

Virtuelle Raumakustik

Markus Geigl und Imre Csonka

3. September 2004

Zusammenfassung

Zur Vergrößerung und Überhöhung des räumlichen Eindrucks werden zusätzlich zum Beschallungssystem Mikrofone im Raum angebracht, deren Signale direkt und/ oder über Verhallungseinheiten den verwendeten Lautsprechern wieder zugeführt werden. Dadurch kann das zeitliche und örtliche Auftreten von (künstlichen) Reflexionen und somit die räumliche Energiedichte gesteuert werden. Dabei wird die Nachhallzeit und die Nachhallkurve modifiziert. Je nach Platzierung der Mikrofone unterscheidet man zwischen Inline und Non-Inline Systemen (hier kommt es zur Kombination der beiden Ansätze). Ein kritischer Parameter beim Entwurf dieser Systeme ist der Schleifenverstärkungsfaktor in der "feedback-loop". Im Allgemeinen gilt, je größer dieser Wert gewählt wird, desto größer wird der Raumeindruck, jedoch steigt gleichzeitig die Gefahr der Klangfärbung und Mitkopplung. Ein Verfahren welches diese Eigenschaft ein wenig reduzieren kann, wird in der Beschallungstechnik "Wobbeln". Dieses kann entweder in der Signalverarbeitungsebene durch Modellieren von Übertragungsfunktionen erfolgen oder durch eine ständige Änderung der Verbindung von Mikrofon- und Lautsprecherpositionen realisiert werden. Für den IEM Cube sollte die Konzeption eines funktionstüchtigen Systems auf der Basis des Ambisonic-Verfahrens erfolgen. Die Änderung / Modulation der Übertragungsfunktionen kann dabei durch zeitlich variable Rotationsmatrizen realisiert werden.

Auf der Basis von Ambisonic gibt es bereits theoretische Ansätze für eine 3D Verhallung. Dabei wird ein bestehendes reales oder synthetisches Schallfeld auf virtuelle Lautsprecher dekodiert. Diese Signale werden mit Raumimpulsantworten (IR) gefaltet, in den Ambisonic Domain rücktransformiert, dem bestehenden Schallfeld zugemischt und über die realen Lautsprecher wiedergegeben. Die IR können durch reale 3D Messungen gewonnen werden oder für künstlerische, experimentelle Zwecke durch unterschiedliche Hallprogramme ersetzt werden. Die Realisierung erfolgt unter Verwendung von PD und externen Hallgeräten (TC M5000).

Inhaltsverzeichnis

1	InLine und NonInLine Systeme	3
1.1	Inline Systeme	3
1.2	Non-Inline Systeme	3
2	Die Applikation	4
2.1	Programmierung	4
2.1.1	Signalfluss	4
2.1.2	pd core	4
2.1.3	mi_da_mikro_michl	7
2.1.4	mi_da_hall_hans	7
2.1.5	Feedback-Unterdrückung	10
2.1.6	Bandpassbank	10
2.1.7	Wobbeln	11
2.1.8	Frequenzshifter	11
2.1.9	Faltung	11
2.2	Benutzeroberfläche	12
2.2.1	LoadIR	12
2.2.2	TetraEdit	14
2.2.3	MasterE dit	15
2.2.4	FeedbackControl	15
3	Ausblick	16
	Abbildungsverzeichnis	17

1 InLine und NonInLine Systeme

Grundsätzlich lassen sich Hallsysteme in zwei große Kategorien unterteilen. Einerseits in "Inline" Systeme, andererseits in "Non-Inline" Systeme. Ziel der ersten Gruppe ist eine Detektion des Direktschalls, weshalb die Mikrofone möglichst nahe zur Schallquelle positioniert werden sollten. Die Mikrofone der zweiten Gruppe werden hingegen im Diffusfeld platziert und nehmen daher das Hallfeld auf. Die derzeitige Entwicklung geht jedoch eher in Richtung einer Kombination der beiden Systeme, um die auftretenden Nachteile der Einzelsysteme zu kompensieren.

1.1 Inline Systeme

Bei Inline Systemen erfolgt, wie bereits beschrieben die Mikrofonaufstellung in der Nähe der Quelle, um das Verhältnis des Direktsignals zum Hallsignal zu maximieren. Da sie primär Direktsignal aufnehmen können sie leicht lokale Eigenschaften der Raumakustik für Quellen auf der Bühne erhöhen. Zu nennen sind hier Klarheit, offensichtliche Quellweite und Anfangsnachhallzeit. Diese Systeme bringen die Information der Bühne besser zum Zuhörer. Die Gefahr einer akustischen Rückkopplung wird durch den niedrigen Diffusanteil minimiert, was allerdings eine vielleicht erwünschte Rückwirkung des Publikums oder eventuelle Aufführungen, die auch das Auditorium einbeziehen, praktisch unmöglich macht. Dieses Problem kann mit Hilfe zusätzlicher Subsysteme, die Mikrofone im Auditorium vorsehen, verhindert werden. Ein weiterer Nachteil eines Inline Systems ist die Lautsprecheraufstellung. Da sich manche Zuhörerplätze in der Nähe der Lautsprecher befinden können, kann dort das Lautsprechersignal den Höreindruck dominieren.

1.2 Non-Inline Systeme

Die Mikrofone werden hier im Zuhörerraum positioniert, um hauptsächlich den Diffusschall aufzunehmen. Diese Systeme eignen sich gut, um globale raumakustische Eigenschaften wie Lautheit, Nachhallzeit und Einhüllung zu erhöhen. Der Abstand von Mikrofon zur Quelle sollte größer als der Hallradius sein. Dieser Abstand muss auch zwischen Mikrofonen und Lautsprechern eingehalten werden, um einem Instabilitätsrisiko und möglichen Klangverfärbungen vorzubeugen. Die Mikrofonensignale sollten außerdem untereinander unkorreliert sein. Ein Nachteil bei Non-Inline Systemen ist, dass sie zwar eine Vielzahl an frühen Reflexionen erzeugen können, diese allerdings nur einen sehr geringen Pegel aufweisen. Daher können sie die lokalen raumakustischen Eigenschaften nur minimal beeinflussen.

Der Entwurf erfolgt durch Bestimmen der Anzahl der Kanäle und der Schleifenverstärkung, die eine gewünschte Verstärkung des eingeschwungenen Zustandes, bei akzeptablen Klangverfärbungen sichert. Wird ein Hallgerät eingeschliffen, kann das System die Nachhallzeit unabhängig von der Schleifenverstärkung und des eingeschwungenen Zustandes erhöhen, indem es das scheinbare Raumvolumen vergrößert.

2 Die Applikation

Nachdem die Theorie eines Systems einer virtuellen Raumakustik (VRAS) bereits im vorhergehenden Kapitel erklärt wurde, wird hier auf die speziellen Anforderungen der lokalen Gegebenheiten eingegangen.

Die Projektarbeit wurde auf einem Ambisonic-System 4. Ordnung erstellt. Die Wiedergabe erfolgt auf 24 unabhängigen Lautsprechern, die annähernd auf einer Halbkugeloberfläche (Hemispähre) platziert sind. Des weiteren wird von 6 Mikrofonen Gebrauch gemacht, die ubiquitär im Raum verteilt, von der Decke in einer Höhe von ca. 3m gehängt sind. Alle Signale laufen in einem Standard-PC (Linux) zusammen, werden dort verarbeitet und wieder auf die Hemisphäre verteilt. Dazu werden 24 (unter Verwendung des Faltungshalles) bzw. 28 I/O-Kanäle (4-kanaliges externes Hallgerät) benötigt. Auf die genaueren Hardware-Spezifikationen in unserem Fall wird weiter unten eingegangen.

Prinzipiell wurden mehrere separate Applikationen erstellt, um die verschiedenen Anforderungen (Verwendung eines Faltungshalles, sowie eines externen Hallgerätes) zu realisieren. Da viele Programmteile sich ähneln bzw. identisch sind wird in dieser Dokumentation eine Applikation erklärt, und zu gegebenem Zeitpunkt auf Unterschiede hingewiesen. Im folgenden wird die Implementation der virtuellen Raumakustik anhand der Applikation mit Faltung erläutert.

2.1 Programmierung

Die Programmierung wurde vollständig in Miller Puckettes "Pure Data" (PD), einer echtzeitfähigen, grafischen Programmierungsumgebung durchgeführt. PD ist eine open-source Software, die unter anderem am Institut für elektronische Musik der Kunstuniversität Graz weiterentwickelt wird und auch dort zum Download bereitsteht (<http://iem.kug.ac.at/pd/>).

2.1.1 Signalfluss

In Abbildung 1 auf Seite 5 ist das Blockschaltbild der Applikation zu sehen. Abbildung 2 auf Seite 6 zeigt den Signalfluss sowie den Sync-Verbund der digitalen Geräte für beide Varianten des VRAS. Abbildung 3 auf Seite 6 zeigt die Anbindung aller analogen Geräte. Die digitalen Verbindungen wurden über eine digitale Patchbay (Friendchip) geroutet.

2.1.2 pd core

Abbildung 4 zeigt das Herzstück des Programmes. Links oben werden zunächst die Positionen der sechs Mikrofone (Ordnung, Elevationswinkel, Azimuthwinkel) definiert und an den Ambisonic-Encoder übergeben.

Hinter dem Begriff "wobbeln" verbirgt sich ein Algorithmus, um Rückkopplungen zu unterdrücken. Darauf wird jedoch erst später im Kapitel 2.1.5 eingegangen.

In der PD-Abstraction "matrix_mul_line8" werden die sechs Mikrofonsignale auf Ambisonic 4. Ordnung codiert. Die Mikrofonsignale werden von der PD-Abstraction "mi_da_mikro_michl" bereitgestellt (siehe Kapitel 2.1.3). Die ersten vier Ausgänge der PD-Abstraction "matrix_mul_line8" werden als Ambisonic-Signal 1.Ordnung, das sogenannte B-Format abgegriffen, und für die Verhallung mittels Faltung oder Hallgerät bereitgestellt.

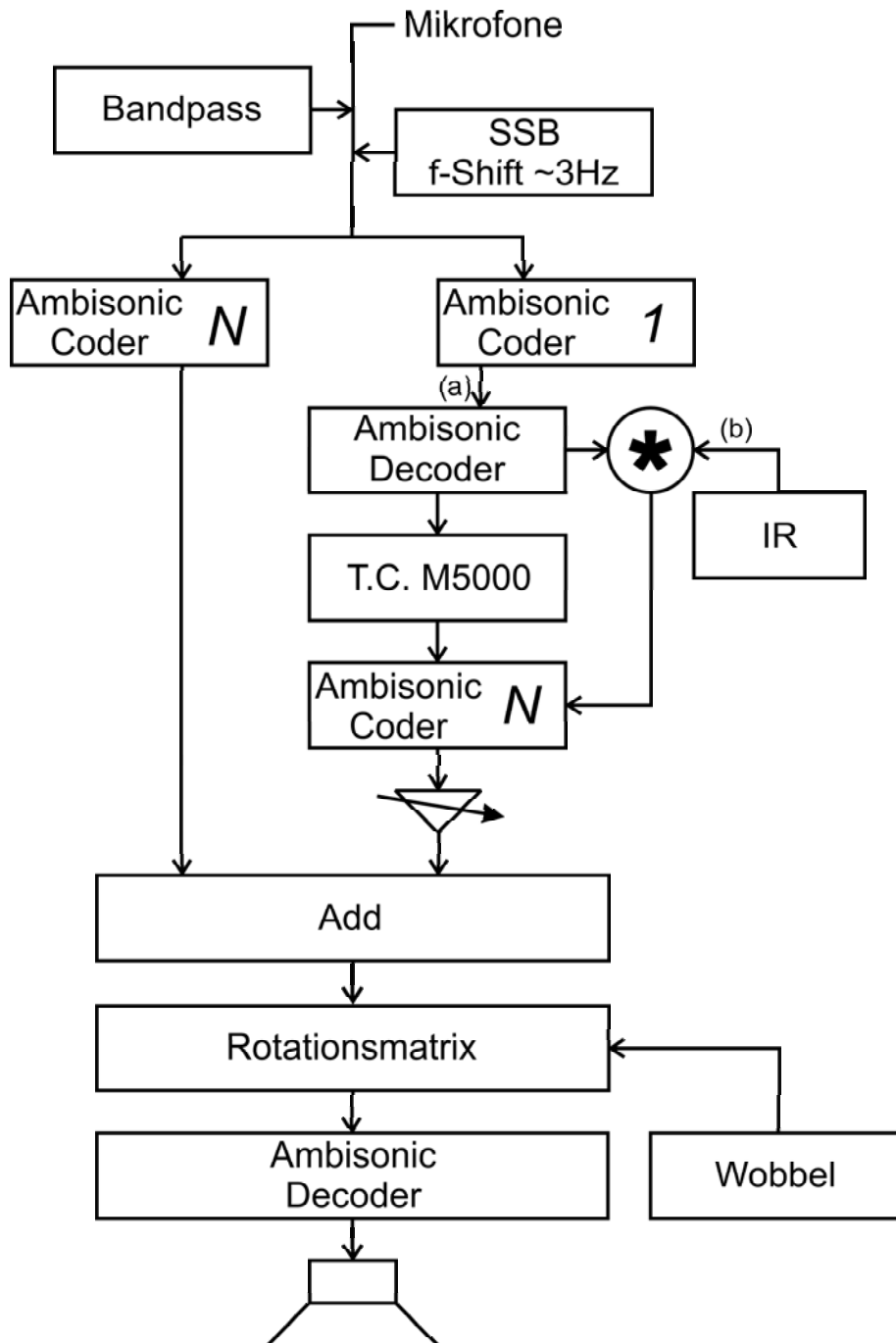


Abbildung 1: Das Blockschaltbild der VRAS Applikation

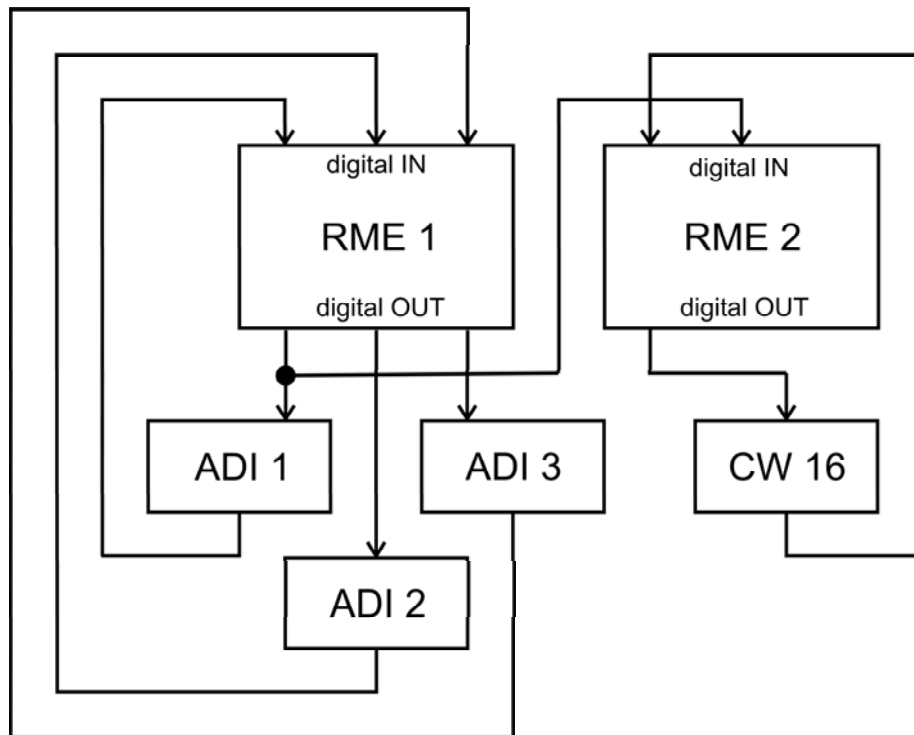


Abbildung 2: Der digitale Verbund

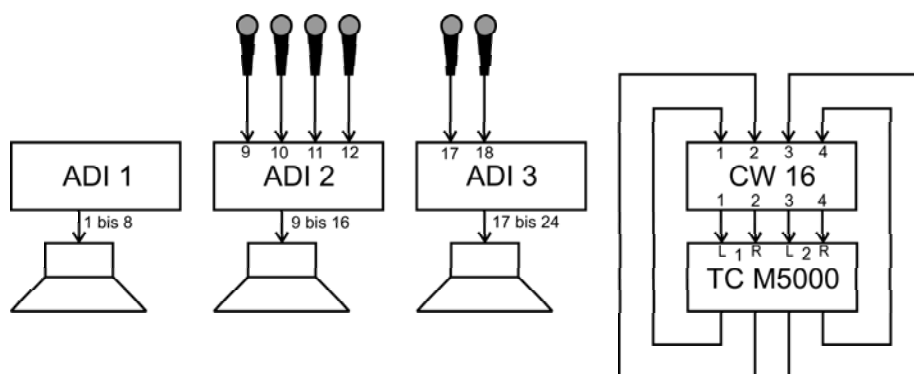


Abbildung 3: Die Anbindung der analogen Geräte

In der PD-Abstraction "mi_da_addier_ade" wird das verhallte Signal zum Direktsignal addiert. Die PD-Abstraction "ambi_rotate_z_4o_3d" dient zur Rotation der Ambisonic-Matrix, gleichbedeutend mit der Rotation des Schallfeldes im Wiedergaberaum. Dies spielt beim sogenannten "wobbeln" eine wichtige Rolle.

Die PD-Abstractions "ambi_decode_4o_24ls" und "cube_cross_comp_out" dienen der Decodierung, Matrizierung sowie der Ausgabe auf die 24 Lautsprecher.

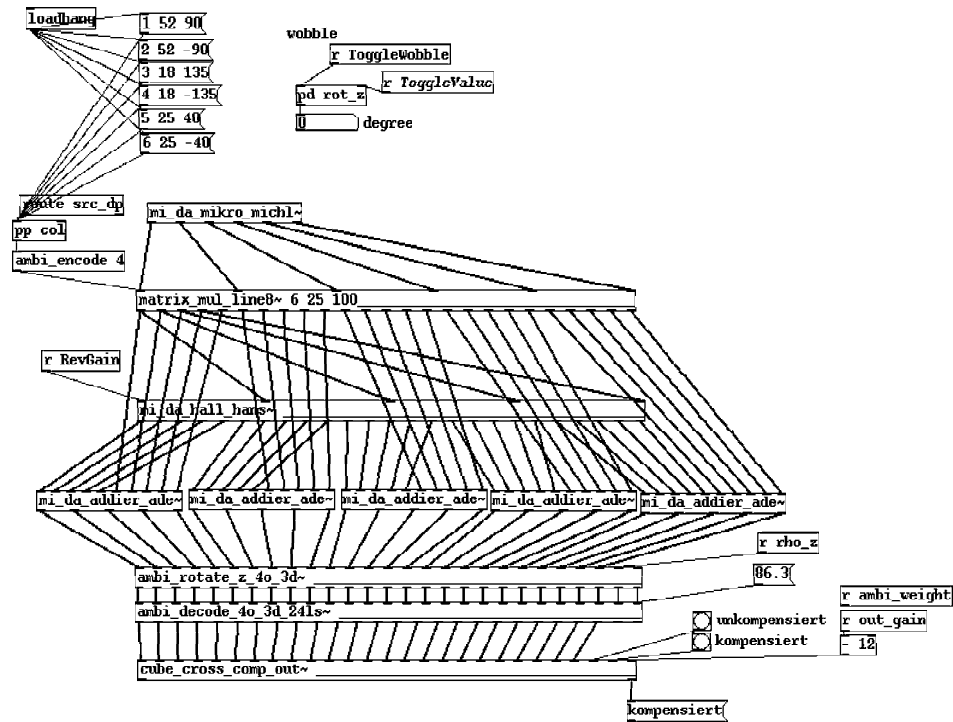


Abbildung 4: Der PD-SubPatch: pd core

2.1.3 mi_da_mikro_michl

Die PD-Abstraction "mi_da_mikro_michl" stellt das Eingangsmodul dar. Zunächst werden im PD-Subpatch "pd mic_gain" die Mikrofonsignale eingelesen und für die Benutzeroberfläche grafisch aufbereitet. Zur besseren Orientierung während des Programmierens ist rechts eine symbolische Grafik mit den Mikrofonpositionen im Raum, deren Nummerierung und Bezeichnung eingefügt. Desweiteren werden hier die verschiedenen Module zur Feedback-Unterdrückung angesteuert.

2.1.4 mi_da_hall_hans

Die PD-Abstraction "mi_da_hall_hans" sorgt für die Verhallung der Mikrofonsignale. Die 6 Mikrofonsignale liegen als 4-kanaliges B-Format vor, werden

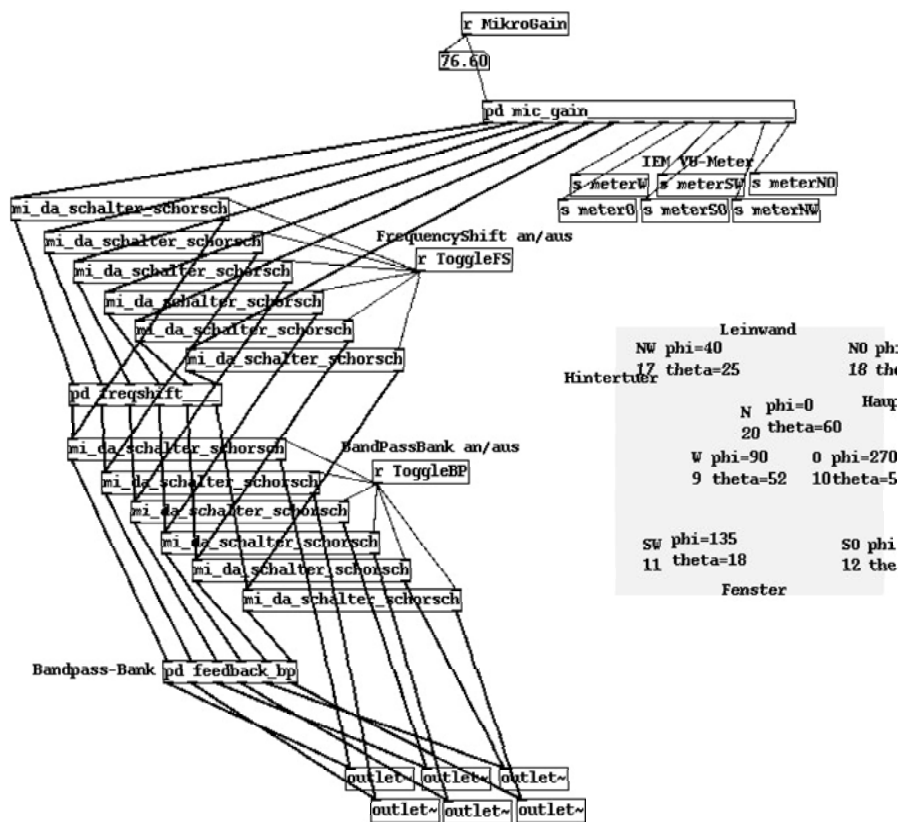


Abbildung 5: Die PD-Abstraction: mi_da_mikro_michl

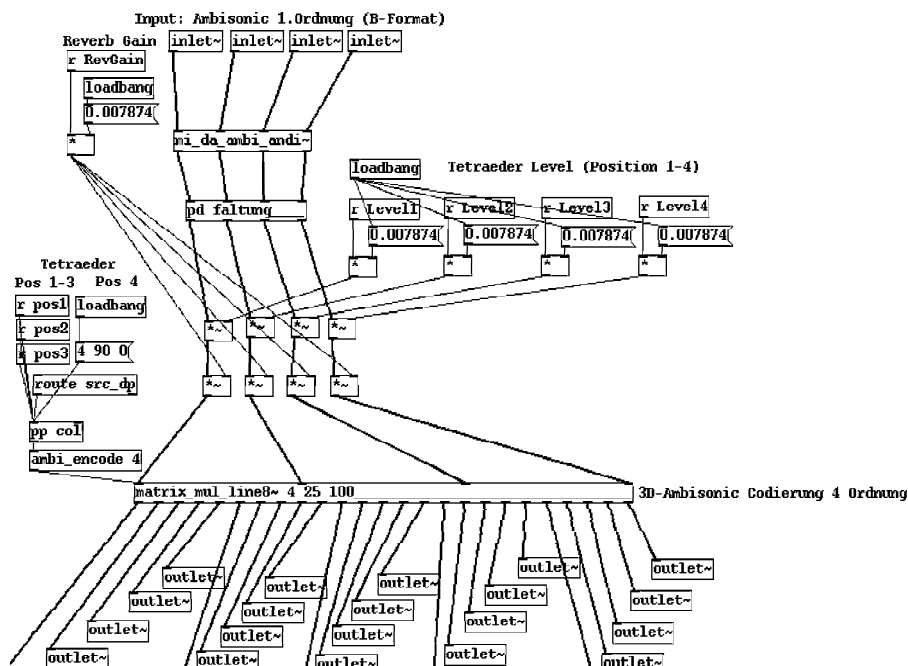
Input: Ambisonic 1.0rdnung (B-Format)

```

graph LR
    in1[inlet~] --> matrix_mul[matrix_mul~ 4 4]
    in2[inlet~] --> loadbang[loadbang]
    loadbang --> tbb[t b b]
    tbb --> pinv[pinv]
    pinv --> msgbox[1s 1 0 60, 1s 2 0 180, 1s 3 0 -60, 1s 4 90 0]
    msgbox --> ambi_decode[ambi_decode 1 3 4 0]
    ambi_decode --> round_zero[round_zero 1e-06]
    matrix_mul --> out1[outlet~]
    ambi_decode --> out2[outlet~]
    round_zero --> out4[outlet~]
    
```

Output: decodierte Signale

Das verhallte Signal muss nun wieder in die Ambisonic-Domäne transformiert werden um zum Direkt-Signal, welches ebenfalls im Ambisonic-Format vorliegt, addiert zu werden.



Wird anstatt der Faltung ein externes Hallgerät zur Verhallung verwendet, wird das Signal an dieser Stelle über einen D/A-Wandler dem Hallgerät zugeführt, prozessiert, A/D-gewandelt und wieder eingelesen.

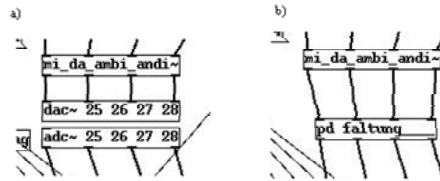


Abbildung 8: Vergleich: Verhallung mittels a) externem Hallgerät und b) dem internen Faltungshall

2.1.5 Feedback-Unterdrückung

2.1.6 Bandpassbank

Um rückkopplungsgefährdete Frequenzen abzuschwächen, wurde eine dreibandige Filterbank mit vollparametrischen Bandpässen implementiert. Da die Filterbank nicht zur ästhetischen Klangregelung, sondern nur zur Feedback-Unterdrückung dient, ist lediglich eine Absenkung der Frequenzbänder möglich. Da Rückkopplungen stark raumabhängig sind, empfiehlt es sich die Filter zur Anpassung an den jeweiligen Wiedergaberaum zu verwenden.

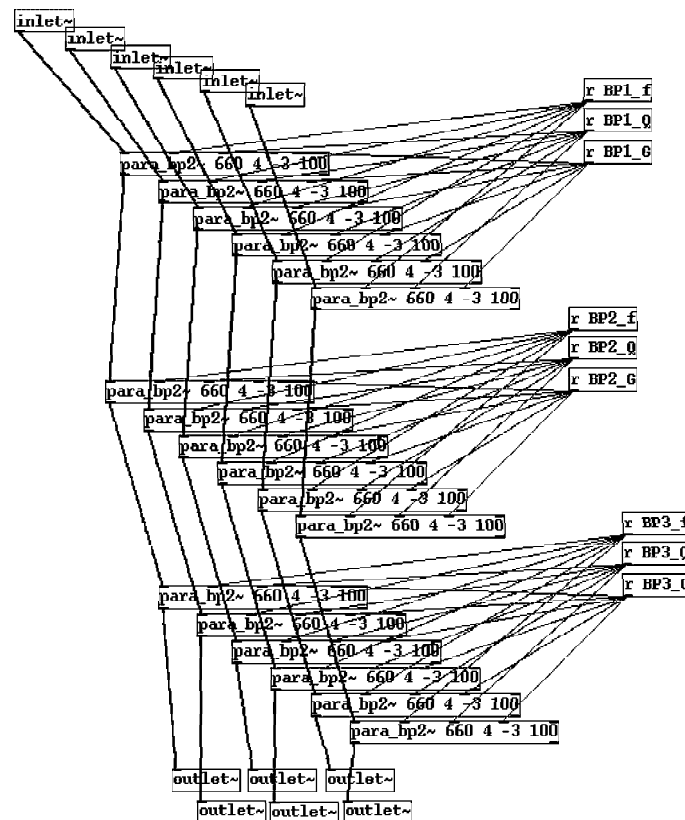


Abbildung 9: Drei kaskadierte Bandpässe zur Feedback-Unterdrückung

2.1.7 Wobbeln

Eine weitere Methode um die Rückkopplungsanfälligkeit des Systems zu reduzieren, stellt das sogenannte "Wobbeln" dar. Hierbei wird der virtuelle Wiedergaberaum in der Ambisonic-Domäne leicht hin und her bewegt. Auf diese Weise wird permanent die Wiedergabeposition relativ zu den Mikrofonpositionen verändert und eine Dekorrelation von Ein- und Ausgangssignal erreicht. Der vom Benutzer veränderbare Parameter stellt die maximale Auslenkung in der Horizontalebene dar.

2.1.8 Frequenzshifter

Ein drittes Werkzeug zur Feedback-Unterdrückung ist der Frequenz-Shifter (FS), der die Mikrofonsignale um wenige Hertz verschiebt. Dadurch wird wieder eine Dekorrelation zwischen Ein- und Ausgang bewirkt. Realisiert wurde der FS mittels einer Einseitenband-Modulation. Der Hilberttransformator gibt an den beiden Ausgängen um 90° verschobene Versionen des Eingangssignales aus. Das phasenverschobene Signal ist das obere Seitenband (USB), das durch $USB(n) = x(n)m(n) - \hat{x}(n)\hat{m}(n)$ berechnet wird, wobei $\hat{x}(n)$ und $\hat{m}(n)$ die um 90° verschobenen Versionen des Trägers bzw. des Modulators sind.

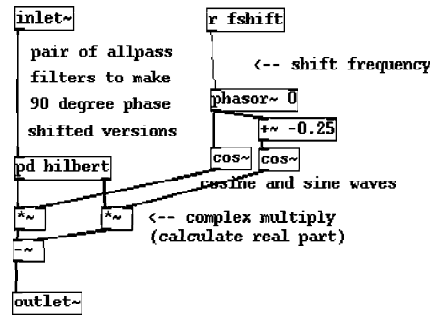


Abbildung 10: Der Frequenz-Shifter (Einseitendband-Modulation)

2.1.9 Faltung

Die interne Verhallung wird mittels einer sogenannten schnellen Faltung auf vier unabhängigen Kanälen durchgeführt. Dabei wird sowohl das Signal als auch die Impulsantwort per FFT in die Frequenz-Domäne transformiert und blockweise multipliziert, was im Zeitbereich einer Faltung gleich kommt. Eine anschließende IFFT transformiert das Ergebnis der Multiplikation erneut in den Zeitbereich.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad \text{entspricht} \quad Y(z) = X(z) \cdot H(z) \quad \text{mit}$$

$$X(z) = \Re\{X(z)\} + j\Im\{X(z)\}$$

$$H(z) = \Re\{H(z)\} + j\Im\{H(z)\}$$

$$Y(z) = \left(\Re\{X(z)\} + j\Im\{X(z)\} \right) \cdot \left(\Re\{H(z)\} + j\Im\{H(z)\} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \Re\{X(z)\}\Re\{H(z)\} + j\Re\{X(z)\}\Im\{H(z)\} + j\Re\{H(z)\}\Im\{X(z)\} \\
&\quad + j^2\Im\{X(z)\}\Im\{H(z)\} \\
&= \Re\{X(z)\}\Re\{H(z)\} - \Im\{X(z)\}\Im\{H(z)\} \\
&\quad + j\left(\Re\{X(z)\}\Im\{H(z)\} + \Re\{H(z)\}\Im\{X(z)\}\right)
\end{aligned}$$

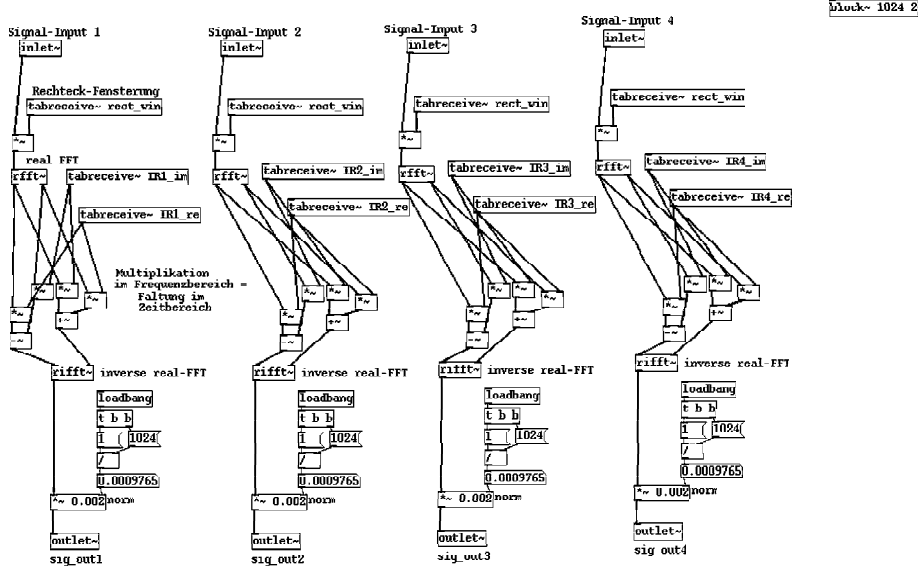


Abbildung 11: Die als schnelle Faltung realisierte Verhallung

Dabei ist es hilfreich, dass die PD-Befehle "RFFT" und "IRFFT" von vornherein Real- und Imaginärteil getrennt verarbeiten. Die Impulsantworten werden bereits beim Einlesen in Real- und Imaginärteil aufgespalten (siehe Abbildung ??)

2.2 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist als graphical user interface (GUI) der gesamten Applikation gedacht, von der aus alle relevanten Parameter zugänglich sind und gesteuert werden können.

Links oben befindet sich ein Button, der die Anwendung global ein- bzw. ausschaltet. Darunter befindet sich eine Anzeige, die einerseits den Momentanwert, andererseits einen Mittelwert der CPU-Last angibt.

2.2.1 LoadIR

Durch Klicken auf "pd loadIR" gelangt man in ein neues Fenster (siehe Abbildung 14 auf Seite 14), um die Impulsantworten zu laden. Verwendet man ein externes Hallgerät, ist diese Option natürlich nicht vorhanden. Ein Klick auf Nummer 1 bis 4 öffnet einen Dialog zur Auswahl der verschiedenen Impulsantworten. Diese müssen im .wav-Format vorliegen.

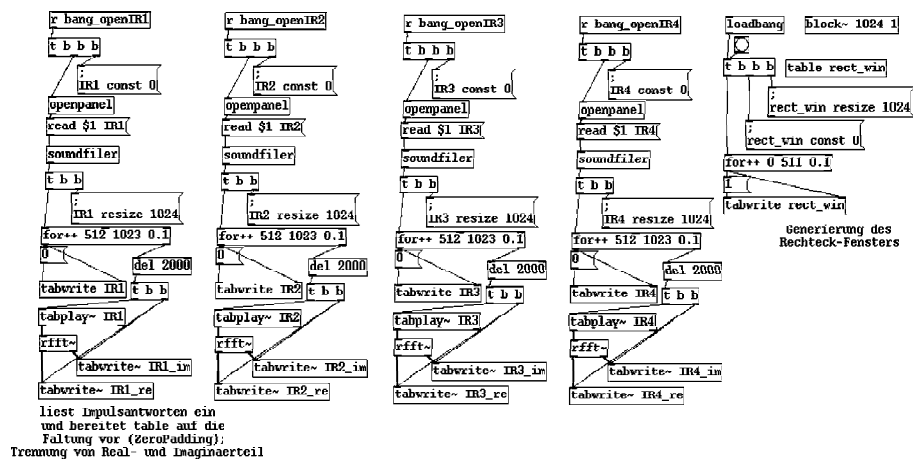


Abbildung 12: Die Impulsantworten werden für die Faltung in Real- und Imaginärteil getrennt

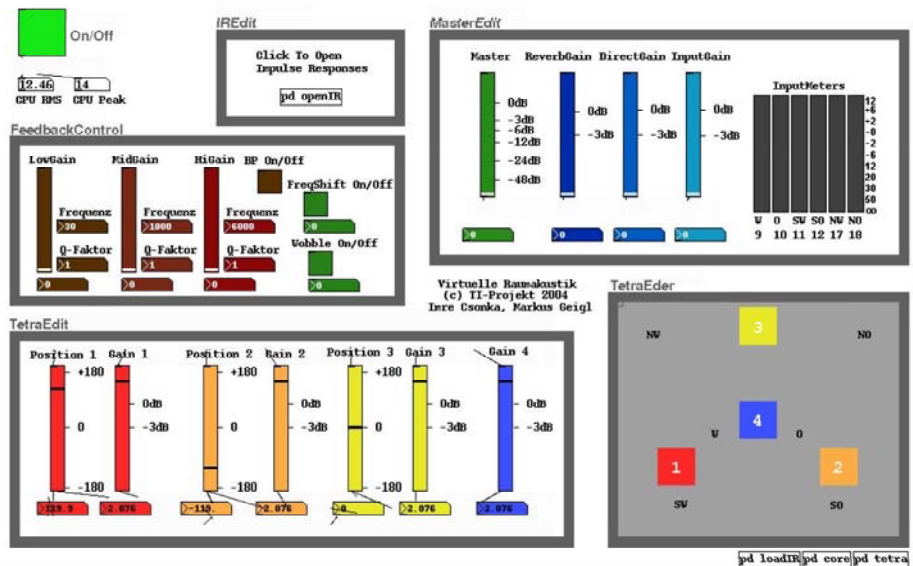


Abbildung 13: Die Benutzeroberfläche

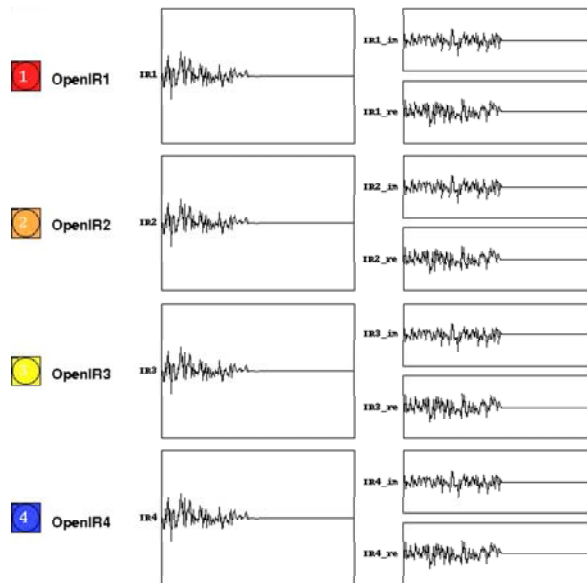


Abbildung 14: Das Fenster zum Laden der Impulsantworten

2.2.2 TetraEdit

Im Bereich TetraEdit werden die Zuspieldpositionen, sowie deren Lautstärke der Kanäle 1 bis 3 gesteuert. Die Lautstärke des Kanal 4 kann ebenfalls gesteuert werden, nicht jedoch die Zuspieldposition. Diese befindet sich immer am Pol der Hemisphere, also oben. Im Bereich TetraEder werden die Positionen der Tetraederecken grafisch dargestellt. Die Größe eines Punktes ist ein Maß für die eingestellte Lautstärke.

2.2.3 MasterEdit

Das Feld MasterEdit enthält die Fader

- Master ...regelt die Gesamtlautstärke des VRAS
- ReverbGain ...regelt die Lautstärke des Hallsignales
- Directgain ...regelt die Lautstärke des unverhallten Direktsignales
- InputGain ...regelt die Eingangsverstärkung der Mikrofonsignale

Die Eingangspegel der Mikrofonsignale können anhand der VU-Meter überwacht werden.

2.2.4 FeedbackControl

Hier können die bereits im Kapitel `refcha:feedback` besprochenen Maßnahmen zur Unterdrückung von Rückkopplungen gesteuert werden. Die einzelnen Module lassen sich separat ein- und ausschalten. Die Bandpass-Filterbank erlaubt eine vollparametrische Absenkung der Frequenzbänder.

3 Ausblick

Hier finden sich noch stichwortartig einige Anregungen, wie VRAS weiterentwickelt und verbessert werden könnte.

- Implementierung einer weiterentwickelten Faltungsmethode, z.B. Gardner-Faltung, um längere Impulsantworten zu verarbeiten, bzw. die Latenz zu verringern.
- Aufnahme sogenannter gerichteter Impulsantworten im B-Format, um evtl. real existierende Räume nachbilden zu können. Dazu ist eine kleine Modifikation der PD-Abstraction "mi_da_hall_hans" notwendig.

Abbildungsverzeichnis

1	Das Blockschaltbild der VRAS Applikation	5
2	Der digitale Verbund	6
3	Die Anbindung der analogen Geräte	6
4	Der PD-SubPatch: pd core	7
5	Die PD-Abstraction: mi_da_mikro_michl	8
6	Die PD-Abstraction mi_da_ambi_andi	9
7	Die PD-Abstraction mi_da_hall_hans	9
8	Vergleich: Verhallung mittels a) externem Hallgerät und b) dem internen Faltungshall	10
9	Drei kaskadierte Bandpässe zur Feedback-Unterdrückung	10
10	Der Frequenz-Shifter (Einseitendband-Modulation)	11
11	Die als schnelle Faltung realisierte Verhallung	12
12	Die Impulsantworten werden für die Faltung in Real- und Imagi- närteil getrennt	13
13	Die Benutzeroberfläche	13
14	Das Fenster zum Laden der Impulsantworten	14