

# Diplomarbeit

im Studiengang

## Audiovisuelle Medien

### Mehrkanalmusikaufnahmen mit Faltungshall

vorgelegt von

Werner Iländer

Matrikelnummer: 14728

an der

Hochschule der Medien Stuttgart

am 15. Januar 2008

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe.

Alle verwendeten Quellen sind im Literaturverzeichnis angegeben. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut ist als solches kenntlich gemacht.

Stuttgart, den 15. Januar 2008

Werner Iländer

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Helfern bedanken, ohne deren Unterstützung die Arbeit an dieser Diplomarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Dank geht an erster Stelle an meine betreuenden Professoren, Herrn Prof. Curdt und Herrn Prof. Hergesell.

Für die Unterstützung mit Tipps und das Leihen des OCT-Surround-Systems sowie weiterer Mikrofone möchte ich mich bei Herrn Wittek und der Firma Schoeps bedanken, ebenso bei Herrn Kessler und der Firma Masterpenguin für das zur Verfügung stellen des HDIR-Creators.

Dank gebührt ebenfalls Herrn Nitschke, Herrn Martin und dem ZKM Karlsruhe für die Ermöglichung von und die Unterstützung bei Aufnahmen. Natürlich bedanke ich mich auch bei den Musikern der Internationalen Ensemble Modern Akademie, deren Konzerte ich aufzeichnen durfte.

Ein herzliches Dankeschön geht an Herrn Priemer und die Mitarbeiter des SWR, sowie an das Radiosinfonieorchester des SWR Stuttgart.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Bauer für die Tonstudiobuchung und bei Herrn Zühlsdorf und Frau Schraffenberger für die Unterstützung.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	6
2 Grundlagen	8
2.1 Raumakustik	8
2.1.1 Reflexion	8
2.1.2 Beugung	9
2.1.3 Absorption	9
2.1.4 Hall	10
2.1.5 Nachhallzeit	11
2.1.6 Hallradius	13
2.2 Der 3/2-Standard	13
2.3 Impulsantwort	15
2.4 Faltungshall	16
3 Die verwendete Software	18
3.1 Der HDIR-Creator	18
3.2 Der Raumsimulator in Sequoia	20
4 Die Aufnahmen	22
4.1 Vorbereitungen	22
4.1.1 Auswahl der Aufnahmeräume	22
4.1.2 Vorbereitungen zur Aufzeichnung der Impulsantworten	24
4.2 Erste Aufnahme – ZKM Karlsruhe	25
4.2.1 Mikrofone	25
4.2.1.1 Das OCT-Surround-System	25
4.2.1.2 Stützmikrofone	29
4.2.2 Lautsprecher	30
4.2.3 Aufnahmen	30
4.3 Zweite Aufnahme – Liederhalle Stuttgart	33
4.3.1 Mikrofone	33
4.3.1.1 Das Straus-Paket	33
4.3.1.2 Stützmikrofone	34
4.3.2 Lautsprecher	35

4.3.3 Aufnahmen	35
5 Erstellen der Impulsantworten	37
6 Faltung	45
6.1 Vorgehen bei der Faltung der Signale	45
6.2 Verwendung des Raumsimulators	47
6.3 Ergebnisse der Faltung	48
7 Mischung	49
7.1 Monomischungen	50
7.2 Surroundmischungen	51
8 Vergleich der Mischungen	54
8.1 Klangbild	54
8.1.1 Durchsichtigkeit	54
8.1.2 Klangfarbe	55
8.1.3 Ausgewogenheit	56
8.1.4 Dynamik	57
8.2 Richtungswahrnehmung	57
8.2.1 Lokalisierbarkeit	58
8.2.2 Panoramaverteilung	58
8.3 Räumlichkeit	59
8.3.1 Die Räumlichkeit des Klangs	59
8.3.2 Raumgetreue Abbildung	60
8.3.3 Surround-Umhüllung	60
8.4 Störgeräusche	61
8.4.1 Störgeräusche des Publikums	61
8.4.2 Störgeräusche im Orchester	62
8.5 Zusammenfassung der Ergebnisse	63
9 Was Faltungshall ermöglicht	64
10 Inhalt von DVD und CD	69
11 Literaturverzeichnis	70
12 Abkürzungsverzeichnis	73

## 1 Einleitung

„Der Mehrkanalton wird in Zukunft ein wichtiger Bestandteil audiovisueller Medien zu Hause sein“ schrieb Viktor Scholl 1993, Student des gleichen Studiengangs wie der Autor, in seiner Diplomarbeit „Dolby Surround, HDTV Mehrkanalton“. Er führt weiter aus, es könne zu einer „allmählichen Ablösung des mit einigen Schwächen behafteten zweikanaligen Stereoformats“ kommen.

Das zweikanalige Stereoformat ist heute zwar noch nicht abgelöst, dennoch hat sich im Vergleich zu 1993 einiges getan. Nicht nur im Bereich des Heimkinos ist heute der 3/2-Standard vorzufinden. Auch im reinen Audibereich findet das mehrkanalige Stereoformat Einzug in unsere Wohnzimmer. Neben SA-CD und DVD-Audio werden heutzutage auch Hörfunkprogramme im 3/2-Format zur Verfügung gestellt. Häufig kann vorwiegend klassische Musik im neuen Mehrkanalformat empfangen werden, nämlich über Satellit.

Zahlreiche neue Erfahrungen im Bereich der Mikrofonierung sind für den 3/2-Standard gemacht worden. Mikrofonsysteme und –anordnungen wurden viel diskutiert.

Durch schnellere Computersysteme wird heute der Einsatz von Faltungshall möglich, sogar unter Echtzeitbedingungen. Daraus ergeben sich viele vorher unvorstellbare Möglichkeiten. Musik, aufgenommen im Tonstudio, hört sich plötzlich so an, als erklänge sie aus einem bekannten Konzertsaal.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob via Impulsantwort und Faltungshall genau so gute Aufnahmen erzielt werden können wie auf herkömmliche Art und Weise. So können Antworten gefunden werden auf Fragen, wie:

- Kann die Aufzeichnung von Impulsantworten die abendliche Aufnahme retten, bei der das Publikum zu viele Störgeräusche in das Hauptmikrofon hervorruft?
- Ist Faltungshall eine Lösung, wenn zwei Konzertaufzeichnungen im Schnitt kombiniert werden müssen, das eine Konzert vor ausverkauftem Saal, das andere aber mit nur wenig Publikum stattfand?
- Kann die vorherige oder anschließende Aufzeichnung von Impulsantworten das Surround-Hauptmikrofon während des Konzerts ersetzen, der natürliche Raumklang des Konzertsaals für die Aufzeichnung oder Übertragung aber erhalten bleiben?

Experimentell soll untersucht werden, welche Qualitäten Aufnahmen mit Faltungshall im Vergleich zur herkömmlichen Aufnahme haben. Dazu werden 3/2-Aufnahmen in Konzertsälen durchgeführt. Im gleichen Raum werden Impulsantworten gewonnen. Anschließend werden zwei verschiedene Mischungen angefertigt, die eine mit Hauptmikrofon und Stützen, die andere lediglich aus den Stützmikrofonen, die mit den Impulsantworten gefaltet werden. Die Mischungen sollen verglichen werden. Zunächst werfen wir einen Blick auf die raumakustischen Grundlagen. Außerdem befassen wir uns mit den Grundlagen des 3/2-Standards sowie von Impulsantwort und Faltungshall.

## 2 Grundlagen

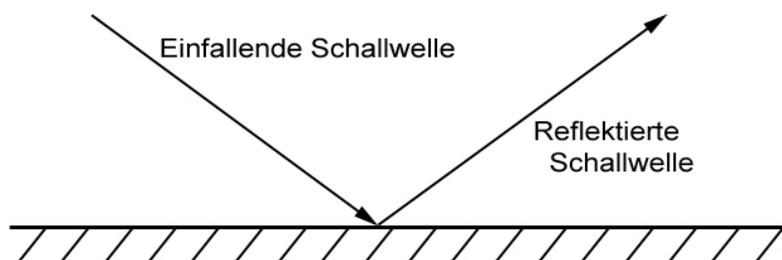
### 2.1 Raumakustik

„Im Allgemeinen befindet sich eine Schallquelle bei der Mikrofonaufnahme in einem geschlossenen Raum, nicht nur wegen praktischer Vorteile, sondern vor allem deshalb, weil der Raum das Schallereignis in einer Weise verändert und ergänzt, die vom Hörer als notwendig und angenehm empfunden wird“ (Axel Kühlem, Musikproduktion mit ProTools, A. 3.4). Warum dies so ist, soll zu Beginn der Grundlagen in diesem Unterkapitel „Raumakustik“ dargestellt werden. Dazu sollen zunächst die wichtigsten Schallphänomene und dann die akustischen Begebenheiten im Raum erklärt werden.

#### 2.1.1 Reflexion

Trifft eine Schallwelle auf einen Gegenstand mit schallharter Oberfläche, wie beispielsweise eine Wand in einem Konzertsaal, so wird er an diesem reflektiert. Es gelten die Gesetze der Reflexion, wie sie im Bereich der Optik an Spiegeln bekannt sind.

„Bedingung für die Gültigkeit der Gesetze ist, dass die reflektierende Fläche groß gegen die Wellenlänge der reflektierten Schallwelle ist, d.h. eine Ausdehnung von wenigstens einigen Wellenlängen besitzt.“ (Michael Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, S. 11)



Grafik 1: Reflexion einer Schallwelle

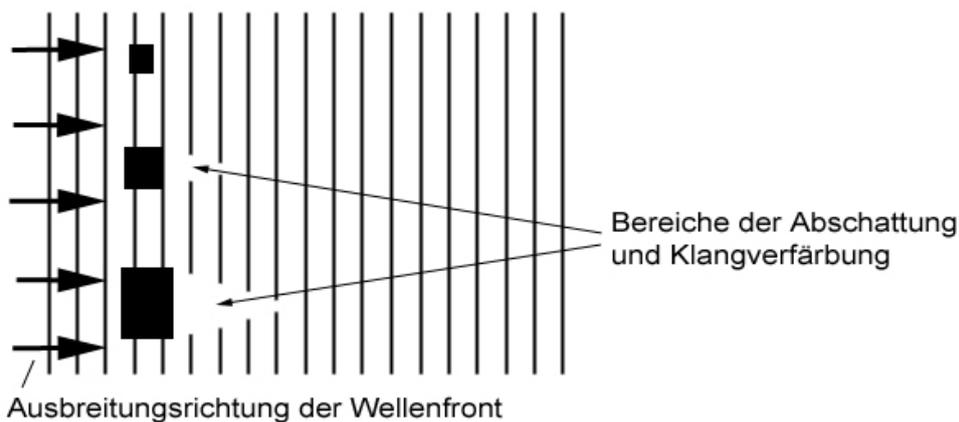
Bei der Reflexion an einer ebenen Fläche haben eintreffender Schallstrahl und reflektierter Schallstrahl den gleichen Winkel zum Lot der Fläche.

„Analog der Darstellung einer Lichtwelle als Lichtstrahl benutzt man in der Akustik den Schallstrahl zur graphischen Darstellung von Reflexionserscheinungen.“ (Hubert Henle, Das Tonstudio Handbuch, S. 38)

### 2.1.2 Beugung

„Wenn eine Schallwelle auf ein Hindernis stößt, dessen Ausdehnung kleiner ist als die Schallwellenlänge, beugt sich die Schallwelle um dieses Hindernis herum.“ (Andreas Ederhof, Das Mikrofonbuch, S. 27)

Daraus folgt, dass tiefe Frequenzen eher um ein Hindernis herum gebeugt werden als höhere. Höhere werden dagegen eher reflektiert.

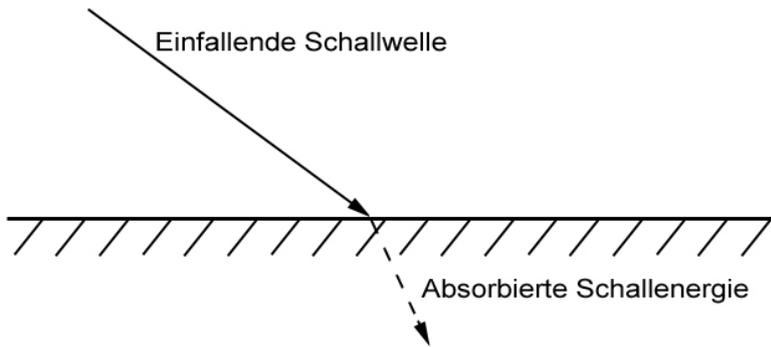


Grafik 2: Beugung von Schallwellen

### 2.1.3 Absorption

Eine Schallwelle, die auf eine Oberfläche mit hohem Schallabsorptionsgrad trifft, wird von ihr absorbiert. Die akustische Energie wird in Wärme umgewandelt.

„Der Schallabsorptionsgrad ist das Verhältnis der absorbierten Schallenergie zur Energie der auftreffenden Schallwelle und stellt ein Maß für das Absorptionsvermögen verschiedener Materialien dar.“ (Andreas Ederhof, Das Mikrofonbuch, S. 26 f) Er hat großen Einfluss auf die Nachhallzeit eines Konzertsaals oder Studios.



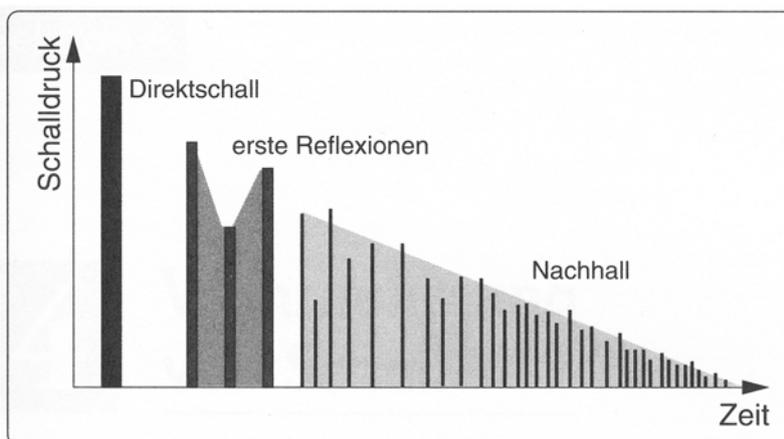
Grafik 3: Absorption einer Schallwelle

„Die gesamte Absorption eines Raumes, das sog. Absorptionsvermögen, ergibt sich aus der Größe der einzelnen absorbierenden Flächen und ihrem jeweiligen Absorptionsgrad.“ (Michael Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 18)

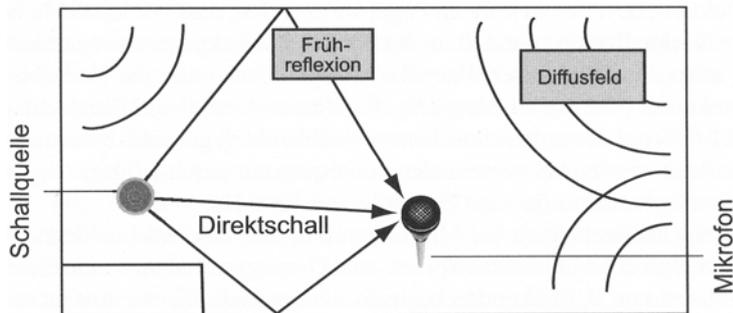
#### 2.1.4 Hall

„Hall ist im Prinzip nichts anderes als eine Unmenge sich überlagernder Echos.“ (Uli Eisner, Mixing Workshop, S. 162) Er ist quasi die Summe aller Reflexionen im Raum.

Die zeitliche Folge der Reflexionen in einem Raum bei Impulsschall verdeutlicht das folgende Schaubild:



Grafik 4: Zeitlicher Aufbau des Schallfelds (Hubert Henle, Das Tonstudio Handbuch, S. 45)



Grafik 5: Direktschall, Frühreflexionen und Diffusfeld im Raum (Andreas Ederhof, Das Mikrofonbuch, S. 23)

Als erstes trifft der Direktschall ein, da er den kürzesten Weg von der Schallquelle zum Hörer zurückzulegen hat (siehe Grafik 5). Er ist richtungsbestimmend. „Er vermittelt bei musikalischen Aufführungen einen Eindruck von der räumlichen Aufstellung der Musiker und ist für die Deutlichkeit und die Durchsichtigkeit des Klangbildes verantwortlich“ (Oliver Neumann/Markus Schäffler, Optimierung der Raummikrofonanordnung bei Mehrkanal-Musikaufnahmen im 3/2-Stereo Format, S. 13).

Nach dem Direktschall treffen die sog. Ersten Reflexionen ein. Sie erhöhen die Lautstärke des Direktschalls und bestimmen die empfundene Raumgröße. Je mehr die erste Reflexion verzögert eintrifft, desto größer ist der Raumeindruck.

Nach einer gewissen Zeit verschmelzen die einzelnen Reflexionen in einem Raum immer mehr zum so genannten Nachhall. Einzelne Reflexionen sind dann nicht mehr wahrnehmbar.

Mit größer werdendem Verhältnis von indirektem Schall (Nachhall) zu direktem Schall wird der Eindruck einer größeren Entfernung erweckt (Johannes Webers, Handbuch der Tonstudioteknik, S. 125).

### 2.1.5 Nachhallzeit

„Unter der Nachhallzeit versteht man diejenige Zeit, in der der Druckpegel des eben beendeten Schallsignals im Raum um 60 dB sinkt.“ (Jarmil Burghausen/Antonin Spelda, Akustische Grundlagen des Orchestrierens, S. 100)

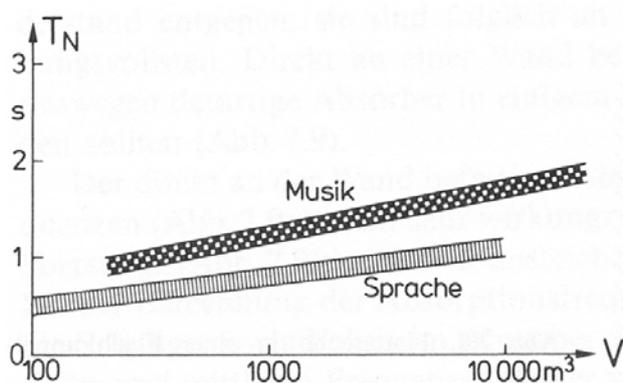
Sie hängt von den Absorptionseigenschaften der Wände und vom Raumvolumen ab. Näherungsweise gilt für die Nachhallzeit T:

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (\text{N. V. Franssen, Stereofonie, S. 52})$$

Dabei steht  $V$  für das Raumvolumen und  $A$  für die Gesamtabsorption des Raumes. Letztere errechnet sich aus den Einzelflächen der Raumbegrenzung  $S_k$  und deren Absorptionsgraden  $\alpha_k$ :

$$A = \sum_k S_k * \alpha_k \quad (\text{Lothar Cremer/Helmut A. Müller, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, S. 274})$$

Kurze Nachhallzeit („trockener“ Raum) führt zu guter Sprachverständlichkeit. Wegen des großen Hallradius ist aber der Pegel im diffusen Schallfeld relativ niedrig (M. Zollner/E. Zwicker, Elektroakustik, S. 241). In Räumen mit langer Nachhallzeit ist es umgekehrt. Als Kompromiss zeigt Grafik 6 die „optimalen“ Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Raumgröße und der Schallart.



Grafik 6: „Optimale“ Nachhallzeiten bei 0,5 bis 1 kHz für Sprache und Musik in Abhängigkeit vom Raumvolumen (M. Zollner/E. Zwicker, Elektroakustik, S. 241)

Die nachfolgende Tabelle zeigt günstige Nachhallzeiten für verschiedene Räume:

Raum	Günstige Nachhallzeit in s
Sprecherstudio	0,3
Großes Fernsehstudio	0,8
Kino	0,9
Konferenzzimmer	1,0
Kammermusikraum	1,2
Opernhaus	1,5
Konzertsaal	2,0
Kirche	über 2,5

aus: Michael Rieländer, ABC der Elektroakustik, S. 146

### 2.1.6 Hallradius

„Der Hallradius ist als jener Abstand [von der Schallquelle] definiert, bei dem Direktschall und diffuser Schall gleich groß sind.“ (Gerhard Graber, Tontechnik und interdisziplinäres Sinnen, S. 81) Er ist Abhängig von Volumen und Fläche des Raumes und vom Absorptionsgrad der Flächen.

Befindet man sich am Ort des Hallradius, erhält man den Direktschall und die Reflexionen zu gleichen Teilen. Innerhalb des Hallradius dominiert, selbst in halligen Räumen, der Direktschall, außerhalb dessen das Diffusfeld, also die Reflektionen von den Wänden.

Der Hallradius  $r_H$  nimmt mit dem Raumvolumen  $V$  zu, verringert sich aber mit zunehmender Nachhallzeit  $T$ . Es gilt:

$$r_H = 0,057 \sqrt{(V/T)} \quad (\text{Michael Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, S. 36})$$

### 2.2 Der 3/2-Standard

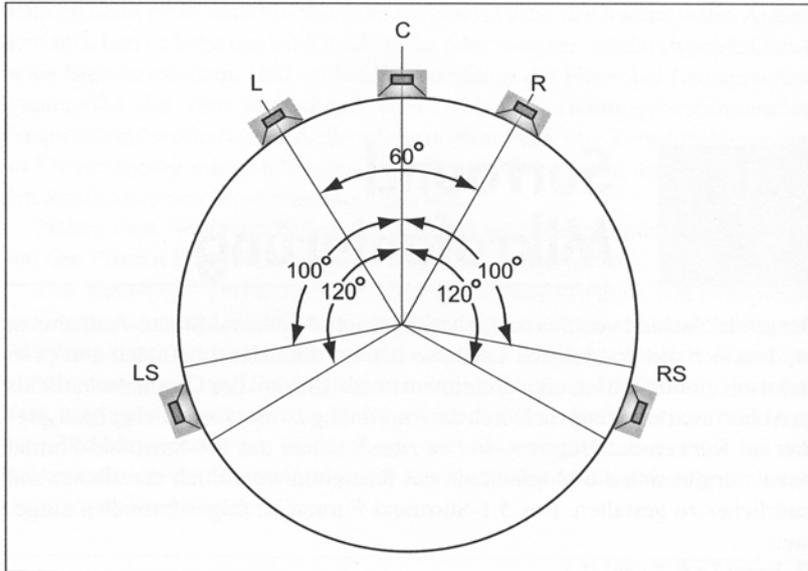
1992 stellte Günther Theile auf der 17. Tonmeistertagung in Karlsruhe das neue 5-Kanalige Tonformat vor (Günther Theile, The New Sound Format 3/2-Stereo, Bericht 17. Tonmeistertagung Karlsruhe 1992). Bei diesem Format kommen fünf Lautsprecher zum Einsatz. Die Lautsprecherpositionen Links und Rechts werden um einen Mittenkanal ergänzt, den sog. Center. Dieser überträgt Mittenschallquellen wie Sprecher oder Solisten. Er soll die Probleme der Phantomschallquellen in der Mitte zwischen linkem und rechtem Kanal beheben. Beim zweikanaligen Stereoformat stellten „Klangverfärbungen und mangelnde Präsenz der Mittenschallquellen“ (Michael Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, S. 274) oft ein Problem dar. Durch den Center wird „die Ortsfestigkeit des Klangbilds“ (Michael Dickreiter, Mikrofon-Aufnahmetechnik, S. 162) erhöht. Der optimale Hörbereich wird erweitert. Weiterhin wird das bisherige Stereoformat um zwei hintere Kanäle ergänzt, die beiden Surroundkanäle SL (Surround Links) und SR (Surround Rechts). Sie können Rauminformationen, also Diffusschall und Publikumsgeräusche, oder konkrete Tonereignisse von hinten übertragen. Sie sollen dem Hörer „die räumliche Einhüllung

und die räumlichen Dimensionen aus dem Aufnahmebereich“ (Michael Dickreiter, Mikrofon-Aufnahmetechnik, S. 162) vermitteln.

Zum sog. 5.1-Standard wird der 3/2-Standard durch einen weiteren, sechsten Kanal. Hierbei handelt es sich um einen Tiefbass-Kanal, der für die Übertragung sehr tiefer Frequenzanteile und Effekte – vornehmlich bei Bild- und Tondarbietungen – vorgesehen ist. Dieser Kanal hat seinen Ursprung im Bereich des Kinos und wird mit LFE bezeichnet. „Der LFE-Kanal ist für Spezialeffekte gedacht, wie Explosionen und Erdbeben, er kommt also nur selten und in unregelmäßigen Abständen zum Einsatz“ (Bobby Owsinski, Mischen wie die Profis, S. 154). Im Bereich klassischer Musikaufnahmen und -übertragungen spielt er normalerweise keine Rolle. Hier beschränkt man sich also meist auf eine 5.0 bzw. 3/2-Übertragung. Häufig kommt bei Übertragungen auch eine 2/2-Anordnung zum Einsatz. Dabei entfällt der vorderseitige Mittenkanal. Bei gleichzeitiger Stereoaufnahme/übertragung vereinfacht sich dadurch der Aufwand. Man verwendet die Stereokanäle auch für die Surround-Mischung und fügt lediglich zwei weitere rückwärtige Kanäle hinzu.

Grund für diese Veränderungen im Tonbereich war die Entwicklung des hochauflösenden Fernsehbildes. Die Verbesserungen des Bildübertragungssystemes brachten auch Überlegungen zur Verbesserung des Tones hervor. 1992 war das Ergebnis eine internationale Standardisierung für eine fünfkanalige Tonwiedergabe, das sog. 3/2-Format. Es sollte sowohl für Bild- und Tonübertragungen als auch für reine Tonübertragungen genutzt werden.

Erst mit der Einführung neuer digitaler Übertragungsverfahren im Bereich des Hörfunks wurde es ermöglicht, fünfkanalige Übertragungen durchzuführen. Seit der digitalen Satellitenübertragung ist diese Möglichkeit gegeben. Heute übertragen Klassik-Sender, wie beispielsweise von BR, SWR oder HR, sehr häufig Konzerte im 3/2-Format. Live-Übertragungen in Fünf-Kanal-Surround finden aus dem Beethovensaal der Liederhalle Stuttgart (SWR), dem Herkulesaal der Residenz München und der Philharmonie im Gasteig München (BR), der Alten Oper in Frankfurt (HR) und vielen weiteren Konzertsälen in Deutschland statt.



Grafik 7: Räumliche Anordnung der Lautsprecher beim 3/2-Format nach Empfehlung ITU 775 (Andreas Ederhof, Das Mikrofonbuch, S. 218)

Die erste Ziffer von 3/2 beschreibt die Anzahl der frontseitigen, die zweite Ziffer die Zahl der Surround-Kanäle (Johannes Webers, Handbuch der Tonstudioteknik, S. 222). Das bisherige zweikanalige Stereoverfahren wird somit durch 2/0 beschrieben.

### 2.3 Impulsantwort

Eine Impulsantwort ist, wie es der Name bereits ausdrückt, die Antwort eines natürlichen Raums/Systems auf die Anregung mit einem Impuls (Horst Zander, MPEG Audiopraxis, S. 237).

Als Impuls verwendet man häufig Pistolenschüsse. Diese erzeugen einen lauten kurzen Knall. Hier erhält man direkt die Impulsantwort des Raumes, wenn man das Signal im Raum aufzeichnet. Gerne lässt man auch Luftballons platzen oder man spielt den Impuls über einen Lautsprecher ein.

Man kann aber auch sog. Sweeps einsetzen, beispielsweise einen gewobbelten Sinus. Dabei durchläuft ein Sinuston den gesamten hörbaren Frequenzbereich. Die Impulsantwort kann aus dem im Raum aufgezeichneten Signal errechnet werden.

Die Sinus-Sweep-Messung basiert auf einer in der Frequenz ansteigenden Sinusschwingung  $x_S(t)$ , einem sog. Chirp-Signal der Länge  $T_C$  und einem hierzu inversen Signal  $x_{S\text{ inv}}(t)$ , welches gefaltet mit dem Signal  $x_S(t)$  die Bedingung

$$x_S(t) * x_{S\text{ inv}}(t) = \delta(t - T_C)$$

erfüllt. Dieses Signal wird als Testsignal über einen Lautsprecher in den zu messenden Raum abgestrahlt und an einem bestimmten Empfangsort  $y(t) = x_S(t) * h(n)$  aufgezeichnet. Durch Faltung des Empfangssignals  $y(t)$  mit dem Signal  $x_{S\text{ inv}}(t)$  erhält man die Raumimpulsantwort

$$y(t) * x_{S\text{ inv}}(t) = x_S(t) * h(n) * x_{S\text{ inv}}(t) = h(t - T_C) \quad (\text{Quelle: Udo Zölzer, Digitale Audiosignalverarbeitung, S. 201})$$

Die Impulsantwort wird benötigt, um das Originalsignal mit ihr zu falten und den sog. Faltungshall zu erhalten.

## 2.4 Faltungshall

Der Faltungshall beruht auf einer mathematischen Rechenoperation, der Faltung. Faltung bedeutet: Jeder Abtastwert von  $a$  wird mit jedem Abtastwert von  $b$  multipliziert. Gewissermaßen erzeugt man ein Datenfeld (Array), wobei die Summe des Datenarrays dann das Ergebnis der Signalfaltung ist (Horst Zander, Das PC-Tonstudio, S. 368).

Nimmt man die Impulsantwort eines Raumes und faltet sie mit einem Signal, so wird dem Signal die Klangcharakteristik des Raumes aufgeprägt. Man kann auch die Impulsantwort eines Filters, eines Lautsprechers oder eines Mikrofons bestimmen und damit den jeweiligen Klang einem Signal zufügen.

Bei der Verwendung von Faltungshall nimmt man gewöhnlich möglichst echofrei aufgenommene Musik. Verhallt wird diese durch Faltung mit einer Impulsantwort eines real existierenden Raumes. So können beispielsweise Studioaufnahmen

durchgeführt werden, die anschließend genau so klingen, als wären sie in einem bestimmten Konzertsaal entstanden, da sie mit dessen Impulsantwort gefaltet wurden.

Zur Berechnung der Faltung werden zwei Methoden eingesetzt. Die direkte Implementierung im Zeitbereich durch ein FIR-Filter ist sehr rechenintensiv. Bei der Berechnung der sog. schnellen Faltung wird eine Fourier-Transformation durchgeführt. Dabei werden die Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt. Anschließend wird jedes Sample des Originalsignals mit jedem Sample der Impulsantwort (ebenfalls ein Signal bestimmter Länge) multipliziert. Die Summe der einzelnen Produkte wird zurück in den Zeitbereich transformiert. (Thomas Görne, Tontechnik, S. 132) Das Ergebnis ist ein mit der Impulsantwort verhalltes Signal.

Die Faltung zweier Wellenformen entspricht der Multiplikation ihrer Spektren und die Multiplikation zweier Wellenformen entspricht der Faltung ihrer Spektren (Horst Zander, Das PC-Tonstudio, S. 368). Dies ermöglicht die Vorgehensweise bei der schnellen Faltung.

Die zweimalige Fourier-Transformation und die Multiplikationen benötigen weniger Rechenleistung als die Faltung im Zeitbereich. Sie ist deshalb besser zur Echtzeitverarbeitung geeignet.

Bereits 1994 sprach Frank Steffen bei der 18. Tonmeistertagung in Karlsruhe über die Möglichkeit, das Wiedergabesignal durch Faltung von Raumimpulsantworten mit einem „trockenen“ Signal zu gewinnen. „Es sind dazu soviel Raumimpulsantworten wie Lautsprecher erforderlich“ (Frank Steffen, Audioübertragung einer Scheinwelt, Bericht 18. Tonmeistertagung Karlsruhe 1994, S. 973). Steffen bezog sich dabei auf das neue fünfkanalige Tonformat. Er wollte jeweils für die Kanäle L, C, R, SL und SR eine Impulsantwort aufzeichnen und ein Monosignal damit falten.

### 3 Die verwendete Software

#### 3.1 Der HDIR-Creator

Von der Hamburger Firma Masterpenguin entwickelt ist der HDIR-Creator primär für das Erstellen von „Fingerabdrücken“ real existierender Räume konzipiert, die in Faltungshallsystemen genutzt werden können. Mit der Software kann ein Raum mit einem Testsignal beschallt und gleichzeitig der Raumklang aufgezeichnet werden. Das Raumverhalten wird mit einem Sinussweep, der den gesamten hörbaren Frequenzbereich durchläuft, aufgezeichnet. Die Software erstellt im Anschluss an die Aufnahme die Impulsantwort des Raumes. Für die Datenerfassung arbeitet das System mit normalen Studiomikrofonen und Regielautsprechern.

HDIR steht für High-Definition Impulse Response. In der bei den Experimenten eingesetzten Version HDIR-Creator Pro können bis zu acht Kanäle gleichzeitig aufgenommen werden, Impulsantworten bis zum 7.1-Format sind somit denkbar. Es ist eine Samplingrate von bis zu 96 kHz möglich. (Quellen: Ralph Kessler, HDIR-Creator Produktbeschreibung und Convention Paper An Optimised Method for Capturing Multidimensional „Acoustic Fingerprints“)

Das flexible System bietet eine Vielzahl denkbarer Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. das Aufzeichnen der Impulsantworten zum Einbinden der Stützen in die Surround-Mischung beim Experiment des Autors.

Der HDIR-Creator ermöglicht auch die Nachbildung der Richtcharakteristik von Solisten und Instrumenten. Denn: „Jede Schallquelle hat eine spezifische, kaleidoskopartige Aura, die sich daraus ergibt, dass verschiedene Frequenzen unterschiedlich abgestrahlt werden“ (Barbara Flückiger, Sound Design, S. 92). So ist auch die richtungsselektive Gewichtung früher Reflexionen über die Möglichkeit, mehrere gemessene Lautsprecherpositionen stufenlos zu mischen, möglich. Die gemessenen Raumimpulsantworten können nach Bedarf bearbeitet werden.

Die Software gliedert sich in vier Teile, Recording Page, Mixing Page, Edit Page und Export Page. (Christian Jungebluth, High Definition Impulse Response Creator Manual)

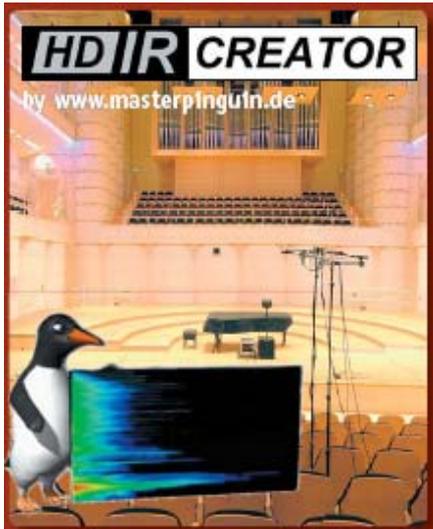
Die Recording Page dient der Aufnahme. Hier können Testsignale unterschiedlicher Länge ausgewählt und mit ihnen die Aufnahme der Raumantwort durchgeführt werden.

Die Mixing Page bietet die Möglichkeit, mehrere aufgezeichnete Raumantworten zu mischen. Oft bietet es sich an, mehrere Lautsprecherwinkel aufzuzeichnen und die Aufnahmen zu mischen, um bessere Ergebnisse zu erhalten. Dabei wird der Lautsprecher einmal frontal auf die Mikrofone ausgerichtet. Bei der zweiten Aufnahme wird er um 90 Grad zur Seite verschwenkt. Insgesamt können mit dem HDIR-Creator bis zu sechs verschiedene Lautsprecherwinkel, die sog. Angles, aufgenommen werden. Die Mixing Page bietet auch die Möglichkeit anhand von einzelnen EQ-Punkten die Aufnahmen im Spektrum zu bearbeiten. Equaliser-Einstellungen können vorgenommen werden, um den Klang des Raumes zu korrigieren.

Die Edit Page ermöglicht es den Start und das Ende der Impulsantworten festzulegen. Auch wird hier die Lage und Länge des Fades am Ende der Impulsantwort festgelegt. Ebenfalls kann hier ausgewählt werden, ob die gesamte Impulsantwort (von Anfang bis Ende) oder nur vom Beginn der ersten Reflektionen bis zum Ende (also ohne Direktschall) exportiert werden soll.

Die Export Page ist für die finalen Einstellungen zum Exportieren der gewonnenen Impulsantworten da. Hier kann man die Art der Files bestimmen, z. B. Mono-Wave-Dateien oder 5-kanalige-Wave-Dateien. Auch kann hier über ein virtuelles Steckfeld festgelegt werden, welche Impulsantwort in welchen Kanal welcher Datei geschrieben wird.

Mit dieser Gliederung bietet die Software überschaubare und doch umfangreiche Bearbeitungsmöglichkeiten für individuelles Erstellen von Impulsantworten.



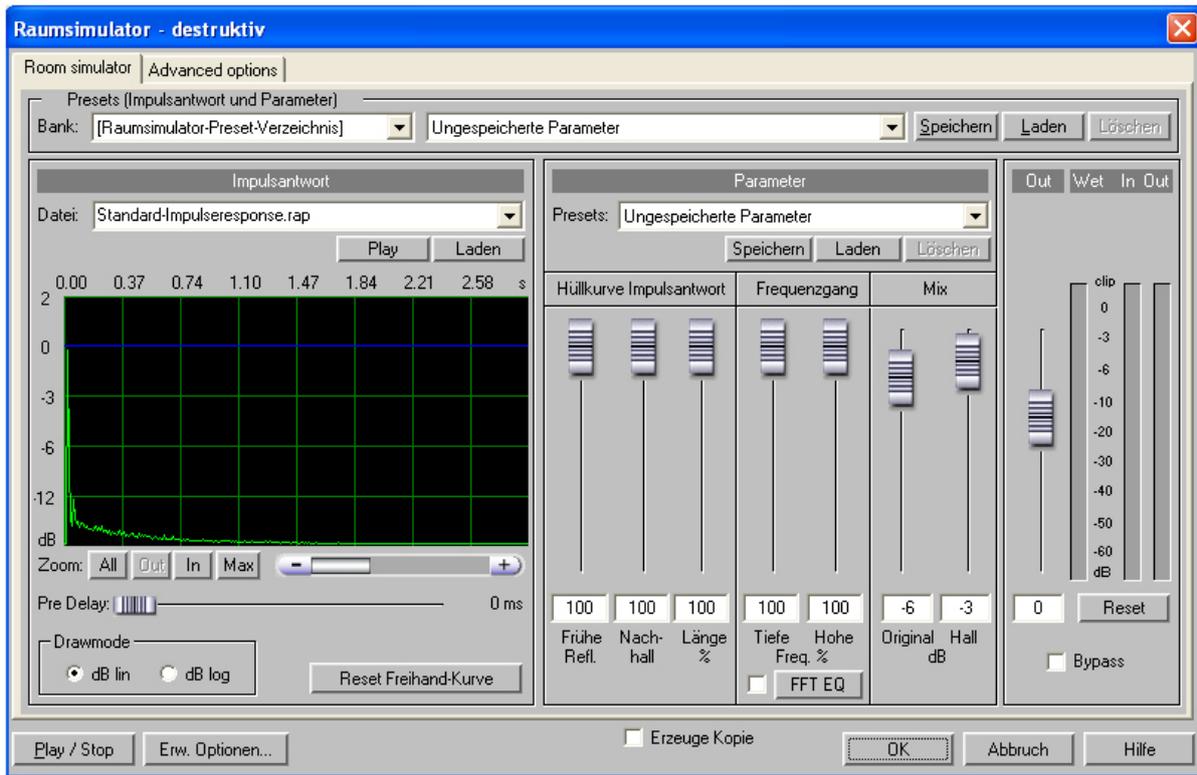
Grafik 8: HDIR-Creator von Masterpinguin

Systemvoraussetzungen für den Betrieb der Software sind: PC mit Windows NT, 2000 oder XP, mindestens 512 MB Arbeitsspeicher und eine freie Festplattenkapazität von 1 GB.

Der HDIR-Creator ist in drei Versionen erhältlich: HDIR-Creator light in Stereo bis zu 48 kHz, HDIR-Creator S mit bis zu fünf Kanälen und 48 kHz Samplingrate und in der Variante HDIR-Creator Pro mit bis zu acht Kanälen und bis zu 96 kHz. Letztere Version wurde für das Experiment in dieser Arbeit eingesetzt.

### 3.2 Der Raumsimulator in Sequoia

Der in der Tonstudiosoftware Sequoia integrierte Raumsimulator arbeitet mit der Faltung. Das Originalsignal wird dabei mit den einzelnen Samples des Raumklanges, also der Impulsantwort, verrechnet. Die Impulsantwort kann in Echtzeit mit dem Originalsignal gefaltet werden. Das Ergebnis klingt so, als wäre das Original in dem Raum aufgenommen worden, in dem die Impulsantwort gewonnen wurde. Sequoia enthält auch eine umfassende Bibliothek an Raumimpulsantworten. Sie können im Raumsimulator eingesetzt werden. Natürlich können dort auch eigene Impulsantworten in verschiedenen Formaten geladen werden. (Sequoia User's Guide sowie Dieter Kahlen, Testbericht Nativer Mehrwert: DAW-Software Magix Sequoia 7.0)



Grafik 9: Dialogfeld Raumsimulator in Sequoia

Grafik 9 zeigt das Dialogfeld des Raumsimulators. Im linken Bereich „Impulsantwort“ kann eine Datei geladen werden. Dabei sind folgende Formate möglich: RAP, WAV und IMR. Mit „Play“ wird die geladene Datei abgehört. Das Schaubild zeigt den Pegelverlauf der Impulsantwort über der Zeit. Man kann in die Datei hineinzoomen. Mit „Pre Delay“ lässt sich eine Vorverzögerung einstellen. Die Pegelanzeige kann zwischen linear und logarithmisch umgestellt werden. Mit einer Freihandkurve lässt sich die Impulsantwort korrigieren.

Im rechten Feld können verschiedene Parameter eingestellt werden. Über eine Hüllkurve werden Frühe Reflexionen, Nachhall und Länge verändert. Der Frequenzgang lässt sich in Tiefen und Höhen korrigieren. Über „Mix“ legt man das Verhältnis zwischen Originalsignal und gefaltetem Signal fest. Die Ausgangslautstärke kann durch den Regler rechts außen korrigiert werden. Eine Pegelanzeige zeigt die Pegel von Input, Faltungssignal und Output an. Die Parameter lassen sich speichern und aufrufen. In den „Advanced Options“ kann die Qualität der Berechnung festgelegt werden.

## 4 Aufnahmen

### 4.1 Vorbereitungen

#### 4.1.1 Auswahl der Aufnahmeräume

„Auch für die beste Mikrofonaufnahme gilt: Die Aufnahme klingt immer nur so gut, wie das Originalsignal am Aufnahmeort geklungen hat.“ (Andreas Ederhof, Das Mikrofonbuch, S. 15)

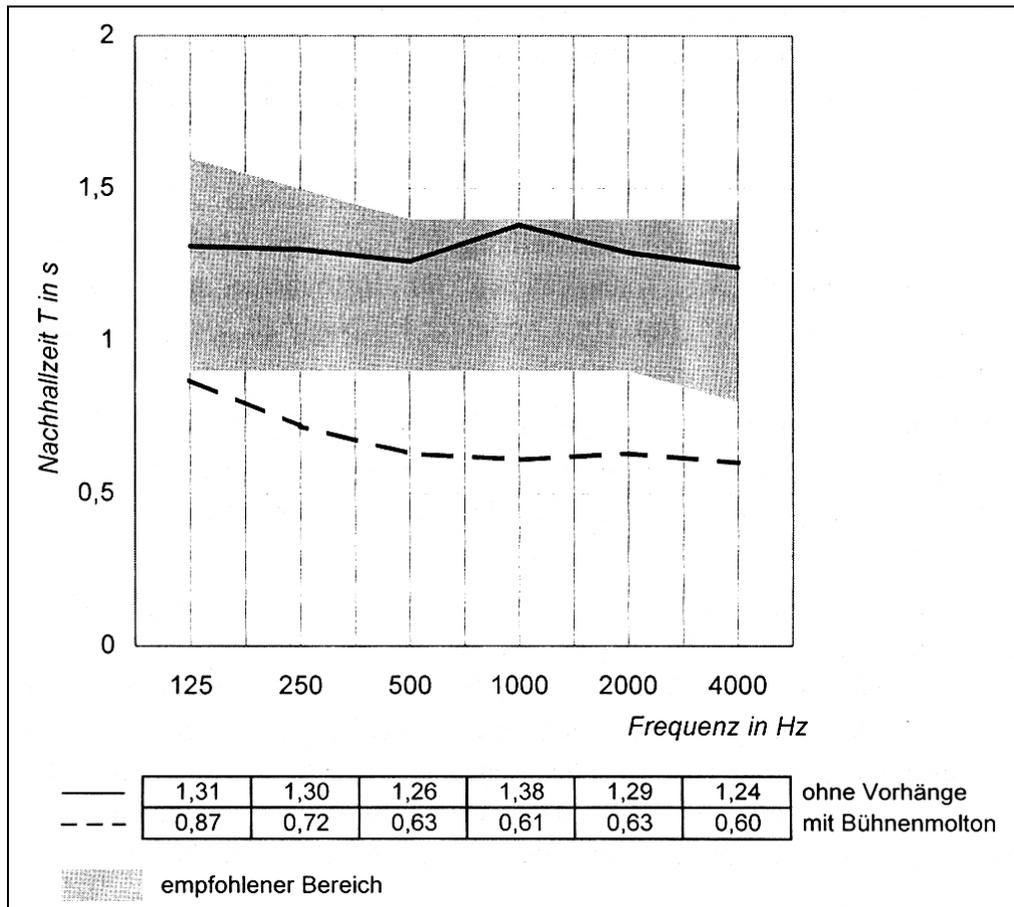
Für eine Aufnahme, bei der es auf den Klang des Originalraums ankommt, ist es sehr wichtig, dass sie in einem klanglich guten Raum stattfindet.

Geplant war, zwei verschiedene Aufnahmen zu machen; eine mit kleinerer und eine mit größerer Besetzung.

Einen klanglich gut gebauten Saal bietet das ZKM Karlsruhe (siehe Grafik 10), das Hauptstudio Musik oder auch Kubus genannt. Er besitzt eine Quaderform mit einer Nachhallzeit zwischen 1,2 und 1,4 Sekunden (siehe Grafik 11) und ist mit Holz ausgekleidet. Er ist für Instrumentalaufnahmen mit elektroakustischer Unterstützung konzipiert.



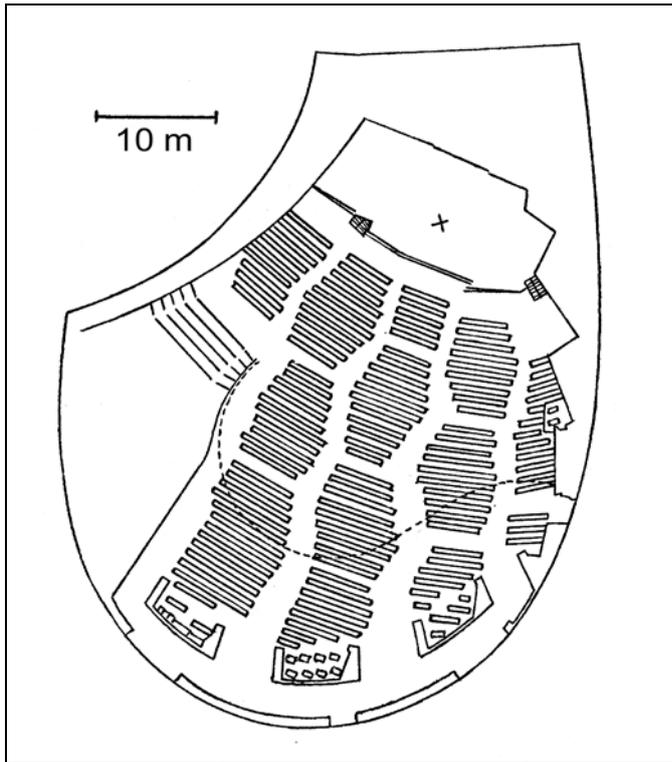
Grafik 10: Konzertsaal „Kubus“ ZKM Karlsruhe (Quelle: Internet [veranst.zkm.de/Kubusindex](http://veranst.zkm.de/Kubusindex))



Grafik 11: Nachhallzeit im Kubus (20. Tonmeistertagung 1998 Karlsruhe, S. 94)

In diesem Raum sollte die erste Aufnahme stattfinden. An zwei Tagen spielten Musiker der Ensemble Modern Akademie in verschiedenen kleineren Besetzungen moderne Musik. Bei diesen Konzerten sollte der erste Vergleichsversuch stattfinden.

Für die zweite Aufnahme wählte ich den Beethovensaal der Liederhalle Stuttgart aus. Er bietet einen exzellenten Klang für klassische Musik. Die beeindruckende Raumgestaltung in Form eines Flügels (siehe Grafik 12) bietet einen sehr unsymmetrischen Klangraum. Dies verhindert, dass bestimmte Raumresonanzfrequenzen entstehen.



Grafik 12: Grundriss des BeethovensaaIs der Liederhalle Stuttgart (Jarmil Burghausen/Antonin Spelda, Akustische Grundlagen des Orchestrierens, S. 106)

Mit einer Nachhallzeit von rund 2 Sekunden bietet der Beethovensaal optimale Voraussetzungen für Orchestermusik. Er fasst 2000 Zuschauer. Der 1956 errichtete Saal besitzt ein Raumvolumen von 16 000 m<sup>3</sup>.

In Zusammenarbeit mit dem SWR Stuttgart ergab sich die Möglichkeit, ein Konzert des Radiosinfonieorchesters Stuttgart im Beethovensaal für das Experiment aufzuzeichnen.

#### 4.1.2 Vorbereitungen zur Aufzeichnung der Impulsantworten

Zur Aufzeichnung der Impulsantworten in jedem Konzertsaal werden die genauen Positionen der Stützmikrofone und ein Lautsprecher zum Einspielen des Testsignals benötigt. Dieser Lautsprecher wird nacheinander an jede Stützmikrofonposition gestellt. Während der Lautsprecher das Testsignal abspielt, wird der Klang im Raum

über die Hauptmikrofone aufgezeichnet. Man erhält bei  $x$  Positionen und  $y$  Hauptmikrofonen also  $x * y$  Monosignale.

Als Testsignal bietet der HDIR-Creator, mit dessen Hilfe die Impulsantworten erstellt werden sollten, einen Sinussweep unterschiedlicher Länge. Die kürzeste Version hat eine Länge von lediglich fünf Sekunden. Besser ist es ein längeres Testsignal zu verwenden, da die Ergebnisse dann genauer ausgewertet werden können. Deshalb fiel die Entscheidung auf das längste Testsignal mit einer Länge von 80 Sekunden.

Aufgrund der gegebenen Infrastruktur an den Aufnahmeorten wurden die Aufnahmen nicht mit dem HDIR-Creator selbst durchgeführt, sondern das Testsignal aus Nuendo bzw. Sequoia heraus in den Saal eingespielt und die Aufnahmen in Nuendo bzw. Sequoia aufgezeichnet.

Später ließen sich die Aufnahmen im HDIR-Creator importieren, um mit diesem die Impulsantworten zu erstellen.

## 4.2 Erste Aufnahme – ZKM Karlsruhe

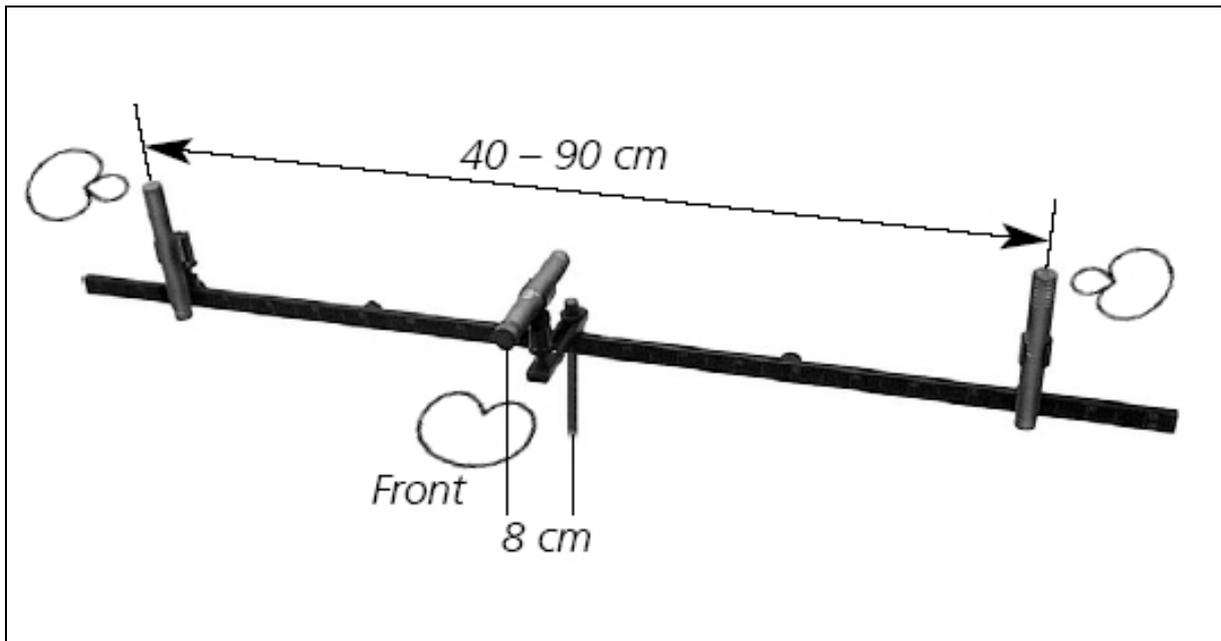
### 4.2.1 Mikrofone

#### 4.2.1.1 Das OCT-Surround-System

Als Hauptmikrofon wurde das OCT-Surround-System vom Mikrofonhersteller Schoeps eingesetzt. OCT steht für Optimized Cardioid Triangle.

Das OCT-Surround-System besteht aus dem OCT-Frontsystem und zwei zusätzlichen Surround-Mikrofonen für die Aufzeichnung der rückwärtigen Kanäle.

Das OCT-System geht auf Günther Theile zurück. Als Grundsystem hat er ein dreikanaliges Hauptmikrofon entwickelt, welches die drei Frontkanäle des 3/2-Formats aufzeichnet. Die Grafik 13 zeigt das dreikanalige Frontsystem.



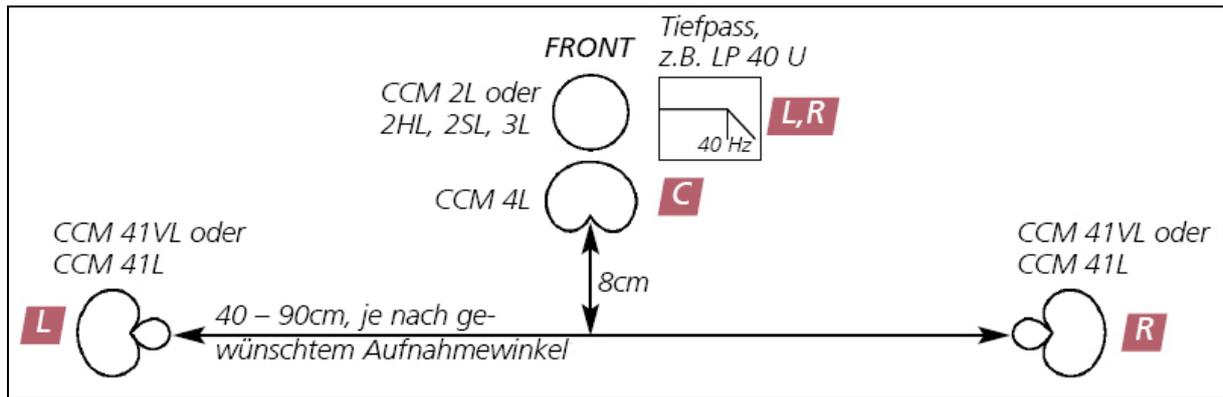
Grafik 13: Das OCT-Frontsystem (Schoeps, Surround-Aufnahmen mit dem OCT, S. 1)

Es besteht aus einer nach vorn gerichteten Niere für die Aufzeichnung des Centersignals. Links und rechts befinden sich zwei seitwärts ausgerichtete Supernieren. Das Center-Mikrofon ist etwas nach vorn versetzt. „Das Prinzip: Gute Trennung zwischen den Sektoren L/C und R/C. Schall, der von der rechten Seite kommt, wird von der linken Superniere nur wenig aufgenommen“ (Schoeps, Surround-Aufnahmen mit dem OCT, S.1).

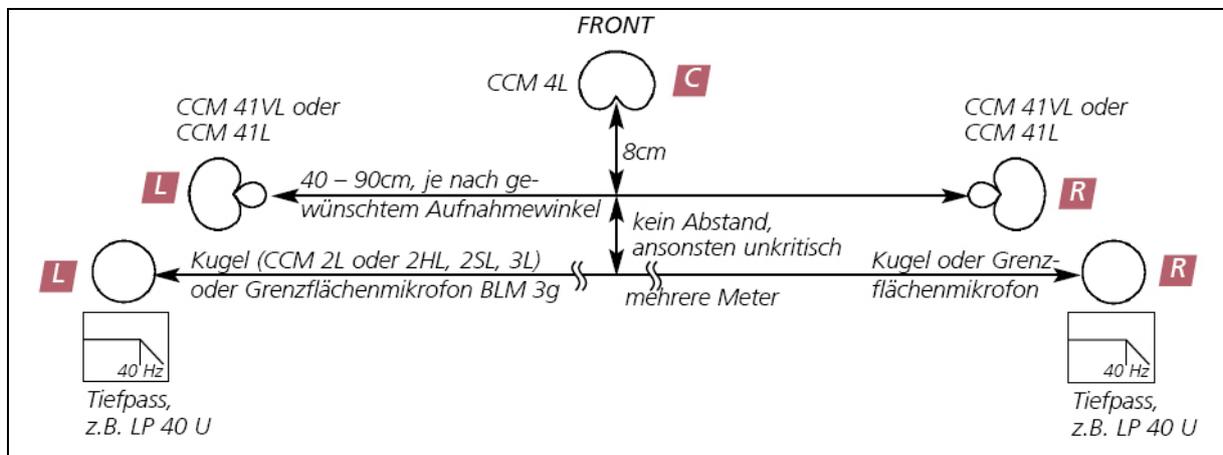
Außerdem erhält man einen sauberen Center-Kanal, weil frontaler Schall vor allem von der zentralen Niere aufgenommen wird. „Die seitlich gerichteten Supernieren nehmen ihn unter 90° auf und liefern daher ca. 10 dB weniger Pegel“ (Jörg Wuttke, Mikrofonaufsätze, S. 102).

Die seitliche Beschallung der Supernieren erfordert die Verwendung von Kleinmembran-Mikrofonen, da nur bei ihnen der Frequenzgang genügend unabhängig vom Einfallswinkel ist. Besonders geeignet sind daher die Mikrofone CCM41 und MK41 von Schoeps, oder die jeweilige V-Variante.

Da die verwendeten Supernieren, wie bei richtenden Mikrofonen üblich, tiefste Frequenzen nicht so perfekt übertragen wie Druckempfänger, können die Signale ergänzend von einer oder zwei Kugeln (siehe Grafiken 14 und 15) im Bereich tiefster Frequenzen zu den Kanälen L und R zugemischt werden.



Grafik 14: OCT-Frontsystem mit einer Kugel mit Schoeps-Mikrofonen



Grafik 15: OCT-Frontsystem mit zwei Kugeln (Schoeps, Surround-Aufnahme mit dem OCT, S.2)

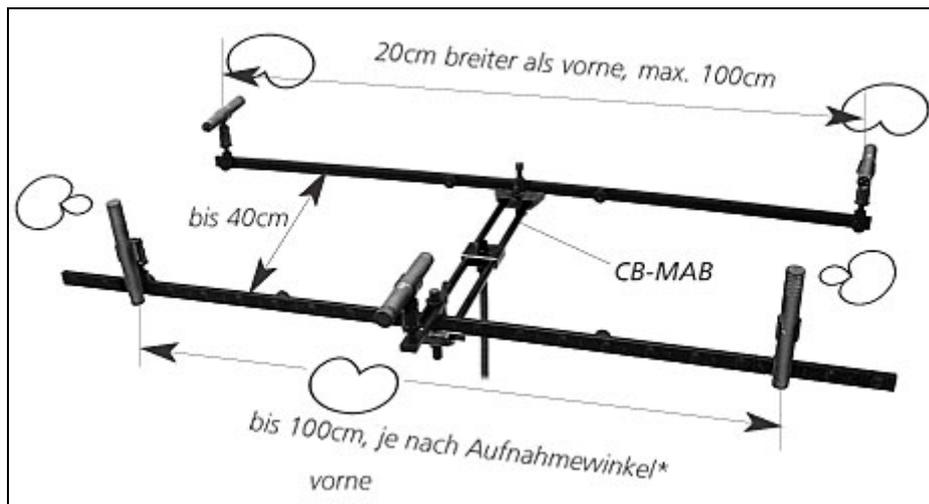
Für die Kugel-Kanäle wird ein Tiefpassfilter eingesetzt, damit nur die tiefen Frequenzen bis 100 Hz aufgenommen werden. Auf diese Weise erfolgt eine optimierte Bass-Übertragung.

Gerne schaltet man dem Center-Mikrofon einen Hochpassfilter mit einer Eckfrequenz von 100 Hz nach, damit der Center-Kanal keine tiefen Frequenzen überträgt.

Um mit dem OCT-Frontsystem auch 3/2-Aufnahmen machen zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten. So ist beispielsweise die Kombination mit dem IRT-Kreuz möglich. „Die vorderen beiden Kanäle des IRT-Kreuzes werden dabei den Hauptkanälen L und R zugemischt, während die hinteren Signale die Kanäle LS und RS bilden“ (Christian Birkner, Surround, S. 97).

Eine weitere Variante, das OCT-Frontsystem surroundfähig zu machen, ist der zusätzliche Einsatz des Hamasaki-Square. Dabei werden vier zusätzliche Mikrofone mit Acht-Charakteristik verwendet.

Eine andere Möglichkeit, 3/2-Aufnahmen durchzuführen, bietet das OCT-Surround-System. Dabei wird das OCT-Frontsystem um zwei rückwärtige Mikrofone ergänzt. Die Grafik 16 zeigt die Anordnung des OCT-Surround-Systems von Schoeps.



Grafik 16: Das OCT-Surround-System

Für die Surround-Kanäle werden zwei Nieren eingesetzt, welche nach hinten ausgerichtet sind. Damit wird die Aufnahme von Direktschall bei diesen Mikrofonen unterdrückt.

Die Laufzeit- und Intensitätsunterschiede zwischen Superniere und Niere sind so bemessen, dass der Seitenschall in ähnlicher Weise wie der Schall von vorne jeweils stereofon aufgenommen wird. D.h., wenn der Zuhörer sich zur Seite dreht, stimmt die Abbildung auch in den Sektoren zwischen L und LS bzw. R und RS. Diese korrekte Wiedergabe der seitlichen Reflexionen führt zu einer guten Reproduktion der räumlichen Perspektive (Schoeps, Surround-Aufnahme mit dem OCT, S. 2).

Das Nierenmikrofon zur Gewinnung des Center-Signals ist um acht Zentimeter nach vorne versetzt bezüglich der Achse der Supernierenmikrofone. Die Mikrofone zur Gewinnung der Signale L und R haben einen Abstand von 40 bis 90 Zentimetern, was einen Aufnahmewinkel zwischen  $90^\circ$  und  $160^\circ$  ergibt:

40 cm: 160°  
50 cm: 140°  
60 cm: 120°  
70 cm: 110°  
80 cm: 100°  
90 cm: 90°

(Quelle: Schoeps, Surround-Aufnahmen mit dem OCT, S. 1)

Im Zweifelsfall sollte der Abstand eher größer gewählt werden, um eine zu mittige Abbildung zu vermeiden.

Die rückwärtig ausgerichteten Surround-Mikrofone sind um 40 Zentimeter nach hinten versetzt. Diese Nieren haben einen um 20 Zentimeter größeren Abstand voneinander als die beiden Supernieren. Allerdings sollte der Abstand 100 Zentimeter nicht überschreiten.

Bei den Aufnahmen im Kubus des ZKM Karlsruhe wurden folgende Mikrofonabstände gewählt: Die Center-Niere war um acht Zentimeter nach vorne versetzt. Der Abstand der Supernieren betrug 70 Zentimeter, der Abstand der Surround-Mikrofone deshalb 90 Zentimeter. Letztere waren um 40 Zentimeter nach hinten versetzt. Es ergab sich damit ein Aufnahmewinkel von etwa 110°.

Zusätzliche Kugeln kamen nicht zum Einsatz. Auch wurde auf eine Filterung des Center-Kanals mittels Hochpass verzichtet.

Folglich kam ein fünfkanales Hauptmikrofon zum Einsatz, welches direkt die fünf Kanäle im 3/2-Format liefert.

#### 4.2.1.2 Stützmikrofone

Als Stützmikrofone kamen Nieren (MK4 und CCM4) und Supernieren (MK41 und CCM41) von Schoeps zum Einsatz. Nieren wurden für die Abnahme von Violine, Cello, Querflöte, Klarinette, Fagott, Trompete, Saxophon, Flügel und Schlagwerk eingesetzt. Auch bei dem Stück mit zwei Marimbaphonen wurde mit Nieren gestützt. Für die Sprech- und Singstimmen wurden dagegen Supernieren verwendet. Teilweise wurde auch bei Schlaginstrumenten mit Supernieren gearbeitet.

Die Besetzung der einzelnen Stücke war immer recht klein, dafür sehr abwechslungsreich. Es wurden je nach aufgenommenem Stück zwischen zwei und sechs Stützmikrofone eingesetzt.

#### 4.2.2 Lautsprecher

Zum Einspielen des Testsignals stand ein Lautsprecher von Meyersound zur Verfügung, der UPJ-1P (vgl. Grafik 17). Er produziert als Aktiv-Lautsprecher einen Spitzen-Output von 128 dB SPL bei einem Meter Abstand. (Quelle: [www.meyersound.de](http://www.meyersound.de))



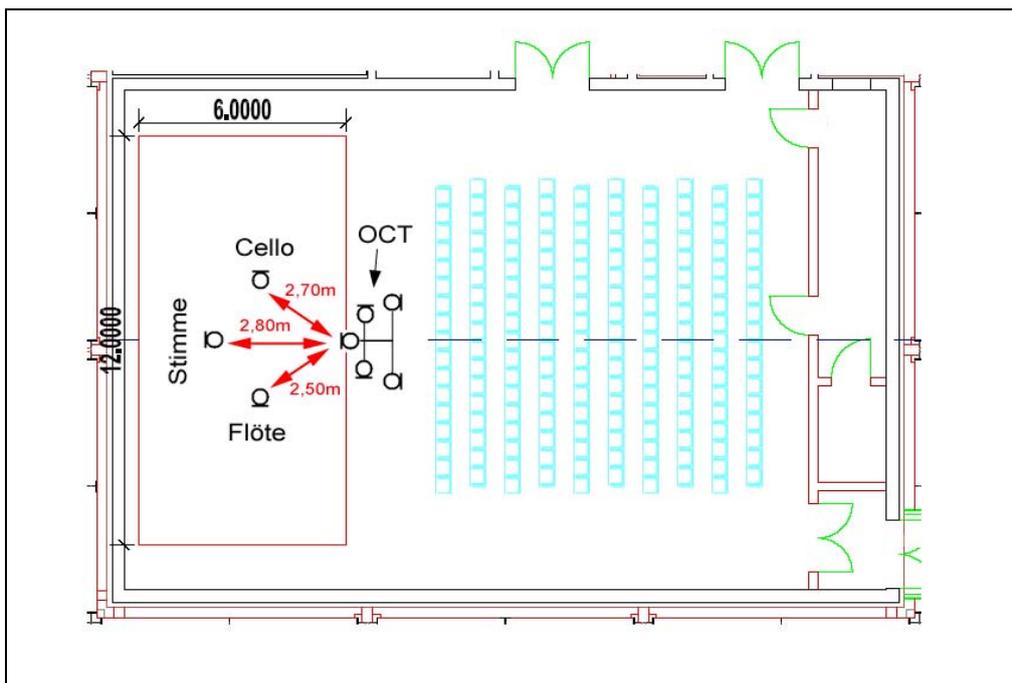
Grafik 17: Meyersound UPJ-1P

#### 4.2.3 Aufnahmen

Zwei Konzerte der Musiker der Internationalen Ensemble Modern Akademie wurden für das Experiment aufgezeichnet. Zum Teil waren auch Stücke mit Live-Elektronik dabei. Für das Experiment kamen aber lediglich die Stücke ohne Elektronik in Frage. Es konnten damit folgende fünf Stücke für das Faltungshallexperiment genutzt werden:

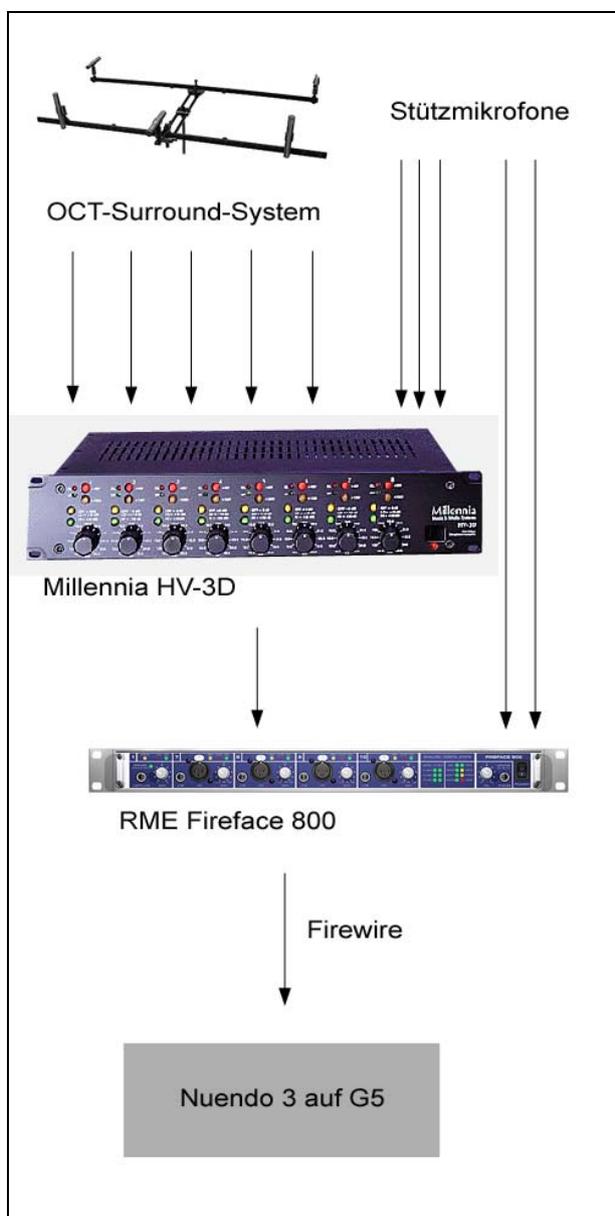
- Carola Bauckholt: Schraubdichtung (1989/90)  
für Sprechstimme, Kontrafagott, Cello und Schlagzeug
  
- Arnold Schönberg, Pierrot lunaire op. 21 (1912)  
für Stimme, Querflöte, Violine, Saxophon, Klarinette, Cello und Klavier
  
- André Jolivet, Heptade (1970)  
für Trompete und Schlagzeug
  
- Philippe Manoury, pièce II: Duo de Marimbas (1988)  
für zwei Marimbaphone
  
- Helmut Lachenmann, temA (1968)  
für Flöte, Stimme und Violoncello

Die Grafik 18 zeigt den Grundriss des Kubus im ZKM Karlsruhe und die Position der Mikrofone bei der Aufzeichnung des Stücks temA für Flöte, Stimme und Violoncello von Helmut Lachenmann.



Grafik 18: Mikrofonpositionen bei der Aufzeichnung von temA von Lachenmann

Die Konzerte wurden auf Nuendo in einem Mehrspurprojekt aufgezeichnet. Dabei kam ein Millennium HV-3D Vorverstärker zum Einsatz. Er ist für den Anschluss von acht Mikrofönen ausgelegt. Mit ihm konnten die fünf Hauptmikrofone des OCT-Surround-Systems sowie drei Stützmikrofone verstärkt werden. Der Vorverstärker wurde an ein RME Fireface 800 angeschlossen. Dort wurden auch die übrigen Stützmikrofone aufgeschaltet. Das RME Fireface war über ein Firewire-Kabel an den Rechner angebunden, auf welchem mit der Tonstudiosoftware Nuendo gearbeitet wurde. Es kam ein G5 zum Einsatz. In Grafik 19 ist der Signalfluss bei der Mehrspuraufzeichnung der Konzerte dargestellt.



Grafik 19: Signalfluss bei der Aufzeichnung im ZKM Karlsruhe

Im Anschluss an die Konzerte konnten die Testsignale für die Erstellung der Impulsantworten aufgezeichnet werden. Dazu wurde der Lautsprecher auf ein Stativ montiert, womit er auf der Bühne leicht an die jeweiligen Stützmikrofonpositionen gebracht werden konnte. An allen Stellen, an denen während der Konzerte Stützmikrofone positioniert gewesen waren, wurde nun das 80-sekündige Testsignal in den Raum eingespielt. Mit den fünf Mikrofonen des OCT-Surround-Systems wurde das Signal jeweils aufgenommen.

## 4.3 Zweite Aufnahme – Liederhalle Stuttgart

### 4.3.1 Mikrofone

#### 4.3.1.1 Das Straus-Paket

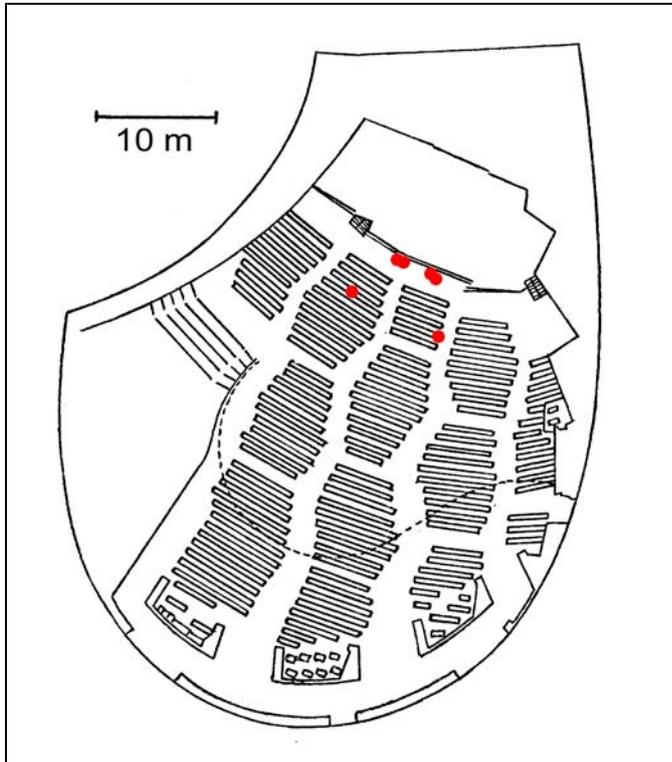
Der Name Straus-Paket geht auf den Diplom-Tonmeister Volker Straus zurück. Er verwendete zwei Mikrofone mit unterschiedlichen Richtcharakteristiken, eine Niere und eine Kugel, und platzierte diese sehr dicht zueinander; daher die Bezeichnung „Paket“. Straus schloss damals beide Mikrofone an nur einen einzigen Mikrofoneingang an. Es handelte sich um eine Serienschaltung. Daraus resultiert als Richtcharakteristik eine breite Niere.

Das Straus-Paket ermöglicht eine große Natürlichkeit der musikalischen Wiedergabe. Man verwendet diese Kombination heute auch gerne als Hauptmikrofonpaar für stereofone Aufnahmen. Dabei zeichnet man beide Mikrofone getrennt voneinander auf und hat so später die Möglichkeit, das Mischungsverhältnis zwischen Niere und Kugel nach Belieben einzustellen.

Bei der Orchesteraufnahme in der Liederhalle kam ein solches Straus-Paket zum Einsatz. Dabei wurden Nieren- und Kugelmikrofone des Mikrofonherstellers DPA verwendet.

Zusammen mit zwei sehr hoch, aber nicht allzu weit von der Bühne entfernt, aufgehängten Raummikrofonen, ergab sich ein sechsteiliges Surround-Hauptmikrofon. Für den Raum, und in der Mischung damit für die Surround-Kanäle, kamen Kugelmikrofone von Neumann zum Einsatz, nämlich das KM130. Beide Mikrofone wurden von der Decke abgehängt.

Grafik 20 zeigt die Position des Surround-Hauptmikrofons. Die beiden Mikrofone zur Aufzeichnung der rückwärtigen Signale sind zwar recht weit vorne, dafür aber sehr hoch im Raum angebracht. Es hat sich ergeben, dass so gute Ergebnisse erzielt werden können. Vorne befinden sich die vier Mikrofone des Straus-Pakets.



Grafik 20: Position des Surround-Hauptmikrofons im Beethovensaal

#### 4.3.1.2 Stützmikrofone

Insgesamt kamen zu den sechs Hauptmikrofonen noch 36 Stützmikrofone hinzu. Dabei kamen hauptsächlich Nieren des Mikrofonherstellers Schoeps zum Einsatz, nämlich das MK4. Außerdem wurden Mikrofone von Neumann verwendet, beispielsweise das U89 für Celli, Kontrabässe und die Blechblasinstrumente und Mikrofone vom Typ KM140 für die Schlaginstrumente.

Bei einem der Konzertstücke spielten zwei Bouzuki mit. Sie wurden durch Supernieren von Schoeps abgenommen, nämlich durch Mikrofone vom Typ MK41.

### 4.3.2 Lautsprecher

Für das Einspielen der Testsignale in der Liederhalle wurde ein Lautsprecher der Firma d&b-Audiotechnik eingesetzt, nämlich der E3 (vgl. Grafik 21). Er bietet einen maximalen Schalldruck von 122 dB bei einem Meter Abstand. Er ist mit 120 Watt belastbar und gibt einen Frequenzbereich von 80 Hz bis 18 kHz wieder. (Quelle: [www.dbaudio.com](http://www.dbaudio.com))



Grafik 21: Lautsprecher E3 von d&b-Audiotechnik ([www.dbaudio.com](http://www.dbaudio.com))

### 4.3.3 Aufnahmen

Im Beethovensaal der Liederhalle Stuttgart bestand die Möglichkeit ein After-Work-Konzert „Klassik ohne Frack“ des Radiosinfonieorchesters Stuttgart des SWR aufzunehmen. Es handelte sich um ein moderiertes gut einstündiges Konzert. Es dirigierte Fabrice Bollon.

Es wurden folgende Stücke aufgezeichnet:

- John Adams, Short Ride in a Fast Machine
- Wolfgang Amadeus Mozart, Konzert für Violine und Orchester Nr. 4 D-Dur KV 218
- Mikis Theodorakis, Auszüge aus „Zorba, der Grieche“ (Alexis Sorbas)

Nachdem bei der Probe die einzelnen Mikrofonpositionen festgelegt worden waren, konnten in der anschließenden Pause die Testsignale für die Impulsantworten aufgezeichnet werden. Dafür wurde ein Sequoia-Projekt angelegt, in dem lediglich die sechs Hauptmikrofone, also Straus-Paket und die beiden Raummikrofone, aufgezeichnet wurden. Eine weitere Spur enthielt das 80-sekündige Sweep-Testsignal, mehrfach hintereinander platziert. So wurde ein zeitlich optimaler Ablauf garantiert. Die Dauer für die Aufnahme der zahlreichen Testsignale konnte ausreichend kurz gehalten werden.

Zur Aufnahme der einzelnen Testsignale wurde nun der Regielautsprecher nacheinander an alle Stützmikrofonpositionen gebracht. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Lautsprechers ist es nicht notwendig bzw. möglich gewesen, jede Mikrofonposition einzunehmen, wenn Mikrofone sehr dicht beieinander angesiedelt waren. Hier kann dann eine Testsequenz auch für mehrere Mikrofonpositionen verwendet werden. Dennoch war aufgrund der großen Anzahl an Stützmikrofonen eine beträchtliche Anzahl Testsequenzen aufzunehmen.

Eine Testsequenz benötigt eine Dauer von gut 80 Sekunden, hinzu kommt die Umpositionierung des Lautsprechers. So ergibt sich etwa ein Zeitaufwand von drei Minuten pro aufzunehmende Stützmikrofonposition.

Nach der erfolgreichen Aufzeichnung lagen für alle Positionen sechs Mono-Wave-Dateien mit einer Samplefrequenz von 48 kHz und einer Auflösung von 24 Bit für die weitere Bearbeitung vor.

Am Abend wurde dann das Konzert ebenfalls als Mehrspurprojekt mit Sequoia aufgezeichnet. Alle sechs Hauptmikrofone und die 36 Stützmikrofone wurden in Monospuren mitgeschnitten.

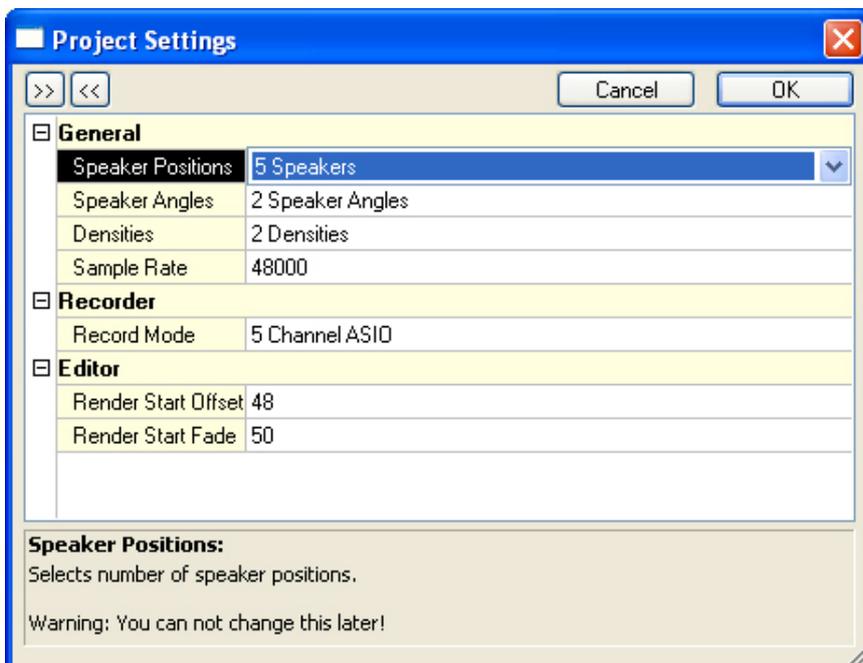
## 5 Erstellen der Impulsantworten

Für das Erstellen der Impulsantworten wurde der HDIR-Creator von Masterpinguin eingesetzt.

Auf der „Record Page“ hätte man die Aufnahmen der Testsignale direkt mit dem HDIR-Creator durchführen können. Aufgrund des Workflows bei den Aufnahmen bot es sich aber an, die Testsweeps aus Sequoia auszuspielen und die Mikrofonsignale auch dort aufzuzeichnen.

Für jede Stützmikrofonposition lagen nun also fünf (OCT-Aufnahme im ZKM) bzw. sechs (Aufnahme in der Liederhalle) aufgezeichnete Monosignale vor. Aus diesen aufgezeichneten Testsignalen waren nun Raumimpulsantworten zu erstellen.

Beim Anlegen eines neuen Projekts im HDIR-Creator müssen zunächst die „Project Settings“ eingegeben werden. Dazu öffnet man unter dem Menüpunkt „Datei“ das Fenster „Project Settings“, welches in Grafik 22 dargestellt ist.



Grafik 22: Project Settings des HDIR-Creators

Bei „Speaker Positions“ wird ausgewählt, wie viele Lautsprecherpositionen aufgezeichnet werden sollen bzw. wurden. Bis zu fünf Positionen lassen sich in einem Projekt verarbeiten. Für das Experiment bedeutet dies, dass immer fünf Stützmikrofonpositionen in einem Projekt bearbeitet werden können.

Unter „Speaker Angles“ lässt sich die Anzahl der verschiedenen Lautsprecherwinkel eingeben, die bei der Aufnahme durchgeführt wurden.

Sind verschiedene Lautsprecherwinkel vorhanden, können unterschiedliche „Densities“ gemischt werden. Die Anzahl wird in diesem Dialogfeld festgelegt.

Außerdem wird hier die gewünschte „Sample Rate“ ausgewählt: 44,1 kHz, 48 kHz oder 96 kHz stehen zur Verfügung. Bei den Experimenten wurde mit 48 kHz gearbeitet.

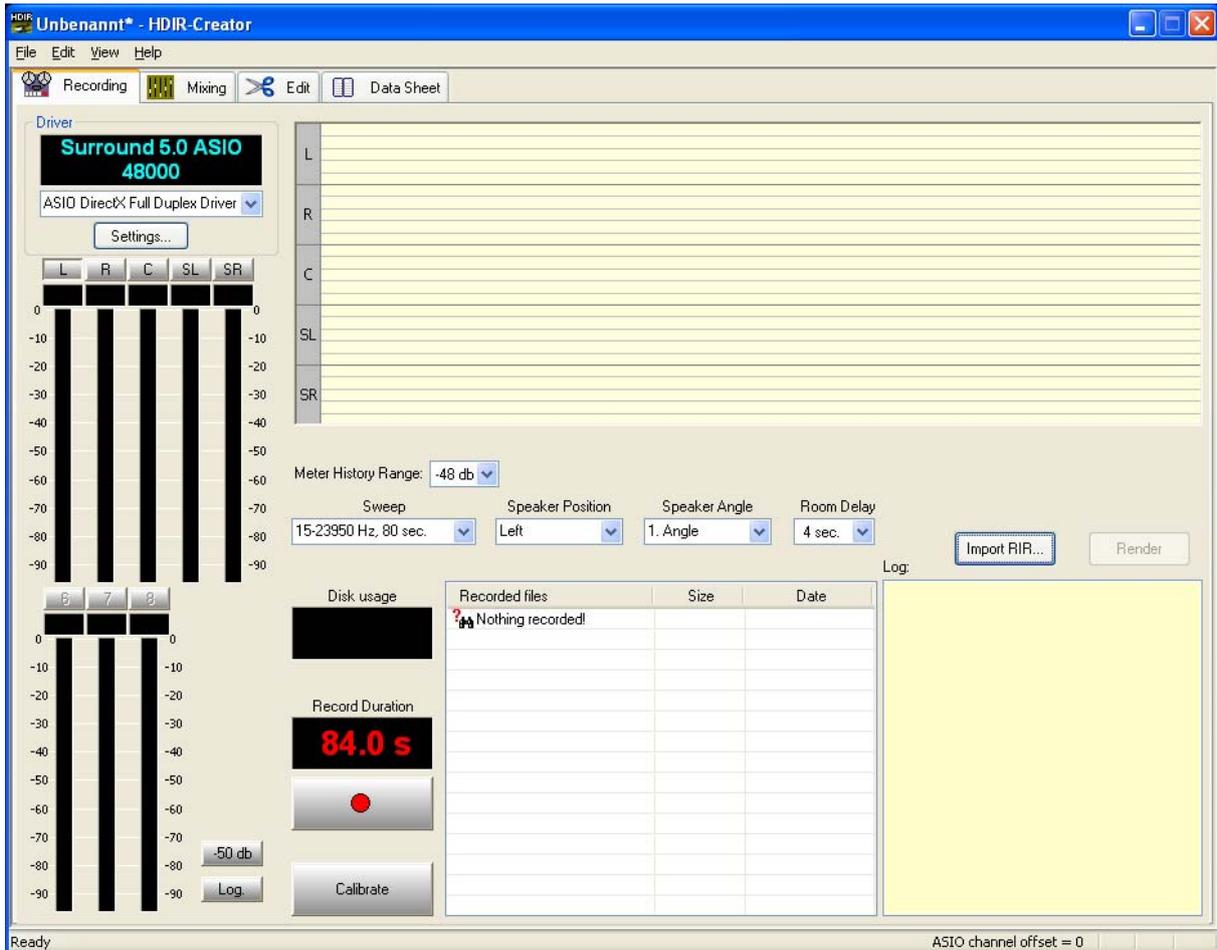
Entsprechend der Anzahl der aufgezeichneten Mikrofone wird unter „Record Mode“ die Anzahl der aufgezeichneten Kanäle festgelegt.

Zusätzlich kann bestimmt werden, wie viele Samples vergehen, bis die Impulsantwort im Exportfile beginnt. Dies geschieht im Feld „Render Start Offset“. Mit „Render Start Fade“ legt man fest, wie lange der Fade zu Beginn der Exportdatei sein soll. Die Angabe erfolgt in Prozent bezüglich des Render Start Offsets.

Sind die Projekteinstellungen getätigt, können auf der „Recording Page“ (siehe Grafik 23) die Testsignale aufgezeichnet werden.

Für die Experimente erfolgte auf dieser Seite lediglich der Import der bereits in Nuendo bzw. Sequoia aufgezeichneten Dateien. Dazu muss noch das entsprechende Testsignal ausgewählt werden, in diesem Falle das 80-sekündige. Unter „Room Delay“ wird eine ausreichend große Zeit für den Nachhall eingegeben. Sie sollte nicht zu eng bemessen werden. Im Feld „Record Duration“ ist dann die Dauer der einzelnen Aufnahmen ersichtlich.

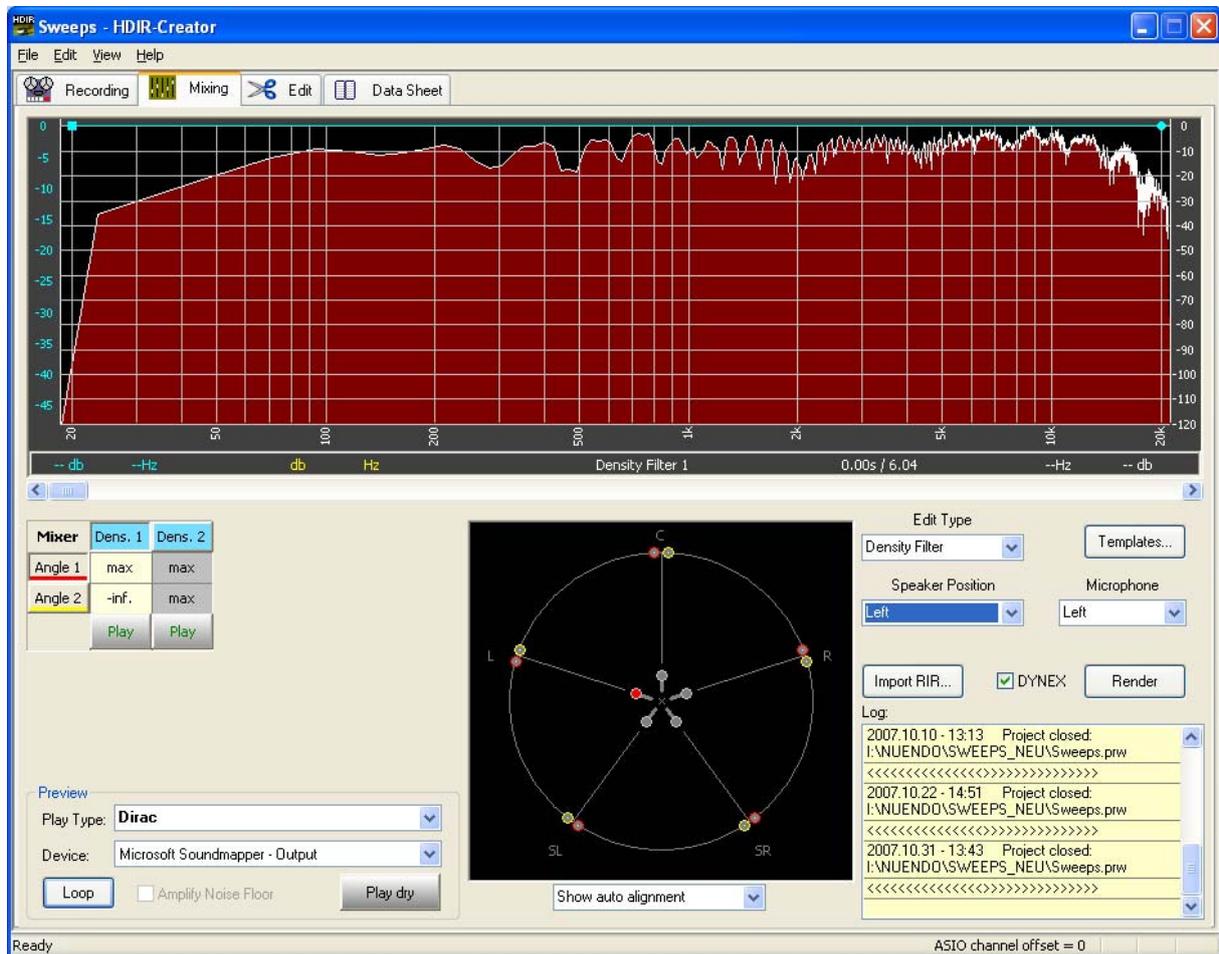
Mit „Import RIR...“ wird anschließend ein Import-Dialog geöffnet. Dort können bereits aufgezeichnete Testsignale geladen werden. Sie müssen dazu in einem ganz bestimmten Format vorliegen: Bei 5-kanaligen Projekten muss es sich um eine 5-kanalige Wave-Datei im Interleaved-Format handeln, bei 6-kanaligen folglich um eine solche mit sechs Kanälen. Diese Dateien wurden zuvor mit der Tonstudiosoftware Nuendo erzeugt. Weiterhin muss eine genaue Namensgebung bei den zu importierenden Dateien eingehalten werden: Sie müssen mit RA\_XY\_Projektnamen.wav bezeichnet werden. Dabei steht RA für Raumantwort. X gibt die Lautsprecherposition an in der Reihenfolge 0, 1, 2, 3, ... Y steht für den jeweiligen Lautsprecherwinkel; der erste wird ebenfalls mit einer Null kenntlich gemacht.



Grafik 23: Recording Page des HDIR-Creators

Beim Import wird die erste Datei, also RA\_00\_Projektnamen.wav ausgewählt. Nach einer längeren Verarbeitungsprozedur sind alle notwendigen Dateien importiert, sofern sie sich alle im selben Ordner befinden.

Auf der „Mixing Page“ (siehe Grafik 24) findet die weitere Verarbeitung der Testsignale statt.



Grafik 24: Mixing Page des HDIR-Creators

Oben wird der Pegel eines Testsignals über der Frequenz dargestellt. Rechts darunter kann über „Speaker Position“ und „Microphone“ ausgewählt werden, welches Testsignal dargestellt wird. Unter „Mixer“ im linken Bereich der Mixing Page kann man den einzelnen „Densities“ das gewünschte Mischungsverhältnis der aufgezeichneten „Speaker Angles“ zuweisen. Beispielsweise kann für die erste Density nur Angle 1 verwendet werden, bei Angle 2 mischt man sie dann zu gleichen Teilen zusammen. Natürlich sind auch andere Mischungsverhältnisse möglich.

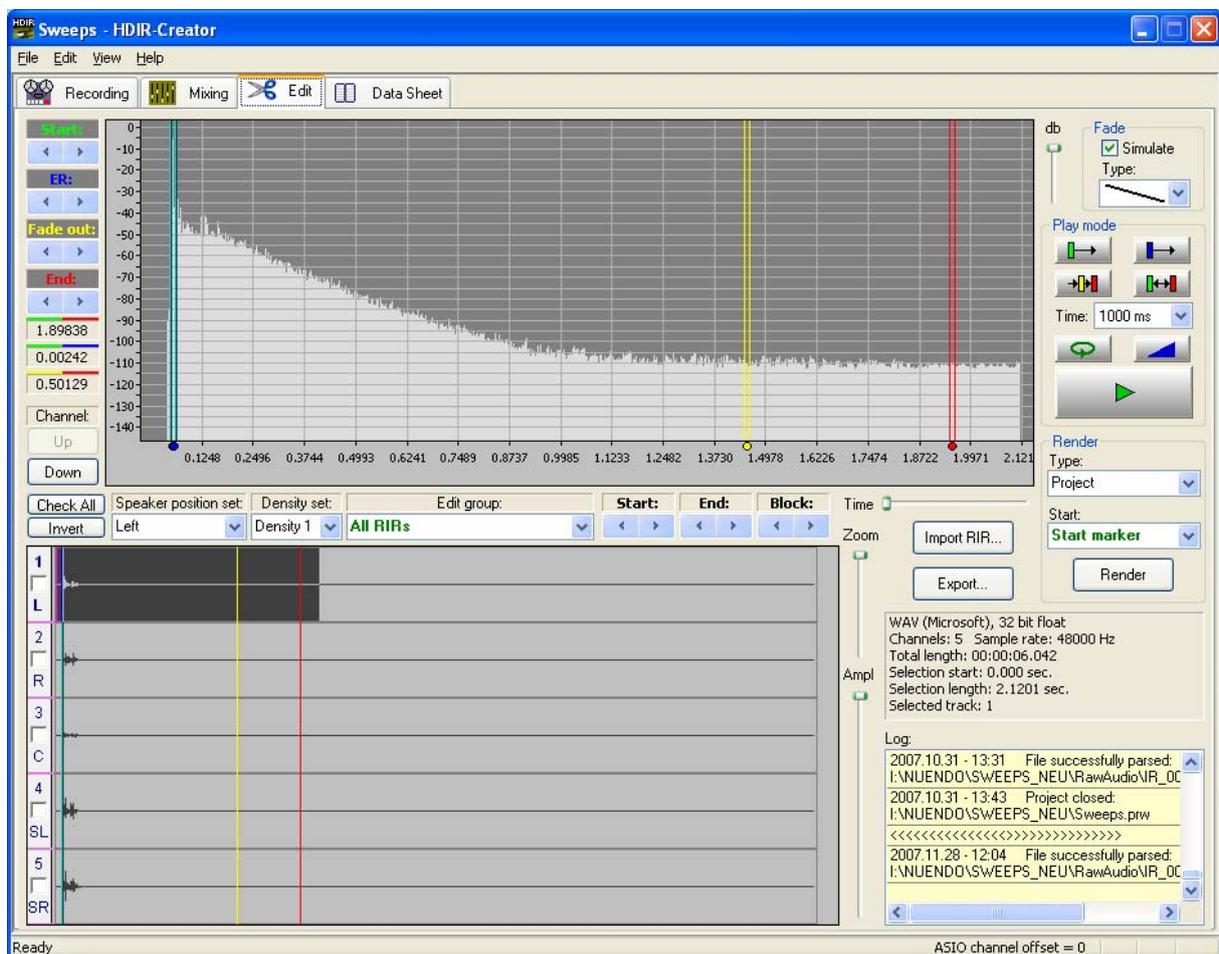
Für weitere Bearbeitungen steht im oberen Feld eine Filterkurve zur Verfügung. Dort können einzelne „EQ Points“ gesetzt und die Kurve damit nach Wunsch gestaltet werden. Unter „Edit Type“ muss dazu ausgewählt werden, ob sich die Korrekturen nur auf die gerade dargestellte Density oder auf alle Densities des Projekts beziehen.

Bei der Bearbeitung der Testsignale für das Experiment wurden keine Veränderungen im Frequenzgang durchgeführt. Die EQ-Kurve blieb unverändert gerade bei 0 dB.

Mit „Import RIR...“ können auf der Mixing Page bereits vorhandene Impulsantworten zur Bearbeitung geladen werden.

Sind alle gewünschten Einstellungen vollzogen, wird mit „Render“ der Verarbeitungsprozess ausgelöst.

Die „Edit Page“ (siehe Grafik 25) bietet die letzten Bearbeitungsmöglichkeiten.



Grafik 25: Edit Page des HDIR-Creators

Hier werden die fertigen Impulsantworten in der Zeitdarstellung angezeigt. Über „Speaker Position Set“ und „Density Set“ kann man die einzelnen Impulsantworten zur Darstellung auswählen. Das Schaubild links unten zeigt eine Übersicht über die Kanäle des jeweils ausgewählten Sets. Hier kann eingezoomt werden.

Noch genauer wird im oberen Feld die jeweils ausgewählte Impulsantwort dargestellt. Auch hier gibt es eine Zoomfunktion. Außerdem wird in diesem Feld immer genau der Bereich angezeigt, der im Feld links unten markiert ist.

Die Edit Page dient dem Editieren der gewonnenen Impulsantworten. Dort wird festgelegt, an welcher Stelle die Impulsantworten beginnen und wo sie enden. Der grüne Marker steht für den Start der Impulsantwort, der rote für das Ende. Mit dem blauen Marker werden die Ersten Reflektionen markiert. Der gelbe Marker befindet sich an der Position, an der der Schlussfade einsetzen soll. Links neben dem Schaubild kann man die korrespondierenden Zeiten zwischen den Markern ablesen. Über die Buttons darüber können die Positionen der Marker korrigiert werden. Bei „Edit Group“ wählt man zuvor aus, für welche Impulsantworten die durchgeführten Veränderungen erfolgen sollen.

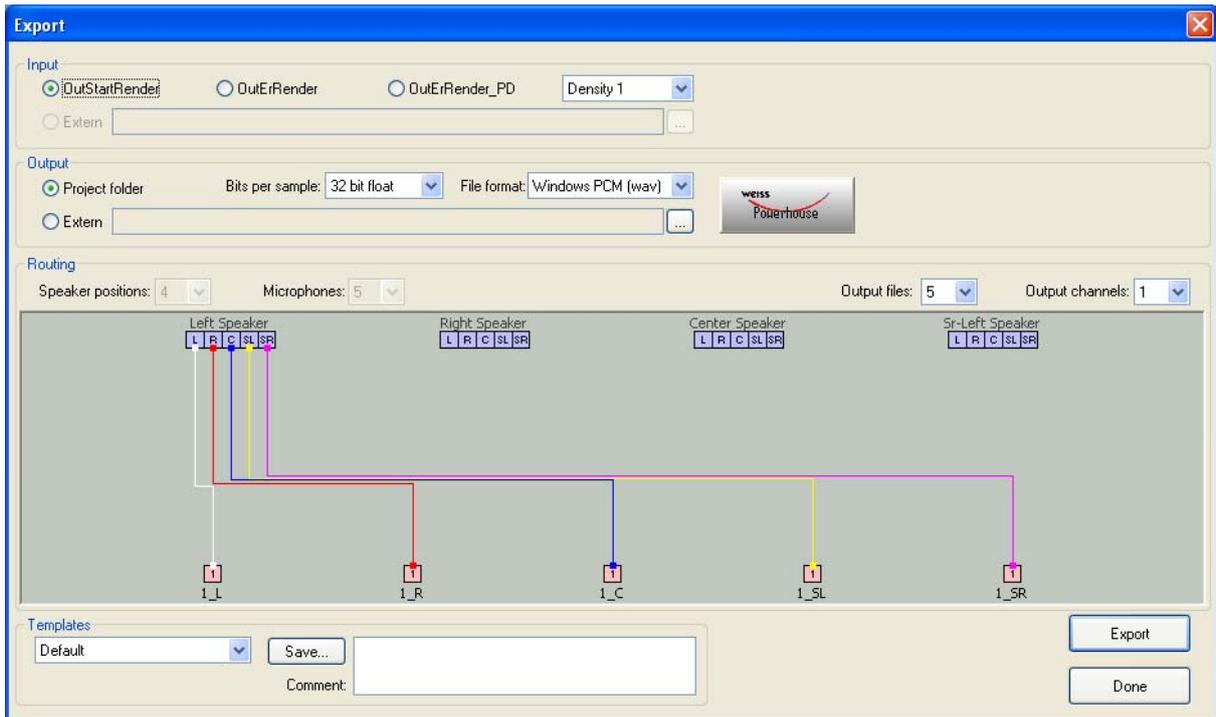
Rechts oben gibt es diverse Abspieloptionen. So kann man hier beispielsweise die gesamte Impulsantwort anhören, oder einen bestimmten Teil von ihr. In einer Choice-Box kann der Fade-Typ festgelegt werden.

Die Choice-Box über dem Render-Button dient der Auswahl eines bestimmten Impulsantwort-Typs. Man legt damit fest, welcher Bereich später exportiert wird. Es gibt die Möglichkeit die komplette Impulsantwort zu exportieren („OutStartRender“) oder nur ab den Ersten Reflektionen, also ohne Direktschall.

Mit „Render“ wird der Verarbeitungsprozess ausgelöst. Ist dieser abgeschlossen, darf der Button „Export“ betätigt werden. Es öffnet sich der Export-Dialog (siehe Grafik 26).

In diesem Dialog muss zunächst unter „Input“ die richtige Variante gewählt werden. Wurde auf der Edit Page „OutStartRender“ ausgewählt, muss dies auch hier entsprechend eingestellt werden. Außerdem ist die gewünschte Density auszuwählen.

Unten ist ein Routing-Feld dargestellt, indem alle im Projekt enthaltenen Impulsantworten einzeln abgegriffen und den Output-Files zugeordnet werden können. Es wird zunächst festgelegt, wie viele Output-Files erzeugt werden sollen und wie viele Kanäle sie enthalten. Dann können die gewünschten Verbindungen gezogen werden.



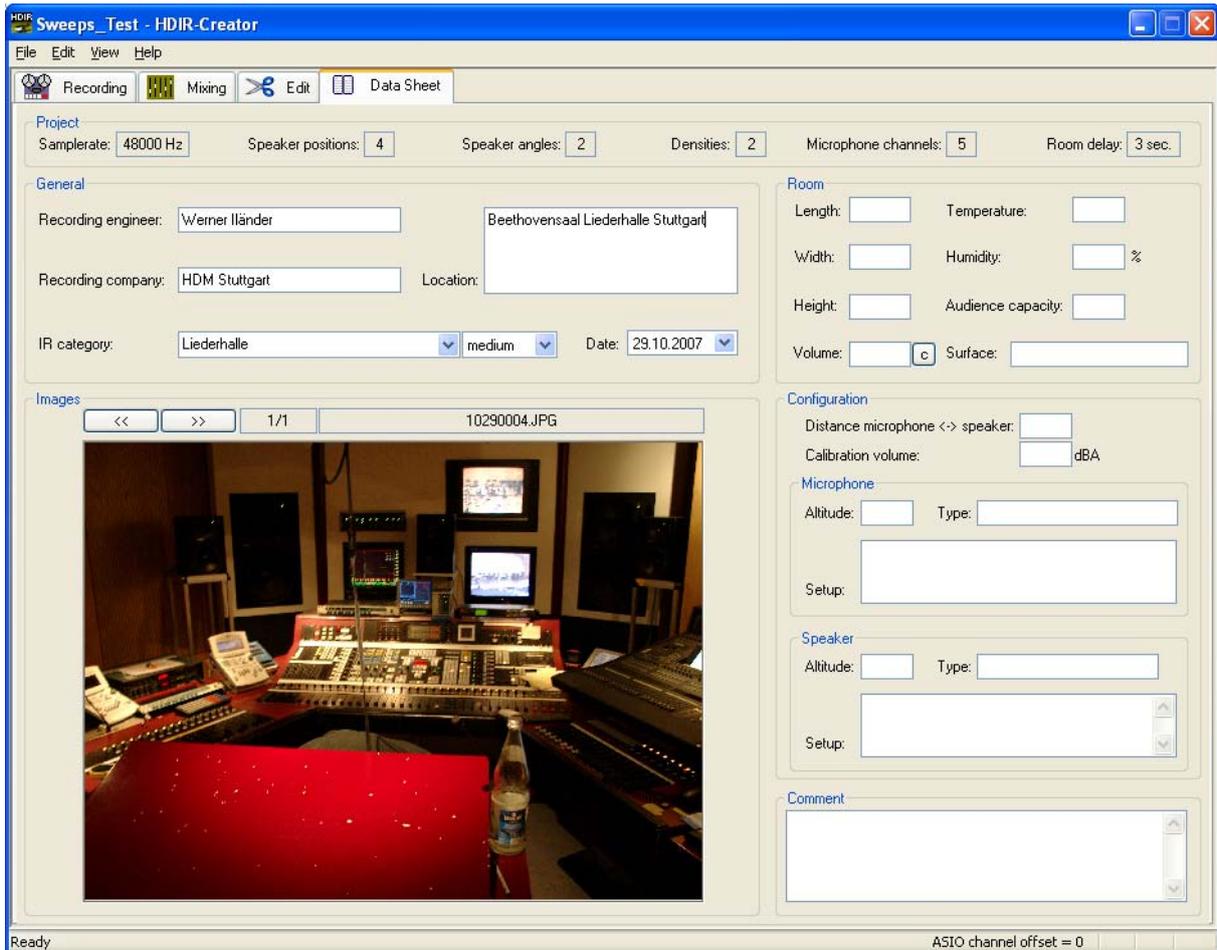
Grafik 26: Export Page des HDIR-Creators

Sind alle Einstellungen gemacht, wird mit „Export“ das Exportieren durchgeführt. „Done“ schließt das Dialogfeld.

Im Falle des Experiments wurden alle Impulsantworten in einzelne Mono-Dateien exportiert.

Die Seite „Data Sheet“ (siehe Grafik 27) ergänzt das Programm. Hier können diverse Informationen direkt vor Ort aufgenommen werden. So kann man darin festhalten, wer aufgenommen hat, wo und wann die Aufnahmen getätigt wurden und in welche Kategorie die Aufnahmen einzuordnen sind. Informationen über den Raum, wie Breite, Länge und Höhe, aber auch Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Hörerkapazität können eingegeben werden. Weitere Informationen über Mikrofone, Lautsprecher und Abstände lassen sich ergänzen.

Hier kann also eine umfangreiche Datensammlung direkt bei der Aufnahme der Testsignale angelegt werden. Die Informationen sind leicht wieder zu finden und gleich bei den dazugehörigen Daten angesiedelt. Lästiges Zusammensuchen der fehlenden Daten erübrigt sich damit. Außerdem können Fotos eingefügt werden, die die Aufnahmesituation veranschaulichen. Das trägt dazu bei, sich leichter an Mikrofon- und Lautsprecherpositionen sowie weitere örtliche Begebenheiten zu erinnern.



Grafik 27: Data Sheet des HDIR-Creators

Nach der Bearbeitung mit dem HDIR-Creator lagen alle erforderlichen Raumimpulsantworten als Mono-Wave-Dateien vor. Diese konnten nun im Raumsimulator von Sequoia verwendet werden.

## 6 Faltung

Mithilfe der durch den HDIR-Creator erstellten Raumimpulsantworten war es jetzt möglich, die einzelnen Stützmikrofone zu verhallen und so ohne Verwendung des Surround-Hauptmikrofons den Raumklang einer 3/2-Mischung zu erhalten.

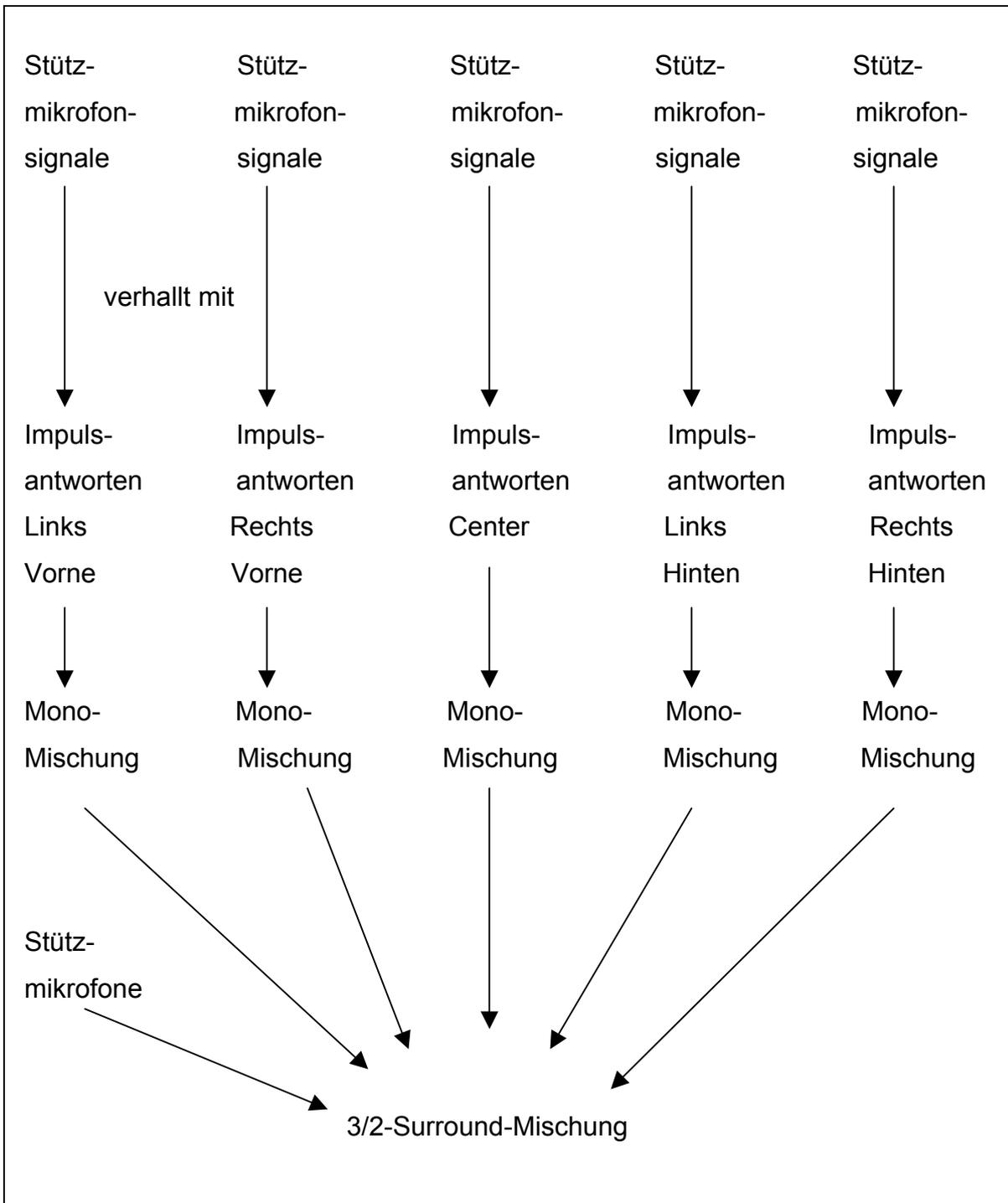
### 6.1 Vorgehen bei der Faltung der Signale

Für jede Stützmikrofonposition standen im Falle der ZKM-Aufnahmen mit dem OCT-Surround-System fünf Mono-Impulsantworten zur Verfügung; nämlich für links, rechts, Center, links hinten und rechts hinten. Bei den Aufnahmen in der Liederhalle lagen für jede Stützmikrofonposition sechs verschiedene Mono-Impulsantworten vor: Niere links, Niere rechts, Kugel links, Kugel rechts, Surround links und Surround rechts.

Aus den einzelnen Stützmikrofonsignalen und unter Verwendung der jeweiligen Impulsantworten sowie eines Raumsimulators ließen sich nun die einzelnen Hauptmikrofonsignale gewinnen. Dazu sind einige Faltungsschritte sowie ein gewisser Mischaufwand nötig.

Bei der Durchführung des Experiments wurde folgendermaßen vorgegangen: Für jedes zu mischende Hauptmikrofon wurde eine eigene Sequoia-Mehrspursequenz angelegt. In ihr waren sämtliche Monosignale der Stützmikrofone enthalten. So lag bei den ZKM-Aufnahmen beispielsweise eine Sequenz für den linken vorderen Kanal des OCT-Surround-Systems vor. Jede Stützmikrofonspur wurde mit der dazugehörigen Impulsantwort des Kanals links vorne im Raumsimulator von Sequoia gefaltet. Nach Durchführung der Faltung für jedes einzelne Monosignal bestand dann die Möglichkeit den Kanal links vorne zu mischen. Man mischt also eine Monosumme zusammen. Diese stellt den Hauptmikrofonkanal links vorne des OCT-Surround-Systems dar. Genauso verfährt man anschließend mit den anderen Kanälen, also Center, Rechts, Links Surround und Rechts Surround. Nach dem Mischen liegen dann fünf Hauptmikrofon-Spuren vor, welche man wie bei einer gewöhnlichen Mischung mit den Stützmikrofonen zu einer abschließenden Surround-Mischung verarbeiten kann. Diese ist letztendlich die Faltungshall-Mischung für den geplanten Vergleich in dieser Arbeit.

Das Vorgehen bei der Faltung der einzelnen Mikrofon-signale veranschaulicht die Grafik 28.



Grafik 28: Workflow bei Faltung und Mischung der ZKM-Aufnahmen

## 6.2 Verwendung des Raumsimulators

Jedes einzelne Stützmikrofonsignal wurde mit den dazugehörigen Impulsantworten verhallt. Der Schritt der Signalfaltung wurde dabei mit dem in Sequoia zur Verfügung stehenden Raumsimulator durchgeführt.

Dazu wird zunächst die Datei im Mehrspurprojekt markiert, welche verarbeitet werden soll. Anschließend wird der Raumsimulator im Menü „Effekte“ aufgerufen. Es öffnet sich ein Dialogfenster (vgl. Grafik 9 in Kapitel 3.2 Der Raumsimulator in Sequoia), in dem die notwendigen Einstellungen getätigt werden müssen. Der Raumsimulator arbeitet destruktiv. Soll die ursprüngliche Datei nicht verändert werden, kann unten „Erzeuge Kopie“ ausgewählt werden. Im Falle des Experiments war dies nicht erforderlich, da die Dateien bereits vorher für jede einzelne Bearbeitung kopiert worden waren.

Links befindet sich das Feld „Impulsantwort“, wo die richtige Impulsantwort-Datei geladen werden muss. Sie wird dann im Feld darunter als Pegel-Zeit-Diagramm angezeigt. Im Feld rechts daneben, bezeichnet mit „Parameter“, können Hüllkurve und Frequenzgang der Impulsantwort verändert werden. Im Falle des Experiments wurden keine Veränderungen vorgenommen. Der Mix wurde so eingestellt, dass das Originalsignal im Ergebnis nicht mehr vorkommt und das Faltungsergebnis zu 100 Prozent aus dem gefalteten Signal besteht.

Sind alle erforderlichen Einstellungen gemacht, wird mit „OK“ der Berechnungsvorgang ausgelöst. Je nach Länge von Musiksequenz und Impulsantwort, dauert dies einige Zeit.

Für jede Stützmikrofonspur und für jedes resultierende Hauptmikrofon musste eine Faltungsoperation mit dem Raumsimulator durchgeführt werden. Das beansprucht einigen Zeitaufwand. Hat man beispielsweise 10 Stützmikrofone und möchte für ein OCT-Surround-System die Signale gewinnen (fünf Mikrofone), sind  $10 * 5 = 50$  Faltungsoperationen erforderlich.

### 6.3 Ergebnisse der Faltung

Als Ergebnis der Faltungsprozesse lagen nun für jedes Hauptmikrofonsignal einzelne Sequenzen vor, die beim nächsten Schritt, der Mischung, zu einzelnen Monomischungen verarbeitet werden mussten. Erst dann ermöglicht sich das Anfertigen einer herkömmlichen Mischung und einer Vergleichsmischung mit Faltungshall. Als nächstes standen also zahlreiche Mischschritte auf dem Programm. Die einzelnen Projektsequenzen für jedes Hauptmikrofon enthielten jeweils die mit den entsprechenden Impulsantworten gefalteten Stützmikrofonsignale. Jede Projektsequenz bildet damit die Grundlage für eine Monomischung, also die Anfertigung eines bestimmten Faltungshall-Hauptmikrofonsignals.

## 7 Mischung

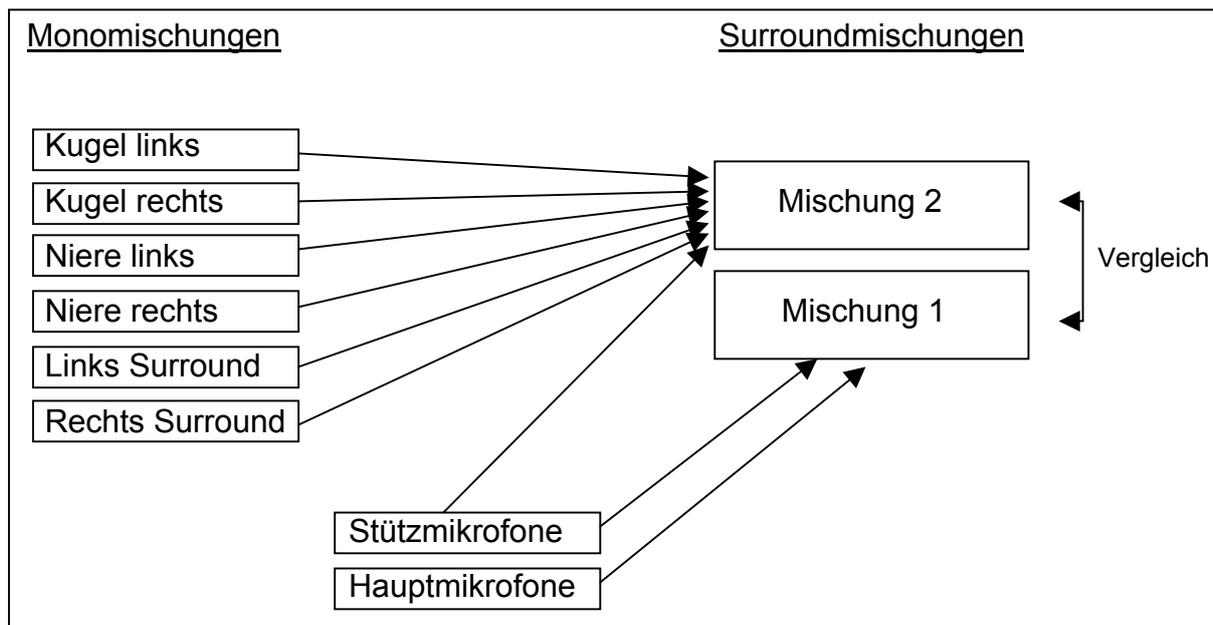
Die Mischung der einzelnen Aufnahmen fand im Tonstudio der Hochschule statt, nämlich in der Regie A, welche an Sequoia angebunden ist. Sequoia diente als Zuspeler zum Mischpult und wurde schließlich auch zur Aufzeichnung fertiger Mischungen verwendet.

Als Mischpult kam das Studer Vista7 zum Einsatz. Sequoia stand in der Version 9 zur Verfügung.

Das Ziel war es, zwei möglichst ähnliche Mischungen anzufertigen; die eine auf herkömmliche Art und Weise, die andere unter Verwendung von Faltungshall, gewonnen mit den Raumimpulsantworten aus dem Aufnahmeraum.

Dazu wurde folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurden für die Faltungshall-Mischung die einzelnen Hauptmikrofonsignale zusammengemischt. Diese setzten sich aus den Stützmikrofonsignalen, gefaltet mit den jeweils zugehörigen Raumimpulsantworten, zusammen. Es wurde also zunächst für jedes Hauptmikrofon in der Faltungshall-Mischung eine Monomischung durchgeführt. Anschließend wurden zwei verschiedene Surround-Mischungen angefertigt, eine auf gewöhnliche Art und Weise und eine mit Faltungshall.

Die Grafik 29 zeigt den Ablauf der Mischungen, wie sie für jedes Musikstück durchgeführt werden mussten, am Beispiel des Violinkonzerts von Mozart.



Grafik 29: Ablauf der Mischungen am Beispiel Mozart Violinkonzert

## 7.1 Monomischungen

Ziel der Monomischungen war es, die einzelnen Hauptmikrofonsignale für die Surround-Mischungen zu gewinnen.

Für jedes Musikstück, von dem 3/2-Surround-Vergleichsmischungen angefertigt werden sollten, lagen zunächst im Falle der ZKM-Aufnahmen fünf und im Falle der Aufnahmen aus der Liederhalle sechs einzelne Projekte vor. In ihnen waren die einzelnen Stützmikrofonsignale, welche mit den Impulsantworten gefaltet worden waren, enthalten. Jedes dieser Projekte musste zunächst als Monomischung bearbeitet werden. Als Referenz für das Ergebnis lag die jeweilige Hauptmikrofonspur von der Aufnahme vor. Nun mussten also die einzelnen Instrumente so zusammengemischt werden, dass sie das jeweilige Hauptmikrofonsignal bilden. Eine solche Monomischung wurde für jedes einzelne Hauptmikrofonsignal, also fünf bzw. sechs Mal pro Musikstück, durchgeführt.

Für das Violinkonzert von Mozart, aufgenommen in der Stuttgarter Liederhalle, lagen folglich einzelne Projekte vor für Kugel links, Kugel rechts, Niere links, Niere rechts, Links Surround und Rechts Surround. Alle sechs Projekte enthielten die Stützmikrofonsignale, die mit den jeweiligen Raumimpulsantworten gefaltet worden waren, und als Referenz das aufgenommene Signal des entsprechenden Hauptmikrofons. Im Falle des Projekts zur Mischung der Kugel links lag also als Referenzsignal das Signal der linken Hauptmikrofonkugel des Strauspakets vor. Nun sollten die gefalteten Stützmikrofonsignale im gleichen Mischungsverhältnis zueinander gemischt werden, wie es beim Signal der linken Kugel der Fall war. Auf diese Weise erhält man ein dem Originalsignal sehr ähnliches Signal. Für alle sechs Hauptmikrofone durchgeführt, erhält man für das Mozart-Violinkonzert komplett neue Hauptmikrofonsignale. Es handelt sich um die durch Faltungshall gewonnenen Signale.

Diese Mischungen wurden für alle Stücke, von denen Vergleichsmischungen angefertigt werden sollten, durchgeführt. Es wurden nur die Mischungsverhältnisse der einzelnen Instrumente und Instrumentengruppen zueinander berücksichtigt. Klangliche Unterschiede beeinflussten die Mischung nicht. Es wurden keine Equalizereinstellungen oder Dynamikveränderungen vorgenommen, um die Faltungshall-Mischungssignale den Original-Hauptmikrofonsignalen anzugleichen.

Das Resultat dieser Mischungen waren die einzelnen Hauptmikrofonspuren für die Faltungshall-Vergleichsmischung in 3/2-Surround. Für die Aufnahmen aus dem ZKM Karlsruhe lagen für jedes Stück fünf Hauptmikrofonsignale vor, für die Aufnahmen aus der Stuttgarter Liederhalle waren es pro Stück sechs Hauptmikrofonsignale, alle aus den Faltungshallberechnungen gewonnen und in den Monomischungen erstellt. Sie wurden nun in Mehrspurprojekte importiert, welche zusätzlich auch die Stützmikrofonsignale des jeweiligen Stücks enthielten.

## 7.2 Surroundmischungen

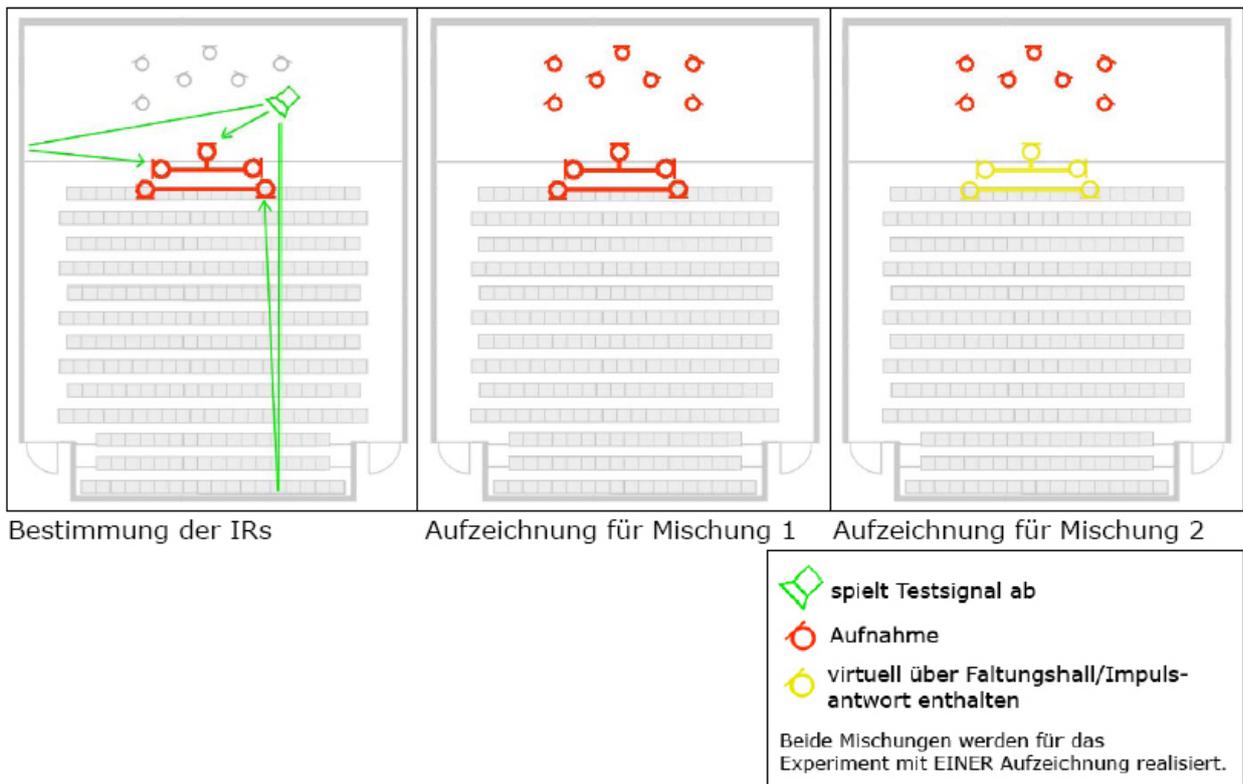
Ausgangspunkt für die Surround-Mischungen war folgender: Für jede Musikaufnahme, von der Vergleichsmischungen angefertigt werden sollten, lagen zwei Mehrspurprojekte vor. Im ersten dieser Projekte lagen, wie bei herkömmlicher Musikmischung üblich, die aufgenommenen Hauptmikrofone und Stützmikrofone bereit. Sequoia spielte die einzelnen Signale dem Studer-Mischpult zu. Bis zu 40 Signale lagen gleichzeitig am Mischer an. Hieraus wurde, wie allgemein üblich, eine klassische Mischung angefertigt, und zwar in 3/2-Surround. Der LFE-Kanal wurde nicht belegt. Für die Aufnahmen mit dem OCT-Surround-System im ZKM Karlsruhe wurde eine echte 3/2-Aufnahme mit Centersignal angefertigt, bei den Aufnahmen in der Liederhalle Stuttgart wurde auf ein Centersignal verzichtet. Es erfolgte in diesem Falle quasi eine 2/2-Mischung.

Das zweite Projekt jedes Musikstücks enthielt anstelle der aufgenommenen Hauptmikrofonsignale die in den unter 7.1 beschriebenen Monomischungen erstellten Hauptmikrofonsignale. Außerdem waren auch hier die Stützmikrofonsignale enthalten. Dieses Projekt war nun die Ausgangsgrundlage für das Anfertigen der zweiten Mischung für den Vergleich, nämlich der Faltungshall-Mischung.

Auch hier lagen bis zu 40 Kanäle vor, aus denen Surround-Mischungen für jedes zu vergleichende Musikstück angefertigt wurden. Bei dieser zweiten Mischung waren somit die Original-Hauptmikrofonsignale nicht enthalten, sondern lediglich die Stützmikrofone und deren Faltungsergebnis mit den übers Hauptmikrofon gewonnenen Raumimpulsantworten.

Die Grafik 30 veranschaulicht, wie die beiden Mischungen zustande gekommen sind. In der Mitte ist zu erkennen, woraus die erste Mischung besteht; nämlich aus

Hauptmikrofonsignalen und Stützmikrofonsignalen. Es handelt sich um eine herkömmliche Mischung. Mischung zwei enthält dagegen nur die Stützmikrofonsignale. Dies wird ganz rechts dargestellt. Das Surround-Hauptmikrofon ist lediglich über die gewonnenen Impulsantworten (siehe links) enthalten.



Grafik 30: Ablauf der Experiment-Aufnahmen

Nach dem Anfertigen aller Surround-Mischungen lagen für jedes Konzertstück, das dem Vergleich unterzogen werden sollte, zwei Surround-Mischungen vor, die erste auf herkömmliche Art und Weise, die zweite unter Verwendung von Impulsantworten und Faltungshall erstellt.

Es standen nun Mischungen folgender Stücke in jeweils beiden Varianten dem Vergleich zur Verfügung.

- Wolfgang Amadeus Mozart, Konzert für Violine und Orchester Nr. 4 D-Dur KV 218

1. Satz und eine Sequenz aus dem 3. Satz

- Mikis Theodorakis, Auszüge aus „Zorba, der Grieche“ (Alexis Sorbas)

Eine Sequenz aus dem Orchesterstück

- Helmut Lachenmann, temA (1968) für Flöte, Stimme und Violoncello

Eine Sequenz aus dem Stück

## 8 Vergleich der Mischungen

Für den Vergleich der Mischungen wurden drei möglichst unterschiedliche Musikstücke ausgewählt: Das Violinkonzert von Mozart mit klassischer Orchesterbesetzung, das Stück von Theodorakis mit sehr großer Orchesterbesetzung, zu der, neben vielen Schlaginstrumenten, auch zwei Harfen und zwei Bouzuki gehörten, sowie das Werk von Lachenmann, welches sehr modern ist und mit drei Musikern das Stück mit der kleinsten Besetzung darstellt. Die Auswahl genau dieser drei Stücke bietet sehr abwechslungsreiches Material, einerseits in Hinsicht auf die Epochenzugehörigkeit der Musik, andererseits auf die Größe des Ensembles.

Von allen drei Stücken lagen Auszüge in zwei Varianten vor; einmal auf herkömmliche Art und Weise gemischt und einmal unter Verwendung von Faltungshall erstellt. Diese Musikbeispiele befinden sich auch auf der DVD, die dieser Arbeit beigelegt ist.

Die Musikbeispiele wurden nach folgenden Kriterien untersucht: Klangbild, Richtungswahrnehmung, Räumlichkeit und Störgeräusche, sowie nach den jeweiligen Unterparametern.

### 8.1 Klangbild

Bei der Beurteilung des Klangbilds spielen Ausgewogenheit, Durchsichtigkeit, Klangfarbe und Dynamik eine Rolle.

#### 8.1.1 Durchsichtigkeit

Ein durchsichtiges Klangbild ist bei klassischen Orchesteraufnahmen sehr wichtig. Dazu sind gute Hauptmikrofonsignale notwendig. Ebenso wichtig ist, dass die Stützmikrofonsignale an die richtigen Positionen im Panorama positioniert werden. Nur durch klar positionierte Instrumentengruppen kann ein durchsichtiges Klangbild erzielt werden.

Bei der Mischung der Hauptmikrofone für die Faltungshallmischung muss deshalb sehr genau auf die Mischverhältnisse der einzelnen Instrumente geachtet werden, damit sich jeweils eine klare Position dieser im Panorama ergibt. Andernfalls würde sich alles einander überlagern und man erhält keine Durchsichtigkeit mehr im Klang. Mit der Faltungshall-Mischung hat man die Möglichkeit, die Verhältnisse der Instrumentengruppen auch in den Hauptmikrofonsignalen sehr präzise abzumischen. So kann man auch unter Verwendung von Faltungshall ein sehr durchsichtiges Klangbild erhalten.

Beide Mischungen haben eine gute Durchsichtigkeit. Der Klang ist klar. Auch die Faltungshall-Mischung überzeugt also hinsichtlich der Durchsichtigkeit. Dies liegt wohl auch daran, dass bei der Mischung der Hauptmikrofonsignale für die Faltungshall-Mischung die Original-Hauptmikrofonsignale als Referenz dienen. Die Pegelverhältnisse der einzelnen Instrumente wurden auf die Originalsignale abgestimmt. Somit ergibt sich bei der Faltungshall-Mischung ein sehr ähnliches Klangbild wie bei der Mischung auf herkömmliche Art und Weise.

### 8.1.2 Klangfarbe

Die Klangfarbe betrifft vor allem die Wiedergabe der einzelnen Frequenzbereiche. Werden nicht alle Frequenzbereiche gleichermaßen wiedergegeben, ergibt sich schnell ein zu dumpfer oder ein zu heller Klang.

Sowohl die Mischung auf herkömmliche Art und Weise als auch die Faltungshall-Mischung können klanglich überzeugen. Die Klangfarbe der Hauptmikrofonsignale der Faltungshall-Mischung ist an manchen Stellen geringfügig dumpfer. Dies ist auf die verwendeten Lautsprecher zurückzuführen. Der Frequenzgang der Lautsprecher, die bei der Gewinnung der Raumimpulsantworten verwendet wurden, beeinflusst den Klang der mit den Impulsantworten gefalteten Signale. So wurden die Höhen in den Impulsantworten teilweise etwas zu gering berücksichtigt. Es kommt zu einer leichten Verfärbung der gefalteten Hauptmikrofonsignale. Es ergibt sich ein leicht dumpfer Klang. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Durch eine angemessene Zumischung der Stützmikrofonsignale erhält schließlich auch die Faltungshall-Mischung die korrekte Klangfarbe.

Insgesamt ergeben sich damit zwischen herkömmlicher und Faltungshall-Mischung nur sehr geringe Unterschiede bezüglich der Klangfarbe. Beide Mischungen sind durchweg zufrieden stellend.

### 8.1.3 Ausgewogenheit

Die Ausgewogenheit des Klangbilds beinhaltet, dass sich die einzelnen Instrumente in Bezug auf Lautstärke und Klang die Waage halten. Zwischen hohen Streichern auf der linken Seite und tiefen Streichern auf der rechten soll ein Gleichgewicht existieren, ebenso wie zwischen Streichern, Bläsern und Schlaginstrumenten. Keine Instrumentengruppe darf zu sehr hervortreten. Ebenso wenig sollen Instrumente im Gesamtklang völlig untergehen.

Ausgewogenheit wird einerseits durch das Hinzufahren der Stützmikrofone erzielt. Hieraus ergeben sich folglich gleiche Ergebnisse bei beiden Mischvarianten, da die Stützmikrofonsignale ja dieselben sind. Andererseits ist es aber auch wichtig, dass schon die Hauptmikrofone ausgewogene Signale liefern. Dazu müssen sie sich bei der Aufnahme an geeigneten Orten befinden. Die Variante mit Faltungshall bietet hier einen Vorteil. Die Ausgewogenheit kann bei dieser Variante sehr gut abgestimmt werden. Bei der Faltungshall-Mischung kann nämlich gesteuert werden, wie stark jedes Instrument im jeweiligen Hauptmikrofonsignal enthalten sein soll, da dieses Signal ja aus den einzelnen gefalteten Stützmikrofonsignalen zusammengemischt wird. Damit kann man bei der Faltungshallvariante die Ausgewogenheit noch besser steuern als bei der herkömmlichen ohne Faltungshall. Bei der Mischung auf herkömmliche Art und Weise kann man an den Hauptmikrofonsignalen nichts mehr drehen. Das Mischungsverhältnis der einzelnen Instrumente lässt sich darin nicht mehr ändern. Das geht nur noch über die Stützen.

Beide Mischungsvarianten klingen sehr ausgewogen. Auch mit Faltungshall kann klangliche Ausgewogenheit erzielt werden.

#### 8.1.4 Dynamik

In diesem Unterkriterium wird geprüft, wie die Originaldynamik wiedergegeben wird, ob sich das Klangbild bei variierenden Lautstärken verändert und ob die vorhandene Dynamik in beiden Mischungen erhalten bleibt.

Gut kann man beispielsweise anhand des Mozartkonzerts erkennen, wie sich leise Solopassagen der Violine und laute Tuttipassagen des Orchesters zueinander verhalten. Auch das Orchesterstück von Theodorakis enthält große dynamische Unterschiede. Dort gibt es Stellen, an denen nur wenige Instrumente spielen, genauso wie Stellen, an denen das ganze große Orchester spielt. Das moderne Stück von Lachenmann enthält noch ganz andere Aspekte der Dynamik. Hier ändert sich die Lautstärke häufig ganz abrupt. Auch wechselt die Lautstärke von einzelnen Tönen manchmal von sehr leise bis hin zu sehr laut.

Die vorhandene Dynamik in den einzelnen Stücken wird bei beiden Mischvarianten ausreichend berücksichtigt. Sowohl leise als auch laute Passagen werden gut wiedergegeben. Hier erweist sich auch die Verwendung von Faltungshall nicht nachteilig. Sowohl bei leisen Stellen, als auch bei lauten ergibt sich in der Faltungshall-Mischung ein guter Raumklang. Der Raum bleibt stabil. Die empfundene Raumgröße ändert sich nicht. Die Originaldynamik im Konzertsaal wird gut in die aufgezeichnete Musik übertragen.

Bei den schnellen Lautstärkewechseln von laut zu leise im Stück von Lachenmann kann man in beiden Varianten gut den Nachhall des Saals hören. Große Dynamik stellt keine Probleme bei den Aufnahmen dar. Sie wird bei allen Stücken gut wiedergegeben.

Faltungshall-Mischung und herkömmliche Variante erzielen hierbei sehr ähnliche Ergebnisse.

#### 8.2 Richtungswahrnehmung

Die Richtungswahrnehmung betrifft den Frontbereich der Surround-Aufnahmen. Im Falle der Aufnahmen aus der Liederhalle geht es um die Stereobasis, die sich zwischen den Lautsprecherkanälen L und R erstreckt. Bei der Aufnahme im ZKM Karlsruhe geht es um die Basis L-C-R.

Es werden die Lokalisierbarkeit der einzelnen Instrumentengruppen sowie die Panoramaverteilung auf jener Basis untersucht.

### 8.2.1 Lokalisierbarkeit

Hier geht es darum, ob einzelne Instrumentengruppen lokalisiert werden können. Die klare Ortung der von den Frontlautsprechern wiedergegebenen Schallquellen bezüglich Richtung und Entfernung soll auch dann erhalten bleiben, wenn von den rückwärtigen Surround-Kanälen ein bestimmter Pegel an diffusem Nachhall ausgestrahlt wird.

Die Faltungshall-Mischung liefert in dieser Hinsicht ein sehr gutes Ergebnis. Einzelne Instrumentengruppen lassen sich sehr gut orten. Die Position im Panorama wird deutlich. Dazu trägt bei der Faltungshallmischung auch bei, dass die einzelnen Hauptmikrofonsignale aus gefalteten Einzelsignalen der Instrumentengruppen zusammengesetzt werden. Dabei lassen sich die Mischungsverhältnisse jeweils sehr gut einstellen. Dies begünstigt die Klarheit im Bezug auf die jeweilige Position im Panorama. Wird für jedes Stützmikrofonsignal bei der Faltung die jeweils richtige Impulsantwort verwendet, erhält man passende Hauptmikrofonsignale, welche sich in Bezug auf die Lokalisierbarkeit günstig auswirken.

Die Lokalisierbarkeit einzelner Instrumentengruppen in der Faltungshall-Mischung steht jener in der Mischung auf herkömmliche Art und Weise somit in keiner Weise nach. Beide Mischungen bieten eine überzeugende Lokalisierbarkeit der Instrumente.

### 8.2.2 Panoramaverteilung

Es muss zunächst angemerkt werden, dass sich eine ordentliche Panoramaverteilung für das Klangbild, insbesondere die Ausgewogenheit und Durchsichtigkeit des Klangs, günstig auswirkt. Wichtig ist demnach, dass die Panoramaverteilung ausgewogen ist. Es dürfen sich weder Lücken auftun, noch dürfen Stellen im Panorama überladen erscheinen. Das Orchester muss sich von

links bis rechts über die gesamte Basis erstrecken. Dennoch muss zusätzlich eine räumliche Tiefenstaffelung im Klangbild erkennbar werden.

Außerdem beinhaltet dieses Kriterium, ob das übertragene Panorama der Verteilung entspricht, wie man sie im Saal wahrgenommen hat.

Sowohl herkömmliche als auch Faltungshall-Mischung bieten eine gute Panoramaverteilung. Dadurch, dass die einzelnen Hauptmikrofone der Faltungshall-Mischung so zusammengemischt wurden, dass sie den originalen Hauptmikrofonsignalen in Hinsicht auf die Mischungsverhältnisse möglichst nahe kommen, ergeben sich hinsichtlich der Panoramaverteilung bei beiden Mischungen nahezu identische Ergebnisse. Ebenso bleibt in der Faltungshall-Mischung die räumliche Tiefenstaffelung erhalten.

Die Panoramaverteilung der einzelnen Instrumentengruppen entspricht bei beiden Mischungen in etwa jener Verteilung, wie man sie im Konzertsaal bei guter Sitzposition wahrgenommen hat.

### 8.3 Räumlichkeit

Das Kriterium Räumlichkeit hat insbesondere bei Surround-Aufnahmen eine große Bedeutung. Standen bei den Betrachtungen zur Richtungswahrnehmung die Frontkanäle der Mischungen im Vordergrund, so spielen nun auch die rückwärtigen Kanäle eine Rolle. Bei der Beurteilung der Räumlichkeit sind folgende Parameter wichtig: Die Räumlichkeit des Klangs, die raumgetreue Abbildung und die Surround-Umhüllung.

#### 8.3.1 Die Räumlichkeit des Klangs

Vor allem aufgrund der Surround-Aufzeichnung mit vier bzw. fünf Kanälen erlangt das Klangbild eine große Räumlichkeit. Sowohl die herkömmliche Mischung als auch diejenige mit Faltungshall bieten einen wohlklingenden, durchsichtigen Raumklang. Gerade die rückwärtigen Kanäle tragen viel zur Räumlichkeit bei. Nicht nur die Originalsignale der Raummikrofone in der herkömmlichen Mischung, sondern auch die über die Impulsantworten gewonnenen Surround-Signale (SL und SR) in der

Faltungshall-Mischung ermöglichen einen guten Raumhall. Der Raumhall ergibt sich überwiegend aus den rückwärtigen Kanälen. Beide Mischungen bieten hier ein überzeugendes Klangbild. Die Räumlichkeit ist sowohl in der herkömmlichen, als auch in der Faltungshall-Variante gegeben. Beide Mischungen weisen eine natürliche Räumlichkeit auf. Auch die gefalteten Raumsignale enthalten einen schön diffusen Nachhallschall. Dieser ist für Mehrkanalaufnahmen von großer Bedeutung. So wird mit der Faltungshall-Mischung ebenso wie bei der herkömmlichen eine ausreichende Räumlichkeit erzielt. Nicht einmal der Einsatz eines Hallgeräts wird notwendig.

### 8.3.2 Raumgetreue Abbildung

Dieses Kriterium beschreibt die Nähe der Aufnahme zum Original-Raumklang im Aufnahmeraum. Sowohl das ZKM Karlsruhe als auch die Liederhalle Stuttgart bieten einen guten räumlichen Klang. Ziel der Surround-Aufnahmen war es, diesen guten Originalklang in die Aufzeichnung zu übertragen. Mit dem OCT-Surround-System wird der Klang im Kubus des ZKM Karlsruhe sehr gut wiedergegeben. In der normalen Mischung, wie auch in der Faltungshall-Mischung ergibt sich ein Raumklang, welcher dem Klang im ZKM sehr nahe kommt.

Bei den Aufnahmen aus der Liederhalle Stuttgart hört man sehr deutlich den guten Klang des Beethovensaals heraus. Auch hier ist es gelungen, den guten Originalklang ohne zusätzliche Hallgeräte in die Aufnahme zu übertragen. Nicht nur die herkömmliche Mischvariante bietet eine raumgetreue Abbildung. Auch der Faltungshall-Mischung kann man den ursprünglichen Konzertsaal heraushören. Sie hat ebenso den raumgetreuen Klang. Der Raumeindruck in der Aufnahme entspricht in beiden Fällen sehr gut demjenigen des AufnahmeRaums.

### 8.3.3 Surround-Umhüllung

Unter der Surround-Umhüllung versteht man, wie gut das Musikereignis den Zuhörer umgibt. Die Surround-Darbietung soll den Zuhörer umschließen. Er soll sich ganz in den Konzertsaal versetzt fühlen. Von vorne hört er das Orchester. Von hinten wird

das Hörerlebnis durch den Raumklang ergänzt. Dem Hörer wird dadurch ermöglicht, den Raumklang des Originalaufnahmerraums wahrzunehmen.

Auch hier sind die Ergebnisse der beiden Mischvarianten nahezu gleich. Beide Mischungen umhüllen den Hörer sehr gut. Dazu tragen sicher die guten Originalräume bei und die Tatsache, dass jene möglichst originalgetreu übertragen wurden. Dazu ist es wichtig, die Raummikrofone für die rückwärtigen Kanäle gut zu positionieren. In diesen muss der Raumklang enthalten sein, der sich stimmig den vorderen Kanälen beifügt, um so für den Hörer einen umhüllenden Raumklang zu liefern. Die Surround-Umhüllung ist für klassische Mehrkanalaufnahmen ein wichtiges Kriterium. Beide Mischungen liefern gute Ergebnisse. Auch mit Faltungshall lassen sich somit gute räumliche Aufnahmen anfertigen.

#### 8.4 Störgeräusche

Die größten Unterschiede der beiden Mischungen findet man bei der Beurteilung der Störgeräusche. Hier soll zwischen den Störgeräuschen aus dem Publikum und jenen, welche direkt in die Stützmikrofone – also vom Orchester selbst – hervorgerufen werden, unterschieden werden.

##### 8.4.1 Störgeräusche des Publikums

Bei Konzerten mit Publikum hat man es häufig mit mehr oder weniger störenden Geräuschen zu tun, die aus dem Publikum vornehmlich in die Hauptmikrofone einstreuen. Gerade bei leisen Passagen können Husten, Räuspern, Stuhlknarrgeräusche, sich schließende Türen und ähnliches sehr störend sein. Bei Surround-Aufnahmen wird diese Problematik noch größer. Die Mikrofone für die Aufzeichnung der Surround-Kanäle befinden sich normalerweise näher am Publikum als am Orchester (Raummikrofone) oder sind auf das Publikum bzw. den Raumteil, in dem sich das Publikum befindet, ausgerichtet (z.B. beim verwendeten OCT-Surround-System). Das bedeutet, dass an diesen Mikrofonen häufig störende Geräusche aus dem Publikum eintreffen.

In der herkömmlichen Mischung werden die Raummikrofone direkt auf die rückwärtigen Lautsprecher gegeben. Störgeräusche sind deshalb gerade von hinten in dieser Mischung häufig zu hören und lassen sich auch nicht vermeiden.

In der Faltungshall-Mischung sind dagegen keine Störgeräusche des Publikums zu hören. Von der Aufzeichnung werden bei dieser Mischung ja lediglich die Stützmikrofonsignale verwendet. In die Stützmikrofone ruft das Publikum aufgrund der großen Entfernung sowie der Ausrichtung und Richtcharakteristik der Mikrofone aber keine Störgeräusche hervor. Die Hauptmikrofonsignale werden ausschließlich aus den Stützmikrofonsignalen und den Impulsantworten gewonnen. Die Impulsantworten sind natürlich ohne störende Einflüsse eines Publikums aufgezeichnet worden.

Demnach sind in der Faltungshall-Mischung keine Störgeräusche des Publikums enthalten. Dies ist ein großer Vorteil dieser Mischung.

#### 8.4.2 Störgeräusche im Orchester

Hat die Faltungshall-Mischung bei Publikumsstörschall ihren Vorteil, so hat sie im Bezug auf die Störgeräusche im Orchester den entsprechenden Nachteil.

Das Orchester selbst erzeugt in die einzelnen Stützmikrofone Störgeräusche. Dies können Blättergeräusche, Abstellen von Instrumenten, Taktklopfen, aber auch wie im Falle des Publikums Husten oder Räuspern sein.

In der herkömmlichen Mischung werden diese Geräusche meist überdeckt, da sie nicht so laut sind, dass sie von den Hauptmikrofonen aufgezeichnet werden. Zwar werden diese Geräusche von den Stützmikrofonen aufgenommen; diese Mikrofone sind jedoch nicht so laut in der Mischung vertreten, als dass sich jene Geräusche über sie bemerkbar machen.

Bei der Faltungshall-Mischung werden allerdings auch die Hauptmikrofonsignale aus den Stützmikrofonen gewonnen. Somit sind die dort enthaltenen Störgeräusche auch in den Hauptmikrofonsignalen enthalten und werden sogar noch im Raum verhallt. Störgeräusche aus dem Orchester werden daher in der Faltungshall-Mischung sehr viel deutlicher wahrgenommen. Beispielsweise können in den leisen Solopassagen im Violinkonzert von Mozart Störgeräusche herausgehört werden. An manchen Stellen sind dort Auftretgeräusche von Füßen zu hören. Folglich ist es bei

Verwendung von Faltungshall wichtig, dass im Orchester (also in der Nähe der Stützmikrofone) möglichst keine Störgeräusche produziert werden. Ansonsten holt man sich darüber wieder Störgeräusche herein, welche man beim Publikum durch die Verwendung von Faltungshall unterdrückt hat.

## 8.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auch unter Verwendung von Faltungshall sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Die Faltungshall-Mischungen bieten ein gutes und ausgewogenes Klangbild, wie man es von der herkömmlichen Mischungsart gewohnt ist. Auch funktioniert die Richtungswahrnehmung einzelner Instrumentengruppen sehr gut. Faltungshall verschlechtert ebenso wenig die Räumlichkeit der Aufnahmen. Die Surround-Umhüllung ist auch unter Verwendung von Faltungshall gegeben. Großer Vorteil von der Faltungshallvariante bleibt die Ausblendung der Störgeräusche durchs Publikum. Da nur die Stützmikrofonsignale verwendet werden, haben Geräusche im Raum kaum Bedeutung für die gewonnenen Signale. Die Hauptmikrofonsignale werden ja durch Faltung mit den Raumimpulsantworten gewonnen.

Während des Konzerts geht es also auch ohne Hauptmikrofon. Man kann die jeweiligen Signale durch Faltung gewinnen, sofern man zuvor oder im Nachhinein mit einem Surround-Hauptmikrofon Impulsantworten des Raumes erstellt. Faltungshall bietet damit jede Menge Möglichkeiten, ohne dass man dabei auf Qualität verzichten muss.

## 9 Was Faltungshall ermöglicht

Die Experimente zeigen, dass Faltungshall heute sehr gute Ergebnisse liefert. Die Verwendung von Faltungshall führt nicht zu einer schlechteren Qualität. Man kann aber je nach Verwendungszweck vielfältige Vorteile nutzen.

Über das Erstellen von Raumimpulsantworten und Faltungsoperationen kann man mit schnellen Rechnern und den jeweiligen Programmen, die heute zur Verfügung stehen, sehr authentische Abbilder von real existierenden Räumen erstellen. So gibt es vielfältige Gelegenheiten für die Nutzung von Faltungshall. In diesem Kapitel soll beispielhaft und abschließend dargestellt werden, was Faltungshall alles ermöglicht.

Gerade im Bereich der Mehrkanalmusikaufnahmen bietet Faltungshall z.B. die Möglichkeit, die Aufnahme vom Publikum unabhängig zu machen. So kann die vorherige oder anschließende Aufzeichnung von Raumimpulsantworten die abendliche Konzertaufzeichnung retten, wenn das Publikum zu viele Geräusche in das Surround-Hauptmikrofon hervorruft. Denn Faltungshall macht es möglich, abends lediglich die Stützmikrofone mitzuschneiden und den Raumklang über die Faltung der gewonnenen Stützmikrofonsignale mit den Impulsantworten zu gewinnen. Die Experimente dieser Arbeit haben gezeigt, dass Ergebnisse erzielt werden können, die den Originalaufnahmen mit Surround-Hauptmikrofon äußerst nahe kommen.

Ein weiterer Vorteil kann sich ergeben, wenn zwei Konzertmitschnitte im Schnitt miteinander kombiniert werden müssen, das eine Konzert aber in ausverkauftem Saal stattgefunden hat, während das andere vor nur wenig Publikum aufgeführt wurde. Bei ersterer Aufnahme wären die Hauptmikrofonsignale dumpfer, da die vielen Kleidungsstücke des Publikums Schall absorbieren. Das zweite Konzert würde viel halliger klingen. Der Klang der Stützmikrofone unterscheidet sich dagegen nur wenig, da sie sich dicht bei den Instrumenten befinden. Publikumseinflüsse sind hier kaum zu hören. Verwendet man nun für beide Konzerte die gleichen Raumimpulsantworten für die Gewinnung von Hauptmikrofonsignalen, sind beide Konzertaufzeichnungen klanglich gleich. Der Absorptionseinfluss des Publikums wird eliminiert. Gewollte Publikumsgeräusche (z.B. Applaus) können über Einzelmikrofonierung hinzu gefahren werden.

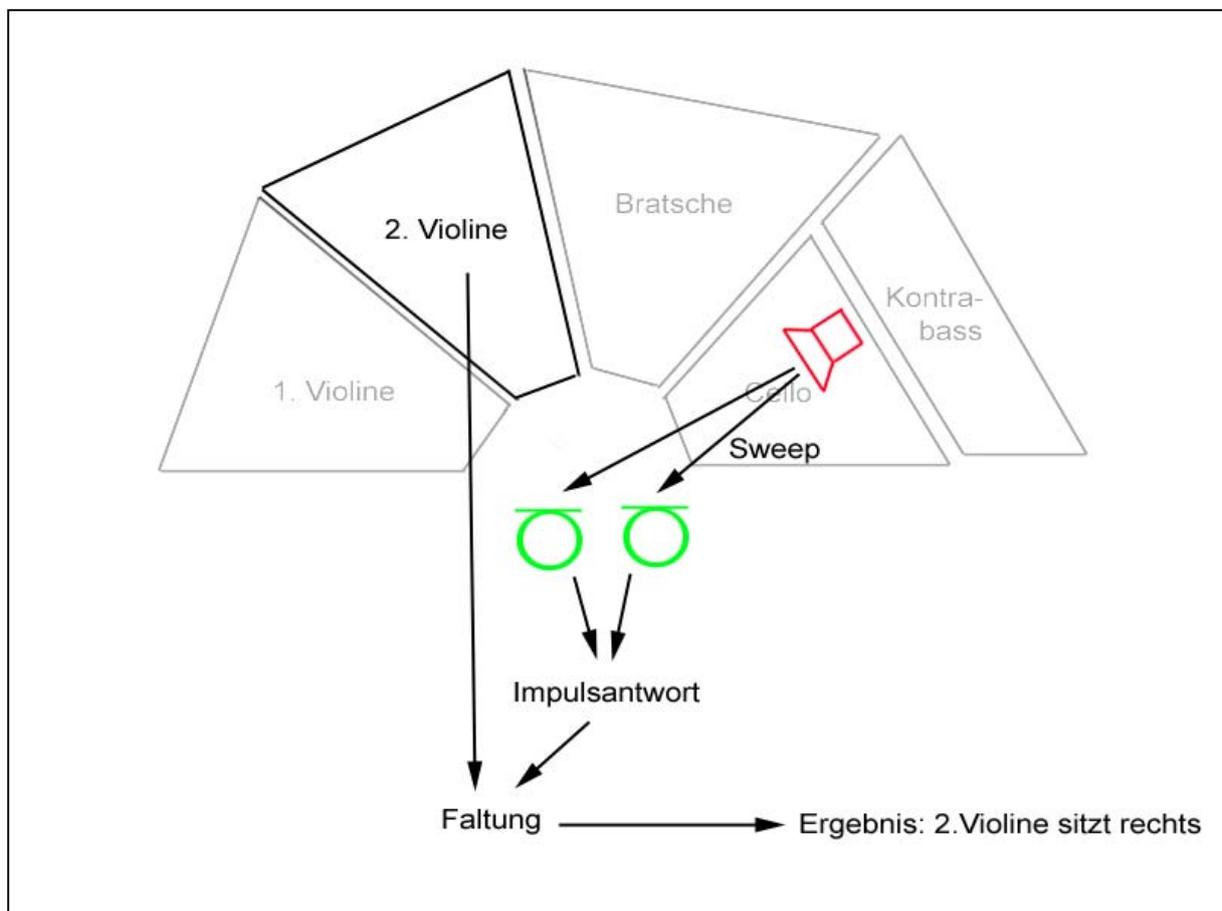
Faltungshall bietet aber auch ganz andere Möglichkeiten. Mit in einem Konzertsaal gewonnenen Impulsantworten kann man ein im Studio aufgenommenes Musikstück so klingen lassen, als wäre es in dem Konzertsaal aufgenommen worden, in dem die Impulsantworten aufgezeichnet wurden. So ist es möglich, Aufnahmen in ganz anderen Räumen zu produzieren, sie aber dennoch so klingen zu lassen, wie in dem Raum, den man sich dafür ausgesucht hat. Dies kann teure Reise- und Transportkosten eines Orchesters sparen.

Ein weiteres Beispiel wäre es, wenn ein Theater eine CD von einem Stück produzieren möchte, die so klingt, als wäre sie im eigenen sehr gut klingenden Theatersaal aufgezeichnet worden. Mit Faltungshall ist es möglich, die Aufnahmen in einem Studio durchzuführen und lediglich einmal im Theatersaal Raumimpulsantworten aufzuzeichnen, welche man dann bei der Faltung einsetzt. Man muss dann nicht tagelang den (möglicherweise teuren) Theatersaal belegen. In der gleichen Zeit können hier andere Aufführungen oder Proben stattfinden. Faltungshall macht es möglich, dass die Studioaufnahmen authentisch klingen, so als wäre der Saal der Schauplatz des Geschehens.

Da unter Verwendung von Faltungshall bei der Aufnahme kein Hauptmikrofon eingesetzt werden muss, ist man bei der Nachbearbeitung sehr flexibel. Hat man Stützmikrofonsignale mit möglichst wenig Übersprechen, ist die Umpositionierung einzelner Instrumente oder Instrumentengruppen möglich. So kann es sein, dass eine Bühne zu eng ist, um eine optimale Aufstellung der Musiker zu ermöglichen. Faltungshall macht es aber möglich, die Musiker wenigstens auf der Aufnahme genau da zu positionieren, wo man sie im Klangbild haben möchte. Man muss lediglich die entsprechende Raumimpulsantwort verwenden, die an der jeweiligen Stelle aufgezeichnet wurde, wo man das Instrument platzieren möchte. Möglicherweise ist für das gegenseitige Hören eine andere Sitzordnung besser als wie es für die Aufnahme von Vorteil ist. In diesem Fall ermöglicht Faltungshall die Kombination beider Vorteile. Es wird einfach via Impulsantworten umpositioniert.

Ein weiteres Beispiel dafür wäre die Sitzordnung der Streicher im Sinfonieorchester. Meist wird dabei die sog. „amerikanische“ Sitzordnung angewandt. Dabei sitzen hohe Streicher links und tiefe Streicher rechts. Dies hat Vorteile für die Musiker beim Spielen durch das bessere gegenseitige Hören, z.B. zwischen 1. und 2. Violine. Für Musikaufnahmen ist es allerdings besser, wenn nach der sog. „deutschen“ Sitzordnung positioniert wird. Dabei befinden sich die 1. Violinen links, die 2. Violinen

rechts, in der Mitte die tiefen Streicher. Dies bringt klangliche Vorteile bei der Aufnahme. Nun hat man nicht mehr die ungünstige Staffelung von links mit hohen zu rechts mit tiefen Klängen. Ein Orchester, das sich lieber nach amerikanischer Sitzordnung aufstellt, kann via Impulsantworten in der Aufzeichnung umpositioniert werden. Dazu müssen die Mikrofone aber sehr präzise aufgestellt werden, damit es möglichst wenig Übersprechen gibt. Die Grafik 31 zeigt, wie das mit entsprechenden Raumimpulsantworten ermöglicht werden könnte.



Grafik 31: Umpositionierung der 2. Violine durch Impulsantworten

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Faltungshall wäre das nachträgliche Aufzeichnen einzelner Instrumente oder Instrumentengruppen. So kann bei der Verwendung von Impulsantworten und Faltungshall ein bestimmtes Instrument bei Bedarf nachträglich neu eingespielt werden und in die bereits vorhandene Musikaufnahme durch Faltung mit der passenden Impulsantwort an der richtigen Stelle im Raum, und damit im Panorama, platziert werden. Die nachträglich aufgenommene Stimme fügt sich klanglich in die bereits bestehende Aufnahme ein. Die ursprüngliche Aufnahme jenes Instruments wird für die Mischung der

Hauptmikrofone weggelassen. Man hat beispielsweise bei der Aufzeichnung von Musik für eine CD einen guten Take eingefangen, den man verwenden möchte. Alles klingt gut, nur das Horn verspielt sich genau in dieser Passage. Faltungshall ermöglicht nun – sofern das Übersprechen der Mikrofone gering gehalten werden kann – das Neueinspielen des Horns, ähnlich wie bei einem Overdubverfahren. Die Hornaufnahme kann bequem über die richtige Impulsantwort in den Gesamtklang eingefügt werden. Der gute Originaltake kann verwendet werden.

Faltungshall ermöglicht außerdem ein flexibleres Mischen. Bei der Verwendung von Raumimpulsantworten liegen keine vorgefertigten Hauptmikrofonsignale vor. Diese werden erst durch das Zusammenmischen der gefalteten Stützmikrofonsignale erstellt. Folglich ergeben sich deutlich mehr Möglichkeiten, klangliche Änderungen vorzunehmen. Man kann das Mischungsverhältnis der Instrumente auch bei den Hauptmikrofonsignalen beliebig verändern. Änderungen im Panorama sind natürlich auch möglich, da man für jedes Stützmikrofonsignal auch eine andere Impulsantwort-Datei verwenden kann, um das Signal aus einer anderen Position im Raum dem Hauptmikrofonsignal zuzuführen, welches man gerade konfiguriert. Somit ist man bei Verwendung von Faltungshall in vielerlei Hinsicht flexibler. Heutige Faltungshallsysteme bieten sowieso deutlich mehr Möglichkeiten, als ältere Systeme. Faltungshall ist kein unveränderbar starres Gebilde mehr.

Auch im Bereich Sounddesign kann Faltungshall vielseitige Vorteile haben. Bei der Nachvertonung von Filmszenen kann es beispielsweise sehr viel Zeit sparen, wenn gleich der Originalklang am Drehort via aufgenommener Impulsantworten verwendet werden kann. So kann der natürliche, zum Bild passende Sound schnell gefunden werden. Das Aufzeichnen von ein paar Impulsantworten an den Originaldrehorten, besonders wenn sie sehr charakteristische Klänge besitzen, kann für die spätere Postproduktion vielerlei Vorteile haben.

Mit den heute zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten sowie den vielfältigen Programmen zur Erstellung von Raumimpulsantworten und zur Verwendung dieser in Mehrspurprogrammen, bietet Faltungshall viele gute Möglichkeiten, Probleme zu lösen oder Arbeitsprozesse zu vereinfachen. Klanglich muss man dabei keine Einschränkungen in Kauf nehmen. Mit guten Impulsantworten kann man qualitativ

hochwertige Aufnahmen erstellen, die klingen, als wären sie selbst am Ort aufgenommen worden, an dem man die Impulsantworten generierte. Die Experimente dieser Arbeit haben gezeigt, dass mit der heute zur Verfügung stehenden Soft- und Hardware sehr gute Ergebnisse im Bereich des Faltungshalls erzielt werden können. In der Zukunft werden Raumimpulsantworten und Faltungshall deshalb sicherlich noch viel Bedeutung haben.

## 10 Inhalt von DVD und CD

Die beiliegende DVD enthält die ausgewählten Musiksequenzen, welche Grundlage der Vergleiche der beiden Mischvarianten waren (vgl. Kapitel 8: Vergleich der Mischungen).

- 1 Mozart, Violinkonzert Nr. 4, 1. Satz, Normale Mischung
- 2 Mozart, Violinkonzert Nr. 4, 1. Satz, Faltungshall-Mischung
  
- 3 Mozart, Violinkonzert Nr. 4, Sequenz aus dem 3. Satz, Normale Mischung
- 4 Mozart, Violinkonzert Nr. 4, Sequenz aus dem 3. Satz, Faltungshall-Mischung
  
- 5 Theodorakis, Sequenz aus „Zorba, der Grieche“, Normale Mischung
- 6 Theodorakis, Sequenz aus „Zorba, der Grieche“, Faltungshall-Mischung
  
- 7 Lachenmann, Sequenz aus temA für Flöte, Stimme und Cello, Normale Mischung
- 8 Lachenmann, Sequenz aus temA für Flöte, Stimme und Cello, Faltungshall-Mischung

Track 1 bis 6: Aufnahme im Beethovensaal der Liederhalle Stuttgart, Konzert des Radiosinfonieorchesters des SWR Stuttgart

Track 7 und 8: Aufnahme im Kubus des ZKM Karlsruhe, Konzert der Musiker der Internationalen Ensemble Modern Akademie

Für alle Leser, die nicht die Möglichkeit haben, eine Surround-DVD (DVD Video) abzuspielen, liegt der Arbeit zusätzlich zur DVD auch noch eine Audio-CD bei. Sie enthält die gleichen Stücke in einer Stereo-Mischung. Dabei wurden die Surroundkanäle dem jeweiligen Frontkanal zugemischt. Der Center-Kanal in Track 7 und 8 wurde auf die Kanäle Links und Rechts verteilt.

## 11 Literaturverzeichnis

Christian Birkner, Surround

PPV Presse Project Verlags GmbH, Bergkirchen 2002

Jarmil Burghausen/Antonin Spelda, Akustische Grundlagen des Orchestrierens

Gustav Bosse Verlag, Regensburg 1971

Lothar Cremer/Helmut A. Müller, Die wissenschaftlichen Grundlagen der

Raumakustik, 2. Auflage, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1978

Michael Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 6. Auflage

K. G. Saur München 1997

Michael Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik

S. Hirzel Verlag, Stuttgart 2003

Andreas Ederhof, Das Mikrofombuch

GC Carstensen Verlag, München 2004

Uli Eisner, Mixing Workshop, 4. Auflage

PPV Presse Project Verlag, Bergkirchen 2000

Barbara Flückiger, Sound Design

Schüren Verlag, Marburg 2001

N. V. Franssen, Stereophonie

Philips Technische Bibliothek, 1963

Thomas Görne, Tontechnik

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2006

Gerhard Graber, Tontechnik und interdisziplinäres Sinnen

Verlag Peter Lang, 2000

Hubert Henle, Das Tonstudio Handbuch, 5. Auflage  
GC Carstensen Verlag, München 2001

Christian Jungebluth, High Definition Impulse Response Creator Manual

Dieter Kahlen, Testbericht Nativer Mehrwert: DAW-Software Magix Sequoia 7.0  
Studio Magazin, September 2003

Ralph Kessler, An Optimised Method for Capturing Multidimensional „Acoustic Fingerprints“, AES Convention Paper, Barcelona, Spanien 2005

Ralph Kessler, HDIR-Creator Produktbeschreibung  
[www.masterpenguin.de](http://www.masterpenguin.de)

Axel Kühlem, Musikproduktion mit ProTools  
Diplomarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien, HdM Stuttgart, 1998

Gisela Marosvölgyi, Schalltechnische Planung ZKM Karlsruhe, 20. Tonmeistertagung  
Karlsruhe 1998, Verlag K. G. Saur, München 1999

Oliver Neumann/Markus Schäffler, Optimierung der Raummikrofonanordnung bei  
Mehrkanal-Musikaufnahmen im 3/2-Stereo Format, Diplomarbeit an der HdM  
Stuttgart 2001

Bobby Owsinski, Mischen wie die Profis  
GC Carstensen Verlag, München 2007

Michael Rieländer, ABC der Elektroakustik  
Franzis-Verlag, München 1983

Viktor Scholl, Dolby Surround, HDTV-Mehrkanalton  
Diplomarbeit im Studiengang Medientechnik, HdM Stuttgart, 1993

Schoeps, Surround-Aufnahmen mit dem OCT  
[www.schoeps.de](http://www.schoeps.de), Karlsruhe 2006

Sequoia User's Guide, 2006

Frank Steffen, Audioübertragung einer Scheinwelt, Bericht 18. Tonmeistertagung  
Karlsruhe 1994, Verlag K. G. Saur, München 1995

Günther Theile, The New Sound Format „3/2-Stereo“, 17. Tonmeistertagung  
Karlsruhe 1992, Verlag K. G. Saur, München 1993

Johannes Webers, Handbuch der Tonstudioteknik, 8. Auflage  
Franzis-Verlag, Poing 2003

Jörg Wuttke, Mikrofonaufsätze, 2. Auflage  
[www.schoeps.de](http://www.schoeps.de), Karlsruhe 2000

Horst Zander, Das PC-Tonstudio  
Franzis-Verlag, Poing 1998

Horst Zander, MPEG Audiopraxis  
Franzis-Verlag, Poing 2000

Manfred Zollner/Eberhard Zwicker, Elektroakustik 3. Auflage  
Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1993

Udo Zölzer, Digitale Audiosignalverarbeitung, 3. Auflage  
B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2005

Internetauftritt des Lautsprecherherstellers d&b-Audiotechnik, [www.dbaudio.com](http://www.dbaudio.com)

Internetauftritt des Lautsprecherherstellers Meyersound, [www.meyersound.de](http://www.meyersound.de)

Internetauftritt „Plansammlung der Veranstaltungstechnik“, ZKM Karlsruhe  
[veranst.zkm.de/Kubusindex](http://veranst.zkm.de/Kubusindex)

## 12 Abkürzungsverzeichnis

A.	Abschnitt
BR	Bayerischer Rundfunk
bzw.	beziehungsweise
C	Center-Kanal beim 3/2-Standard
CD	Compact Disc
cm	Zentimeter
dB	Dezibel
DVD	Digital Versatile Disc (digitale vielseitige Scheibe)
etc.	et cetera
f	folgende [Seite]
ff	folgende [Seiten]
HdM	Hochschule der Medien
HDTV	High-Definition-Television (hochauflösendes Fernsehen)
HR	Hessischer Rundfunk
Hz	Hertz
IRT	Institut für Rundfunktechnik
kHz	Kilohertz
KV	Köchel-Verzeichnis
L	Linker Kanal
LFE	Low Frequency and Effect-Channel
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
Nr.	Nummer
OCT	Optimized Cardioid Triangle (bestimmte Mikrofonanordnung)
R	Rechter Kanal
S.	Seite
SA-CD	Super-Audio-CD
SL	Surround Links (rückwärtiger linker Kanal beim 3/2-Standard)
sog.	so genannte
SR	Surround Rechts (rückwärtiger rechter Kanal beim 3/2-Standard)
SWR	Südwestrundfunk
vgl.	vergleiche
ZKM	Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe