäßige Abstrahlung ohne Auslöschungen zu erreichen, kommen 4 Bassreflexrohre auf der Vorderseite zum Einsatz. Die Berechnung wird automatisch durchgeführt, da es meiner Einschätzung nach manuell nicht mehr zeitgemäß ist und die Kalkulation so um vieles genauer und flexibler ist.

Abbildung 23:

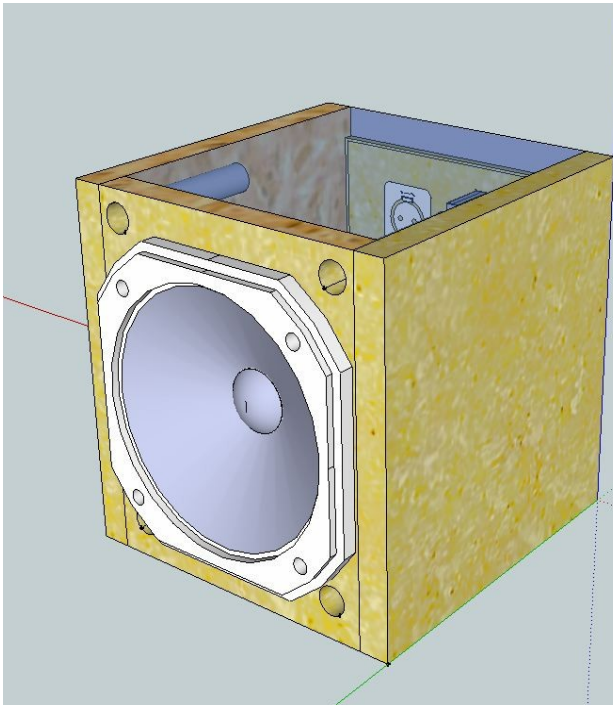
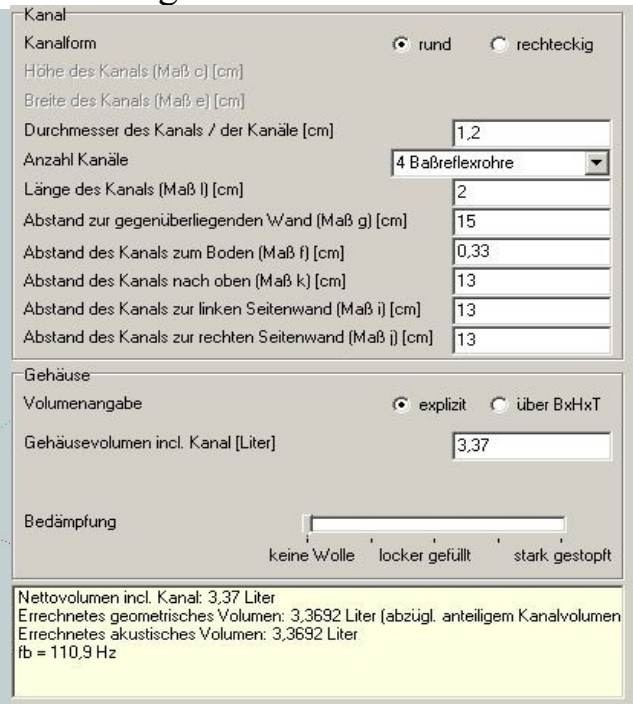
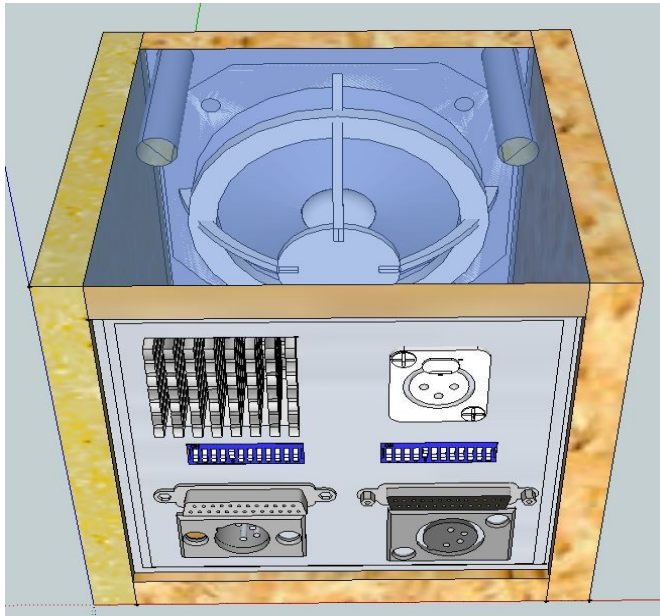


Abbildung 24

A screenshot of a software interface for calculating speaker cabinet parameters. The interface is divided into two main sections: 'Kanal' (Channel) and 'Gehäuse' (Cabinet). The 'Kanal' section includes fields for 'Kanalform' (radio buttons for 'rund' and 'rechteckig'), 'Höhe des Kanals (Maß c) [cm]', 'Breite des Kanals (Maß e) [cm]', 'Durchmesser des Kanals / der Kanäle [cm]' (value: 1,2), 'Anzahl Kanäle' (dropdown menu showing '4 Baßreflexrohre'), 'Länge des Kanals (Maß l) [cm]' (value: 2), 'Abstand zur gegenüberliegenden Wand (Maß g) [cm]' (value: 15), 'Abstand des Kanals zum Boden (Maß f) [cm]' (value: 0,33), 'Abstand des Kanals nach oben (Maß k) [cm]' (value: 13), 'Abstand des Kanals zur linken Seitenwand (Maß i) [cm]' (value: 13), and 'Abstand des Kanals zur rechten Seitenwand (Maß j) [cm]' (value: 13). The 'Gehäuse' section includes 'Volumenangabe' (radio buttons for 'explizit' and 'über BxHxT'), 'Gehäusevolumen incl. Kanal [Liter]' (value: 3,37), and a 'Bedämpfung' (Damping) slider with positions for 'keine Wolle', 'locker gefüllt', and 'stark gestopft'. At the bottom, a summary box displays: 'Nettovolumen incl. Kanal: 3,37 Liter', 'Errechnetes geometrisches Volumen: 3,3692 Liter (abzügl. anteiligem Kanalvolumen)', 'Errechnetes akustisches Volumen: 3,3692 Liter', and 'fb = 110,9 Hz'.

Das Gehäuse wird mit 12-13mm Sperrholz bzw MDF erstellt, um Vibrationen so gering als möglich zu halten. Die Rückseite wird komplett vom Anschlusspaneel eingenommen.

Abbildung 25:



Bauteile:

- XLR 3 Female: Mikrofon/Line Eingang (Regelbar durch Poti)
- Kühlkörper: Kühlung des Verstärker IC
- DIP Schalter: Zuweisung des Multicore Kanals (ähnlich DMX)
- SUB-D Male: Audio-Multicore IN
- SUB-D Female: Audio-Multicore Out
- XLR 4 Male: Stromversorgung In (+/- 30V; GND)
- XLR 4 Female: Stromversorgung Out (+/- 30V; GND)

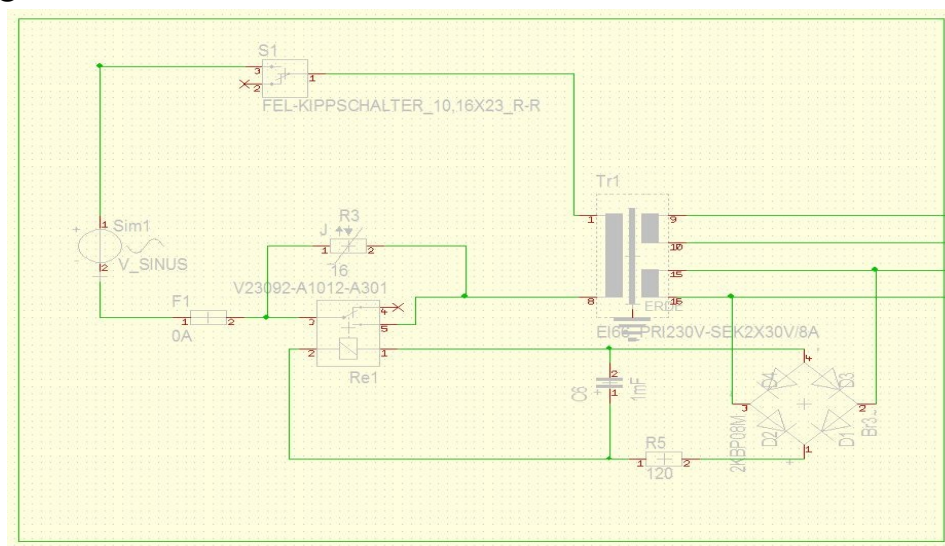
4.6 Aktivelektronik

4.6.1 Stromversorgung

Hier wird eine etwas unorthodoxe Methode gewählt. Die Spannungstransformation findet an einem zentralen Platz von 230V in 4x 30V AC statt. Durch die zentrale Wandlung können 2 große Ringkerntrafos Anwendung finden welche durch 2 getrennte Stromkreise die Versorgung der linken und rechten Signalkette sicherstellt. Die Gleichrichtung und Pufferung findet entweder im Trafogehäuse oder in den Lautsprechern statt. Welche Variante besser klingt, soll im Versuch getestet werden. Durch den Wegfall eines Netzteils bzw. Trafos verringert sich das Gewicht und das Preis Leistungs Verhältnis/LS steigt. Der Verstärker IC bringt schon ab 24 V seine volle Leistung von 68W an 4 Ohm. Leistungsverluste über das Kabel können bei ausreichender Pufferung im LS vernachlässigt werden.

Bei Ringkerntrafos im Leistungsbereich über 200W ist es sinnvoll eine Einschaltstrombegrenzung einzusetzen. Diese wird in Diagramm 12 durch R3, einen Heißleiter realisiert. Dieser lässt anfangs nur einen sehr kleinen Strom durch den Trafo, welcher gerade ausreicht, durch R5 den Kondensator C5 zu Laden. Ist der Kondensator zu 40% geladen, schließt das Relais Re1. Der Ringkerntrafo ist nun niederohmig mit der Versorgungsspannung verbunden und somit voll leistungsfähig. Der NTC kühlt wieder ab und wirkt auch bei kurzen Stromausfällen oder unbeabsichtigtem Aus- und wieder Einschalten.

Abbildung 26:



Da der Ort der Pufferung und Gleichrichtung noch nicht feststeht, wird hier nur darauf hingewiesen, dass die Gleichrichtung durch Brückengleichrichter und die Pufferung durch jeweils $6 \times 10.000 \mu\text{F}$ realisiert wird, sofern die Glättung im Trafogehäuse stattfindet. Andernfalls wird sie durch jeweils 1×10.000 für V_{cc} und V_{ee} im Lautsprechergehäuse geschehen.

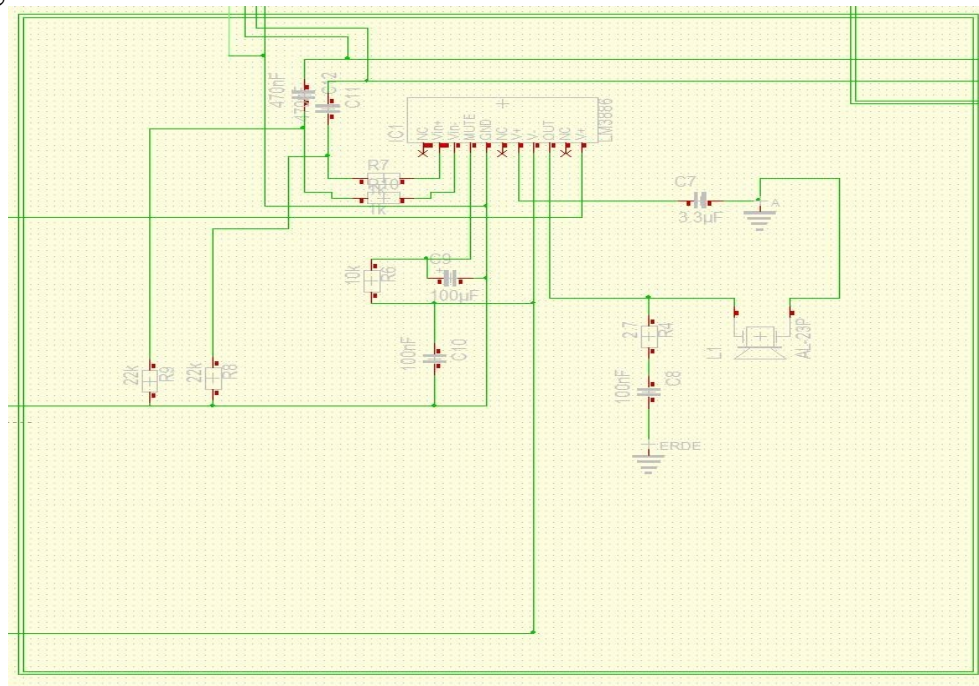
4.6.2 Verstärker

Abbildung 27 zeigt den Schaltungsaufbau für den Verstärker IC. Aufgrund des einfachen Aufbaus und der nahezu perfekten Werte habe ich mich für die Verwendung des Verstärker ICs „LM3886“ entschieden.

(Gekürzte) Technische Daten:

- 68W Dauerleistung bei $\pm 28\text{V}$ an 4 Ohm
- 135W Spitzenleistung
- S/N-Ratio $>92\text{dB}$
- diverse Schutzschaltungen
- symmetrischer Eingang
- THD+N max. 0,03% bei Vollaussteuerung

Abbildung 27:



Die diskreten Anbauteile wurden hauptsächlich dem Datenblatt entnommen. Aus Sicherheitsgründen wurden allerdings Koppelkondensatoren C11/C12 vor den Eingang gesetzt, welche Gleichstrom von Selbigem abhalten (z.B. Phantomspeisung). Der Eingang wird, wie im professionellen Audiobereich üblich, symmetrisch gegen Grund ausgeführt.

4.6.3 NF Eingang

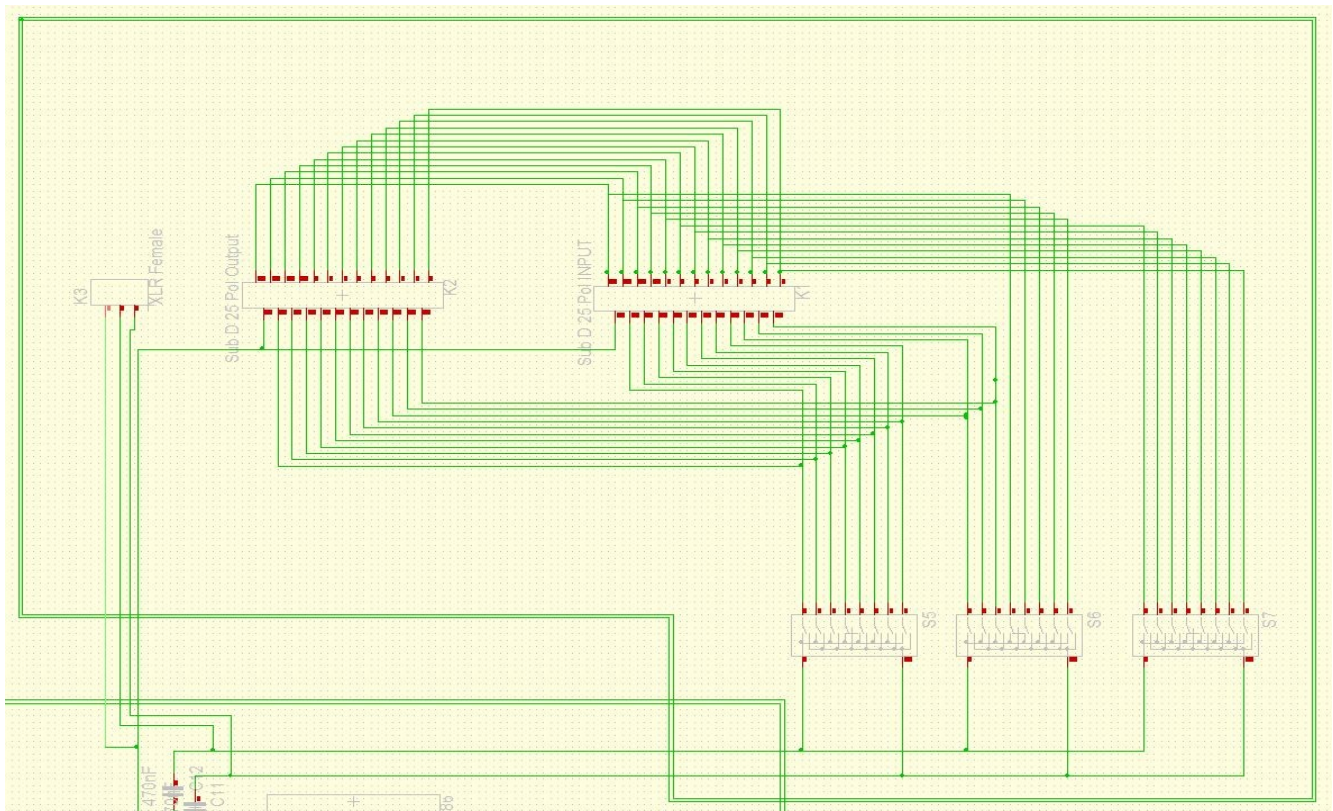
Die o.g. Systemverkabelung verlangt die Adressierbarkeit eines jeden Lautsprechers ebenso, wie die Möglichkeit viele Signale durchschleifen zu können. Es soll zudem möglich sein, günstige Multicore Kabel zu verwenden. Bei Recherchen stieß ich auf SUB-D Kabel, welche von 9 bis 25 Polen zu erhalten sind. Längen sind von wenigen Zentimetern bis 30m in unterschiedlichsten Qualitätsstufen auf dem Markt. Bei der 25-Pol Version lassen sich so 12 symmetrische Kanäle übertragen. Die Dämpfungs- und Übertragungseigenschaften müssen durch Tests in Erfahrung gebracht werden. Wie bei jedem aktiven Lautsprecher inzwischen üblich, darf ein regelbarer Mic/Line Eingang nicht fehlen. In diesem Fall wird die Möglichkeit nicht außer Acht gelassen, diesen auch auf die SUB-D Leisten legen zu können. Als Eingangsstufe wird eine OP-Amp Mikrofonvorstufe mit Phantomspeisung auf Basis eines NJM4580 bzw. THAT 1510 verwendet, welche rauscharm, günstig und platzsparend ist. Eine abschaltbare, aktive Klangregelung mit low/high Shelving Filtern und einer parametrischen Mitte, sowie einer Delay-DSP für Standalone-Anwendungen wird ebenfalls implementiert.

Die Zuweisung der Kanäle erfolgt mittels 24 Dipschaltern.

Codierung:

Dip 1	Kanal 1	Phase 0°
Dip 2	Kanal 1	Phase 180°
Dip 3	Kanal 2	Phase 0°
Dip 4	Kanal 2	Phase 180°
...	...	...
Dip 23	Kanal 12	Phase 0°
Dip 24	Kanal 12	Phase 180°
Dip 25	Masse	

Abbildung 28 zeigt den dazugehörigen Schaltplan:



4.7 Anwendungsbeispiele

4.7.1 Variable Raumakustik

Das Gebiet, für das dieses System entwickelt wurde, liegt bei kleineren Veranstaltungen bis ca. 200 Personen: Einfachturnhallen, Klassenzimmer, Kleinkunst-Theater, Je größer und halliger der zu beschallende Raum, desto mehr natürlicher Diffusschall kann verwendet werden. Dabei muss nicht zwangsweise ein frequenzlinearer Nachhall im Raum vorherrschen. Durch eine vorherige Analyse des Raumes kann aktiv ein nahezu linearer Nachhall erzeugt werden.  Bei Veranstaltungen, bei denen der Nachhall sehr kurz bis sehr lang sein muss, müssen trotzdem Maßnahmen mit Absorbern/Diffusoren getroffen werden. Da hier die Erfahrungen fehlen, müssen diese mit dem „MUMUTHino“ System erst noch gesammelt werden.

4.7.2 Groundstack

Die wohl am häufigsten anzutreffende Beschallungssituation ist das Stacking am Boden bzw. das Aufstellen von Lautsprechern auf Stativen. Durch die Möglichkeit 1-12 Lautsprecher pro Seite einzusetzen und diese durch verschiedene Subwoofer ergänzen zu können, eröffnen sich viele Einsatzmöglichkeiten. Konferenzen, Schulkonzerte, Sprachbeschallung. etc.  Durch die schmale hohe Anordnung der Lautsprecher erhält man eine Schallzeile (LA).

Berechnung des Nahfeldradius:

Abbildung 29:

$$r_{\text{Fernfeld}} = \frac{l^2 \cdot f}{340 \text{ m/s}}$$

(Nahfeld: -3dB/m ; Fernfeld: -6dB/m)

Beispiel: Standardlautsprecher 12“/1“ Bestückung bei 130dB in 1m Entfernung
vs. 8 Lautsprecher in LA Anordnung 116dB in 1m Entfernung.

Entfernung [m]	DB 12“/1“	dB LA	
1	130	116	
2	124	113	
3	118	110	
4	112	107	
5	106	104	
6	100	101	
7	94	98	
8	88	95	

Trotz der geringeren Lautstärke des LA's ist dieses schon ab 6m Entfernung lauter als ein Standardlautsprecher. Irrtümlicherweise wird der Lautsprecher hier als Kugelschallquelle angenommen, was real nie der Fall ist. Gerade Hochtöner fokussieren den Schall oft durch Hörner. Die LA Technik ist durch ihre Longthrow Eigenschaften dennoch unübertroffen.

Durch das Feature der Verzögerung einzelner Lautsprecher kann das Stack senkrecht aufgebaut und der Schall mit maximal 20° nach oben bzw. unten abgelenkt werden. Auch eine Fokussierung oder Streuung ist in gewissem Rahmen möglich. 

4.7.3 Geflogener Aufbau

Für die fliegende Montage stehen Flugpunkte zur Verfügung. Um das System noch flexibler zu gestalten, besteht sowohl die Möglichkeit, das System manuell, als auch akustisch (Laptop+Software/eingebaute Delay-DSP) zu curven.

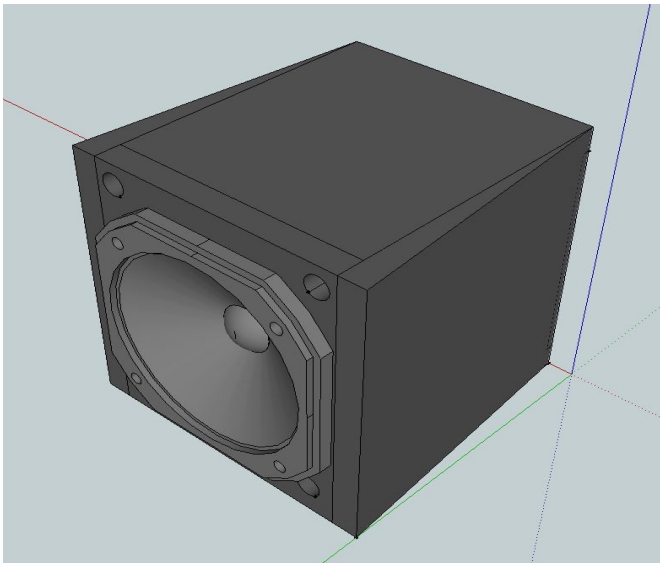
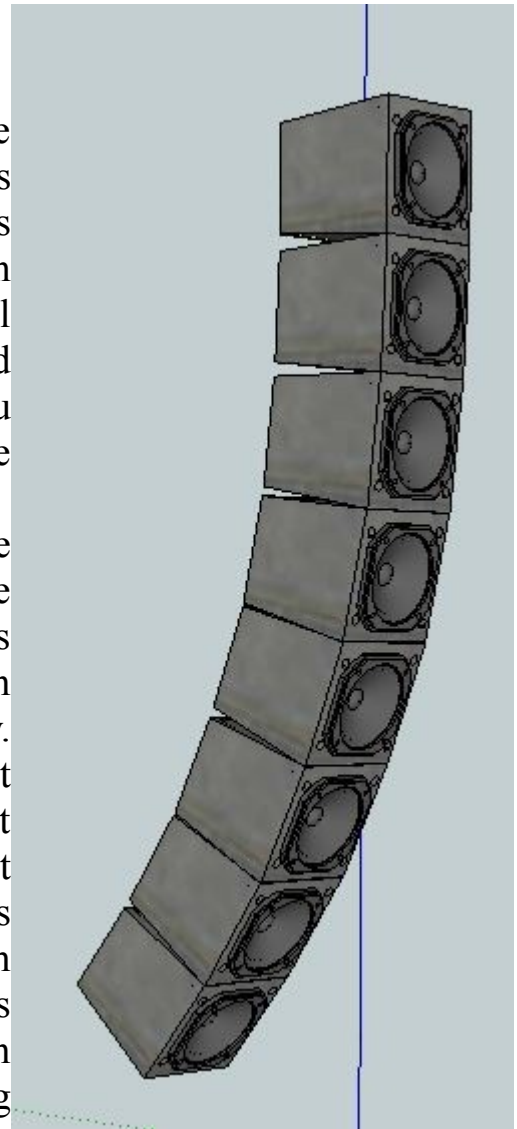
Bei manuellem Curving wird an einem der Lautsprecher per XLR das Signal eingespeist und per D-Sub durch alle LS durchgeschleift. Ein Laptop mit DSP ist dabei nicht nötig. Die Klangregelung geschieht mittels eingebautem EQ.

Ein Mischpult kann somit ohne weitere Signalprozessoren direkt angeschlossen werden.

5. Schlussbemerkung

Sowohl das System „MUMUTHino“, als auch die Weiterentwicklung als multifunktionales Beschallungssystem bieten sicherlich enormes Potenzial. Durch die heutigen Möglichkeiten Frequenzgänge für viele Lautsprecher individuell zu verändern, mit wenig Hardware- Aufwand komplexeste Beschallungsaufgaben lösen zu können bietet es sich für verschiedenste Veranstaltungsformen an.

Auch, wenn die Leistungsfähigkeit nicht an eine große PA heran reicht, sind hohe Schalldrücke erreichbar. Dabei muss man immer bedenken, dass das System als Raumsimulationssystem entworfen wurde, bei welchem nur Diffusschall erzeugt bzw. verstärkt werden muss. Der Einsatzbereich liegt hier meiner Einschätzung nach, wie oben erwähnt bei kleineren Veranstaltungen. Die Erfahrungen mit „MUMUTHino“ waren sehr interessant. Das Experiment, den Cube oder das MUMUTH im Kleinen nachzuahmen kann ich deshalb als gelungen bezeichnen. Sicherlich wird an der einen oder anderen Stelle noch eine Veränderung gemacht werden, das Grundkonzept



hat jedoch erstaunlich gut funktioniert. Die 90 investierten Euro für die Lautsprecher haben sich gelohnt. Die Anschaffung des großen Systems bewegt sich zwischen 800 (24 LS) und 3000 Euro (24 LS, Mikrofone, Audio-PC, Verkabelung) Wenn das Budget einmal zur Verfügung steht, wird das System gebaut und getestet.

(QuellenVZ. Und Klangbeispiele auf Wunsch erhältlich)