

---

# **Optimierung der Akustik und der Abhörsituation im Tonstudio der TU Graz**

Diplomarbeit

durchgeführt von

**Stefan Behr**

Institut für Breitbandkommunikation  
der Technischen Universität Graz

interim. Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

Betreuer: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

Graz, im November 2004

---

---

## Zusammenfassung

Neben der technischen Ausstattung eines Tonstudios verdient vor allem die Raumakustik von Tonregieräumen enorme Bedeutung. Erst durch ein abgestimmtes akustisches Umfeld kann eine Tonproduktion objektiv beurteilt und gestaltet werden. Dabei stellen unterschiedliche Tonformate verschiedene Ansprüche an die jeweilige Akustik.

Da im Tonstudio der Technischen Universität Graz für Surround-Produktionen eine Fixinstallation von Surround-Lautsprechern vorgesehen ist, war es das Ziel dieser Arbeit, Lösungen für eine akustische Optimierung des Regieraumes für Surroundwiedergabe zu finden. Hierzu sind zunächst umfangreiche Messungen durchgeführt worden, die vor allem die Feinstruktur verschiedener Gütemaße im Raum zueinander darstellen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen ist eine computergestützte Simulation der Raumakustik durchgeführt worden, mit deren Hilfe akustische Verbesserungen erprobt und optimiert werden konnten.

Abschließend sind verschiedene Standardkonfigurationen für die praktische Arbeit mit Surround-Ton im TU-Studio entworfen worden.

## Abstract

Apart from the technical equipment of any recording studio, the acoustics of the control room play a significant role, too. Only the adequate adjustment of the room acoustics can guarantee for an objective evaluation and realisation of an audio production. In this process, the quality of the sound format is the crucial factor since different sound formats require different standards of the particular room acoustic.

At the Technical University of Graz, not only stereophonic productions but also multichannel productions are to be realised in the future. Therefore, the aim of this thesis was to elaborate methods which optimise the acoustics of the control room designed for surround recording. First, extensive measurements had to be performed which define the structure of varying room acoustic parameters within the given control room. The data gathered was background for a PC based simulation of different room acoustics. This simulation allowed for acoustic improvements to be tested and optimised.

Finally, different standard set-ups could be created which can be applied to 5.0-channel music in the university's studio.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Sollwerte von Tonregieräumen</b>	<b>7</b>
2.1	Stereo Regie .....	7
2.1.1	Normen8	
2.2	Surround Regie.....	11
2.2.1	Raummaße.....	11
2.2.2	Lautsprecheranordnungen .....	12
2.2.3	Einmessen einer 5.1 Anlage .....	14
<b>3</b>	<b>Der Regieraum der TU Graz</b>	<b>19</b>
3.1	Nachhallzeiten im Studio .....	20
3.2	Vergleich mit der Norm .....	22
<b>4</b>	<b>Akustische Messungen im Studio</b>	<b>24</b>
4.1	WinMLS 2004.....	24
4.2	Gütemaße .....	24
4.2.1	Nachhallzeit $T_N$ .....	25
4.2.2	Nachhallzeit nach Eyring.....	25
4.2.3	Nachhallzeit nach Sabine .....	26
4.2.4	Anfangsnachhallzeit EDT .....	26
4.2.5	Deutlichkeitsgrad $D_{50}$ .....	27
4.2.6	Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ und Klarheitsmaß $C_{80}$ .....	27
4.3	Messung 1 .....	28
4.3.1	Messaufbau.....	29
4.3.2	Auswertung .....	31
4.4	Messung 2 .....	49
4.4.1	Messaufbau.....	49
4.4.2	Auswertung .....	51

---

4.4.3 Plattenabsorber .....	54
4.5 Messung 3 und 4 .....	55
4.5.1 Messaufbau.....	57
4.5.2 Auswertung Messung 3 und 4 .....	58
4.6 Messung 5 .....	70
4.6.1 Auswertung Messung 5 .....	71
4.7 Flatterechos .....	75
4.8 Zusammenfassung der Messungen.....	77
<b>5 Simulation</b> .....	<b>79</b>
5.1 CATT-Acoustic.....	79
5.2 Vergleich und Abgleich mit den Messungen .....	80
5.2.1 Lautsprecher .....	82
5.2.2 Vergleich der Simulation mit Messung 1 .....	91
5.2.3 Vergleich mit Messung 3.....	94
5.3 Auswertung der Simulation (normaler Zustand).....	95
5.3.1 Frühe Reflexionen am Abhörort.....	96
5.4 Simulation von Studioveränderungen .....	105
5.4.1 Verhinderung des Flatterechos .....	105
5.4.2 Reflexionen am Studiofenster .....	111
5.4.3 Optimierung der Diffusorwirkung.....	113
5.4.4 Optimierung der Nachhallzeit .....	121
<b>6 Maßnahmen für 5.0</b> .....	<b>128</b>
6.1 Lautsprecher .....	128
6.1.1 Einrichten der 5.0-Lautsprecher .....	128
6.1.2 Nutzung der Stereo-Anordnung .....	130
6.2 Verkabelung und Routing .....	130
6.2.1 Kabelführung.....	132
6.3 Akustische Veränderungen .....	133

---

---

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>139</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>140</b>
<b>9</b>	<b>Anhang A</b>	<b>143</b>

---

9.1	Einrichten einer 5.0-Aufstellung .....	143
9.1.1	Einstellung der Standard-5.0-Aufstellung .....	143
9.1.2	Ermittlung der Position der Lautsprecher für individuelle Surround- Aufstellungen .....	143
9.2	Konfigurierungsbeispiele für 5.0-Anordnungen .....	144
9.2.1	Was man für die Nutzung von 5.0 wissen sollte .....	145
9.2.2	Konfigurierungsbeispiel 1 .....	145
9.2.3	Konfiguratoionsbeispiel 2 .....	146
9.3	Einmessen der Anlage .....	148
9.3.1	Kanalidentifikation .....	149
9.3.2	Pegelkontrolle .....	149
9.3.3	Referenz-Abhörpegel $L_{LIST\ ref}$ .....	149
9.3.4	Messung der individuellen Lautsprecher/Raum-Übertragungskurve .....	150
<b>10</b>	<b>Anhang B - Hinweise zur Daten-CD</b>	<b>151</b>

---

10.1	Daten der Messungen .....	151
10.2	Daten zu CATT-Acoustic .....	151
10.3	Daten zum Einmessen .....	152

# 1 Einleitung

In der Produktion von Musik stellt das Tonstudio den zentralen Arbeitsplatz eines Toningenieurs dar. Dort soll es ihm möglich sein, den Klang von Audiomaterial beurteilen und optimieren zu können. Zu diesem Zweck steht in professionellen Regieräumen hervorragendes technisches Equipment zur Verfügung. Darüber hinaus ist aber auch die Akustik des Raumes von entscheidender Bedeutung, um einwandfreie Produktionen durchführen zu können.

Das Tonstudio der Technischen Universität in Graz verfügt über einen Regieraum, der für Stereo-Produktionen ausgelegt ist. Da inzwischen Mehrkanalformate wie Dolby Digital immer mehr an Bedeutung erlangen, soll das Studio zusätzlich mit einer variablen, fest installierten Surround-Anlage ausgestattet werden. Bisher übliche „fliegende“ Aufbauten sollen damit der Vergangenheit angehören.

Neben einer Installation von Lautsprechern, die ein flexibles Arbeiten mit Surround-Material erlauben, soll auch die Raumakustik für dieses zusätzliche Aufgabenfeld adaptiert bzw. optimiert werden. Als Grundlage hierfür dient eine umfassende Ermittlung der bisherigen akustischen Gegebenheiten, die über die üblichen raumakustischen Messungen hinaus ein genaues Bild der Feinstruktur verschiedener Gütemaße im Raum ermöglicht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollen mittels einer computergestützten Simulation Lösungsmöglichkeiten für eine optimale Akustik besonders für Surroundwiedergabe gefunden werden.

Zwar soll im Sinne eines Lehrstudios ein möglichst flexibler Umgang mit Surroundformaten möglich sein, für den praktischen Umgang mit Surround-Ton im Studio aber soll diese Arbeit auch Standardkonfigurationen anbieten, die eine schnelle Umsetzung von normgerechten Standards ermöglicht.

## 2 Sollwerte von Tonregieräumen

Für jede Art von Tonaufnahmen oder Tonbearbeitung ist es wichtig, diese objektiv beurteilen zu können. Aus diesem Grund hat man bereits früh in der Geschichte der Tonstudioteknik die Wichtigkeit und Unverzichtbarkeit von Tonregieräumen erkannt. Hier kann akustisch getrennt vom Aufnahmeraum das Audiomaterial abgehört und verändert werden, bis ein befriedigendes Ergebnis vorliegt. Natürlich beeinflusst neben der technischen Ausstattung auch die Akustik dieses Regieplatzes wesentlich den Klang einer Produktion. So kann also ein Werk, das im Tonstudio einwandfrei klingt, in einem anderen Raum über andere Lautsprecher vollkommen anders wahrgenommen werden. Um dies zu vermeiden, ist schon früh versucht worden, einen Regieraum zu konstruieren, der eine Referenz als Hörort darstellt und so ein repräsentatives Klangbild ermöglicht.

### 2.1 Stereo Regie

In den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts hat man versucht, den Einfluss des Raumes dadurch auszuschalten, indem man den Raum überall sehr stark bedämpft hat. Das Ergebnis waren Regieplätze, die ein vollkommen unnatürliches Raumgefühl vermittelt haben. Zwar ist der Direktschall ungestört zu beurteilen, doch ist die Akustik zu unterschiedlich zu ‚normalen‘ Hörplätzen, wie z.B. einem Wohnzimmer, für die Musik ja aufgenommen wird.

In den siebziger Jahren hat man begonnen, sich mit der Schallausbreitung in Räumen mehr und mehr zu beschäftigen. Die inzwischen üblich gewordenen Stereolautsprecher wurden in die Frontwände eingebaut, die aus hartem reflektierendem Material bestanden. Der hintere Teil des Studios wurde stark absorbierend ausgelegt. Auch war man sich bereits bewusst, durch entsprechende Anordnung der Wände und Decken Flatterechos zu vermeiden. Das Problem war aber, dass der Klang überall im Raum unterschiedlich war und jeder Raum anders klang. Auch mit Hilfe von Equalizern konnten keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden.

Erst in den achtziger Jahren sind Konzepte wie ‚Live-End-Dead-End‘ (LEDE) und ‚Reflection-Free-Zone‘ (RFZ) aufgekommen.

‚Live-End-Dead-End‘ bedeutet, dass der vordere Teil des Regieraumes eine trockene, stark absorbierende Akustik aufweist, der hintere dagegen diffus reflektierend wirkt. Durch eine

entsprechende Raumgröße können störende frühe Reflexionen verhindert werden, wenn entsprechend lange Laufzeiten ermöglicht werden.

In dieser Zeit wurden auch Diffusoren basierend auf numerischen Methoden entwickelt, die es ermöglichen, Energie in den Raum zurück zu geben ohne, dass sich Echos ausbilden. Der so entstehende Diffusschall vermittelt ein natürliches Raumgefühl ohne störende Reflexionen.

Als wichtig wurde die Forderung erkannt, frühe Reflexionen am Abhörort zu unterbinden.

Durch geeignete Raumgeometrie kann ein Bereich, eine ‚Reflection-Free-Zone‘ (RFZ), um den Abhörort geschaffen werden, der frei von frühen Reflexionen ist. Selbst wenn sich im Frontbereich das studiotypische Fenster zum Aufnahmeraum befindet, kann durch gezielte Schalllenkung eine scheinbar reflexionsarme Scheibe erreicht werden, da alle reflektierten Strahlen am Abhörort vorbeigeführt werden.

Gelingt es, einen Tonregieplatz mit einer RFZ auszustatten, ist es möglich Signale zu hören, die frei vom Raumcharakter sind, also objektiv beurteilt werden können.

Schwierigkeiten entstehen dabei jedoch oft durch die Einrichtung. Reflexionen von Möbeln und technischem Equipment besonders in der hinteren Raumhälfte wirken der RFZ entgegen.

Besonders in kleineren Räumen mit geringem Abstand von Lautsprechern und Mischpult kommt es zu frühen Reflexionen, die durch Überlagerung mit dem Direktschall zu Kammfiltereffekten führen.

Ein Ansatz im Studiodesign, dies zu verhindern, ist das ‚Early Sound Scattering‘ (ESS). Dabei sollen die unerwünschten Reflexionen durch frühe diffuse Energie maskiert werden. Dafür wird die vordere Wand um die Lautsprecher herum mit Diffusoren ausgestattet, die ein homogenes Diffusfeld bewirken. Der hintere Raumanteil muss dann absorbierend gestaltet werden.

### 2.1.1 Normen

Alle Konzepte für Regieräume haben heute das Ziel, einen Raum zu schaffen, der ein symmetrisches Schallfeld ermöglicht, keine stehenden Wellen zulässt, ein möglichst diffuses Schallfeld aufweist und störende frühe Reflexionen verhindert. Neben diesen Forderungen, die in unterschiedlichsten Formen umgesetzt werden können, existieren Normen, die die akustischen Bedingungen für Tonregieräume bestimmen.

Neben baulichen Richtlinien wie der Forderung von Raum-in-Raum-Bauweise, einer Mindestgröße von  $> 30\text{m}^2$  ( $< 300\text{m}^3$ ) und Symmetrie sollen auch Nischen, Säulen, konkave Oberflächen und der gleichen vermieden werden.

Wesentlich ist auch die Einhaltung von Schalldruckpegeln von Dauergeräuschen. Diese werden von eingeschalteten haus- und studiotecnischen Anlagen verursacht. Die Gründe hierfür sind vor allem Klimaanlage sowie Geräusche aus der Gerätetechnik wie z.B. Lüfter. Der Schalldruckpegel ist wesentlich von der Nutzung des Raumes abhängig und wird stets für die Terzmittenfrequenzen von 50Hz bis 10kHz in tabellarischer Form oder als Grenzkurve



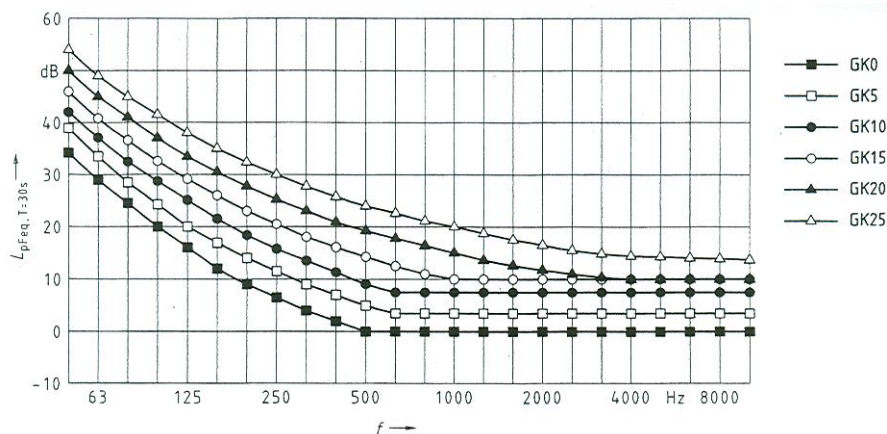
(GK) angegeben.

Je nach Programminhalt muss ein Regieraum einer bestimmten Grenzkurve genügen. Es werden folgende Einteilungen definiert [DIN]:

- Hörspiel (Studio): GK 0
- Kammermusik (Studio): GK 0
- Sinfonische Musik (Studio): GK 5
- Unterhaltungsmusik (Studio): GK 15
- Räume, in denen vorwiegend Sprache aufgenommen wird: GK 5 bis GK 15
- Räume, in denen vorwiegend die Tonqualität beurteilt wird und/oder eine Tonbearbeitung stattfindet: GK 5 bis GK 15
- Produktionsstudios des Fernsehens und Bearbeitungsräume in Fernsehen und Hörfunk: GK 10 bis GK 20
- Bearbeitungsräume mit büroähnlichem Charakter: GK 20 bis GK 25

Die folgende Abbildung zeigt die Grenzkurven für den höchstzulässigen Dauergeräuschpegel. Diese sind aus den internationalen Noise Rating-Kurven (NR) abgeleitet.

Unabhängig vom Schalldruckpegel dürfen Dauergeräusche weder tonale noch periodische Komponenten enthalten.



**Abbildung 2.1: Grenzkurven für den höchstzulässigen Dauergeräuschpegel [DIN]**

Bei angrenzenden Räumen muss eine Luftschallpegeldifferenz eingehalten werden, die sicherstellt, dass bei entsprechendem Betriebspegel in einem Raum der jeweilige Dauergeräuschpegel im anderen nicht überschritten wird.

Die Nachhallzeit wird ebenfalls in der Norm vorgeschrieben. Auch hier ist ein einfacher

Zahlenwert nicht ausreichend, sondern ein frequenzabhängiger Verlauf erforderlich. In Abhängigkeit von der Raumgröße sind in Abbildung 2.2 Richtwertbereiche für die Nachhallzeit bei 500Hz angegeben.

Für die hohen akustischen Anforderungen im Tonstudio gelten des Weiteren enge Toleranzen, was den Verlauf der  $T_{60}$  über der Frequenz betrifft. Im Bereich von 200Hz bis 2,5kHz soll die Nachhallzeit weder das 0,9-fache der angestrebten Nachhallzeit unterschreiten noch das 1,1-fache überschreiten. Dieses Toleranzfeld ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

Insgesamt sollte die Nachhallzeit in Tonregieräumen im Bereich von 0,2 bis 0,4s liegen.

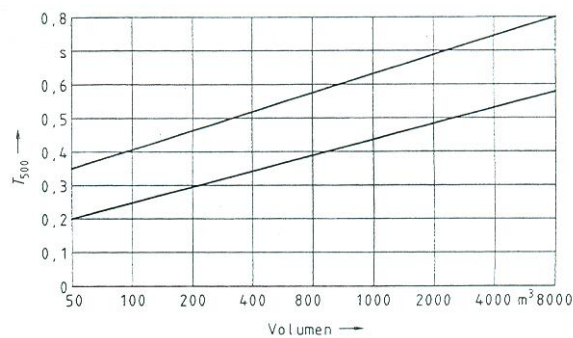


Abbildung 2.2: Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Volumen des Raumes [DIN]

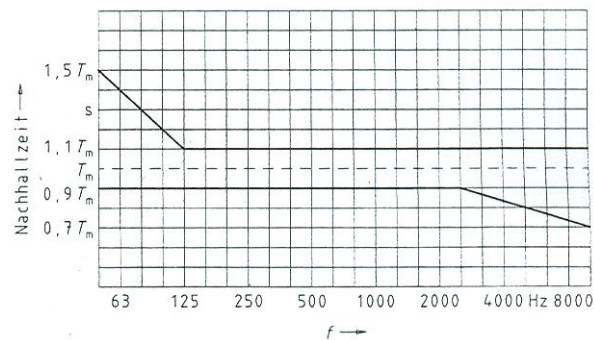


Abbildung 2.3: Toleranzfeld für Nachhallzeiten [DIN]

Bei der Aufstellung der Lautsprecher muss beachtet werden, dass freistehende Monitore einen Mindestabstand von 1m zu allen Begrenzungsflächen haben. Sollen die Tonmonitore in die Wand eingebaut werden, müssen sie mit der Wand bündig abschließen. Es darf dabei nicht zu Schwingungsanregung der Wand oder von Stativen kommen.

Grundsätzlich sind die Lautsprecher symmetrisch zum Abhörort zu positionieren. Die Stereobasis  $b$  sollte 3 bis 4,5m betragen, der Basiswinkel  $\delta$  sollte  $60^\circ \pm 15^\circ$  sein. Der

Hörabstand ergibt sich dann mit  $l = (0,9 \pm 0,3) \cdot b$  (vgl. Abbildung 2.4).

Die Höhe der Hauptabstrahlachse sollte in Ohrhöhe (1,20 bis 1,30m) liegen. Der Abhörpegel darf 85dB(A) nicht überschreiten.

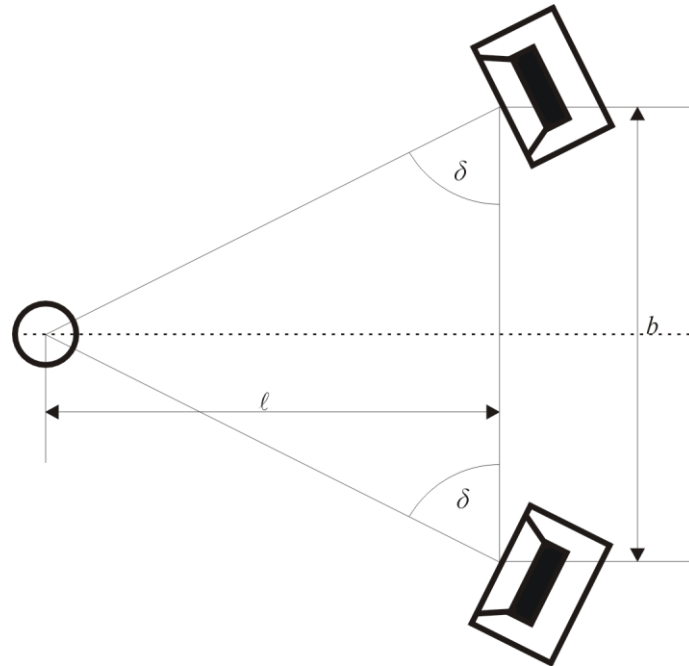


Abbildung 2.4: Horizontale Aufstellung von Tonmonitoren

## 2.2 Surround Regie

### 2.2.1 Raummaße

Ein Regieraum für Surround-Produktionen soll die Möglichkeit bieten, Mehrkanalton wie z.B. 5.0 objektiv bearbeiten und beurteilen zu können.

Als sinnvoll sind Raumgrößen von 30 bis 70m<sup>2</sup> anzusehen. Im Vergleich zu einem Stereoregieplatz sollte das Volumen um 20% größer sein. Der Grundriss des Raumes sollte symmetrisch zur Mittelachse sein, die durch den Centerlautsprecher und den Abhörort verläuft. Dabei sollten ebenfalls parallel verlaufende Wände vermieden werden, um Flatterechos und stehende Wellen zu verhindern.

Als Richtlinie kann folgende Gleichung angesetzt werden [Storyk/Noy]:

$$1,1 \frac{w}{h} \leq \frac{l}{h} \leq 4,5 \frac{w}{h} - 4$$

**Formel 2.1: Ansatz zum Raumdesign**

- w ... Breite des Raumes
- h ... Höhe des Raumes
- l ... Länge des Raumes

Zusätzlich sollte ebenfalls gelten:

$$\frac{l}{h} < 3$$

**Formel 2.2**

$$\frac{w}{h} < 3$$

**Formel 2.3**

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass Breite, Länge und Höhe des Raumes nicht Vielfache  $\pm 5\%$  voneinander sind.

## 2.2.2 Lautsprecheranordnungen

Für eine Surroundabhöranlage wird das Stereo-Lautsprecherpaar, welches sich bezogen auf den Sweetspot im Allgemeinen auf  $\pm 30^\circ$  befindet, zunächst um einen Center-Monitor erweitert. Dieser wird auf  $0^\circ$  installiert, also auf der Symmetrieachse des Studios. Je nach Surroundformat kommen dann noch weitere Lautsprecher hinzu, die als Surround-Lautsprecher bezeichnet werden.

Die wesentlichen Standards der Surroundformate haben sich im Zusammenhang mit bildbezogenem Material entwickelt. Für Musik allein existieren keine verbindlichen Regeln. Durch die Verbreitung von Surroundanlagen im Heimbereich durch DVD-Player ist Dolby-Digital zu einem allgemeinen Standard geworden.

Hierbei handelt es sich um ein so genanntes 5.1 Format, welches sich neben dem Stereopaar und dem Center noch durch einen linken und einen rechten Surround-Lautsprecher sowie einen LFE-Kanal auszeichnet.

Insgesamt handelt es sich also um sechs Lautsprecher, die jeweils eine eigene Tonspur wiedergeben. Auf Medien wie der DVD liegen diese sechs Spuren in einem codierten Digitalsignal (AC-3) vor.

Der LFE-Kanal (Low Frequency Effects) ist nicht mit einem Subwoofer zu verwechseln, der

den Frequenzbereich von Lautsprechern zu tiefen Frequenzen hin erweitern soll, sondern stellt einen zusätzlichen Kanal dar, der besonders in Kinofilmen für sehr tieffrequente Effektsounds genutzt wird. Kleinere Anlagen zur Wiedergabe von Dolby-Digital verbinden oft die Funktion von Subwoofer und LFE mit einem so genannten Bassmanagement in einem Lautsprecher.

Für professionelle Anwendungen, wie sie in einem Tonstudio gefordert werden, sollten aber alle fünf Lautsprecher so genannte Full-Range-Lautsprecher sein, also einen linearen Frequenzgang von 50 bis 2kHz aufweisen. Soll in einem Regieraum ausschließlich Musik produziert werden, kann auch auf einen LFE verzichtet werden. Man spricht dann von einem 5.0-Format.

Des Weiteren sollten alle Lautsprecher identisch im Klang und im Abstrahlverhalten sein, also vom gleichen Typ, idealer Weise das gleiche Model sein.

Dies gilt besonders für die drei Frontlautsprecher (L, R, C). Als Surround-Lautsprecher können ggf. andere Modelle verwendet werden, dann aber sollten diese auf die Frontlautsprecher abgestimmt sein, also z.B. aus der entsprechenden Serie vom selben Hersteller sein.

Die genormte Anordnung für eine Dolby-Digital-Wiedergabe sieht vor, den Center auf  $0^\circ$ , Links und Rechts auf jeweils  $\pm 30^\circ$  und die Surround-Lautsprecher auf  $\pm 110^\circ$  aufzustellen.

Dabei befinden sich alle Monitore auf einem Kreis um die Abhörposition und haben so alle den gleichen Abstand zum Sweetspot. Ist es erforderlich, dass alle drei Frontlautsprecher auf einer Geraden angeordnet werden müssen, also der Center dichter an den Hörer heranrückt, so ist der fehlerhafte Abstand durch ein entsprechendes Delay zu korrigieren. Nach Möglichkeit sollte aber eine Aufstellung angestrebt werden, die ohne Laufzeitkorrektur auskommt.

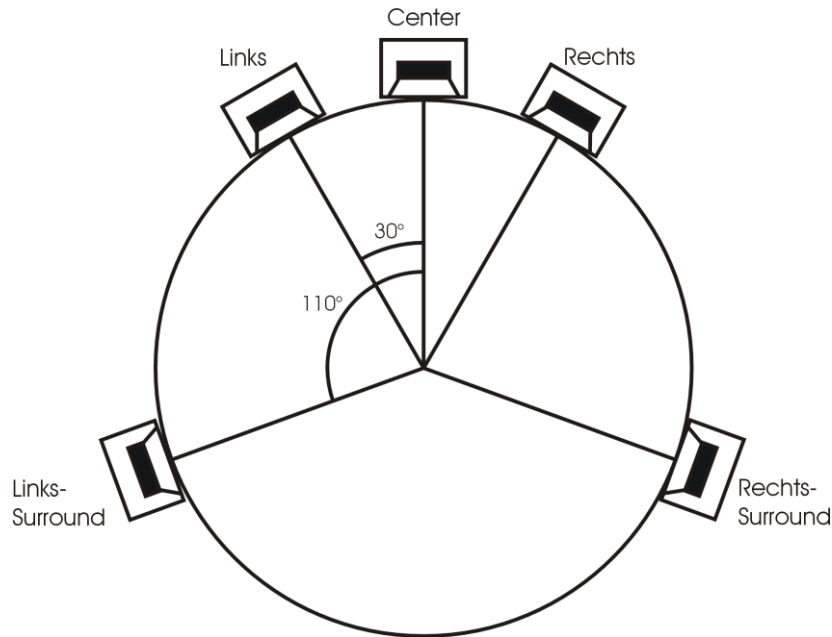


Abbildung 2.5: 5.0-Anordnung

Die Höhe der Lautsprecher sollte der Ohrhöhe des Hörers entsprechen. Im Allgemeinen geht man hier von einer Höhe von 1,2m aus. Jeder Monitor sollte auf den Sweetspot ausgerichtet werden. Sollen die Lautsprecher höher montiert werden, ist eine Neigung von maximal  $15^\circ$  [Storyk/Noy] zulässig.

Besonders günstig ist es, wenn alle Lautsprecher in die entsprechenden Wände eingebaut werden, so dass die Frontseiten dieser bündig mit den Wänden abschließen. Hierdurch werden unerwünschte frühe Reflexionen an Wänden hinter den Monitoren am sinnvollsten unterbunden.

Ist dies nicht möglich, so sollten die Lautsprecher entweder sehr dicht an absorbierende Wände gestellt werden oder ein Mindestabstand von 1,0m zu allen begrenzenden Flächen eingehalten werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Signalortung durch Reflexionen verfälscht wird.

### 2.2.3 Einmessen einer 5.1 Anlage

Neben einer korrekten Aufstellung der Lautsprecher ist auch das Einmessen einer Surround-Anlage ein wichtiger Faktor. Sowohl beim reinen Anhören von Mehrkanalton als auch beim Mischen ist ein Einstellen der Anlage unverzichtbar. Nur dadurch bleibt gewährleistet, dass auch unter anderen Abspielbedingungen ein reproduzierbares Klangbild realisiert werden kann.

Aus diesem Grund ist gerade in der Produktion von Surround-Material eine Kontrolle aller

Pegel wichtig und ein Einmessen der Anlage zu Produktionsbeginn sinnvoll.

Besonders in Studios mit wechselnden Ingenieuren oder wechselnder Lautsprecheraufstellung kann auf eine Kontrolle nicht verzichtet werden. Aus diesem Grund ist es auch üblich, vor Beginn des Programmteils entsprechende Testsignale mit aufzuzeichnen. Damit stellt man sicher, dass das Material unter den gleichen Bedingungen wiedergegeben werden kann wie in der Produktion.

### 2.2.3.1 Einstellsignale

Neben einer subjektiven Überprüfung wie Lautstärkevergleich oder Phasenrichtigkeit der verschiedenen Kanäle ist die messtechnische Kontrolle unverzichtbar. Dazu werden bestimmte Signale, die Einstellsignale, über die Lautsprecher wiedergegeben und messtechnisch erfasst.

Die üblichen Messsignale sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Signale	Aussteuerungsmesser mit $\tau < 0,1\text{ms}$ [dB]	Aussteuerungsmesser mit $\tau < 10\text{ms}$ [dB]	Effektivwertmessung RMS [dB]
Sinussignal 1kHz	-18 / -9 / 0	-18 / -9 / 0	-18 / -9 / 0
Rosa Rauschen 20Hz - 20kHz	-9	-13	-18
Rosa Rauschen 200Hz - 20kHz	-11	-15	-20

Tabelle 2.1: Messsignale

Mit den Sinussignalen wird zunächst eine Pegelkontrolle durchgeführt. Hierbei sollen die Pegel im Signalweg eingestellt werden. Daher ist es ratsam, die Abhörlautstärke zu reduzieren. Die Wiedergabe erfolgt über alle Kanäle gleichzeitig. Test-CDs bieten hierfür neben 0dB auch

-9dB und -18dB an.

Im nächsten Schritt muss der Referenz-Abhörpegel ( $L_{\text{LIST ref}}$ ) eingestellt werden. Dazu dient das Rosa Rauschen, welches von 200Hz bis 20kHz bandpassgefiltert ist. Am Abhörort wird mit einem Schallpegelmesser der Schalldruckpegel (SPL) bestimmt (Einstellung am

Messgerät: „slow“). Dieser soll bei Wiedergabe über alle Kanäle  $85\text{dB(A)}$ <sup>1</sup> betragen und wird resultierender Referenz-Abhörpegel genannt. Je nach Surround-Anordnung, also je nach Anzahl der Kanäle, ergibt sich für jeden Lautsprecher ein Referenzpegel entsprechend der Formel 2.4, wenn das Messsignal nur über einen Kanal abgespielt wird.

$$L_{LISTref} = 85 - 10 \log n [\text{dB(A)}]$$

**Formel 2.4: Referenz-Abhörpegel**

Dabei stellt  $n$  die Anzahl der verwendeten Wiedergabekanäle der jeweiligen Surround-Anordnung dar. Bei fünf Lautsprechern ( $n=5$ ) ergibt sich ein Referenz-Abhörpegel pro Kanal von  $78\text{dB(A)}$ .

Dieser Pegel ist also für jeden Kanal separat einzustellen. Pegeldifferenzen von  $1\text{dB}$  sollten zwischen zwei Kanälen vermieden werden, wenn möglich sollte der Unterschied kleiner  $0,5\text{dB}$  sein.

Als Kontrolle dient dann der resultierende Referenz-Abhörpegel.

Signale	SPL [dB], slow	SPL [dB(A)], RMS, slow
Rosa Rauschen 20Hz - 20kHz	82	78
Rosa Rauschen 200Hz - 20kHz	80	78

**Tabelle 2.2: Referenz-Abhörpegel am Bezugs-Abhörort**

Mit dem Rosa Rauschen im Bereich  $20\text{Hz}$  bis  $20\text{kHz}$  kann die individuelle Lautsprecher/Raum-Übertragungskurve mit einem Spektrum-Analysator gemessen werden. Hierfür wird die Einstellung des Referenz-Abhörpegels von  $78\text{dB(A)}$  vorausgesetzt.

Steht neben den fünf Lautsprechern auch ein Subwoofer zur Verfügung, so ist eine Pegelanpassung zwischen den Lautsprechern und dem Subwoofer durchzuführen. Je nach Übergangsfrequenz werden unterschiedliche Frequenzbereiche von bandpassgefiltertem Rosa

---

<sup>1</sup>  $\text{dB(A)}$  entspricht den ITU- und EBU-Empfehlungen. SMPTE und das Japanische HDTV-Forum fordern C-bewertete Messungen ( $\text{dB(C)}$ ).



Rauschen benutzt, da der Subwoofer auch nur eine begrenzte Bandbreite besitzt.

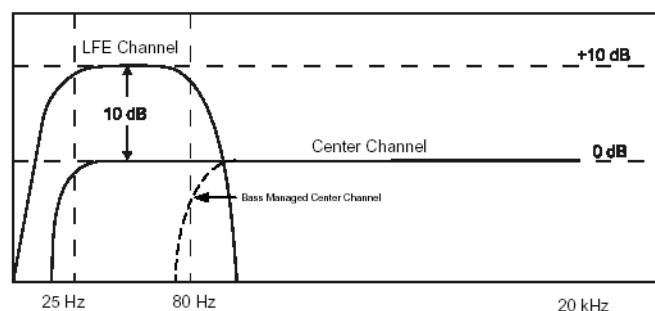
Übergangsfrequenz [Hz]	Oktavbreites, inkohärentes R.R., $f_{mTerz}$ [Hz]
80	25-50 und 125-250
100	31,5-63 und 160-320
120	40-80 und 200-400
160	50-100 und 250-500
200	63-125 und 315-630

**Tabelle 2.3: Signale zur Pegelanpassung**

Das entsprechende Signal wird über alle Kanäle wiedergegeben und so ein Pegel-Gleichgewicht realisiert. Dabei gilt, dass der Schalldruckpegel des Subwoofers gleich dem der Lautsprecher ist.

Dieses Verfahren bezieht sich auf die Verwendung eines Subwoofers, der den Frequenzbereich der Hauptlautsprecher zu tiefen Frequenzen hin erweitern soll, nicht auf den LFE-Kanal. Dieser wird besonders im Filmtone als zusätzlicher Signalweg für sehr tiefe Soundeffekte genutzt. Im Konsumerbereich finden sich Subwoofer und LFE allerdings oft in einem Tieftonlautsprecher wieder (Bassmanagement).

Der LFE-Kanal selbst wird so eingestellt, dass eine Messung von Rosa Rauschen mit einem Frequenzanalysator einen Pegel von 10dB über dem des Center-Kanals ergibt. Dies wird in Abbildung 2.6 veranschaulicht.



**Abbildung 2.6: LFE im Frequenzanalysator [Dolby]**

Besteht nur die Möglichkeit, den Schalldruckpegel über die gesamte Bandbreite zu bestimmen, muss am Schallpegelmessgerät ein Pegel von ca. 82-83dB(A) abgelesen werden. Der

Unterschied zum Center-Kanal beträgt dann also nur ca. 4-5dB, da in diesem Fall über den gesamten Frequenzbereich gemessen wird, was einen geringeren Wert zur Folge hat.

## 3 Der Regieraum der TU Graz

Der Regieraum des TU-Studios gehört zum Institut für Breitbandkommunikation des Fachbereiches Nachrichtentechnik. Neben einem kleineren Regieplatz vor allem für Postproduction und einem gemeinsamen Aufnahmerraum stellt der Regieplatz 1 den wichtigsten Arbeitsbereich im Studiokomplex des Institutes dar. Ausgestattet mit einem Euphonix C2000, verschiedenen Harddisk-Recording-Systemen sowie professionellem Outboardequipment bietet er die Möglichkeit hochwertiger Audioproduktionen.

Im Gegensatz zu kommerziellen Studios steht hier auch die Funktion als Lehrstudio im Vordergrund, was sich in der Einrichtung und auch in der technischen Ausstattung widerspiegelt. So können hier neben Studioproduktionen auch Lehrveranstaltungen wie z.B. Studiomesstechnik und Studiogerätekunde stattfinden.

Das Studio in heutiger Form besteht seit 1997/98 und ist sowohl durch die Raumakustik als auch durch die technische Ausstattung für Stereoproduktionen ausgelegt. Hierfür ist in Tonstudios das Live-End-Dead-End -Konzept (LEDE) typisch. Es sieht eine trockene, absorbierende Akustik im vorderen Bereich, wo auch die Monitore platziert sind, und einen reflexionsreicheren Bereich im hinteren Teil des Studios vor.

Im TU-Studio wird dies an der Vorderseite durch kombinierte Absorber erreicht, die aus Plattenabsorbern mit zusätzlichem porösem Absorber davor bestehen. Diese sind kassettenartig ab einer Höhe von 1,20m in unterschiedlichen Größen und mit unterschiedlichen Einbautiefen der Platten an der Stirnseite des Regieraumes platziert. Zusätzlich befinden sich in den vorderen Ecken über die gesamte Raumhöhe Bassabsorber, die hier ihre größte Wirkung erzielen können. Ein weiterer Bassabsorber befindet sich unter dem leicht nach links verschobenen Studiofenster.

Die Seitenwände sind im vorderen Teil wie die Frontseite ausgestattet. Im mittleren Teil sind Schlitzabsorber vom Boden bis unter die Decke installiert, im hinteren Teil, in den Eckbereichen, wieder tieffrequent wirkende Plattenabsorber, die aber nicht wie im vorderen Bereich mit Stoff bespannt sind. Die linke Seitenwand verläuft rechtwinklig zur Vorderseite, die rechte spannt einen Winkel zur Frontseite von ca. 93° auf. Hier befindet sich auch der Eingang.

Die Rückwand verläuft schräg bis zur Symmetrieachse des Studios, erreicht hier die größte Raumtiefe und verläuft dann spiegelsymmetrisch bis zur linken Wand. Mittig an der

Rückwand befinden sich Diffusoren der Firma Vatter Acoustic Technologies, rechts davon ein Schrank, links davon eine Tür, die in den Gerätekeller führt.

Die Deckenverkleidung besteht rechts und links außen aus abgehängten Mikropor-S Akustikplatten mit einer Einbautiefe von 19cm. In der Mitte verläuft eine Deckenkonstruktion aus unterschiedlichen Materialien wie pyramidenförmigen Schaumstoffmatten und Holz, die unterschiedliche Neigungswinkel aufweist.

Abgesehen von dem zweistufigen Holzpodest hinter dem Pult an der Rückwand ist am gesamten Boden Teppich verlegt.

Das Mischpult ist fest in den Raum integriert und wird von Studiomöbeln umgeben, in denen sich auch Patchbay und andere externe Geräte befinden.

Die Abmessungen des Raumes, gemessen durch die Raummitte, betragen in der Länge 6,40m, in der Breite 8,34m und in der Höhe 2,85 bis 3,04m. Die Einbautiefe der Absorber beträgt 0,25m.



Abbildung 3.1: Regieraum

### 3.1 Nachhallzeiten im Studio

Die derzeitige akustische Ausstattung basiert auf Messungen im leeren Raum von 1994. Ausgehend von diesen Messungen wurde ein akustischer Ausbau nach dem LEDE-Konzept geplant. Die Nachhallzeiten des leeren Raumes sowie die angestrebten Werte sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
T <sub>60</sub> im leeren Raum	1,42	1,67	1,87	1,87	1,65	1,42	1,08	0,91
Angestrebte T <sub>60</sub>	0,61	0,52	0,51	0,48	0,46	0,48	0,40	0,37

**Tabelle 3.1: Nachhallzeiten 1994 - oben: gemessen, unten: berechnet**

Die für die notwendige Nachhallzeitverkürzung benötigten Absorptionsgrade der verwendeten Absorber sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

In der Planung findet der Teppichboden keine Berücksichtigung, der aber natürlich nicht unwesentlich zur aktuellen Raumakustik beiträgt. Ebenso sind die Diffusoren an der Studiorückwand, die neben der Streuung auch absorbieren, nicht in die Planung von 1994 mit eingeflossen, sondern erst später hinzugefügt worden. Dadurch ergeben sich heute aktuelle gemittelte Nachhallzeiten (Messung 1), die in Tabelle 3.3 angeführt sind.

	<b>f [Hz]</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
A1 / A2	Kombiabs. Wände	70	80	55	90	90	90	90	90	90
A3	Bassabs. vorne	80	50	30	20	16	11	15	10	10
A4	Schlitzabsorber	-	25	82	37	10	10	20	20	20
A5	Bassabs. hinten	40	80	31	14	11	5	11	5	5
D1	Mikropor-S (19cm)	-	31	28	50	75	57	67	70	70
D2	Dämmmatte Decke	70	80	55	90	90	90	90	90	90
D4	Verstreuung Decke	-	25	82	37	10	10	20	20	20
Dif	Diffusoren <sup>1</sup>	-	30	42	48	29	43	36	-	-

**Tabelle 3.2: Absorptionsgrade [%]**

<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
T <sub>30</sub> [s]	0,40	0,34	0,37	0,40	0,38	0,36	0,32	0,28

**Tabelle 3.3: Nachhallzeiten [s] 2004 - gemittelt (M1)**

<sup>1</sup> Die Werte für die Diffusoren stammen nicht aus der damaligen Planung, sondern wurden von Vatter Acoustic Technologies (Hersteller) zur Verfügung gestellt.

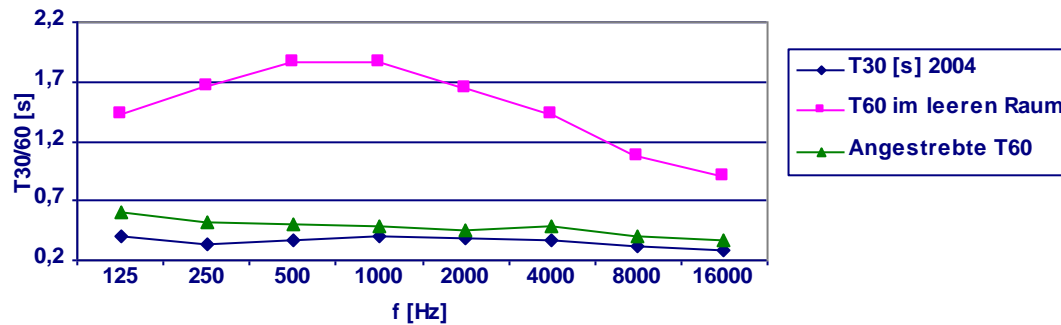


Abbildung 3.2: Vergleich der Nachhallzeiten im Regieraum

Die folgende Tabelle vergleicht die äquivalenten Absorptionsflächen der ersten Planung mit denen, die sich aus der aktuellen Messung ergeben. Diese äquivalente Absorptionsfläche repräsentiert eine Fläche, die bei einem Absorptionsgrad von  $\alpha=1$  das gleiche Absorptionsvermögen aufweist wie alle wirkenden Flächen zusammen.

Da die Nachhallzeiten in allen Oktavbändern gesunken sind, steigen die äquivalenten Absorptionsflächen an.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A \cdot \alpha$ 1994 [m <sup>2</sup> ]	53,0	53,3	56,6	59,6	56,9	68,0	73,1
Angestrebte T <sub>60</sub> 1994 [s]	0,61	0,52	0,51	0,48	0,46	0,48	0,40
T <sub>30</sub> 2004 [s]	0,40	0,34	0,37	0,40	0,38	0,36	0,32
$A \cdot \alpha$ 2004 [m <sup>2</sup> ]	67,6	79,5	73,1	67,6	71,2	75,1	84,5
Differenz der äquivalenten Absorptionsflächen	14,6	26,2	16,5	8,0	14,3	7,1	11,4

Tabelle 3.4: Vergleich der äquivalenten Absorptionsflächen

Die bis hier genannten Werte der Nachhallzeit können den Regieraum nur sehr allgemein akustisch charakterisieren. Sie lassen keine Aussagen über den Verlauf der T<sub>60</sub> im Raum zu. Auch kann keine Abhängigkeit der Quellpositionen abgeleitet werden. Um hier genauere Erkenntnisse zu erlangen, bedarf es umfangreicherer Messungen.

## 3.2 Vergleich mit der Norm

Die in Kapitel 2 beschriebenen Normen erfüllt der Regieraum nur bedingt. Durch die

Tatsache, dass der Raum breiter als tief ist, sind die geforderten Raumverhältnisse nicht einzuhalten. Während die Formeln 2.2 und 2.3 erfüllbar sind, kann die Forderung aus Formel 2.1: Ansatz zum Raumdesign (Ansatz zum Raumdesign) nicht erreicht werden. Setzt man die Abmessungen des Raumes in die Formel ein, ist die Formel nicht erfüllbar.

Aufgrund des Raumvolumens von ca.  $145\text{m}^3$  ist laut Abbildung 2.2 eine Nachhallzeit für 500Hz von 0,28 bis 0,43s normgemäß. Tatsächlich liegt eine  $T_{30}$  von 0,37s vor. Dieser Wert passt also sehr gut zu der gegebenen Raumgröße.

Auch die Nachhallzeit in anderen Frequenzbändern verläuft entsprechend Abbildung 2.3 innerhalb der Norm (Abbildung 3.3).

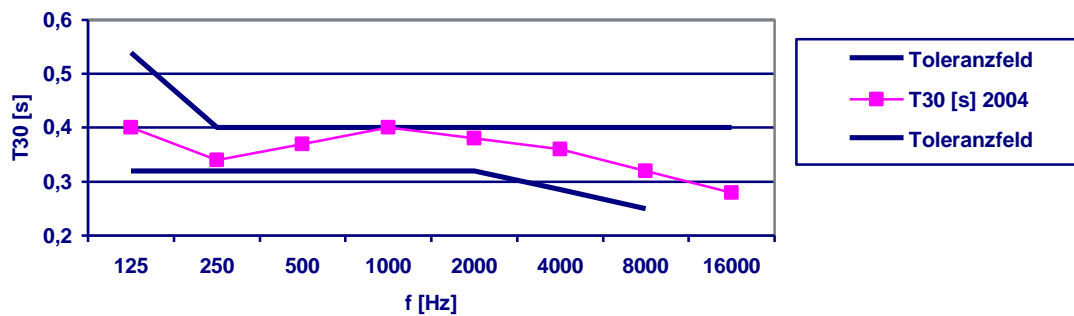


Abbildung 3.3: Nachhallzeit von 2004 (M1)

Die Messwerte der aktuellen Nachhallzeiten stammen aus Messung 1, die später ausführlich beschrieben wird. Da sich die Quelle hierbei im vorderen Raumteil befunden hat, werden die Ergebnisse auf eine Stereowiedergabe anwendbar sein. In wie weit der Raum die normgerechten Nachhallzeiten für eine Surroundwiedergabe erfüllt, wird in dieser Arbeit eingehend untersucht.

## 4 Akustische Messungen im Studio

Im Gegensatz zu allgemein üblichen Messungen im Bereich der Raumakustik soll hier nicht nur die Ermittlung von gängigen akustischen Parametern im Vordergrund stehen, sondern viel mehr die akustische Feinstruktur des Regieraumes untersucht werden. Des Weiteren sollen die Messungen die Grundlage einer Raumsimulation darstellen und Aufschluss über die Eignung der derzeitigen Akustik zur Wiedergabe von Surround-Material geben.

### 4.1 WinMLS 2004

Alle raumakustischen Messungen wurden mit der Software WinMLS 2004 durchgeführt. Dieses Programm bietet zwei verschiedenen Messsignale an. Bei dem Verfahren der Maximum Length Sequence (MLS) wird ein periodisches binäres Pseudozufallssignal generiert. Dieses wird in den zu messenden Raum eingespielt und über ein Kugelmikrofon wieder aufgezeichnet. Die Autokorrelationsfunktion der MLS kommt einer Dirac-Impulsfolge sehr nahe. Durch Kreuzkorrelation erhält man die periodische Impulsantwort des Raumes, aus der mittels einer DFT die gewünschte Impulsantwort berechnet wird. Der Vorteil dieses Verfahrens mit MLS ist, dass das Erregersignal weder einem idealen Impuls gleichen muss, noch bei Erregung durch Rauschen die Amplitude und der Phasengang bekannt sein müssen. Alternativ dazu kann in WinMLS 2004 der Raum auch durch einen Sweep angeregt werden. Grundsätzlich ergeben beide Verfahren die gleiche Impulsantwort. Unterschiede können sich dadurch ergeben, dass die Methoden unterschiedlich auf Systemunzulänglichkeiten wie Rauschen oder Zeitvarianz reagieren. Aus diesem Grund wurden die Messungen mit beiden Anregungssignalen durchgeführt. Die Ergebnisse haben aber gezeigt, dass es nur zu vernachlässigbar kleinen Unterschieden zwischen den Messungen mit MLS und Sweep kommt. Alle Auswertungen verwenden daher die Werte, die durch eine Anregung mit MLS ermittelt wurden.

### 4.2 Gütemaße

Die Raumakustik beschäftigt sich mit der akustischen Beschaffenheit von Räumen. Zwar ist



der akustische Eindruck eines Raumes in erster Linie eine subjektive Empfindung, doch sind heute allgemein gültige Kriterien - die Gütemaße - vorhanden, einen Raum auch objektiv zu beschreiben.

Diese Gütemaße werden aus Energiebetrachtungen hergeleitet, wobei die Energie von Direktschall, von Anfangsreflexionen und Nachhall in Bezug auf die Gesamtenergie betrachtet werden.

Ermittelt man den Energie-Zeit-Verlauf, erhält man die für jeden Raum typische Impulsantwort.

Im Folgenden werden einige wichtige Gütemaße, die bei der Messung und Simulation zur Anwendung kamen, beschrieben.

### 4.2.1 Nachhallzeit $T_N$

Die Nachhallzeit ist das älteste Maß, mit dem in der Akustik Räume beschrieben werden. Es existieren heute zwar die unterschiedlichsten Gütemaße, aber immer noch ist die Nachhallzeit die wesentliche Größe in der Raumakustik.

Grundsätzlich beschreibt diese die Dauer, bis die Energie auf den millionsten Teil abgeklungen ist, also einen Pegelabfall von 60dB ( $N=60$ ). Je nach Signal-Rauschabstand wird aber auch ein geringerer Pegelabfall gemessen und entsprechend extrapoliert. Da die Nachhallzeit im Allgemeinen nicht konstant ist, muss daher mit unterschiedlichen Ergebnissen von z.B. der  $T_{30}$  und der  $T_{15}$  gerechnet werden.

An sich wird die Nachhallzeit nicht direkt zu den Energiekriterien gezählt. Es kann diese aber über die Schröder-Rückwärtsintegration aus den Energiemessungen erfolgen, was sich rechnerunterstützte Verfahren zu nutze machen.

In wieweit Nachhallzeiten für gut zu befinden sind, hängt wesentlich von der Verwendung der Räumlichkeiten ab.

### 4.2.2 Nachhallzeit nach Eyring

Aus dem Energieabfall von 60dB, also einem Abklingen auf den millionsten Teil, ergibt sich bei einer Schallgeschwindigkeit von  $c = 344$  m/s die Nachhallzeit nach Eyring zu:

$$T_N = \ln \frac{E}{E_0} \cdot \frac{4V}{A \cdot c \cdot \ln(1-\alpha)} = 0,161 \frac{V}{-A \cdot \ln(1-\alpha)}$$

**Formel 4.1: Nachhallzeit nach Eyring**

Dabei handelt es sich bei  $V$  um das Raumbvolumen, bei  $A$  um die wirksame Fläche und bei  $\alpha$  um den Schallabsorptionsgrad. Dieser ist wie folgt definiert.

$$\alpha = \frac{\text{absorbierende Schallleistung}}{\text{auftreffende Schallleistung}}$$

**Formel 4.2: Schallabsorptionsgrad**

Der Absorptionsgrad kann demnach Werte zwischen Null und Eins annehmen. Schallharte Flächen, die 100% der einfallenden Energie reflektieren würden, hätten also den Wert  $\alpha = 0$ . Vollständige Absorption wird mit dem Wert  $\alpha = 1$  beschrieben.

### 4.2.3 Nachhallzeit nach Sabine

Eine Vereinfachung der Formel der Nachhallzeit nach Eyring ist die Nachhallzeit nach Sabine und gilt für kleine bis mittlere Schallabsorptionsgrade ( $\ln(1 - \alpha) \cong -\alpha$ ).

$$T_N = 0,161 \frac{V}{\alpha \cdot A}$$

**Formel 4.3: Nachhallzeit nach Sabine**

Hier und auch in der Formel von Eyring setzt sich der Nenner aus einer Summe aller Teilflächen mit dem jeweiligen materialabhängigem Absorptionsgrad zusammen.

### 4.2.4 Anfangsnachhallzeit EDT

Da oftmals die Nachhallzeit  $T_{60}$ , also ein Pegelabfall von 60dB, von den individuell empfundenen Nachhallzeiten abweicht, hat man die EDT (Early-Decay-Time), die Anfangsnachhallzeit, eingeführt.

Dieser Wert wird bestimmt, indem man den Verlauf des Schalldruckpegelabfalls von -10dB auf -60dB extrapoliert. Der so gewonnene Wert beschreibt im Allgemeinen den subjektiven Raumeindruck besser als die Nachhallzeit  $T_{60}$ . Der Grund hierfür ist, dass der Beginn der Abklingkurve meist am besten wahrgenommen wird und der Hörer daraus eine subjektive Nachhallzeit ableitet. Auch reicht oft der Dynamikbereich eines Raumes nicht aus, einen Pegelabfall von 60dB wahrnehmen zu können.

### 4.2.5 Deutlichkeitsgrad $D_{50}$

Für eine hohe Deutlichkeit ist eine frühe Energie ausschlaggebend. Frühe Energie bedeutet bei Sprache ein Zeitintervall von 50ms nach dem Direktanteil. Bildet man das Verhältnis von dieser frühen Energie zur Gesamtenergie, erhält man den Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$ .

$$D_{50} = \frac{W_{0..50}}{W_{ges}} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

**Formel 4.4: Deutlichkeitsgrad**

Eine gute Verständlichkeit wird bei Werten größer als 0,5 bzw. 50% erzielt.

### 4.2.6 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ und Klarheitsmaß $C_{80}$

Das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  gibt die Pegeldifferenz der vor bzw. nach 50ms eintreffenden Schallenergie an. Es findet Anwendung bei Sprache. Zur Beurteilung von Musik dient dementsprechend das Klarheitsmaß  $C_{80}$  mit den Integrationsgrenzen  $0...80$  und  $80... \infty$ .

Es lässt Rückschlüsse auf die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne und Unterscheidbarkeit verschiedener Instrumente zu.

$$C_{50} = 10 \log \frac{W_{0..50}}{W_{50..\infty}}$$

**Formel 4.5: Deutlichkeitsmaß**

$$C_{80} = 10 \log \frac{W_{0..80}}{W_{80..\infty}}$$

**Formel 4.6: Klarheitsmaß**

Das  $C_{50}$  beschreibt eine ausreichende Verständlichkeit bei Werten ab -8dB, ab -3dB spricht man von einer guten Verständlichkeit. Werte von über 2dB stehen für sehr gute Verständlichkeit.

Eine hohe Durchsichtigkeit von Musik wird bei  $C_{80} > 0$ dB erreicht, bei Werten zwischen -3dB

und 0dB wird der Zuhörer von der Musik umhüllt.

## 4.3 Messung 1

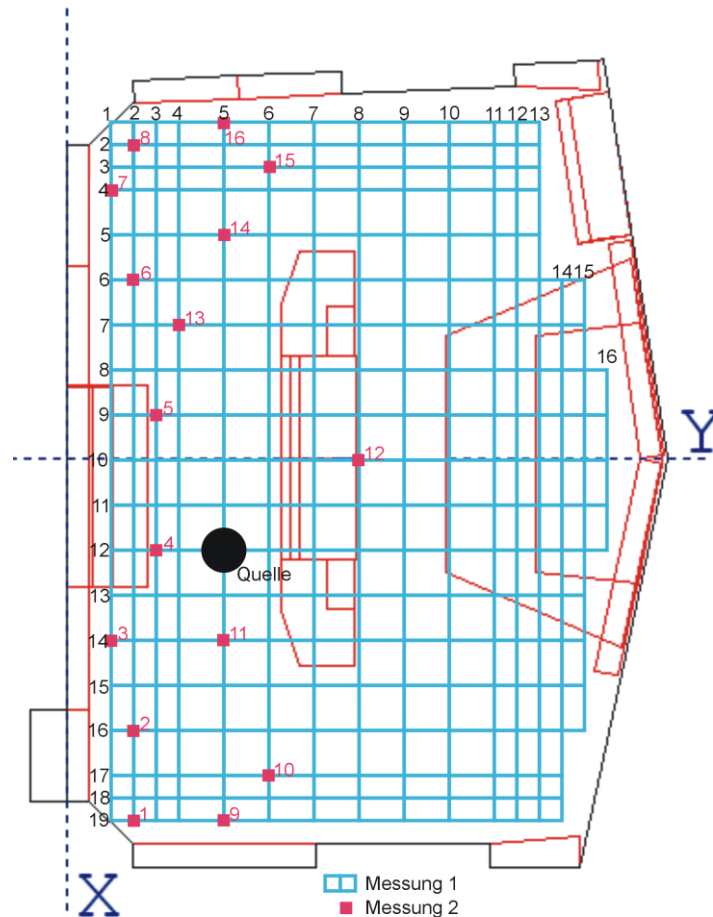
Ziel der Messung 1 ist eine ausführliche Erfassung der akustischen Parameter im Raum. Im Gegensatz zu allgemeinen Messungen, bei denen an wenigen ausgewählten Punkten im Raum gemessen wird und diese Messwerte dann gemittelt werden, sollten hier durch die Wahl eines engmaschigen Messrasters detaillierte Informationen über die akustischen Gegebenheiten gewonnen werden.

Hierzu wurde ein Raster entworfen, welches mit einer Maschenweite von 0,5m in den Raum eingepasst wurde.

Da im Besonderen die Auswirkungen der verschiedenen Absorber und Diffusoren von Interesse waren, wurde in der Nähe dieser der Abstand auf 0,25m reduziert. Damit ergeben sich 19 Messreihen entlang der Raumbreite mit jeweils 13 bis 16 Messpunkten je nach Raumtiefe. Insgesamt besteht das Raster somit aus 277 Messpunkten. Dieses ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Gezeigt werden der Grundriss des Regieraumes<sup>1</sup>, die akustischen Einbauten sowie das Mischpult in der Raummitte und das Holzpodest an der Rückseite. Die blauen Linien repräsentieren das Messraster. Messpunkt „1/1“ befindet sich oben links, „19/14“ unten rechts.

---

<sup>1</sup> Die Grundlage der Grafik ist der Simulation mit CATT-Acoustic entnommen und entsprechend bearbeitet.



**Abbildung 4.1: Raster Messung 1 und 2**

Alle Messpunkte befinden sich auf einer Höhe von 1,60m. Dies weicht zwar von der üblichen Messhöhe von 1,20m ab, stellt aber sicher, dass sich die Messmikrofone deutlich im Bereich der Absorbereinbauten befinden.

Die Schallquelle stand auf einer Höhe von 1,28m auf Rasterpunkt „12/5“ und bestand aus zwei Genelec 1032A, die Rückseite an Rückseite einen Kugelstrahler simulieren sollten.

### 4.3.1 Messaufbau

Durchgeführt wurde die Messung mit dem Softwarepaket WinMLS 2004. Dieses bietet die Möglichkeit, mit acht Messkanälen gleichzeitig zu messen, was bei der Dichte und Vielzahl der Messpunkte ein großer Vorteil war. Als Messmikrofone kamen acht AKG 480C mit Kugelcharakteristik zum Einsatz. Die genaue Auflistung der Speiseteile und Kapseln ist Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Messkanal	1	2	3	4	5	6	7	8
AKG 480C	M42	M41	M21	M18	M19	M20	M17	M43
AKG CK 91	M42b	M41b	M21b	M18b	M19b	M20b	M17b	M43b

Tabelle 4.1: Messmikrofone

Neben den zwei Lautsprechern von Genelec als Kugelquelle wurde als Mikrofonvorverstärker ein Swissonic AD8 verwendet. Dieser bietet acht Mikrofoneingänge mit Phantomspeisung und ermöglicht eine Verbindung zur Soundkarte, hier ein RME Digiface, via adat-Schnittstelle. Als Ausgang diente der Line-Out der Soundkarte.

Sämtliche Steuerung erfolgte über ein Acer Laptop (Intel Centrino, 1,4GHz), welches sich zusammen mit den anderen Geräten im angrenzenden Aufnahmerraum befand. Es mussten sich also keine Personen oder geräuschverursachende Messgeräte zum Zeitpunkt der Messungen im Regieraum aufhalten. Die Klimaanlage war abgeschaltet, es herrschten 24°C bei einer Luftfeuchtigkeit von 45%.

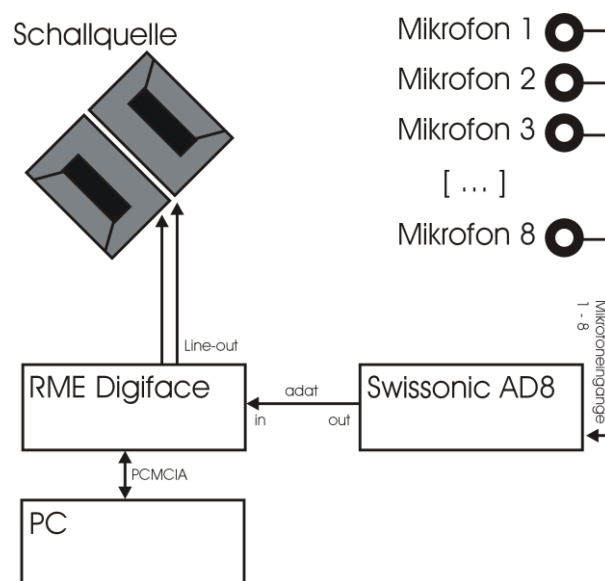


Tabelle 4.2: Messaufbau - Messung 1 und 2



Abbildung 4.2: Messung 1

### 4.3.2 Auswertung

Ziel dieser Messreihe war, neben den aktuellen Nachhallzeiten und Gütemaßen, vor allem Veränderungen dieser Parameter innerhalb des Raumes darzustellen. Im Vordergrund standen also nicht gemittelte Zahlenwerte, die im klassischen Sinne den Raum akustisch beschreiben, sondern ortsgebundene Werte, die in Bezug zu anderen Punkten im Raum gestellt werden sollten.

Um einen Parameter mit seinen Änderungen und Tendenzen dem Raum entsprechend darzustellen, ist ein Flächendiagramm gewählt worden. Gemäß dem Raster können so alle Messwerte ortsbezogen präsentiert werden. Für jedes Oktavband ergibt sich also ein Diagramm, welches einen akustischen Parameter entlang der 19 Messreihen mit bis zu 16 Messpunkten darstellt. Die Skalierung der Graphen ist individuell gewählt worden, um wesentliche Merkmale möglichst deutlich sichtbar zu machen.

Die Fläche entspricht dem beschriebenen Raster, die Symmetrieachse des Studios verläuft also horizontal durch Reihe 10, das Studiofenster im vorderen Teil befindet sich auf der linken Seite in der Mitte, die Diffusoren im hinteren Teil also auf der rechten. Auf dieser Seite befinden sich auch die durch die Raumgeometrie fehlenden Messpunkte.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Abstände der Messpunkte im Raster in den Diagrammen verzerrt dargestellt werden, da hier überall identische Abstände angenommen wurden.

### 4.3.2.1 Messung 1: $T_{30}$

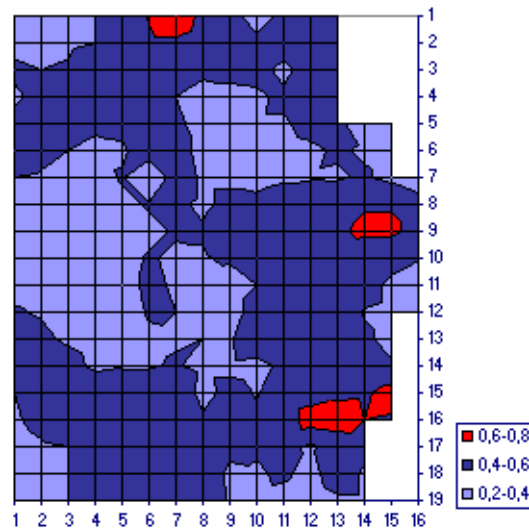


Abbildung 4.3:  $T_{30}$  [s] - 125Hz

In dem Oktavband „125Hz“ sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Bereiche erkennbar. Der dunkelblaue Bereich, der Werte der Nachhallzeit zwischen 0,4 und 0,6s darstellt, entspricht der gemittelten Nachhallzeit.

Interessant sind also die Bereiche, die hiervon abweichen. Es treten mehrere Zonen hervor, die deutlich weniger Nachhallzeit aufweisen. Offensichtlich wird in diesen Gebieten mehr Energie absorbiert als es durchschnittlich der Fall ist. Die hellblauen Flächen stellen ein Intervall von 0,2 bis 0,4s dar. In den Raumecken vorne (im Diagramm also links oben und unten) zeigt sich die Auswirkung der Bassabsorber, die bei 125Hz ihren größten Wirkungsgrad haben. In der vorderen Raummitte kommen neben der Wirkung der Kombiabsorber generell in diesem Bereich die Dämmmatte an der Decke, die sich zwischen siebter und 13. Reihe befindet, so wie der Bassabsorber unter dem Studiofenster zum tragen. Im hinteren Raumteil ist die Nachhallzeit unsymmetrisch verteilt. Während in Reihe 19 die Region um den Schlitzabsorber unterdurchschnittlich lange Nachhallzeit hat, fehlt auf der gegenüberliegenden Seite dieses Merkmal. Auch in der hinteren Raummitte fehlt die Symmetrie zwischen den Bereichen „6/10“ und „14/10“. Unmittelbar an den Diffusorelementen nimmt die Nachhallzeit erwartungsgemäß ab.

Die größten Werte treten im Bereich der Eingangstür, sowie im Bereich der Reihe 16 um die Messpunkte 12 bis 15 auf. Dies ist durch die unverkleidete Wand sowie die Tür in den Geräte Keller sicherlich einer der schallhärtesten Bereiche im Studio. In der Mitte vor den Diffusoren nimmt die Nachhallzeit ebenfalls erwartungsgemäß zu.



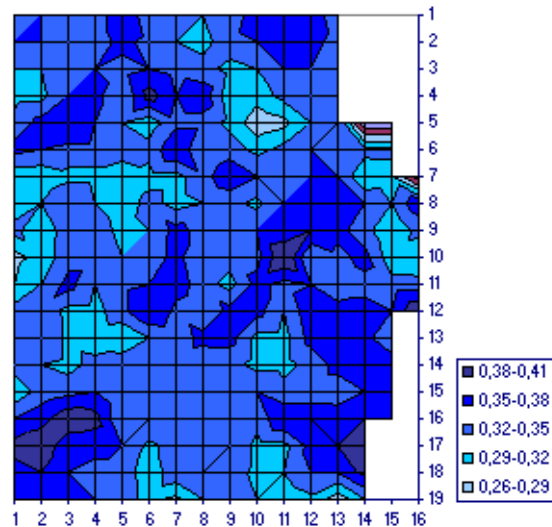


Abbildung 4.4:  $T_{30}$  [s] - 250Hz

Im Oktavband „250Hz“ dominiert der Bereich 0,32 bis 0,35s entsprechend der gemittelten Nachhallzeit aus Tabelle 3.3. Ein Anstieg der  $T_{30}$  ist vor allem im hinteren Raumteil vor den Diffusoren zu beobachten. Dass die Absorption in unmittelbarer Nähe der Diffusorelemente wieder abnimmt, könnte im Zusammenhang mit den hohen Absorptionsgraden der Deckenverstreberungen in diesem Bereich stehen.

Ebenfalls ist der Einfluss der Dämmmatte an der Decke über dem Studiofenster erkennbar.

Insgesamt aber sind die Werte eher gleichmäßig über den Raum verteilt und lassen sich nur schwer in zusammenhängende Zonen gleicher Größenordnung unterteilen.

Die extremsten Werte befinden sich wieder vor der schallharten Rückwand auf der linken Seite und im Bereich der Verbindungstür zum Aufnahmezimmer.

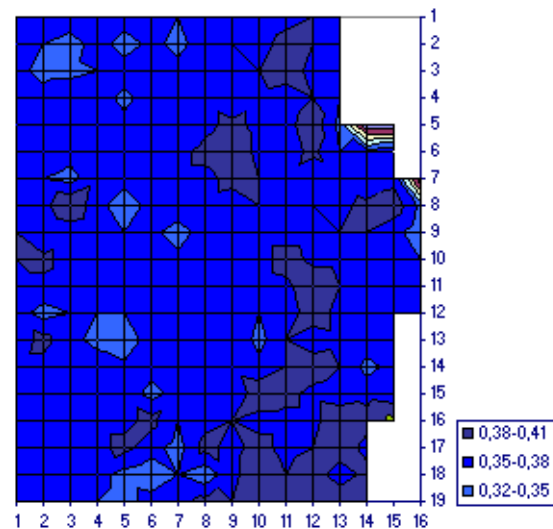


Abbildung 4.5:  $T_{30}$  [s] - 500Hz

Das Oktavband „500Hz“ hat seinen Mittelwert bei 0,37s. Im Diagramm ist gut zu erkennen, dass sich der entsprechende Wertebereich über den gesamten Raum verteilt. Abweichungen im vorderen Bereich zeichnen sich durch geringere Nachhallzeiten aus, Abweichungen im hinteren Bereich durch höhere. Hier wird bereits das LEDE-Konzept sichtbar, dass seine Trennung ungefähr in der Raummitte (Messpunktspalte 8) hat.

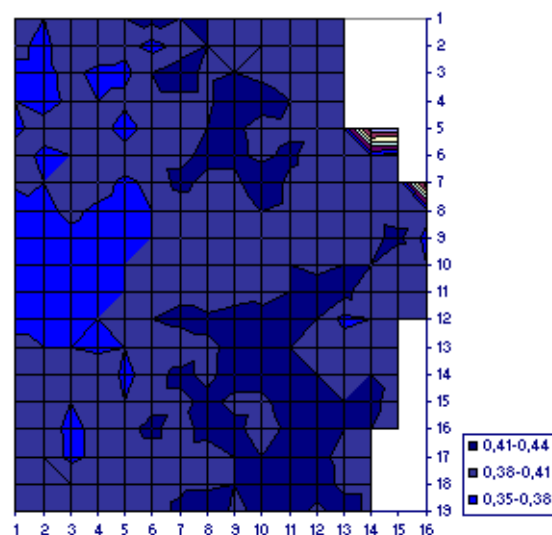
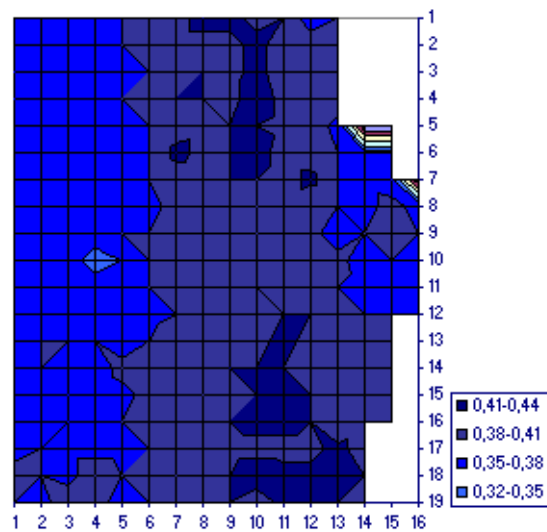


Abbildung 4.6:  $T_{30}$  [s] - 1000Hz

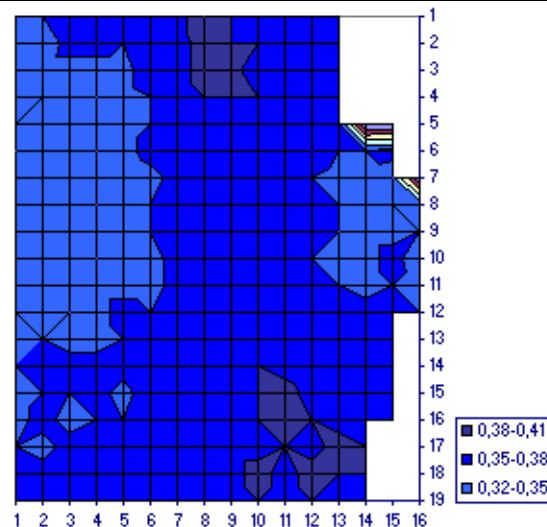
Im Oktavband „1000Hz“ lassen sich wiederum wesentlich deutlicher Bereiche mit verschiedener Nachhallzeit erkennen. Abweichungen vom Durchschnittswert kommen im Bereich der vorderen Raummitte vor, wo die Dämmmatte an der Decke für hohe Absorption

sorgt. In der hinteren Raumhälfte sind wiederum überwiegend mittig höhere Werte der  $T_{30}$  zu erkennen. Allerdings treten diese auch wieder unsymmetrisch im Raum auf.



**Abbildung 4.7:**  $T_{30}$  [s] - 2000Hz

Im Oktavband „2000Hz“ zeigt sich eine deutliche Unterteilung von verschiedenen Bereichen bezüglich der Nachhallzeit. Die größte Absorption findet wieder im Bereich der Dämmmatte an der Decke statt, der nächste Wertebereich spiegelt den insgesamt höher bedämpften vorderen Bereich des Studios wieder. Im ‚Live End‘ finden sich Werte mit der höchsten Nachhallzeit. Ganz offensichtlich zeigt sich hier das LEDE-Konzept. In dem Bereich der Kombiabsorber, die bis Messspaltspalte 8 reichen, treten niedrige Nachhallzeiten auf, dahinter steigen die Werte an. Erst wieder im Bereich der Diffusoren nehmen die Werte wieder ab, da diese wieder eine höhere Absorption aufweisen.



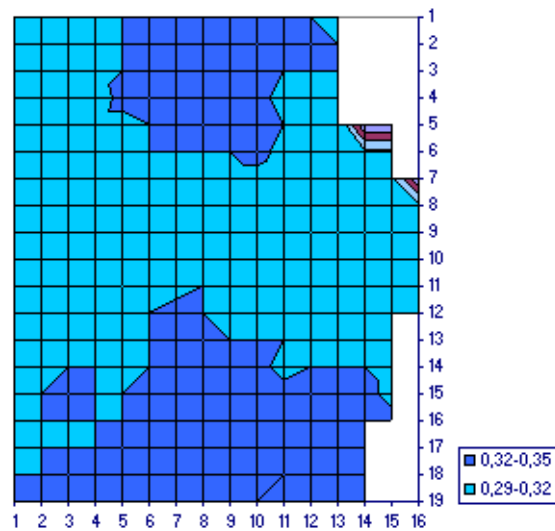
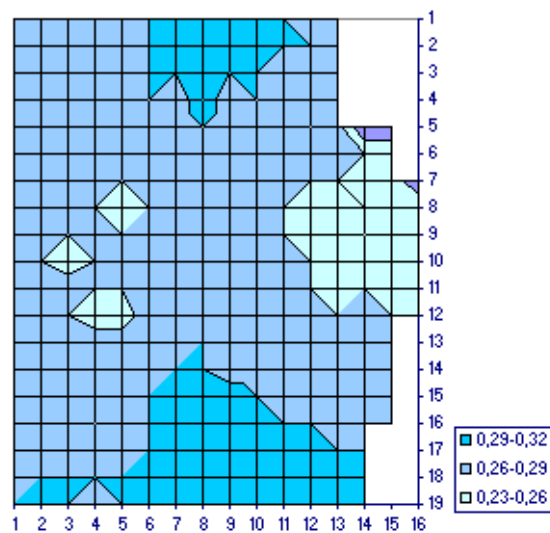
**Abbildung 4.8:**  $T_{30}$  [s] - 4000Hz

Im Oktavband „4000Hz“ kommt es zu den gleichen Verteilungen wie bei 2000Hz. Allerdings ist bereits zu beobachten, dass in der Raummitte die Nachhallzeit Werte annimmt, wie sie sonst im „Dead-End“ vorkommen.

Diese Tendenz ist in den Oktavbändern „8000Hz“ und „16000Hz“ noch deutlicher ausgeprägt.

Offensichtlich verhalten sich die Schlitzabsorber an den Seiten zunehmend auch als Reflektor für steigende Frequenzen. Dass es zu Reflexionen an diesen Absorbern kommt, belegen die deutlich wahrnehmbaren Flatterechos, die sich bei entsprechender Anregung zwischen den Seitenwänden im hinteren Bereich ausbilden.

Ein weiterer Grund für etwas geringere Nachhallzeiten im mittleren Bereich könnte auch das Mischpult darstellen.

Abbildung 4.9:  $T_{30}$  [s] - 8000HzAbbildung 4.10:  $T_{30}$  [s] - 16000

### 4.3.2.2 Messung 1: EDT

Unter EDT versteht man die Anfangsnachhallzeit, die aus einem Schalldruckpegelabfall von 0 bis -10dB extrapoliert wird. Dieser anfängliche Teil des Nachhalls ist maßgeblich für die subjektive Empfindung der Nachhallzeit.

In der Messtechnik ist dieser Parameter vor allem in Relation zur Gesamtnachhallzeit zu sehen.

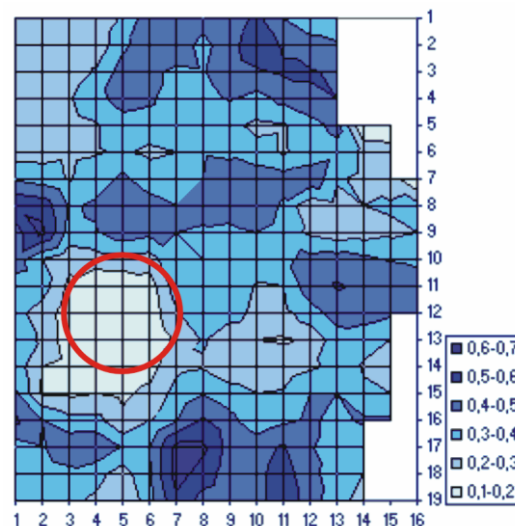
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
T <sub>30</sub>	0,40	0,34	0,37	0,40	0,38	0,36	0,32	0,28
EDT	0,35	0,26	0,30	0,36	0,36	0,34	0,29	0,25

**Tabelle 4.3: EDT im Vergleich zur T<sub>30</sub> [s] (gemittelt)**

Bei Messung 1 ergaben sich für die EDT Werte, die zumindest im Vergleich gemittelter Werte unter denen der T<sub>30</sub> liegen. Eine Gegenüberstellung findet sich in Tabelle 4.3.

Durchschnittlich ist also mit einem schnelleren Pegelabfall zu Beginn, also innerhalb des ersten 10dB-Abfalls, zu rechnen.

Wie sich die Werte an den verschiedenen Messpunkten im Raum verhalten, lässt sich wieder anhand von Diagrammen entsprechend dem Raster zeigen.



**Abbildung 4.11: EDT [s] - 125Hz**

Im Vergleich zu den Darstellungen der T<sub>30</sub> fällt auf, dass die EDT wesentlich deutlicher von der Position der Schallquelle abhängt. Es bestätigt sich die größere Platzabhängigkeit der Anfangsnachhallzeit. Der Mittelpunkt dieser befand sich in Messung 1 an Punkt 12/5. In der Grafik für die EDT für 125Hz ist deutlich ein Bereich um die Lautsprecher erkennbar, der extrem niedrige Werte aufweist. Es findet also ein wesentlich schnellerer Abfall der Nachhallzeit statt als es im größeren Abstand von der Quelle der Fall ist. Da man in diesem Oktavband von einer kugelförmigen Abstrahlung ausgehen kann, ergibt sich für diesen Bereich niedriger EDT-Werte, der radial um die Quelle auftritt, eine Ausdehnung in der Größenordnung des Hallradius. Dieser berechnet sich für kugelförmige Abstrahlung wie folgt:

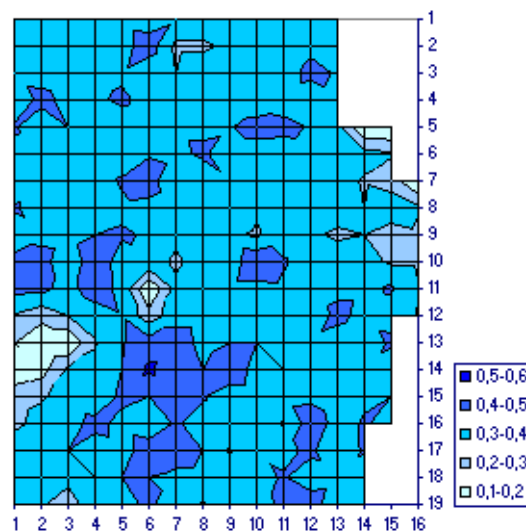
$$r_H [m] = 0,057 \sqrt{\frac{V[m^3]}{T[s]}}$$

**Formel 4.7: Hallradius für Kugelstrahler [Cremer 1]**

Damit ergibt sich im Regieraum, ausgehend von einem Volumen von ca.  $150\text{m}^3$  und einer Nachhallzeit von  $0,4\text{s}$  bei  $125\text{Hz}$ , ein Hallradius von ca.  $1,10\text{m}$ . Dieser ist als Kreis um den Quellenmittelpunkt (12/5) in Abbildung 4.11 eingezeichnet.

Erst oberhalb dieser Grenze zwischen Direktschall und Diffusanteil kann also die Auswirkung des Raumes auf die EDT betrachtet werden.

Bei höheren Frequenzen ist der Hallradius nicht mehr so deutlich als Kreis um die Quelle zu erkennen. Hier macht sich das Bündelungsmaß der Lautsprecher bemerkbar, welches dann auch in die Berechnung des Hallradius hineinfließt. Es bilden sich jeweils vor den Lautsprechern Bereiche aus, die sehr niedrige EDT-Werte besitzen. Gut erkennbar ist dies im Oktavband „ $1000\text{Hz}$ “.

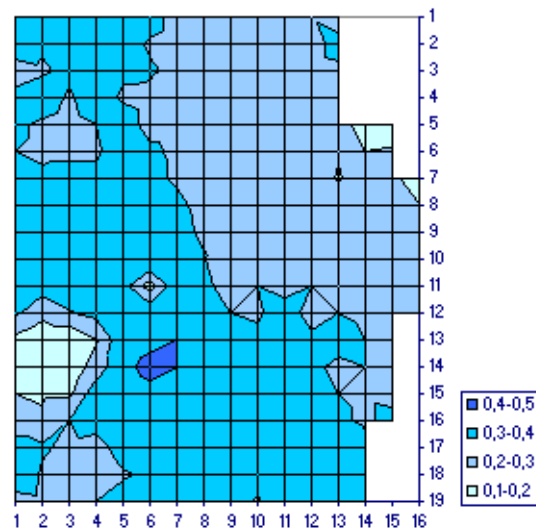


**Abbildung 4.12: EDT [s] - 1000Hz**

Bei dem Lautsprecher, der in den Raum abstrahlt, ist dieser Bereich recht klein, beim Monitor, der in Richtung Wand zeigt, deutlich größer. Hier kommt es durch die Nähe zu reflektierenden Begrenzungen bereits zu frühen Reflexionen, die die Energie in diesem Bereich erhöhen.

Neben diesen Erscheinungen in Quellennähe zeigen sich im Raum Regionen höherer Werte. Aber auch hier bleibt die Quelle mit ihren spezifischen Abstrahlverhalten weiter sichtbar.

Grenzen zwischen Wertebereichen verlaufen entsprechend des Lautsprecherzwischenraumes, also senkrecht auf die  $0^\circ$ -Achse. Besonders deutlich wird dies im Oktavband „8000Hz“.



**Abbildung 4.13: EDT [s] - 8000Hz**

Wie bereits erwähnt, ist in der Raumakustik die Beziehung von EDT zur Gesamtnachhallzeit von Interesse. Will man z.B. in Konzertsälen verschiedene Platzbereiche beurteilen, zieht man das Verhältnis von EDT zu Gesamtnachhallzeit heran. Dabei wird ein Platz für Musikdarbietungen als umso besser bewertet, je größer das Verhältnis ist [Fasold].

Betrachtet man nun das Verhältnis von EDT und der  $T_{30}$ , ergibt sich folgender Zusammenhang: Ist das Verhältnis gleich eins, sind also beide Werte gleich, so ist von einem linearen Verlauf der Nachhallzeit auszugehen, da beide Werte durch Extrapolation der entsprechenden Abschnitte der Nachhallkurve gewonnen werden.

Ist das Verhältnis größer als eins, muss ein langsamerer Abfall bis  $-10\text{dB}$  gefolgt von einem schnelleren ab  $-10\text{dB}$  vorliegen. Insgesamt wird die Nachhallgerade also „aufgebläht“ sein.<sup>1</sup>

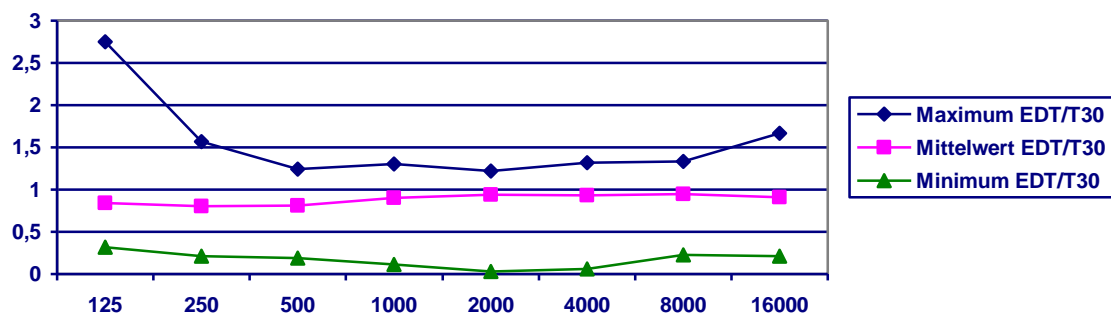
„Durchhängende“ Nachhallverläufe sind demnach bei einem Verhältnis kleiner eins zu erwarten.

In jedem Oktavband ist dieses Verhältnis für jeden Messpunkt gebildet worden. In Tabelle 4.4 sind die jeweiligen Minima, Maxima und Mittelwerte angeführt.

<sup>1</sup> [Cremer 1] unterscheidet zwischen „aufgeblähten“ und „durchhängenden“ Nachhallgraden



f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Minimum EDT/T <sub>30</sub>	0,32	0,21	0,19	0,11	0,03	0,06	0,23	0,21
Maximum EDT/T <sub>30</sub>	2,75	1,57	1,24	1,30	1,22	1,32	1,33	1,67
Mittelwert EDT/T <sub>30</sub>	0,84	0,80	0,81	0,90	0,94	0,93	0,95	0,91

Tabelle 4.4: Verhältnis EDT zu T<sub>30</sub>Abbildung 4.14: Verhältnis EDT zu T<sub>30</sub>

Die Mittelwerte liegen zwischen 0,80 und 0,95. Da die gemittelten Werte der EDT bereits kleiner als die der T<sub>30</sub> waren, ist klar, dass das Verhältnis kleiner eins ist. Die Tatsache, dass die Werte besonders ab 1000Hz nahezu gleich eins sind, zeigt, dass sich der Regieraum durch lineare Verläufe der Nachhallzeit auszeichnet. Auch bei den tieferen Oktavbändern zeugen Werte von 0,80 bis 0,84 von geringen Nichtlinearitäten.

Wie aus Tabelle 4.4 ersichtlich ist, kommt es aber auch zu Werten mit größerer Abweichung. Wieder kann man die Verhältniswerte auch ortsbezogen darstellen.

Da die extremsten Werte der EDT in der Nähe der Quelle zu finden waren, zeichnet sich diese auch nach Bildung des Verhältnisses deutlich ab.

Das Diagramm des Verhältnisses für 125Hz in Abbildung 4.15 zeigt wieder klar den Bereich entsprechend des Hallradius.

Auch insgesamt stellen sich die Diagramme der Verhältniswerte sehr ähnlich denen der EDT dar: Deutliche Erscheinung der Quelle und diagonal verlaufende Wertebereiche.

Dass sich die Daten der EDT mehr in den Verhältnis-Diagrammen widerspiegeln als die Werte der T<sub>30</sub>, ist auf den deutlich größeren Wertebereich der EDT zurückzuführen und verdeutlicht, dass sich die Nachhallzeiten im Raum nur in wesentlich kleineren Intervallen bewegen. Schließlich wird ja die T<sub>30</sub> aus einem Pegelbereich gebildet, der bereits zum Diffusanteil des Nachhalls zählt, also eine wesentlich homogenere Energieverteilung im

Raum aufweist.

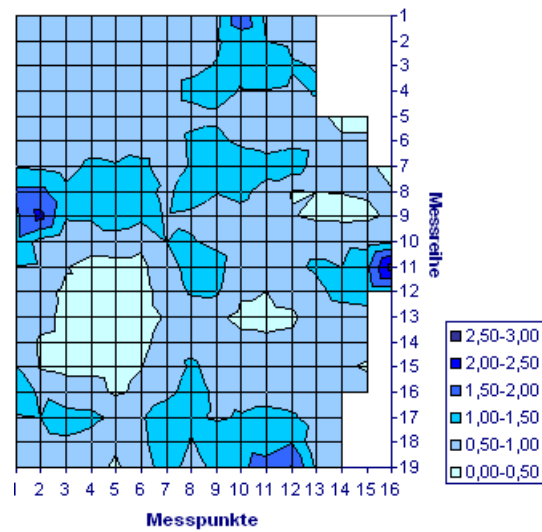


Abbildung 4.15: EDT/T<sub>30</sub> - 125Hz

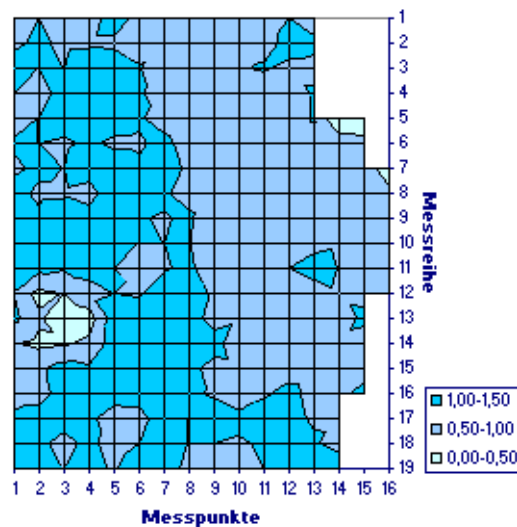


Abbildung 4.16: EDT/T<sub>30</sub> - 4000Hz

### 4.3.2.3 Messung 1: D<sub>50</sub>, C<sub>50</sub>, C<sub>80</sub>

Neben den klassischen Gütemaßen wie Nachhallzeit und EDT sind auch der Deutlichkeitsgrad (D<sub>50</sub>), das Deutlichkeitsmaß (C<sub>50</sub>) und das Klarheitsmaß (C<sub>80</sub>) bestimmt worden.

Diese Parameter werden aus Energiebetrachtungen an einem Ort gewonnen, indem je nach Definition (vgl. Kapitel 4.2) bestimmte Anteile des Energieverlaufes zueinander in Bezug

gesetzt werden.

Die Werte des  $D_{50}$ , dargestellt in Tabelle 4.5, liegen bis auf vernachlässigbar wenige deutlich über der 50% -Marke. Mit diesen Ergebnissen von wenigsten über 70%, meist aber deutlich höher, kann von einer sehr guten Verständlichkeit ausgegangen werden. Offensichtlich tritt also ein wesentlicher Teil der Energie am jeweiligen Messpunkt innerhalb der ersten 50ms auf.

f [Hz]		125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
$D_{50}$ [%]	Minimum	48	80	81	76	76	77	81	82
	Maximum	98	111	98	98	99	98	98	99
	Mittelwert	86	92	90	87	87	88	91	93
$C_{50}$ [dB]	Minimum	0,1	5,5	6,2	4,8	5,1	5,3	6,3	6,7
	Maximum	18,0	17,6	16,6	16,4	18,2	17,9	18,0	18,4
	Mittelwert	8,8	10,8	10,1	8,6	8,6	9,3	10,7	12,3
$C_{80}$ [dB]	Minimum	7,2	11,5	10,5	10,4	10,1	10,8	12,4	14,0
	Maximum	24,2	24,6	22,0	21,1	22,5	23,3	24,2	25,6
	Mittelwert	14,4	16,9	15,4	13,7	13,9	14,9	16,9	19,1

Tabelle 4.5:  $D_{50}$ ,  $C_{50}$  und  $C_{80}$  aus M1

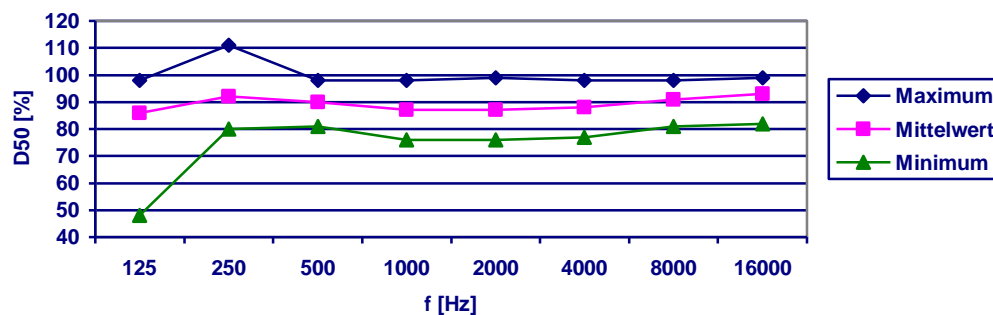
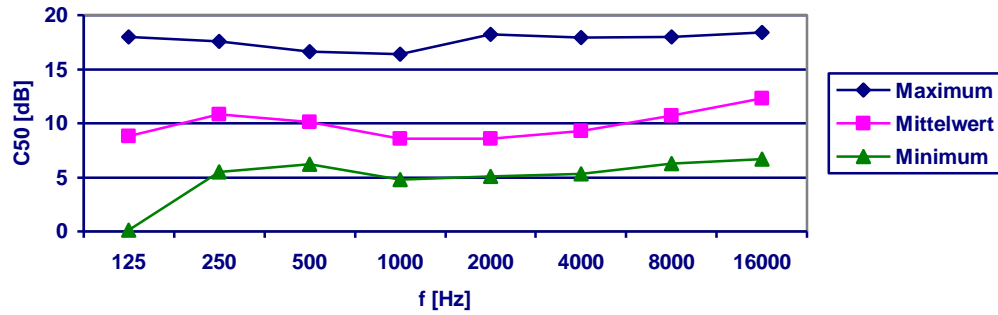
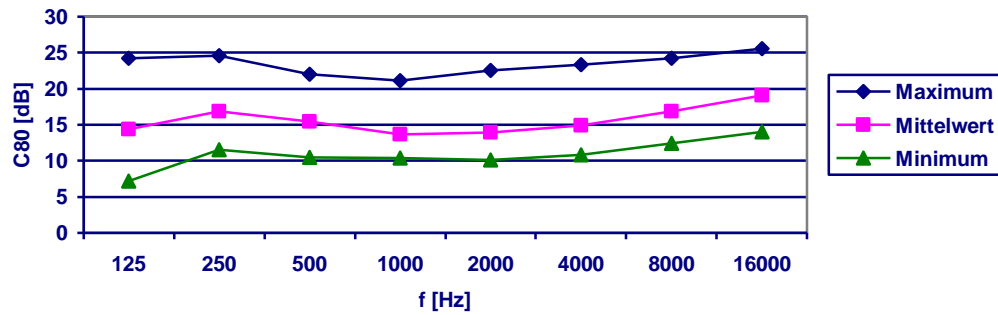


Abbildung 4.17:  $D_{50}$  [%] aus M1

Abbildung 4.18:  $C_{50}$  [dB] aus M1Abbildung 4.19:  $C_{80}$  [dB] aus M1

Die Verteilung der Werte im Raum ist in den folgenden Abbildungen wieder graphisch dargestellt worden.

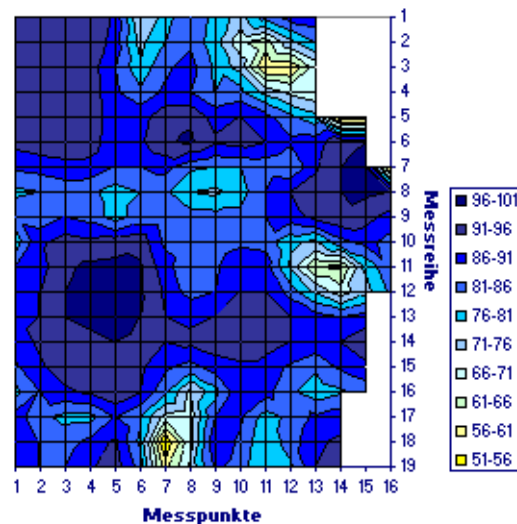
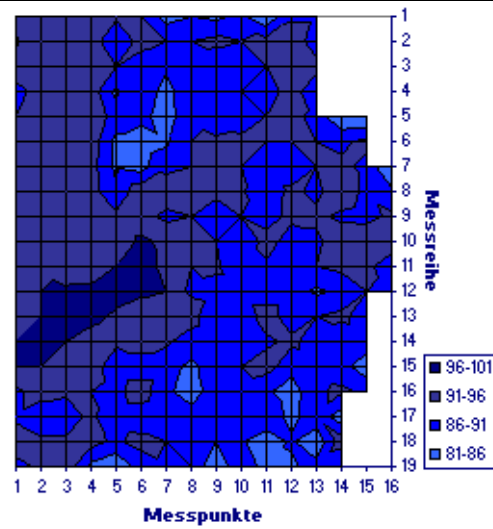
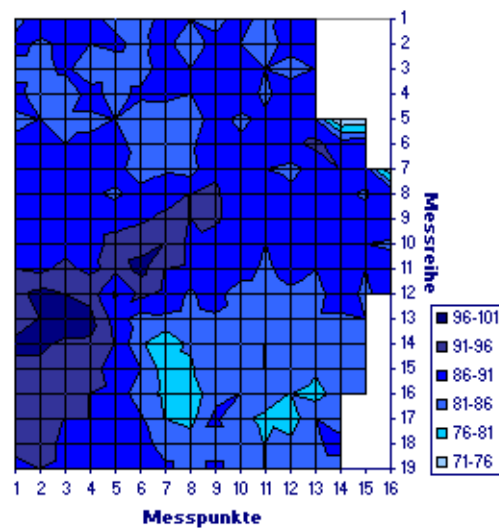


Abbildung 4.20:  $D_{50}$  [%] - 125Hz, Messung 1

Auch hier spiegelt sich mit zunehmender Frequenz die Richtcharakteristik der Lautsprecher wieder. So finden sich die höchsten Werte in Membrannähe der beiden Lautsprecher. Entsprechend der Richtwirkung zeigen sich im größeren Abstand geringere Werte. Das Bündelungsmaß hat deutlichen Einfluss auf die Energieverteilung. Ab dem Frequenzband „500Hz“ aufwärts ist auch wieder die LEDE-Konstruktion des Regieraires erkennbar. Es treten im hinteren Raumteil, also im Live-End, vermehrt Bereiche auf, die ein geringeres  $D_{50}$  besitzen. Durch die geringere Absorption in diesem Bereich kommt es zu mehr Reflexionen und es ergibt sich ein größerer Energieanteil nach 50ms.

Aufgrund der schräg zum Raum verlaufenden Lautsprecherfronten ist dies im hinteren linken Studiobereich deutlicher als im rechten, da hier die Keule der Richtcharakteristik für einen größeren Direktschallanteil sorgt.

Abbildung 4.21:  $D_{50}$  [%] - 500Hz, Messung 1Abbildung 4.22:  $D_{50}$  [%] - 2000Hz, Messung 1

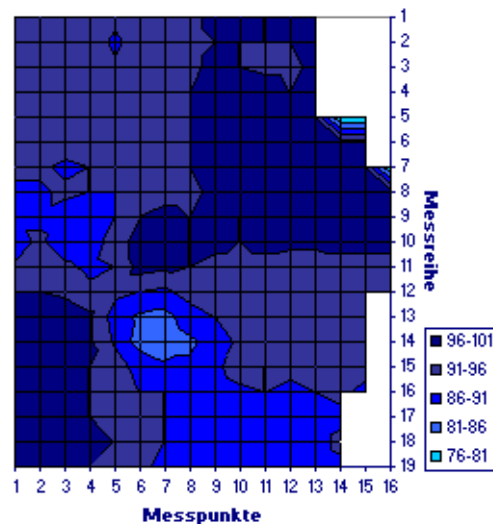


Abbildung 4.23:  $D_{50}$  [%] - 16000Hz, Messung 1

Die Gütemaße  $C_{50}$  und  $C_{80}$  sind ebenfalls über Energieverhältnisse definiert. Allerdings wird der frühe Energiebereich von 50ms bzw. 80ms nicht auf die Gesamtenergie bezogen, sondern auf den folgenden Energieanteil. Außerdem werden sie nicht in Prozent sondern in dB angegeben.

An den Werten des  $D_{50}$  ist bereits beobachtet worden, dass sich die wesentlichen Energieerscheinungen innerhalb der ersten 50ms abspielen. Die hohen Werte des Deutlichkeitsgrades belegen dies.

Entsprechend sind für das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  auch hohe Werte zu erwarten.

Da man bereits von einer guten Verständlichkeit ab -3dB ausgehen kann, zeichnet sich der Regieraum mit durchweg positiven Ergebnissen deutlich durch hervorragende Werte aus. Die gemittelten Werte in Tabelle 4.5 liegen sogar alle deutlich über der 2dB-Grenze, ab der von einer sehr guten Verständlichkeit ausgegangen wird.

Die Verteilung der Werte über den Raum ergeben aufgrund der frühen Energie ähnliche Bilder wie die des  $D_{50}$ .

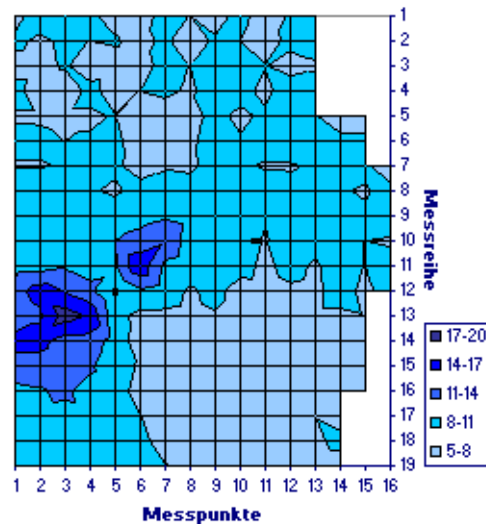


Abbildung 4.24:  $C_{50}$  [dB] - 2000Hz. Messung 1

Dass die Bilder der  $C_{80}$  ebenso wie die der  $C_{50}$  ausfallen, bestätigt nochmals, dass sich die wesentlichen energetischen Abläufe im Raum innerhalb der ersten 50ms abspielen.

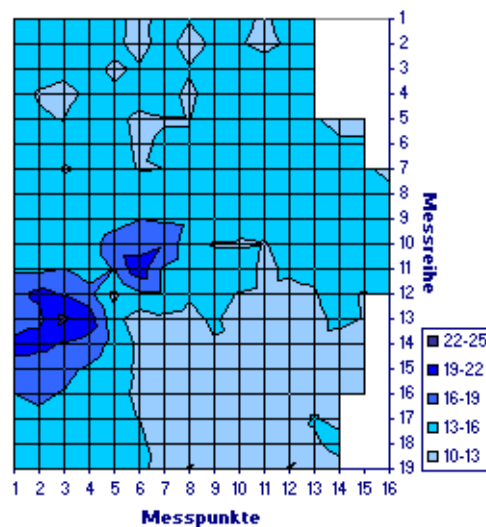


Abbildung 4.25:  $C_{80}$  [dB] - 2000Hz, Messung 1

Insgesamt wird in der Messung 1 deutlich, dass sich ein Raum akustisch wesentlich genauer beschreiben lässt, wenn ein sehr enges Raster an Messpunkten gewählt wird. Erst dadurch lassen sich Regionen ähnlicher Eigenschaften feststellen und Tendenzen über den Raum erkennen. Im Gegensatz zu gemittelten Messwerten weniger Messpunkte zeigt sich auf diese Weise deutlich das Grundkonzept des Studios, die LEDE-Akustik. Aber auch Rückschlüsse über die Wirkung von Oberflächen im Raum kann erst sinnvoll durch die Wahl eines



engmaschigen Messrasters veranschaulicht werden. Durch die Auswertung der Gütemaße ist des Weiteren auch eine Betrachtung der Energieverläufe möglich.

## 4.4 Messung 2

Messung 2 diente dazu, Aufschluss über die Wirkung der Kombiabsorber, die sich im Dead-End befinden, zu gewinnen.

### 4.4.1 Messaufbau

Alle Absorber sind in ein Einbaugerüst von 25cm Tiefe eingebaut. Dies bestimmt auch die jeweilige Fläche. Die Kombiabsorber bestehen zunächst aus einer Mineralfaserplatte von 5cm Dicke, die direkt an der Außenwand des Studios angeklebt ist. Es folgt eine Sperrholzplatte aus Buche der Dicke 3mm. Hier existieren zwei Absorbertypen, A1 und A2, die sich nur in der Einbautiefe der Platte unterscheiden. Typ 1 sind alle Absorber oben mit einer Einbautiefe von 17cm. Absorber vom Typ 2 befinden sich darunter, also in der Wandmitte, und weisen einen Plattenabstand zur Wand von 14cm auf. Die Platten sind durch einen Montagerahmen fest mit dem Einbaugerüst verbunden. Vor der Plattenkonstruktion befindet sich ein Abdeckrahmen, der die sichtbare Stoffbespannung trägt und zudem eine Weichschaumstoffmatte vom Typ „audiotec S204“ von 5cm Dicke enthält. Ein Querschnitt durch diese Kombiabsorber ist in Abbildung 4.26 dargestellt.

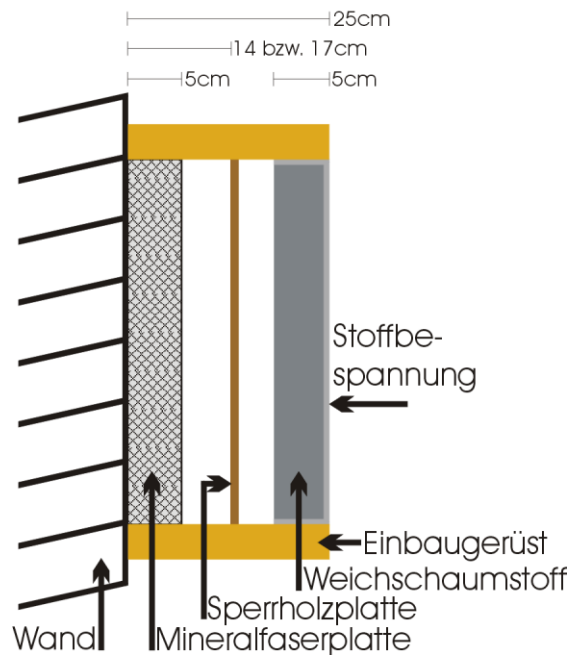


Abbildung 4.26: Aufbau der Kombiabsorber

Die Bassabsorber (A3) in den vorderen Eckbereichen sind Plattenabsorber. Direkt hinter einem Abdeckrahmen mit Stoffbespannung befindet sich eine Sperrholzplatte aus Buche, deren Rückseite mit einer 1,6mm dicken Dämmfolie (Bituthene V) beklebt ist. Innenseitig an der Absorberrückwand befindet sich eine 5cm dicke Mineralfaserplatte. Der komplette Absorber ist in das Einbaugerüst gestellt.

Die Abdeckrahmen mit den Weichschaumstoffmatten können ohne großen Aufwand entfernt werden, sodass die jeweiligen Sperrholzplatten sichtbar werden.

In dieser Messung konnten also im Vergleich zu Messung 1 Änderungen der Nachhallzeit bei fehlendem Abdeckrahmen bestimmt werden.

Dazu wurden verschiedene Raumzustände definiert. Unter „A“ werden alle Absorber der rechten Seitenwand (Türseite) inklusiv dem rechten Bassabsorber zusammengefasst. „B“ bezeichnet alle Abdeckrahmen der linken Seitenwand sowie den linken Bassabsorber. Die der Stirnseite des Studios werden als „C“ bezeichnet.

Mit diesen drei Gruppen ergeben sich acht Raumzustände:

- Normalzustand, alle Absorber eingebaut, wie in Messung 1
- ohne A
- ohne A und B
- ohne A und C
- ohne A, B und C

- ohne B
- ohne B und C
- ohne C

Zu jedem dieser Raumzustände wurde an 16 Punkten gemessen. Die einzelnen Messpunkte sind in Abbildung 4.1 mit roten Quadraten gekennzeichnet. Es handelt sich um ausgewählte Punkte des Rasters aus Messung 1. Da auch die Schallquelle unverändert blieb, konnten für den Normalzustand die Ergebnisse aus Messung 1 für den jeweiligen Messpunkt übernommen werden. Alle weiteren Raumzustände wurden entsprechend dem Aufbau aus Messung 1 durchgeführt.



Abbildung 4.27: Messung 2 - "ohne B und C"

## 4.4.2 Auswertung

Die Messungen lieferten also für jeden der 16 Messpunkte acht Werte, entsprechend der Raumzustände.

Es konnte also zu jeder Messposition ein Diagramm erstellt werden, welches die Nachhallzeiten  $T_{30}$  über der Frequenz darstellt. Erwartungsgemäß steigt im Allgemeinen diese an, je mehr absorbierendes Material aus dem Raum entfernt wurde.

Betrachtet man die Abbildung 4.28, ist dies am Beispiel der 1000Hz gut erkennbar.

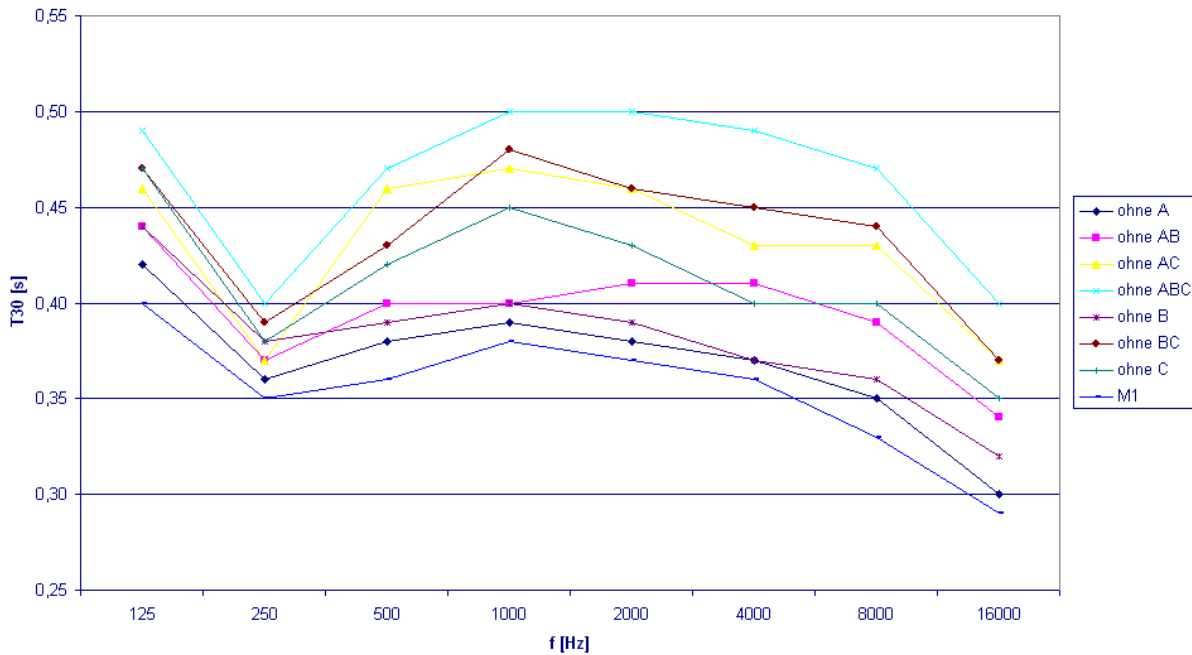


Abbildung 4.28:  $T_{30}$  für verschiedene Raumzustände, Messpunkt 1

„M1“ bezeichnet die Werte, die aus Messung 1 übernommen wurden. Es sind also alle Absorber eingebaut, und die Nachhallzeit ist die geringste. Wird die Absorbergruppe „A“ entfernt, steigt die  $T_{30}$  an Messpunkt 1, also an der gegenüber liegenden Wand, geringfügig an („ohne A“). Ein weiterer Anstieg wird durch das Herausnehmen der Gruppe „B“ erreicht. Den größten Einfluss hat offensichtlich Gruppe „C“, die die größte wirksame Fläche beisteuert. Fehlen schließlich alle drei Gruppen, ist die Nachhallzeit am größten.

Die geringsten Veränderungen finden bei 250Hz statt. Noch deutlicher wird dies z.B. in dem Diagramm für Position 5 (Abbildung 4.29). Der Grund ist darin zu sehen, dass die Kombiabsorber bei 250Hz ihren geringsten Wirkungsgrad aufweisen (vgl. Tabelle 3.2). Zudem befindet sich Messpunkt 5 in der Nähe des Bassabsorbers, der sich unter dem Studiofenster befindet und in allen Raumzuständen unverändert, also voll wirksam bleibt.

Auch im Frequenzband „125Hz“ nimmt die Nachhallzeit an den meisten Messpunkten deutlich weniger zu, schließlich ist bei den Kombiabsorbern für die Wirkung bei 125Hz die Sperrholzplatte verantwortlich, die ja trotz fehlendem Abdeckrahmen unverändert im Raum wirken kann.

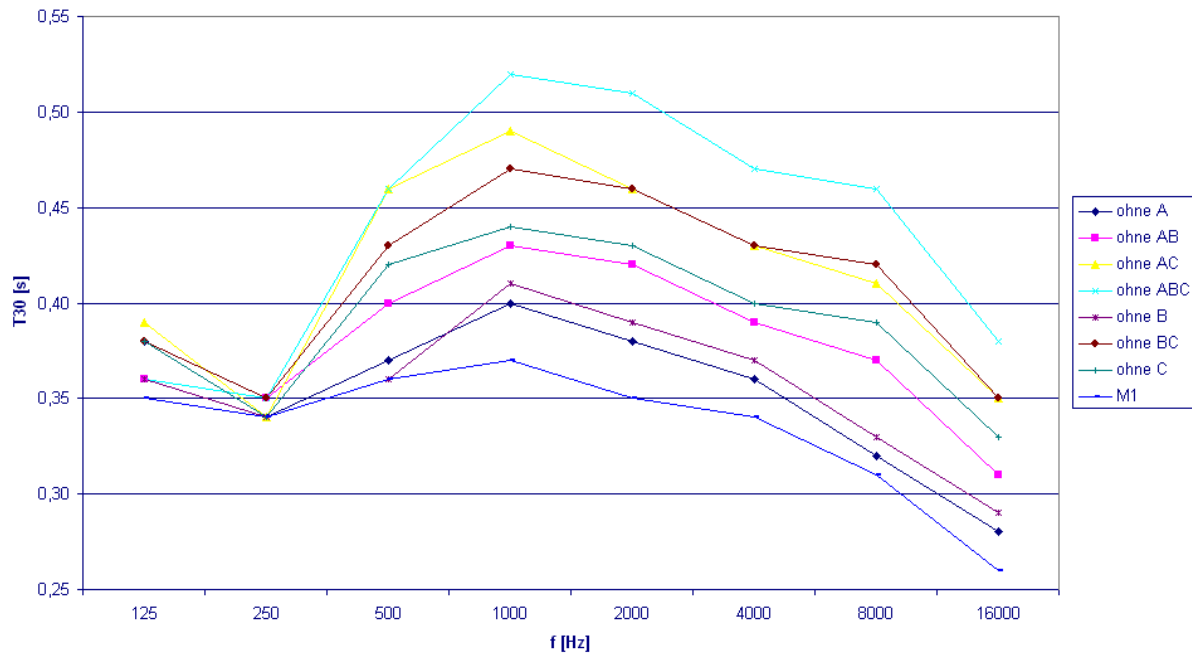


Abbildung 4.29:  $T_{30}$  für verschiedene Raumzustände, Messpunkt 5

Die wesentliche Veränderung der Absorber besteht in der Entfernung der Weichschaumstoffplatte.

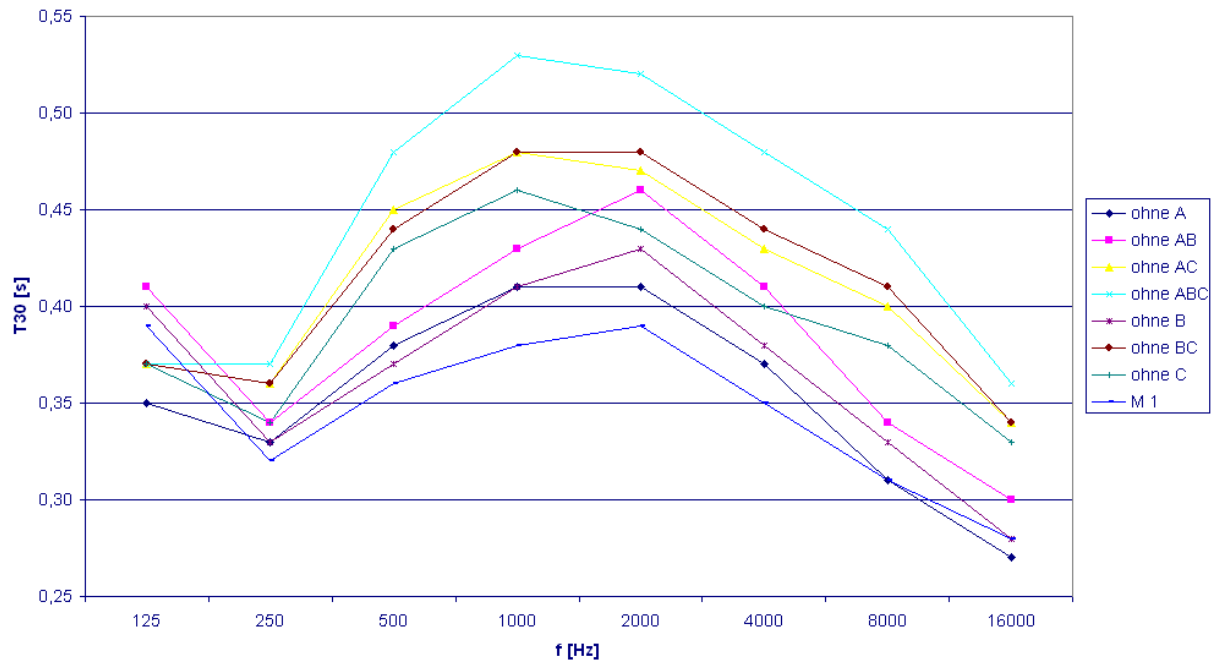
Betrachtet man die Herstellerdaten der Schaumstoffplatte in Tabelle 4.6, zeigt sich, in welchen Frequenzbereichen Veränderungen der Nachhallzeit im Studio grundsätzlich zu erwarten sind.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Weichschaumstoffmatte „Audiotec S204“	19	53	81	100	94	100	-	-

Tabelle 4.6: Absorptionsgrad des Herstellers [%]

Natürlich spielt für die Absorptionseigenschaft auch der Wandabstand eine Rolle, aber bei Abständen zwischen acht und elf Zentimetern (vgl. Abbildung 4.26) wirkt sich das Luftvolumen erst oberhalb von 500 Hz auf die Absorptionseigenschaften des Schaumstoffes aus.

Tatsächlich zeigen sich im Allgemeinen die größten Steigerungen der Nachhallzeit ab 1000 Hz aufwärts, wo der Weichschaumstoff nahezu 100% absorbiert. Die geringsten Anstiege treten bei 125 und 250 Hz auf. Die Plattenabsorber, bzw. die Platten der Kombiabsorber, sind für die Absorption der tiefen Frequenzen verantwortlich.

Abbildung 4.30:  $T_{30}$  für verschiedene Raumzustände, Messpunkt 12

### 4.4.3 Plattenabsorber

Dieser Absorbertyp, auch Resonanzabsorber genannt, zeichnet sich durch Wirkung in tiefen Frequenzbereichen aus. Im Vergleich zu porösen Absorbern, die auf Grund ihres  $\lambda/4$ -Wirkbereiches eine enorme Einbautiefe bei vergleichbaren Frequenzen benötigen, kommen die Plattenabsorber mit einer wesentlich geringeren Einbautiefe aus. Allerdings wirken sie wesentlich schmalbandiger. Die Funktion beruht auf dem mechanischen Masse-Feder-Prinzip. Durch ihre Masse, die innere Steifigkeit und innere Reibung entzieht die schwingende Platte dem Schallfeld Energie.

Die Resonanzfrequenz berechnet sich zu

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{d[\text{cm}] \cdot m\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right]}}$$

Formel 4.8: Resonanzfrequenz von Plattenabsorbern [Fasold]

Dabei ist  $d$  der Wandabstand der Platte und  $m$  die flächenbezogene Masse. Geht man im Fall der im Studio verwendeten Absorber von einer Masse von  $2,3\text{kg/m}^2$  aus, ergibt sich bei einem durchschnittlichen Wandabstand von ca.  $15\text{cm}$  eine Resonanzfrequenz von ca.  $100\text{Hz}$ . Die Wirkung der schwingenden Platten wird sich in den Messungen also im Oktavband  $125\text{Hz}$  zeigen.

Zusätzlich zu Messung 1, der Untersuchung zur Feinstruktur, konnte ergänzend die Wirkungsweise der Kombiabsorber gezeigt werden. Auch hier stand der Einfluss auf den gesamten Raum im Vordergrund.

In einem Tonstudio sind aber neben der gesamten Raumakustik vor allem die Eigenschaften an dem Ort bedeutsam, an dem der Hörer sitzt, um Ton zu bearbeiten. Daher ist der Bereich um den Abhörpunkt in weiteren Messungen untersucht worden.

## 4.5 Messung 3 und 4

Die bisherigen Messungen haben sich mit der derzeitigen Raumsituation und der aktuellen Akustik beschäftigt. Die Schallquelle war immer im vorderen Bereich des Studios platziert, wie es das Live-End-Dead-End-Konzept vorsieht.

In den folgenden Messungen soll festgestellt werden, in wieweit die derzeitige Akustik für eine Surround-Anordnung von fünf Lautsprechern geeignet ist.

Aus diesem Grund ist ein neues Messraster definiert worden, welches den Bereich rund um den Sweetspot, also den optimalen Abhörpunkt, abdeckt.

Dieser befindet sich in den Messungen 3 und 4, wie in Tonstudios üblich, direkt an der Mischpultkante in der Mitte in einer Höhe von 1,20m. Im Raster der Messung 1 entspricht das dem Punkt 10/8.

Das neue Raster besteht aus neun Messreihen mit jeweils sieben Messpunkten. Im Bereich zwischen dem Pult und dem Holzpodest ist eine Maschenweite von 0,25m gewählt worden, da um den Sweetspot eine detaillierte Erfassung der Akustik möglich sein soll. Die beiden letzten Messpunkte jeder Reihe befinden sich auf dem Holzpodest jeweils auf einer Stufe. Sie befinden sich in eine Höhe vom 1,20m gemessen von der jeweiligen Stufe, um auch hier die genormte Sitzhöhe einzuhalten.

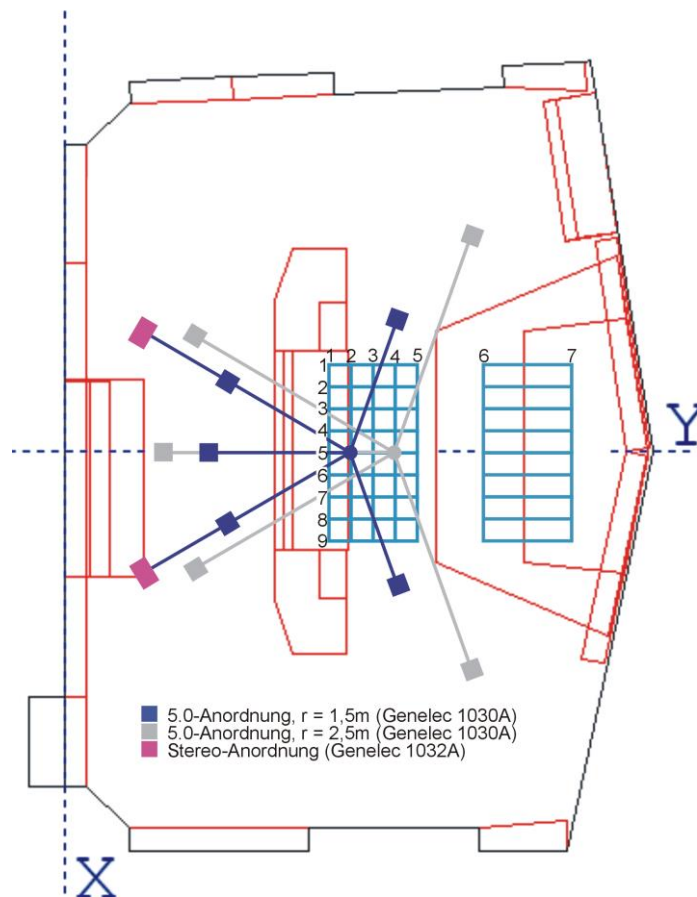


Abbildung 4.31: Messraster Messung 3 und 4

In Abbildung 4.31 ist das Raster für die Messungen 3 und 4 dargestellt. Ebenso sind die verwendeten Lautsprecheranordnungen zu sehen. Das dunkelblaue System symbolisiert eine 5.0-Abhöranlage, wie sie abgesehen vom fehlenden LFE-Kanal für Dolby-Digital vorgesehen ist. Der Abstand der Boxen zum Sweetspot beträgt 1,5m. Die Monitore befinden sich auf einer Höhe von 1,6m und sind daher entsprechend geneigt. Des Weiteren ist ein Lautsprecherpaar für Stereowiedergabe zu sehen. Das zweite Surroundsystem (grau) kommt erst in Messung 5 zum Einsatz.

Auf Grund dieser Lautsprecheranordnungen ergeben sich sieben verschiedene Messungen mit unterschiedlichen Quellen:

- Stereo-Lautsprecherpaar (Genelec 1032A)
- Surround-Anordnung (5 mal Genelec 1030A) zusammen (Alle)
- nur Rechts (R)
- nur Center (C)
- nur Links (L)
- nur Rechts-Surround (RS)



- nur Links-Surround (LS)

Für jede Quelle wird jeweils das komplette Raster durchgemessen. Bei neun Reihen mit je sieben Messpunkten ergeben sich also sieben Messungen mit je 63 Messpunkten.

### 4.5.1 Messaufbau

Die Messungen wurden wieder mit WinMLS 2004 durchgeführt. Wie bereits in Messung 1 wurden die AKG C480 mit Kugelcharakteristik als Messmikrofone verwendet. Über den Vorverstärker AD8 von Swissonic gelangten die Daten über ein RME Digiface in den PC.

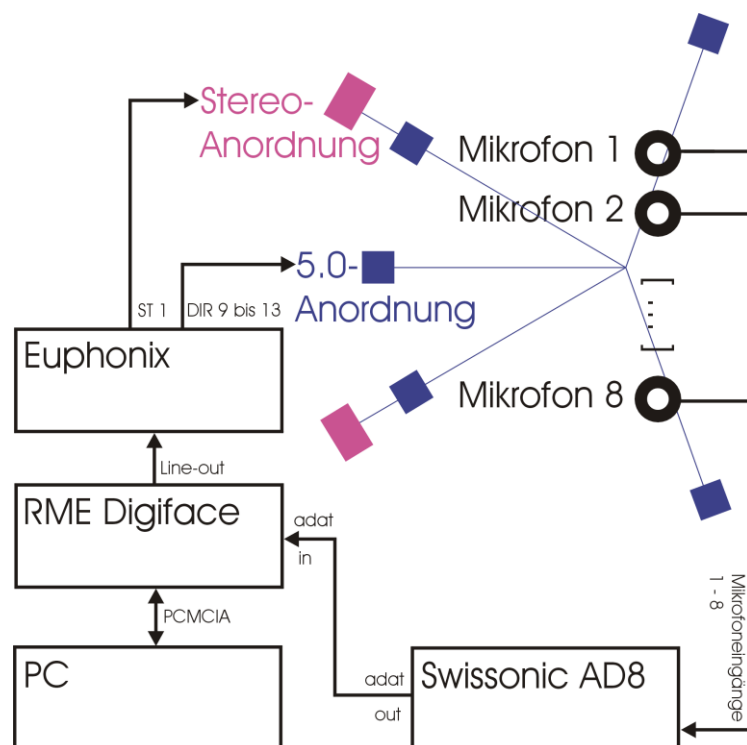


Abbildung 4.32: Messaufbau Messung 3,4 und 5

Der Ausgang der Soundkarte wurde an das Euphonix-Mischpult angeschlossen, um so das Messsignal auf jeden Lautsprecher legen zu können.

Das Stereopaar war am Ausgang der Stereosumme 1 angeschlossen, die Surround-Lautsprecher an den Direct-Out-Buchsen der Kanäle 9 bis 13. Mit einem Schallpegelmesser wurden die Lautsprecher vorschriftsmäßig eingepgelt.



Abbildung 4.33: Messung 3

## 4.5.2 Auswertung Messung 3 und 4

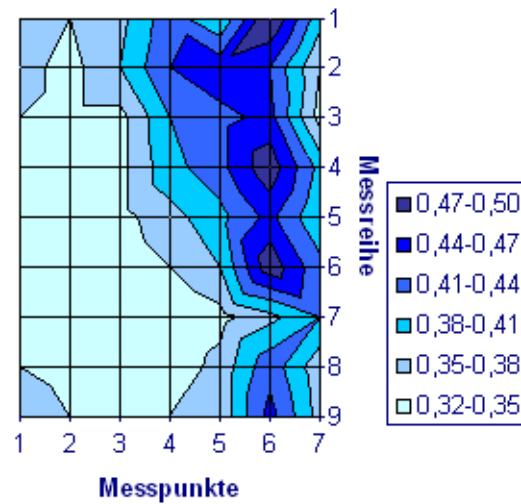
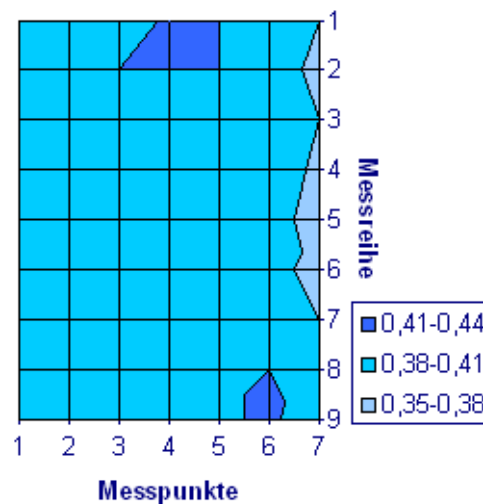
Wie in Messung 1 waren auch hier die Tendenzen der Werte zueinander von Interesse. Aus diesem Grund sind die verschiedenen Parameter wieder als Flächendiagramm dargestellt. Auch hier kommt es durch unterschiedliche Abstände im Raster zu Verzerrungen im Diagramm, welches überall die gleiche Maschenweite annimmt. Bis zu den jeweiligen fünften Messpunkten ist die Darstellung verzerrungsfrei, dann gestaucht.

### 4.5.2.1 Stereo-Anordnung als Quelle

Wählt man bei der Messung das Stereopaar als Quelle, so ergeben sich erwartungsgemäß für die Nachhallzeit die gleichen Werte wie in Messung 1 an den entsprechenden Messpunkten. In den oberen Oktavbändern (8 und 16kHz) kann man die Nachhallzeit im Abhörbereich als homogen ansehen. Hier kommt es zu Abweichungen der Werte untereinander von 0,03s. Auch ein Vergleich der Werte im entsprechenden Bereich aus Messung 1 bestätigt dies. Bei den Oktavbändern bis 500Hz kommt es zu etwas größeren Unterschieden innerhalb des Rasters, diese treten aber vor allem in den letzten Messpunktzeilen, also auf den beiden Stufen auf.

Wie bei einer Stereobeschallung wünschenswert, verteilen sich die Werte symmetrisch zur Raumachse.

Nur in den Oktavbändern 500 und 125Hz ist die Verteilung unsymmetrisch. Hier kommt es auch im Bereich zwischen Pult und Stufen zu größeren Abweichungen.

Abbildung 4.34:  $T_{30}$  [s] – 125Hz, Messung 3 – 1032AAbbildung 4.35:  $T_{30}$  [s] – 2000Hz, Messung 3 – 1032A

Die Werte der Gütemaße, die aus Energiebetrachtungen abgeleitet werden, unterscheiden sich in dieser Messung deutlicher von denen aus Messung 1. Hier kommt der Unterschied in der Messpunkthöhe zum tragen. Im Gegensatz zu der Höhe aus Messung 1 mit 1,60m kommt es bei 1,20m zu deutlicheren Einflüssen des Pultes und der darauf montierten Bildschirme.

Auch hier zeigt sich eine Symmetrieachse durch Reihe 5. Maximale Werte kommen vor allem auf dieser Achse vor. Bei tiefen Frequenzen kommt es durch die Überlagerung der kugelförmigen Schallwellen beider Lautsprecher zu kreisförmigen Bereichen gleicher Größenordnung um das Maximum (Abbildung 4.36).

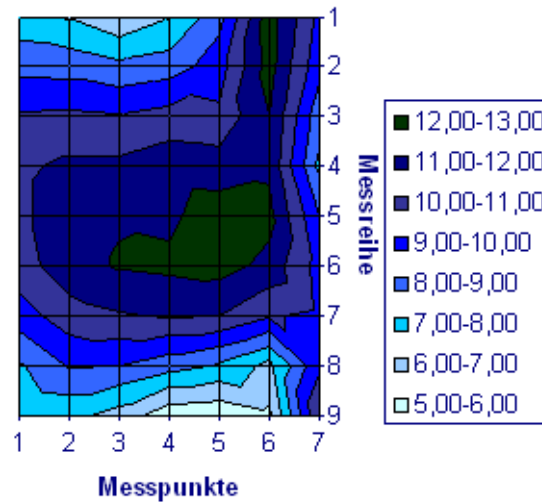


Abbildung 4.36: C<sub>50</sub> [dB] – 125Hz, Messung 3 – 1032A

Bei der EDT kommt es in Bereichen mit viel früher Energie zu niedrigen Werten, entsprechend einem schnellen Energieabfall (Abbildung 4.37).

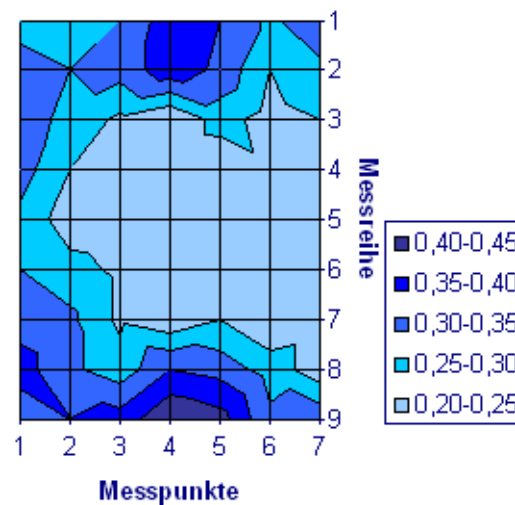


Abbildung 4.37: EDT [s] – 250Hz, Messung 3 – 1032A

Für steigende Frequenzen ist die Verteilung nicht mehr kugelförmig. Es bilden sich Zonen gleicher Wertebereiche entsprechend der Symmetrieachse aus. Sehr deutlich sichtbar ist dies in Abbildung 4.38, die das Klarheitsmaß für 1000Hz darstellt.

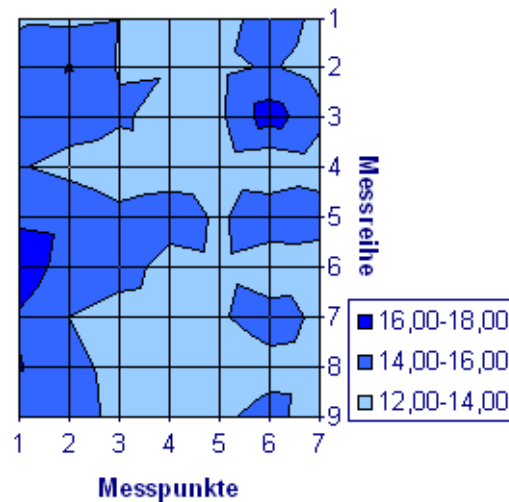


Abbildung 4.38:  $C_{80}$  [dB] – 1000Hz, Messung 3 – 1032A

Zu den hohen Frequenzen hin gewinnen das Mischpult und die Bildschirme immer mehr an Einfluss. So wird vor allem der vordere Bereich inhomogen, Veränderungen der Abhörposition entlang des Pultes führen zu größeren Werteveränderungen. Im hinteren Bereich dagegen bilden sich homogenere Zonen aus.

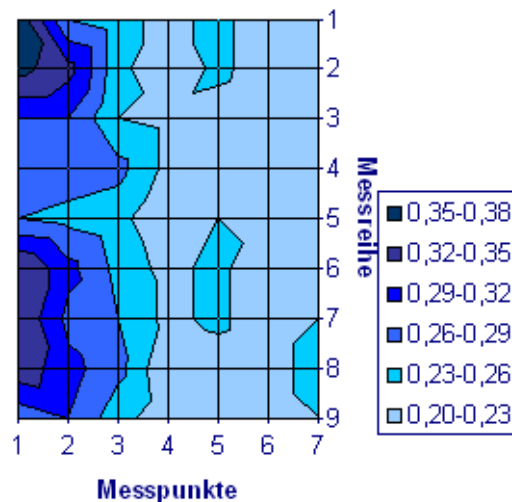


Abbildung 4.39: EDT [s] – 16000Hz, Messung 3 – 1032A

#### 4.5.2.2 Surround-Anordnung als Quelle

Zu der Stereo-Anordnung sind für dasselbe Raster auch Messungen mit Quellen entsprechend der 5.0-Anordnung durchgeführt worden. Dabei fungierte zum einen jeder Lautsprecher allein als Quelle, zum anderen wurde das Messsignal gleichzeitig auf alle fünf Monitore gegeben.

Der Abstand zum Sweetspot betrug 1,50m. Dies ist aufgrund der räumlichen Gegebenheiten auch der minimale Radius für eine solche Aufstellung.

Zunächst wurde mit allen fünf Monitoren zusammen als Quelle gemessen.

Die Nachhallzeiten unter diesen Bedingungen sind im Bereich des Rasters sehr konstant. Im vorderen Bereich vor den Stufen ergeben sich überwiegend Werte, die nicht mehr als 0,05s von einander abweichen. Kommt es doch zu größeren Abweichungen, so finden sich diese auf der Symmetrieachse und in der siebten Messpunktreihe wieder. Dies wird besonders in Abbildung 4.40 für 1000Hz deutlich.

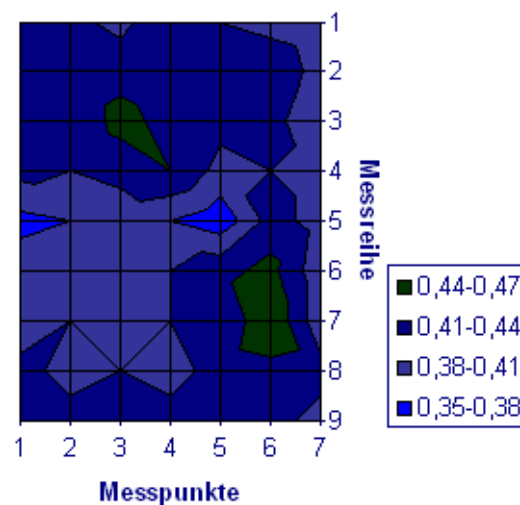


Abbildung 4.40:  $T_{30}$  [s] – 1000Hz, Messung 3 – Alle

Ab dem Oktavband „4000Hz“ bleibt die Nachhallzeit in engen Grenzen konstant.

Betrachtet man die Energieverteilungen, fällt auf, dass sich die Wirkungen der fünf Lautsprecher überlagern. So erkennt man in Abbildung 4.41, dass sich um den Sweetspot ein runder Bereich mit den maximalen Werten des  $C_{50}$  bildet. Radial nach außen fallen sie gleichmäßig ab. In direkter Nähe vor den Lautsprechern nehmen sie wieder zu. Dies ist für die beiden hinteren Lautsprecher besonders deutlich zu sehen, da hier ein geringerer Abstand zwischen Messraster und Quelle besteht.

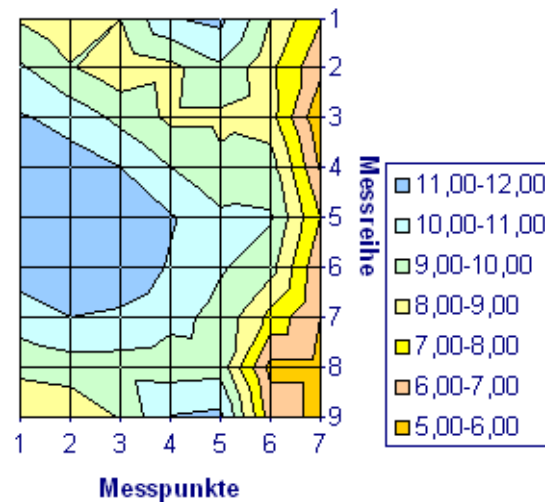


Abbildung 4.41:  $C_{50}$  [dB] – 125Hz, Messung 3 – Alle

Außerhalb des Surroundradius, also in den Messpunktzeilen 6 und 7, nehmen die Werte erheblich ab.

Dass das Deutlichkeitsmaß außerhalb der Surround-Aufstellung, also auf dem Holzpodest, wesentlich schlechter ausfällt als innerhalb, war zu erwarten und ist auch in den anderen Frequenzbändern klar erkennbar.

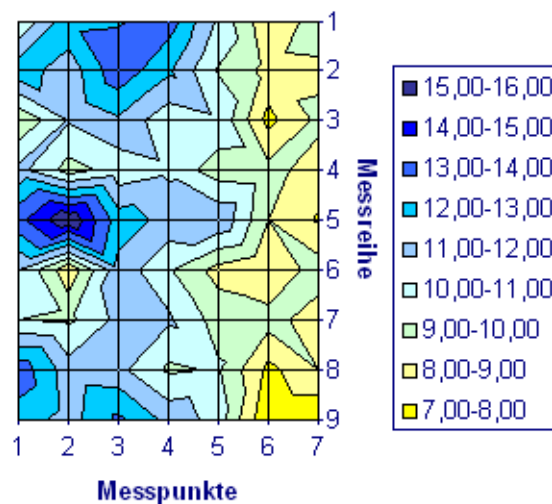


Abbildung 4.42:  $C_{50}$  [dB] – 1000Hz, Messung 3 – Alle

Entsprechendes zeigt sich auch für das Klarheitsmaß und die EDT. Der geringe Abstand der Lautsprecher zu den Messpunkten schaltet die Auswirkung des Raumes auf die Akustik in diesem Bereich überwiegend aus. Dies deckt sich mit den Empfehlungen des Herstellers und der Tatsache, dass es sich bei den Genelec 1030A um Nahfeld-Monitore handelt.

Dem entsprechend fallen auch die Flächendiagramme der fünf einzelnen Quellen aus. Am Beispiel der linken Quelle alleine wird deutlich, dass die Nachhallzeit im Wesentlichen so ausfällt wie in Messung 1. Das Beispiel in Abbildung 4.43 zeigt die  $T_{30}$  für 1000Hz, wenn nur der Lautsprecher vorne links als Quelle benutzt wird.

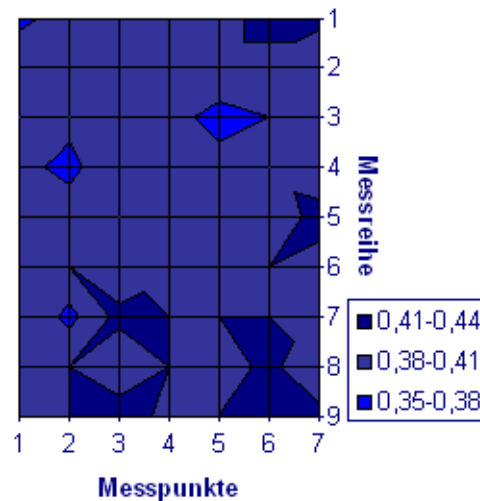


Abbildung 4.43:  $T_{30}$  [s] – 1000Hz, Messung 3 – L

Der linke Lautsprecher befindet sich wie die Quelle in Messung 1 im vorderen Bereich des Studios, also im Dead-End.

In der Surround-Anordnung müssen aber zwei Lautsprecher im hinteren Bereich positioniert sein. Offensichtlich hat die Position der Quelle Einfluss auf die Dauer der Nachhallzeit, denn im Flächendiagramm für die  $T_{30}$  unter Verwendung des Lautsprechers links hinten (LS) ergeben sich deutlich höhere Nachhallzeiten (Abbildung 4.44).



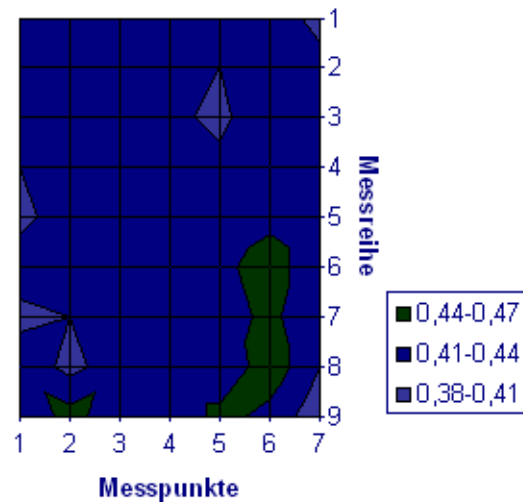


Abbildung 4.44:  $T_{30}$  [s] – 1000Hz, Messung 3 – LS

Die weiteren Gütemaße zeigen durch die Nähe zu den Mikrofonen wieder Wertebereiche, die in Abhängigkeit von der Richtcharakteristik des jeweiligen Lautsprechers radial bzw. keulenförmig um den Lautsprecher verlaufen. Auch sind die niedrigsten Werte wieder in den beiden letzten Messreihen zu finden. Dies verdeutlicht die Abbildung 4.45.

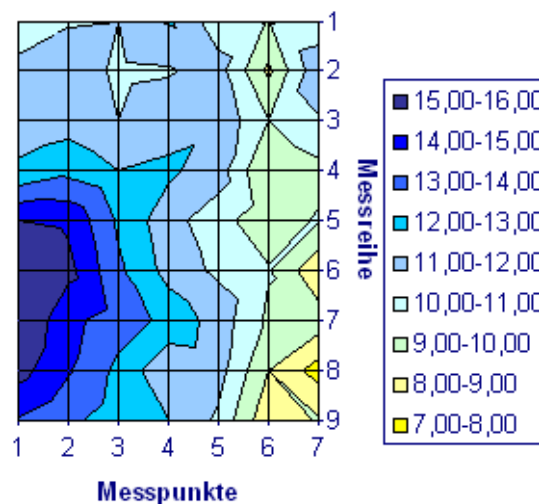


Abbildung 4.45:  $C_{50}$  [dB] – 2000Hz, Messung 3 – L

Entsprechend gespiegelt verlaufen die Wertebereiche in der vergleichbaren Messung mit dem rechten Lautsprecher (Abbildung 4.46).

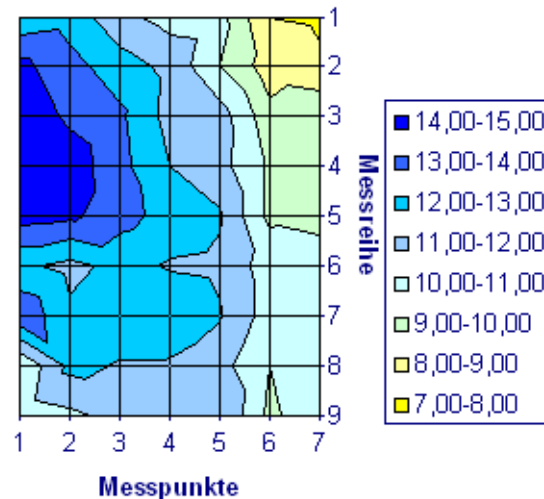


Abbildung 4.46: C<sub>50</sub> [dB] – 2000Hz, Messung 3 – R

Auch für den Center und die zwei Surroundkanäle gilt Entsprechendes. Abbildung 4.47 zeigt das Diagramm des C<sub>50</sub> für 16000Hz. Die Quelle ist der linke Surround-Lautsprecher (LS). Zusätzlich wird hier auch die starke Richtwirkung der Monitore bei hohen Frequenzen deutlich.

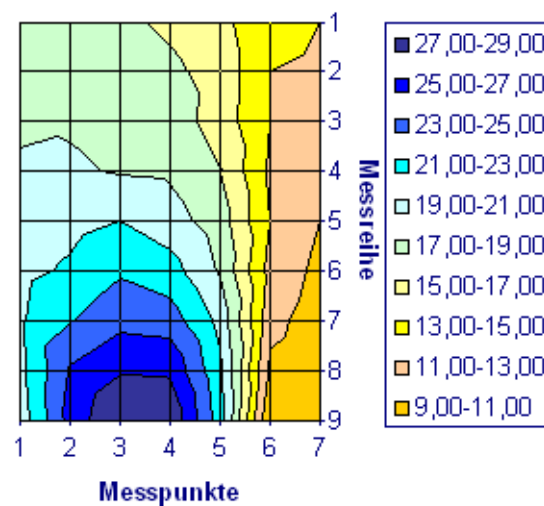


Abbildung 4.47: C<sub>50</sub> [dB] – 16000Hz, Messung 3 – LS

#### 4.5.2.3 Abgehängte Diffusoren (Messung 4)

Die akustische Ausstattung des Regieraumes ist für Stereowiedergabe ausgelegt. So sind die Diffusoren an der Rückseite für eine Surroundwiedergabe eher kontraproduktiv, da bei 5.0-Material ein gewünschter Raumeindruck durch die hinteren Surround-Lautsprecher erreicht

werden soll, nicht durch den Raum selbst. Durch die streuende Wirkung der Diffusorelemente kann es schwierig werden, einen künstlichen Raumeindruck über die Surroundkanäle zu beurteilen.

Um die Auswirkung der verwendeten Diffusoren auf die Surround-Anordnung zu erfassen, ist eine weitere Messung durchgeführt worden. Diese ist vom Aufbau und der Durchführung mit der Messung 3 identisch. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Diffusorelemente mit Akustikplatten aus Melamin abgedeckt wurden.

Vergleicht man nun die Flächendiagramme, müssen Unterschiede durch die Akustikplatten verursacht worden sein, da von einem zeitinvarianten System ausgegangen werden kann.

Grundsätzlich sollte die Nachhallzeit durch Einbringen von absorbierendem Material in den Raum sinken.

Im Vergleich der Flächendiagramme beider Messungen treten bei 125Hz noch keine wesentlichen Veränderungen auf. Die Platten wirken hier noch nicht, da die Absorption in diesem Frequenzbereich sehr gering ist (vgl. Tabelle 4.7).

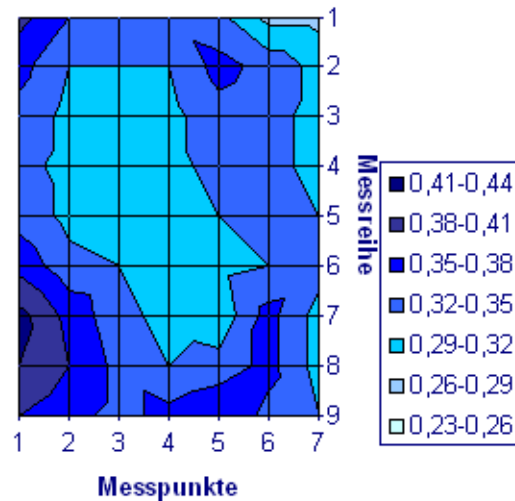
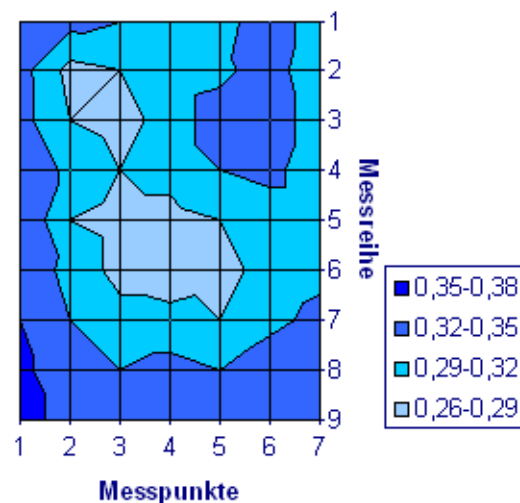
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Melamin (4cm)	< 10	10	35	70	> 80	-	-	-

**Tabelle 4.7: Absorptionsgrad [%] für Melaminplatten<sup>1</sup>**

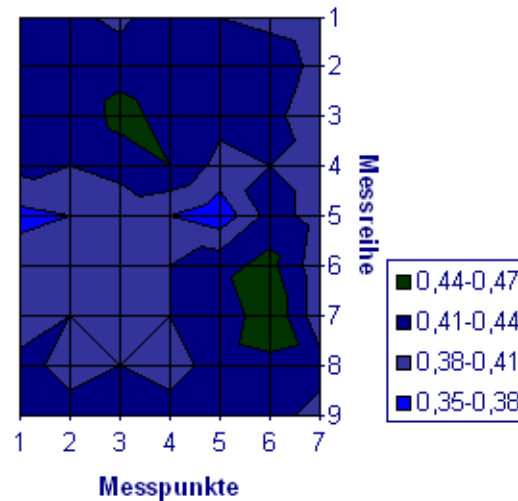
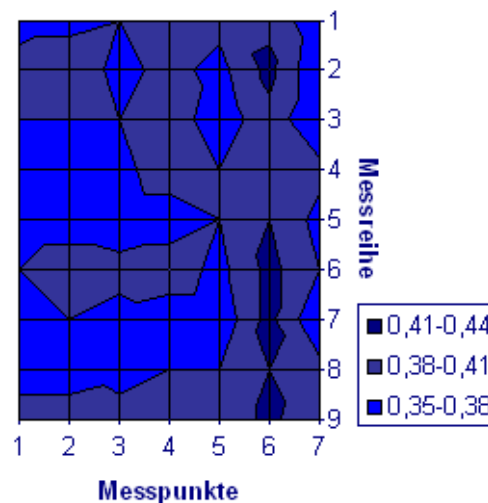
Bei 250Hz kommt es bereits zu Veränderungen. Die Nachhallzeit ist etwas gesunken. Der Bereich mit den niedrigsten Werten bei Messung 3 wird quasi vergrößert. Sein Zentrum weist nun das neue Minimum auf. Auch in der letzten Messpunktreihe verringern sich die Werte deutlich entlang der absorbierenden Platten. Maximalwerte, die in Messung 3 noch erreicht wurden, sind nicht mehr anzutreffen.

---

<sup>1</sup> Die Werte beruhen auf Messungen von Stefan Birnstingl, die im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt wurden.

Abbildung 4.48:  $T_{30}$  [s] – 250Hz, Messung 3 – AlleAbbildung 4.49:  $T_{30}$  [s] – 250Hz, Messung 4 – Alle

Auch mit steigender Frequenz werden mit Hilfe der Akustikplatten niedrigere Nachhallzeiten erreicht. Im Oktavband „1000Hz“ war zunächst nur ein kleiner Bereich längs der Symmetrieachse im Wertebereich 0,35 bis 0,40s. Mit den abgedeckten Absorbern vergrößert sich dieser Bereich fast auf das gesamte Raster.

Abbildung 4.50:  $T_{30}$  [s] – 1000Hz, Messung 3 – AlleAbbildung 4.51:  $T_{30}$  [s] – 1000Hz, Messung 4 – Alle

Neben der Nachhallzeit verändern sich auch die Gütemaße durch die zusätzliche absorbierende Fläche. Am Beispiel des  $C_{50}$  ist zu erkennen, dass das Energieverhältnis ansteigt, sich also ein noch deutlicherer Teil der Gesamtenergie in den ersten 50ms befindet. Ein Vergleich mit dem bereits beschriebenen Diagramm in Abbildung 4.42 und dem entsprechenden der Messung 4 in Abbildung 4.52 zeigt folgendes: Rund um den Sweetspot nehmen die Werte zu. Während bei Messung 3 die maximalen Werte nur direkt im idealen Abhörbereich und eng darum zu finden sind, zeigt sich in Messung 4 ein größeres Zentrum entlang der Symmetrieachse. Der Wertebereich 9 bis 11dB hat sich in die letzten Messpunktzeilen verschoben.

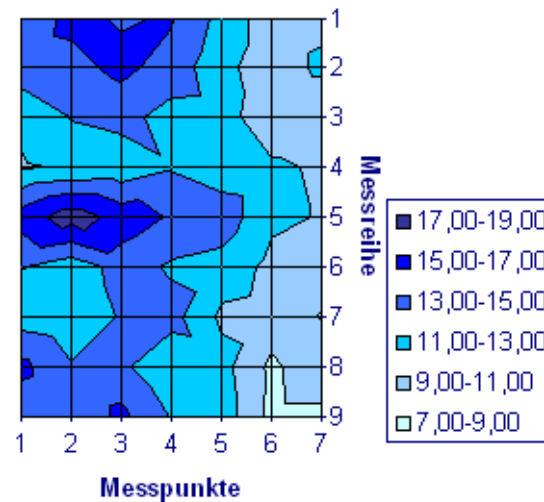


Abbildung 4.52:  $C_{50}$  [dB] – 1000Hz, Messung 4 – Alle

Auch in den weiteren Oktavbändern steigen die Werte für das  $C_{50}$  und das  $C_{80}$  durch die zusätzlichen Absorber an. Offensichtlich können also die Gütemaße innerhalb der Abhörposition durch entsprechende Maßnahmen verbessert werden.

Ein Anstieg des Deutlichkeitsmaßes und des Klarheitsmaßes bedeutet, dass ein noch größerer Anteil der Gesamtenergie innerhalb der ersten 50ms bzw. 80ms auftreten muss. Dass dies durch ein schnelleres Abfallen des Energieverlaufes verursacht wird, bestätigt die ebenfalls geringer werdende EDT.

## 4.6 Messung 5

In den Messungen 2 und 3 ist von einer Surround-Anordnung mit einem Radius von 1,50m ausgegangen worden, alle Lautsprecher waren also diese Distanz vom Sweetspot entfernt. Da das Studio vor allem ein Lehrstudio ist, wo in Gruppen gearbeitet wird, ist ein Abstand von 1,50m zu den Lautsprechern sehr wenig. Dass mehrere Personen gleichzeitig eine ideale Abhörposition einnehmen, ist praktisch nicht möglich. Aus diesem Grund ist eine weitere Messung (Messung 5) durchgeführt worden, die einen größeren Abstand zu den Lautsprechern vorsieht. Die neue Anordnung hat einen Radius von 2,50m. Zu dem ist der Sweetspot um einen halben Meter nach hinten verschoben worden, um einer größeren Anzahl von Hörern die Nähe zum idealen Abhörpunkt zu ermöglichen.

Die neue 5.0-Anordnung ist in Abbildung 4.53 in grau dargestellt. Auch das Raster der Messung ist entsprechend angepasst worden. Im Vergleich zu Messung 3 und 4 ist auf die erste Messpunktreihe verzichtet worden. Es bleiben also 4 Messpunkte pro Reihe zwischen Mischpult und dem Holzpodest mit einem Abstand von 0,25m. Da bereits in vorherigen Messungen klar geworden ist, dass Messpunkte hinter den Surround-Lautsprechern große

Abweichungen von Werten im Zentrum aufweisen, ist das Raster in diesem Bereich auf vier Messpunkte reduziert worden. In der Abbildung 4.53 wird das gültige Messraster vorn durch die dicken blauen Linien und im hinteren Bereich durch blaue Kästchen dargestellt. Die dünnen blauen Linien, sowie die blaue 5.0-Anordnung sollen einen Vergleich zu Messung 3 und 4 erleichtern.

Ansonsten sind Aufbau, Messequipment und Durchführung mit Messung 3 und 4 identisch.

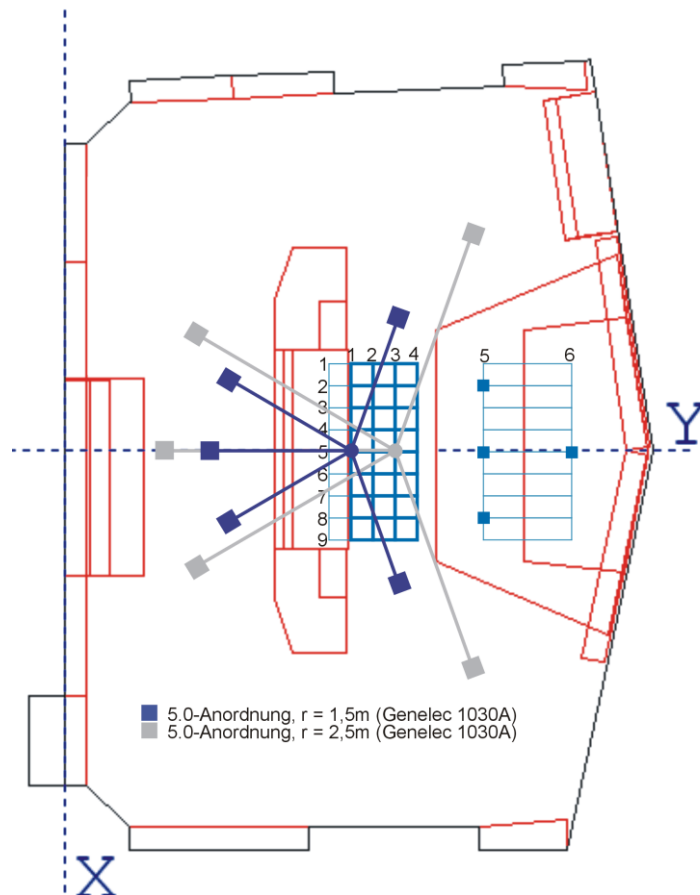


Abbildung 4.53: Raster Messung 5

### 4.6.1 Auswertung Messung 5

Der wesentliche Grund zu der Durchführung dieser Messung war die Frage nach der Auswirkung des Lautsprecherabstandes vom Sweetspot.

Auch bei einem größeren Radius der 5.0-Anordnung ist zu beobachten, dass die Nachhallzeit von der Position der Quelle abhängt. Während die Lautsprecher vorne wieder Werte der  $T_{30}$  in der Größenordnung von Messung 1 aufweisen, kommt es in der hinteren Raumhälfte wie bereits in den Messungen 3 und 4 zu höheren Nachhallzeiten.

Vergleicht man die Flächendiagramme der Messung mit allen Lautsprechern als Quelle (Alle) mit denen aus Messung 3, also mit dem kleineren Radius, fällt auf, dass die Nachhallzeit je nach Lautsprecherposition in sehr ähnliche Wertebereiche fällt. Teilweise treten in Messung 5 etwas höhere Werte der  $T_{30}$  auf. Grundsätzlich ergeben sich aber Werte entsprechend der vorhergegangenen Messungen.

Deutlichere Unterschiede treten bei den weiteren Gütemaßen auf. An den Diagrammen des  $C_{50}$  lässt sich erkennen, dass sich das jeweilige Maximum in den Oktavbändern nach hinten verschiebt. Also treten auch hier die besten Ergebnisse im Sweetspot auf. Allerdings kommt es bei dem großen 5.0-Radius zu kleineren Werten. Auch werden die Bereiche gleicher Größenordnung kleiner. Anders ausgedrückt: Die besten Wertebereiche liegen näher und enger beim Sweetspot. Dieser bildet sich auch nicht mehr rund aus, sondern mehr entlang der Symmetrieachse.

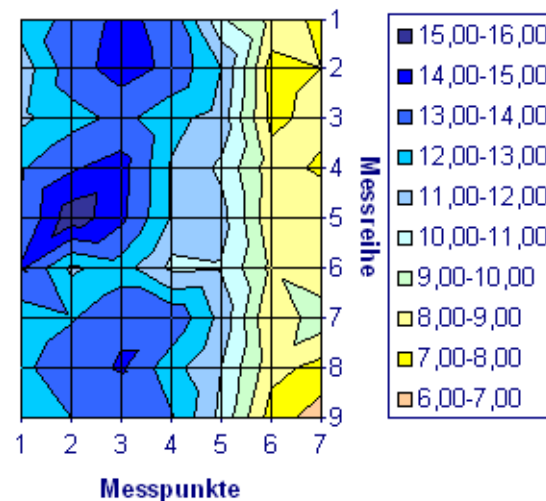


Abbildung 4.54:  $C_{50}$  [dB] - 2000Hz, Messung 3 – Alle



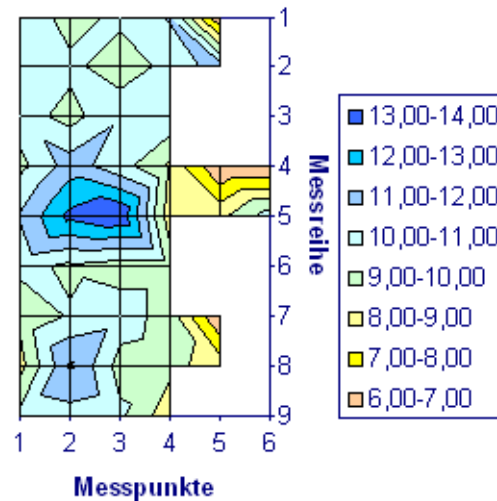


Abbildung 4.55:  $C_{50}$  [dB] - 2000Hz, Messung 5 – Alle

Auf Grund des größeren Abstandes sind die Nahfeld-Auswirkungen nicht mehr so deutlich erkennbar. Deutlich ist wieder zu sehen, dass im Bereich außerhalb des Surroundradius die Werte wesentlich geringer anfallen.

Auch für das Klarheitsmaß ergeben sich in Messung 5 kleinere Werte und ähnliche Tendenzen wie im Verlauf des  $C_{50}$ .

Offensichtlich verändert sich mit einer Vergrößerung des Radius der Energieverlauf deutlich. Da auch die EDT in Messung 5 deutlich angestiegen ist, muss davon ausgegangen werden, dass der Schalldruck langsamer abnimmt. Dies wird durch die Surround-Lautsprecher verursacht, die in einem Bereich stehen, in dem es zu deutlichen Reflexionen kommt. Befindet sich die Quelle näher an reflektierenden Flächen, kommt es durch kurze Laufzeitunterschiede zwischen Direktschall und den Reflexionen zu langsameren Pegelabfällen. Je weiter die Quelle von solchen Oberflächen entfernt ist, desto später treffen Reflexionen am Sweetspot ein und es kommt zu einem schnelleren Abfall des Pegels zu Beginn.

Da es zwischen den Schlitzabsorbern an den Seitenwänden zu erheblichen Flatterechos kommt, wenn sich eine Schallquelle dazwischen befindet, hält sich die Energie länger in diesem Bereich und es kommt zu einem Anstieg der EDT und auch der Nachhallzeit. Die Abbildung 4.56 und Abbildung 4.57 zeigen einen deutlichen Anstieg der EDT von teilweise mehr als einer Sekunde.

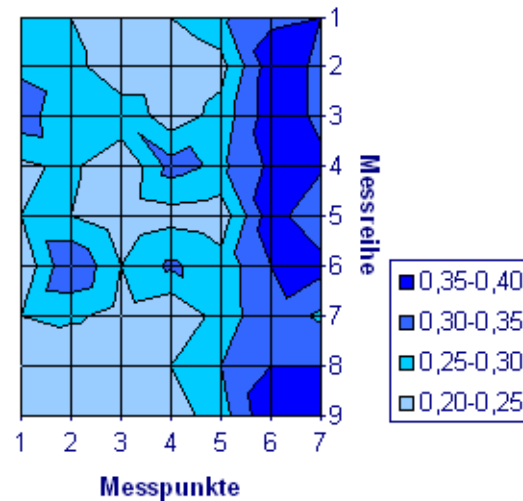


Abbildung 4.56: EDT [s] - 2000Hz, Messung 3 – Alle

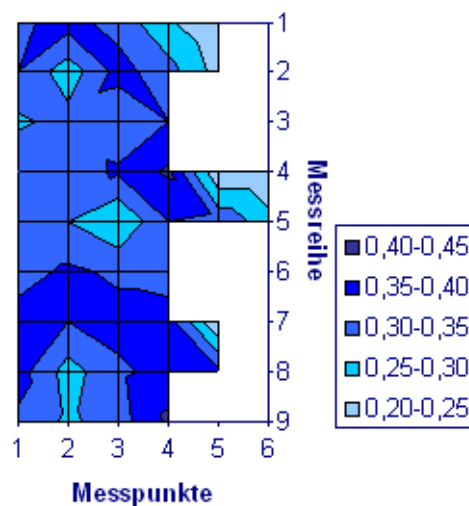


Abbildung 4.57: EDT [s] - 2000Hz, Messung 5 – Alle

Insgesamt bedeutet ein so großer Radius, dass der Hörer nicht mehr im Nahfeldbereich der Lautsprecher sitzt. Dem entsprechend verändern sich auch die Gütemaße, der Raum gewinnt mehr an Einfluss auf die akustische Qualität des Abhörortes.

Zusätzlich kommt es durch die Raumgeometrie zu ungünstigeren Reflexionen, da sich die Lautsprecher näher an begrenzenden Flächen befinden.

Grundsätzlich kommt es durch Quellen im hinteren Raumteil zu einer Erhöhung des Nachhalls durch die Ausbildung von Flatterechos.

## 4.7 Flatterechos

Unter einem Echo versteht man einen subjektiven Höreindruck von sich wiederholenden Schallereignissen. Diese entstehen durch Reflexionen und damit verbundenen Laufzeitdifferenzen zwischen Direktschall und reflektiertem Schall.

Ist der Zeitunterschied dieser Ereignisse beim Hörer sehr gering, so kann das Gehör diese nicht als zwei oder mehrere Ereignisse getrennt wahrnehmen. Bei Differenzen von bis zu 5ms wird nur ein Klangereignis beobachtet. Es folgt ein zeitliches Intervall, in dem zwar erkannt werden kann, dass es sich um mehr als einen Schallreiz handelt, nicht aber die Reihenfolge detektiert werden kann. Erst ab einem Zeitbereich von 30 bis 50ms ist das menschliche Gehör in der Lage eine zeitliche Aufeinanderfolge exakt wahrzunehmen. Dieser Übergangsbereich ist als fließend anzusehen und individuell unterschiedlich. Reflexionen, die nicht als Echo wahrgenommen werden, sind in vielen akustischen Fällen hilfreich, da sie den Direktschall energetisch unterstützen und so z.B. bei Sprachdarbietungen die Verständlichkeit erhöhen können. In Tonregieräumen, wo auch die exakte Ortung einer Quelle wichtig ist, können solche Reflexionen schädlich sein. Echos, die wahrnehmbar sind, werden praktisch immer als störend empfunden.

In geschlossenen Räumen werden sie durch gegenüberliegende, schallharte Flächen verursacht, zwischen denen der Schall mehrfach hin und her reflektiert wird. Je nach Raumgröße bzw. Wandabstand folgen die Reflexionen schneller oder langsamer aufeinander. Eine schnelle Folge von Echos erinnert an ein Flattern und wird daher auch als Flatterecho bezeichnet.

Begünstigt wird dieses Phänomen, wenn ein Raum neben Flächen mit der Möglichkeit zur Echobildung auch stark bedämpfte Wände enthält. Das Echo läuft dann parallel zu den absorbierenden Flächen und hält sich länger und deutlicher zwischen den reflektierenden Wänden. Auch treten Echos deutlicher hervor, je geringer der Grundgeräuschpegel in einem Raum ist.

Beides, schallschluckende Wände senkrecht zu schallharten Wänden und ein extrem niedriger Grundgeräuschpegel liegen im Regieraum der TU vor.

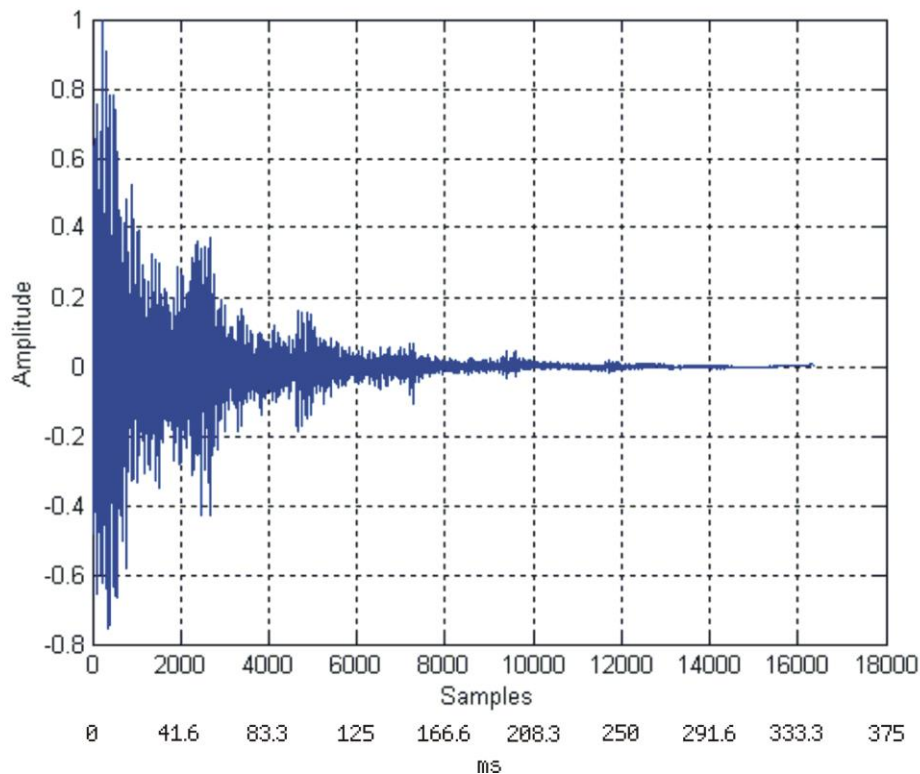
Tatsächlich bilden sich im hinteren Bereich zwischen den Schlitz- und Plattenabsorbern der Seitenwände Flatterechos aus. Ein mehrfaches Hin- und Herlaufen des Schalls in diesem Bereich entsteht aber nur dann, wenn auch in diesem Bereich eine Quelle angeordnet ist.

Um die Auswirkung dieser Flatterechos zu untersuchen, wurden zwischen den Seitenwänden acht Mikrofone verteilt und der Raum an verschiedenen Stellen angeregt. Zieht man das Raster aus Messung 1 heran (Abbildung 4.1), so befanden sich die Kugelmikrofone an den Punkten 19/9, 16/12, 13/10, 10/8, 9/12, 6/10, 4/11 und 1/10. Es handelte sich hier um dieselben Mikrofone wie in Messung 1.

Da sich ein impulsartiger Schall besonders zur Erzeugung von Echos eignet, wurde an 14 verschiedenen Punkten im hinteren Studiobereich ein Impuls mit Hilfe eines Klappholzes

erzeugt und über die acht Mikrofonkanäle aufgenommen.

In Abbildung 4.58 ist die Wave-Darstellung einer solchen Aufnahme dargestellt.



**Abbildung 4.58: Flatterecho**

Aus dem Abstand der Seitenwände von 8,34m ergibt sich eine Laufzeit von ca. 50ms für den Hin- und Rückweg. Da mit einer Samplingfrequenz von 48000Hz aufgenommen wurde, entspricht diese Zeit 2400 Samples. In Abbildung 4.58 sind die Flatterechos gut erkennbar. Neben dem Direktschall und sehr frühen Reflexionen zu Beginn sind deutlich weitere Maxima zu erkennen. Diese treten alle 50ms bzw. alle 2400 Samples auf.

Die Abbildung stellt die Aufnahme eines Mikrofons dar, welches sich sehr nahe an der Wand befunden hat (1/10). Die Quelle befand sich an der gegenüberliegenden Seite. In dieser Konstellation sind die Flatterechos am deutlichsten zu erfassen. Wenn sowohl die Quelle als auch die Mikrofonposition sich in der Raummitte befinden, fallen die Echos geringer aus, bleiben aber auch dann noch deutlich hörbar. Findet eine Anregung im vorderen Bereich des Raumes statt, entstehen keine Flatterechos.

## 4.8 Zusammenfassung der Messungen

Die Messungen haben gezeigt, dass eine engmaschige Untersuchung der Raumakustik die Eigenschaften eines Raumes detailliert verdeutlichen kann. Im Gegensatz zu den gängigen Messmethoden, die nur Mittelwerte aus wenigen Messungen nutzen, können durch eine entsprechende Messpunktdichte auch Tendenzen und Verläufe akustischer Parameter dargestellt werden.

Allgemeine Ergebnisse:

Die detaillierte Darstellung spiegelt das derzeitige akustische Konzept, die LEDE-Akustik, sehr deutlich wieder. Neben den zwei großen Bereichen, dem Live- und dem Dead-End, lässt sich auch gut die Wirkung der unterschiedlichen Absorbertypen ausmachen (ab Abbildung 2.1).

Die Nachhallzeiten liegen im Bereich von 0,28 bis 0,40s und haben im Allgemeinen einen durchhängenden Verlauf.

Die Gütemaße belegen, dass sich die wesentlichen energetischen Vorgänge innerhalb der ersten 50ms abspielen (Tabelle 4.5).

Ergebnisse zur Stereowiedergabe:

Bei Stereowiedergabe werden sinnvolle homogene Nachhallzeiten im Regieraum erreicht.

Insgesamt zeigt sich ein symmetrisches Schallfeld um die Studioachse.

Im Abhörbereich gewinnen das Pult und die Bildmonitore mit steigenden Frequenzen zunehmend an Einfluss auf das Schallfeld (Kapitel 4.5.2.1).

Ergebnisse für Surroundwiedergabe (Radius 1,50m):

Innerhalb der Surround-Anordnung herrschen konstante Nachhallzeiten, außerhalb kommt es zu größeren Abweichungen (4.5.2.2).

Durch die Nahfeldwirkung der Lautsprecher fällt der Einfluss des Raumes wenig ins Gewicht. Die Lautsprecher im Live-End bewirken ein Flatterecho (Abbildung 4.58), welches sich zwischen den Seitenwänden ausbildet. Aus diesem Grund kommt es auch zu einem Anstieg der Nachhallzeiten in diesem Bereich (Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44).

Ergebnisse für Surroundwiedergabe (Radius 2,50m):

Die Nachhallzeit ist vergleichbar mit den Werten der kleinen Surround-Anordnung.

Unterschiede treten bei den Gütemaßen auf. Die geringeren Werte zeigen einen größeren Einfluss des Raumes durch den größeren Abstand zum Hörer (Kapitel 4.6.1).

Aufgrund der Aufstellung kommt es durch die Nähe zu den Seitenwänden zu ungünstigeren

---

Reflexionen, was durch den Anstieg der EDT belegt wird (Abbildung 4.56 und Abbildung 4.57). Zudem unterstützt der geringe Wandabstand die Bildung von Flatterechos.

Trotz der Vielzahl an Messergebnissen besteht aber keine Möglichkeit, Reflexionen im Raum direkt darzustellen. Zwar spiegeln sich Flatterechos auch in der Nachhallzeit wieder, doch einzelne Verläufe von Schallstrahlen bleiben verborgen.

Um hier weitere Erkenntnisse zu gewinnen und um Lösungsmöglichkeiten für eine optimale Akustik zu entwickeln, wurde eine Simulation des Regieraumes in CATT-Acoustic durchgeführt.

# 5 Simulation

Für weitere akustische Untersuchungen, die den Messungen bisher verborgen blieben, wie Strahlverfolgung ist eine Simulation des Regieraums des TU-Studios in der Software CATT-Acoustic durchgeführt worden. Neben diesen zusätzlichen Möglichkeiten zur Raumanalyse sollen aber auch Maßnahmen zur Optimierung der Akustik erprobt werden.

## 5.1 CATT-Acoustic

Bei dem Softwarepaket CATT-Acoustic handelt es sich um ein raumakustisches Werkzeug, mit dem es möglich ist, die Akustik von Räumen zu simulieren. Diese Simulationen finden Anwendung in der Planung von Räumen, um bereits einen Überblick über die zu erwartende Akustik zu erhalten noch bevor mit dem Bau begonnen wird.

In einem virtuellen Koordinatensystem werden im Programm Eckpunkte definiert, zwischen denen man dann Flächen aufspannen kann. Auf diese Weise können so komplette Räume erstellt werden. Den einzelnen Flächen können akustische Eigenschaften wie Absorption, Streuung und Transmission zugewiesen werden.

In dem virtuellen Raum können dann Schallquellen wie ideale Kugelstrahler, Modelle realer Lautsprecher aber auch nicht elektroakustische Quellen wie Sprecher positioniert werden. Des Weiteren werden an Hörorten so genannte Receiver definiert, die einen Hörer im Raum darstellen. So ist es möglich, an jedem Punkt im Raum separat die akustischen Eigenschaften zu untersuchen.

Die Vorhersage der raumakustischen Parameter erfolgt dann über verschiedene Algorithmen des Programms.

“Ray-Tracing” beruht auf den Grundlagen der geometrischen Raumakustik. Ausgehend von der Schallquelle werden Schallstrahlen ‚verfolgt‘ und beim Auftreffen auf Oberflächen nach den Gesetzen der Optik reflektiert. Dieses Verfahren eignet sich gut, um Schallausbreitung im Raum zu analysieren. Durch das unnatürliche Wachstum der Reflexionsdichte lassen sich Echogramme allerdings nur schwer aus dieser Methode bestimmen.

Das “Image-Source-Model” (ISM) simuliert für jede Quelle an jeder Oberfläche pro Ordnung eine Spiegelquelle. Auf diese Weise lassen sich Reflexionen qualitativ konstruieren.

“Randomized Tail-corrected Cone-tracing” (RTC) stellt den wichtigsten Algorithmus in

CATT-Acoustic dar. Dieser beruht auf einer Kombination aus verschiedenen Vorhersagemodellen und ist neben der Berechnung von Echogrammen in der Lage, auch Auralisation zu ermöglichen. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit, in den virtuellen Raum ‚hinein zu hören‘ und so einen Höreindruck der geplanten Akustik zu erhalten.

## 5.2 Vergleich und Abgleich mit den Messungen

Die Simulation des Regieraumes basiert auf einem CATT-Acoustic-Modell, das im Rahmen einer Projektarbeit<sup>1</sup> erstellt worden ist.

Dort konnte bereits gezeigt werden, dass CATT-Acoustic in der Lage ist, realistische akustische Vorhersagen für das Studio zu treffen. Für die Simulation waren bezüglich der jetzigen Fragestellung nur wenige Adaptionen notwendig. Da nun vor allem die Akustik am Abhörort von Bedeutung ist, sind die zwei Bildmonitore, die auf dem Mischpult befestigt sind, in der Simulation hinzugefügt worden. Stellten diese in der Projektarbeit noch ein zu vernachlässigendes Detail dar, so sind sie durch ihre Nähe zu Lautsprechern und ihre Position in der Lautsprecherachse jetzt in die Simulation mit eingeflossen. Des Weiteren konnte durch die umfassenden Ergebnisse der aufwendigeren Messungen noch einige wenige Verfeinerungen an Materialkonstanten durchgeführt werden. Da aber die wesentlichen Raumparameter bereits bei der Projektarbeit bekannt waren, waren nur sehr wenige Änderungen nötig, um ein Modell zur Verfügung zu haben, welches ein realistisches Abbild des realen Raumes darstellt.

Die Tabelle 5.1 stellt simulierte Werte vor der Optimierung denen danach gegenüber und ermöglicht einen Vergleich mit den Messwerten aus Messung 1 am selben Messpunkt.

<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
WinMLS	0,39	0,32	0,36	0,38	0,39	0,35
CATT- vor der Optimierung	0,41	0,30	0,32	0,35	0,33	0,25
CATT- nach der Optimierung	0,39	0,31	0,33	0,35	0,36	0,29
Abweichung [%]	-5	+3	+3	0	+9	+16

**Tabelle 5.1:  $T_{30}$  [s] - Messpunkt 10/8, Messung 1**

<sup>1</sup> „Raumakustiksimulation mit Auralisation unter Verwendung von CATT-Acoustic“, Projektarbeit für Elektrotechnik-Toningenieur durchgeführt von Stefan Behr



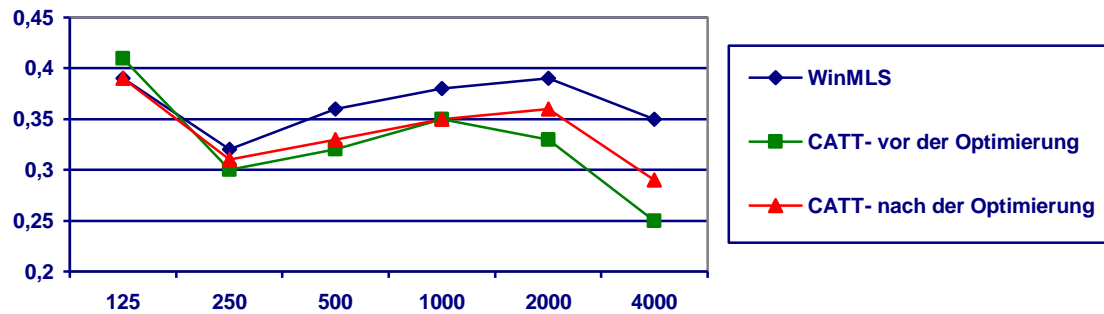


Abbildung 5.1: T<sub>30</sub> [s] - Messpunkt 10/8, Messung 1

In den folgenden Tabellen und Abbildungen werden Ergebnisse der Messungen entsprechenden Simulationsergebnissen gegenübergestellt. In den Simulationen wurde der jeweilige Messaufbau nachgebildet, es wurden also die eigens entworfenen Lautsprechermodelle genauso im virtuellen Raum installiert wie im realen. Zwar bietet CATT-Acoustic die Möglichkeit auf ideale Kugelstrahler als Quelle zurückzugreifen, doch sind auch im Vergleich zu Messung 1 die beiden Genelec 1032A implementiert worden, da die kugelförmige Abstrahlung nur im tiefen Frequenzbereich gegeben ist.

Entsprechend der Messpositionen sind in CATT-Acoustic die Receiver, also die virtuellen Hörer, im Raum positioniert worden. Dabei ist die Anzahl dieser reduziert worden.

In den unterschiedlichen Simulationsoptionen schlägt sich die Wahl der Genauigkeit wesentlich auf die Rechenzeit nieder. Wählt man z.B. eine sehr hohe Ordnung der Spiegelquellen, wie das Maximum (9), so beträgt die Simulationsdauer je nach Anzahl der Quellen schnell 70 Stunden und mehr. Vergleichende Simulationen mit geringerer Genauigkeit haben aber gezeigt, dass sich die Ergebnisse nur unwesentlich unterscheiden. In den Tabellen Tabelle 5.2 bis Tabelle 5.4 sind die wichtigsten Einstellungen zusammengefasst.

<b>Audience area mapping</b>	
Number of rays/oct	255422
Ray truncation time	800ms
Mep step	0,25m
Map height	1,6m / 1,2m

Tabelle 5.2: Einstellungen in CATT-Acoustic (AAM)

<b>Early part detailed Image Source Model</b>	
Specular refl. order	6
Diffuse refl. order	1
I.S. truncation time	800ms

Tabelle 5.3: Einstellung in CATT-Acoustic (IMS)

<b>Full detailed calculation</b>	
Number of rays/oct	12381
Ray truncation time	800ms

Tabelle 5.4: Einstellung in CATT-Acoustic (FDC)

## 5.2.1 Lautsprecher

Um möglichst realistische Ergebnisse in CATT-Acoustic zu simulieren, ist es möglich, eigene Lautsprechermodelle in der Simulationssoftware zu erstellen. Mit Hilfe des ‚Directivity-Moduls‘ lassen sich beliebige reale Lautsprecher nachbilden, indem man die jeweilige Richtcharakteristik für die horizontale und vertikale Ebene eingibt. Dazu wird eine Eingabemaske zur Verfügung gestellt, in der der entsprechende richtungsabhängige Schalldruckpegel für jedes Oktavband in 15°-Schritten direkt in ein Polardiagramm eingegeben werden kann. Um in der graphischen Abbildung in CATT-Acoustic den jeweiligen Lautsprecher realistisch darzustellen, finden auch die Abmessungen des Monitors Berücksichtigung. Auf diese Weise lassen sich beliebige Lautsprecher im SD0-Format (\*.sd0) abspeichern und stehen so jederzeit für eine Implementierung in den Source-Files zur Verfügung.

Im Regieraum wurden bisher die Lautsprecher „Genelec 1032 A“ als Stereopaar verwendet. Als Alternative hierzu soll - ebenfalls zur Stereowiedergabe - ein System aus Manger-Schallwandler und Basswürfel ergänzt werden, die im Rahmen einer Projektarbeit gebaut wurden<sup>1</sup>. Für die Surround-Anordnung stehen fünf „Genelec 1030 A“ zur Verfügung.

Um die erforderlichen Daten für die SD0-Formate zu erhalten, sind die Lautsprecher vermessen worden.

Hierzu stand ein Messsystem von Audioprecision zu Verfügung. Mit Hilfe von Makros<sup>2</sup> innerhalb der Benutzersoftware „APWIN“ kombiniert mit „Microsoft Excel“ konnten sowohl

<sup>1</sup> Projektarbeit-Toningenieur von Harald Pairits

<sup>2</sup> Projektarbeit-Toningenieur von Philip Sonnleitner

die Richtcharakteristik als auch der Frequenzgang ermittelt werden.

Die Messungen wurden auf dem Dach des Institutes für Breitbandkommunikation durchgeführt, um Einflüsse von Räumen auszuschließen. Zwar konnte auch so nicht wirklich eine Freifeldmessung stattfinden, die dennoch auftretenden Reflexionen des Bodens sind aber klar erkennbar und es konnte eine ausreichende untere Grenzfrequenz erreicht werden.

Die Bestimmung des Frequenzganges erfolgte über die Kombination aus Fernfeld- und Nahfeld-Messung, um auch den untersten Frequenzbereich erfassen zu können.

Die Richtcharakteristik wurde entsprechend des Directivity-Moduls in CATT-Acoustic in 15°-Schritten durchgeführt. Dazu wurde der Lautsprecher mit einem Stativ auf eine drehbare Scheibe gestellt, die mit einer Winkelskala versehen ist. So ist es möglich, bei konstanter Mikrofonposition die Richtcharakteristik des Lautsprechers in horizontaler und vertikaler Achse zu bestimmen.

### **5.2.1.1 Genelec 1032 A**

Bei Ausnutzung der größtmöglichen Stativlänge konnte bei der Genelec 1032 eine Mikrofonhöhe von 2,24m erreicht werden. Die erste Reflexion, die die Fenstergröße zur Bestimmung des Frequenzganges festlegt, kann nur vom Boden verursacht werden, da sich sonst keine weiteren Flächen in der Umgebung des Messaufbaus befunden haben. Durch die Mikrofonhöhe und einen Abstand von 0,50m zur Membran ist also mit einer Laufzeit von ca. 12ms bis zum Eintreffen der ersten Reflexion zu rechnen. In diesem Zeitraum liegen also Freifeldbedingungen vor. Als untere Grenzfrequenz ergibt sich damit ca. 83Hz. Tatsächlich konnte in APWIN eine Fenstergröße manuell gewählt werden, die eine Grenzfrequenz von 87Hz ermöglicht.

Der Verlauf unterhalb dieser Grenze für die Fernfeldmessung konnte durch die Nahfeldmessung bestimmt werden. Hier wurde ein Mikrofonabstand von 3cm eingestellt.

Als Übergangsfrequenz zwischen Nah- und Fernfeldmessung wurde 90Hz gewählt. Der vollständige Frequenzgang ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

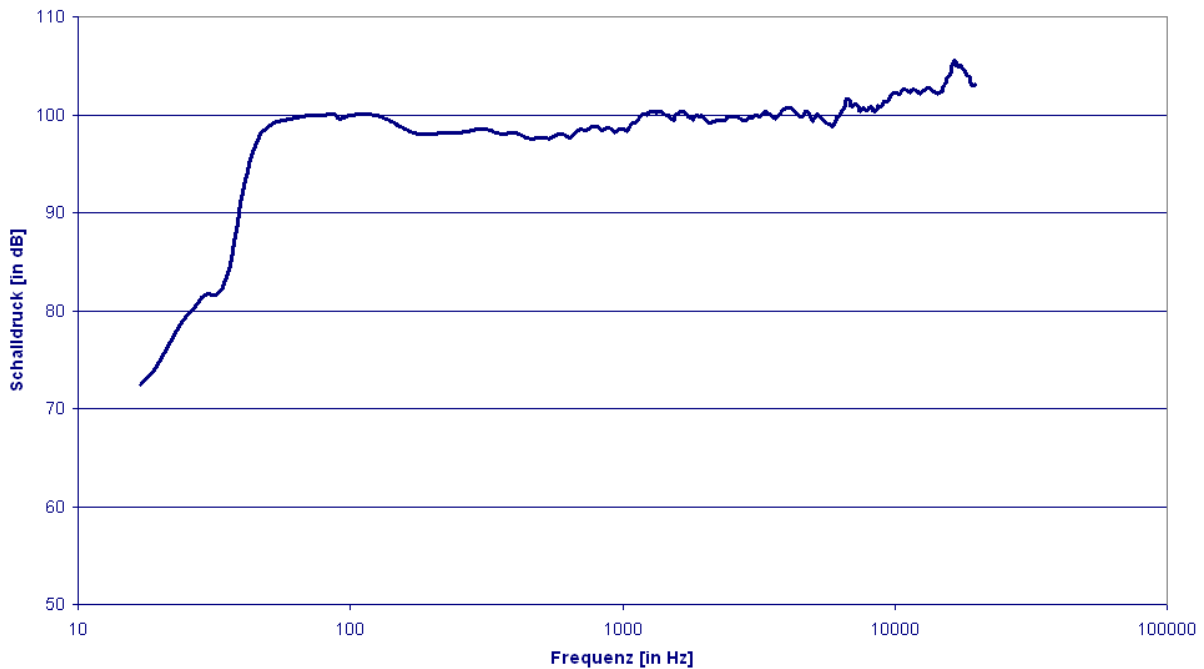
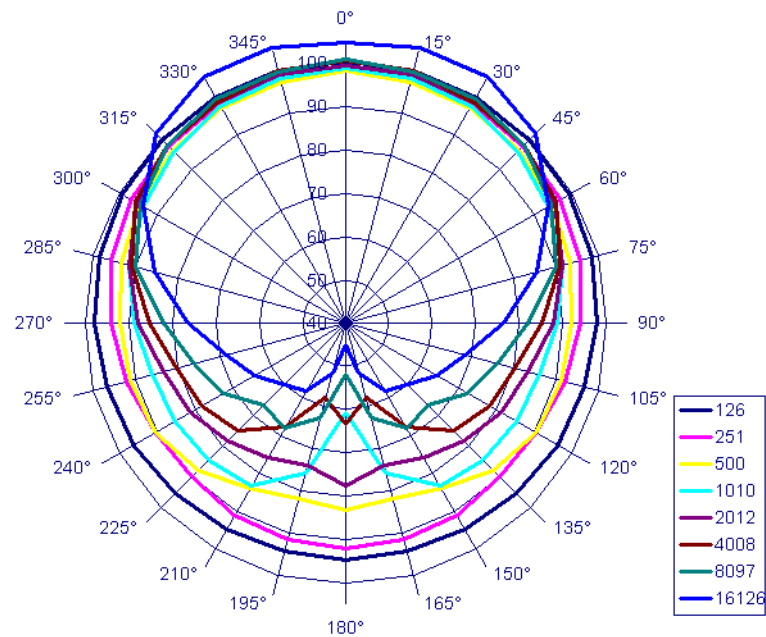


Abbildung 5.2: Genelec 1032 A – Frequenzgang

Die Richtcharakteristik wurde in zwei Ebenen gemessen. Da der Lautsprecher symmetrisch aufgebaut ist, reicht es aus, für die horizontale Ebene bis  $180^\circ$  zu messen, und die korrespondierenden Werte zu spiegeln, so dass ein vollständiges Poldiagramm entsteht.

Abbildung 5.3 zeigt ein solches Diagramm. Bei tiefen Frequenzen zeigt sich eine nahezu kugelförmige Abstrahlung, mit steigenden Frequenzen kommt es immer deutlicher zu einer Richtwirkung nach vorn, die Abstrahlung nach hinten wird immer geringer. In einem Bereich von  $\pm 30^\circ$  kann von einem gleichmäßigen Pegel ausgegangen werden. Je nach Frequenz kommt es dann bei größeren Winkeln zu einer Pegelabschwächung.



**Abbildung 5.3: Genelec 1032 A - Richtcharakteristik (horizontal)**

Um die vertikale Richtcharakteristik zu bestimmen, wurde der Lautsprecher um  $90^\circ$  gedreht, also auf die Seite gelegt. Auf diese Weise konnte auch diese Ebene mit dem gleichen Messaufbau gemessen werden. Da in diesem Fall die Box nicht mehr symmetrisch aufgebaut ist, war es nötig Werte für  $360^\circ$  aufzunehmen. In Abbildung 5.4 ist die vertikale Richtcharakteristik dargestellt.  $90^\circ$  entspricht einer Abstrahlrichtung nach oben,  $270^\circ$  einer nach unten.

Im Diagramm wird neben der frequenzabhängigen Richtwirkung auch der unsymmetrische Verlauf der Abstrahlung zwischen oben und unten deutlich.

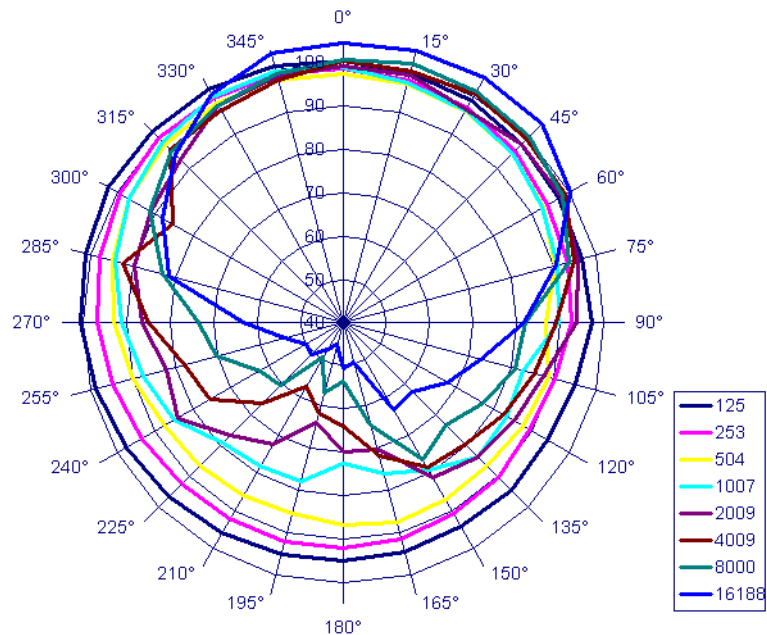


Abbildung 5.4: Genelec 1032 A - Richtcharakteristik (vertikal)

Aus diesen Diagrammen wurde die Charakteristik des Lautsprechers für CATT-Acoustic übernommen. Da in der Software die Werte für  $0^\circ$  auf 0dB festgelegt sind, wurden alle bemessenen Werte entsprechend auf den jeweiligen  $0^\circ$ -Wert normiert. Neben einer Darstellung der Richtcharakteristik als Poldiagramm für jedes Oktavband bietet CATT-Acoustic auch die Möglichkeit einer 3D-Graphik, genannt „Balloon“. Als Beispiel hierfür zeigt Abbildung 5.5 die Richtcharakteristik für 2000Hz.

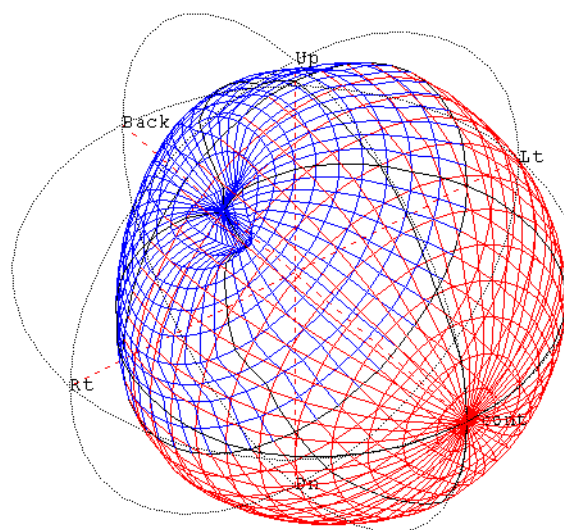


Abbildung 5.5: Richtcharakteristik in CATT-Acoustic - 2000Hz, Genelec 1032 A

### 5.2.1.2 Genelec 1030 A

Entsprechend zum Lautsprecher Genelec 1032 A wurde die Messung am Genelec 1030 A durchgeführt. Aufgrund kleinerer Abmessungen dieses Lautsprechergehäuses konnte eine Mikrofonhöhe von 2,14m erreicht werden. Daraus resultierte eine untere Grenzfrequenz von 96Hz bei einem Mikrofonabstand von 0,50m. Die Übergangsfrequenz von Nahfeld- zu Fernfeldmessung vom Frequenzgang, dargestellt in Abbildung 5.6, ist 120Hz. Die Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 zeigen die Polardiagramme für horizontale und vertikale Richtcharakteristik.

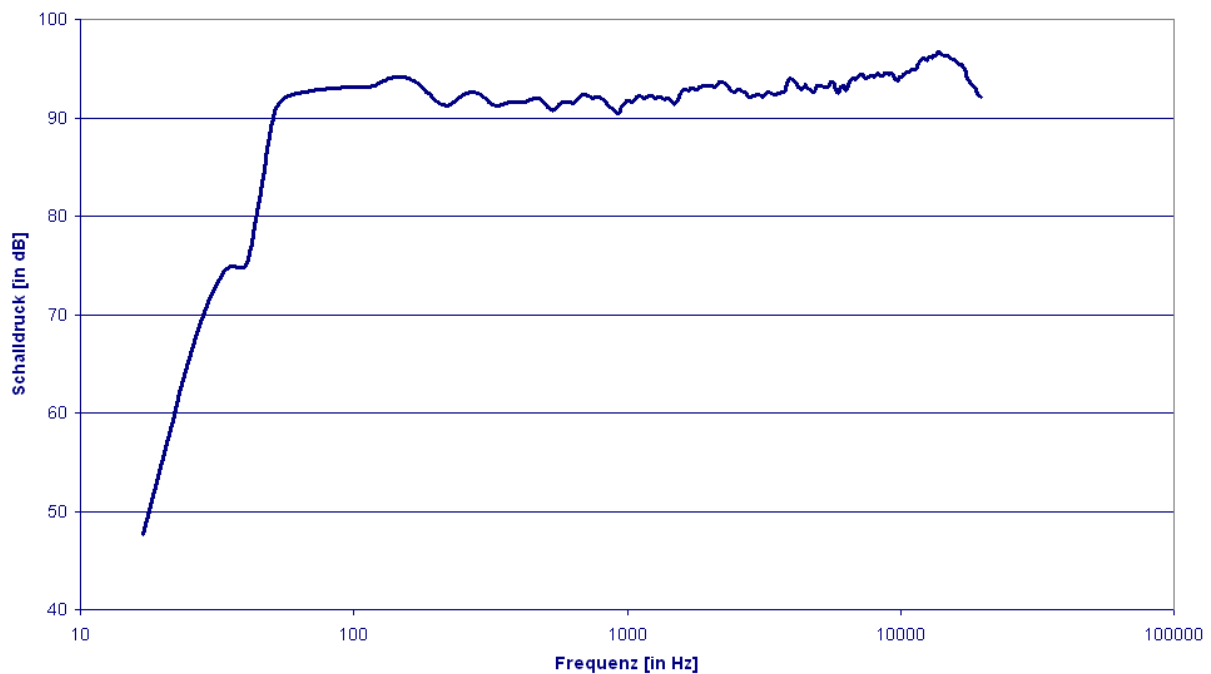


Abbildung 5.6: Genelec 1030 A – Frequenzgang

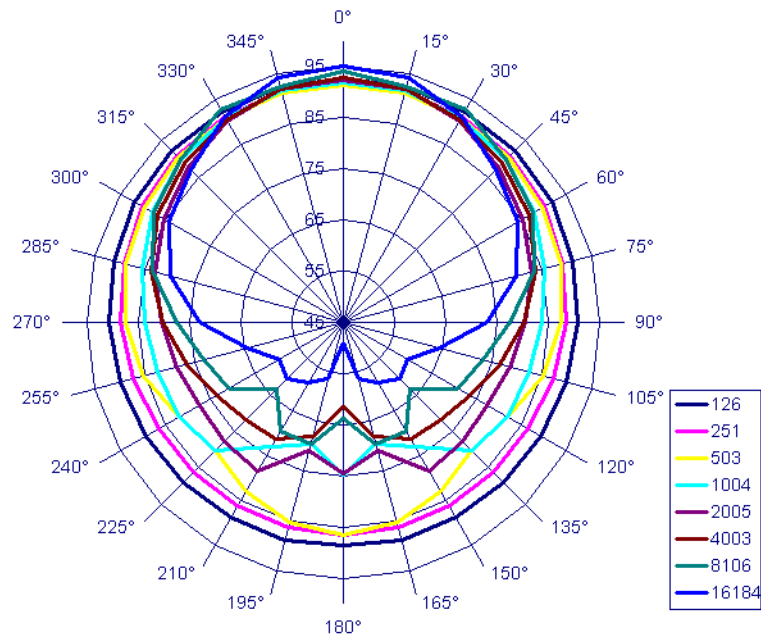


Abbildung 5.7: Genelec 1030 A - Richtcharakteristik (horizontal)

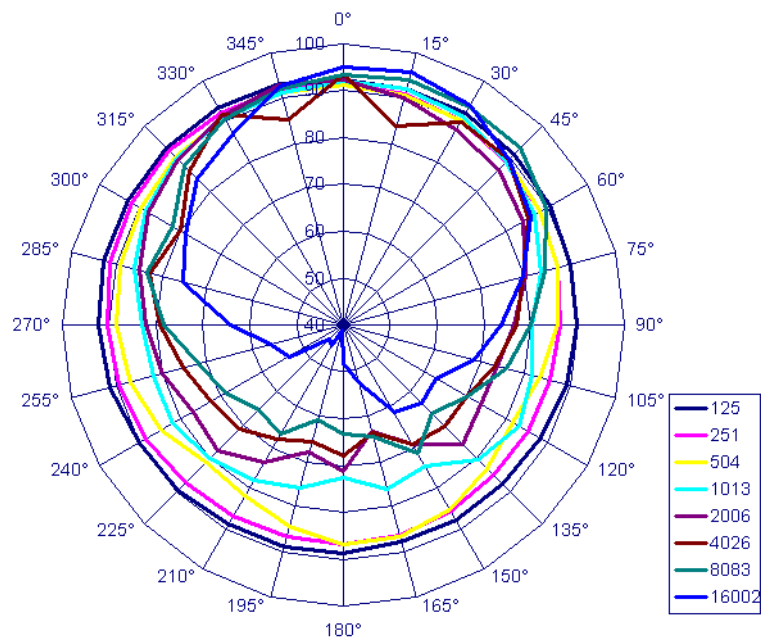


Abbildung 5.8: Genelec 1030 A - Richtcharakteristik (vertikal)

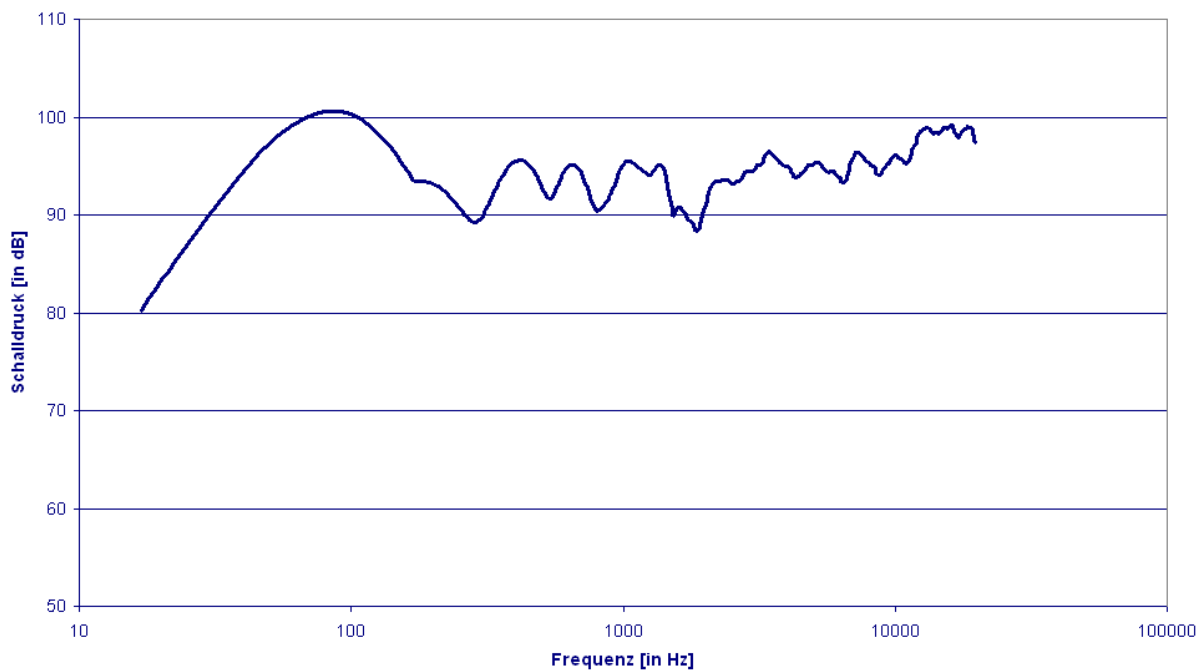
### 5.2.1.3 Manger-Schallwandler

Bei dem Manger-Schallwandler (MSW) handelt es sich um ein Lautsprechersystem bestehend aus einem MSW, eingebaut in ein würfelförmiges Gehäuse, und einem Tieftöner in einem



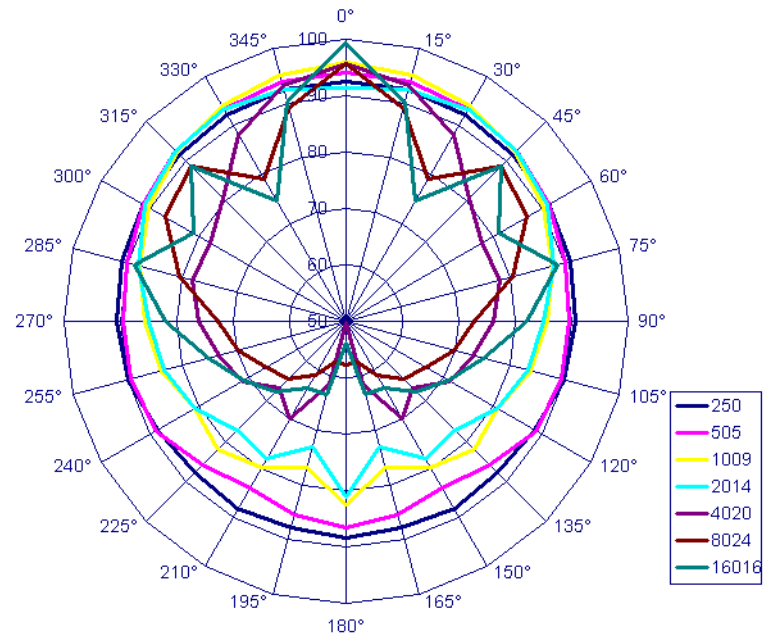
weiteren geschlossenen Gehäuse. Beide werden über eine Frequenzweiche angesteuert. Die Messungen von Frequenzgang und Richtcharakteristik wurden so wie bei den Genelec-Lautsprechern durchgeführt. Allerdings konnte für die Messung der vertikalen Ebene aufgrund der Größe und der Abmessung des gesamten Lautsprechersystems nur der MSW auf die Seite gedreht werden. Da aber bei tiefen Frequenzen von einer kugelförmigen Abstrahlung ausgegangen werden kann, wird also nur eine Verzerrung in der Abstrahlsymmetrie die Folge sein. Um aber Werte für ein Lautsprechermodell in CATT-Acoustic zu ermitteln, sollten die Messergebnisse vollkommen ausreichen.

Abbildung 5.9 stellt den Frequenzgang mit einer Übergangsfrequenz von 120Hz dar.

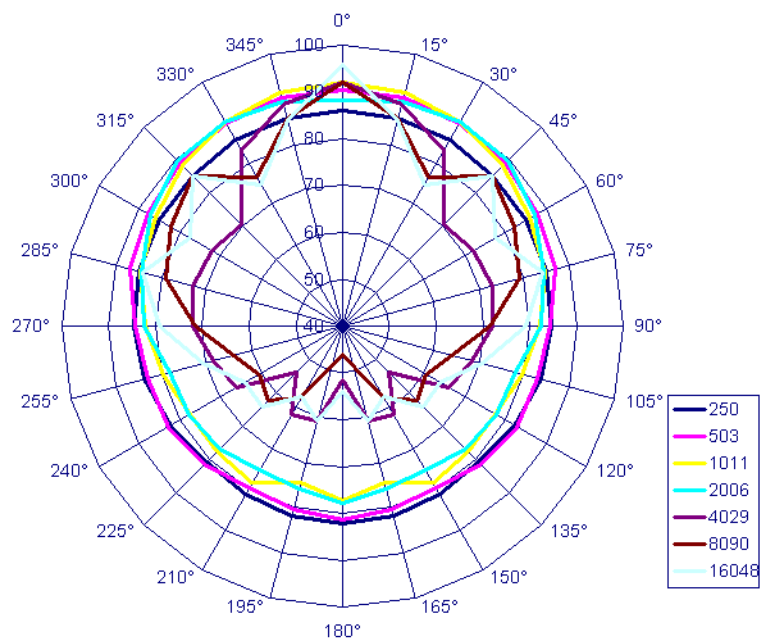


**Abbildung 5.9: Manger Schallwandler – Frequenzgang**

Die folgenden Abbildungen Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 zeigen die Polardiagramme. Hier zeigt sich, dass bereits bei 15° Abweichung von der Hauptachse deutliche Pegelverluste bei hohen Frequenzen auftreten. Dieses Messergebnis wird bestätigt, wenn man sich bei Musikwiedergabe aus der 0°-Abstrahlrichtung herausbewegt. Bereits bei geringer Entfernung zu dieser ist ein enormer Verlust der Brillanz zu hören, also eine deutliche Abschwächung der hohen Frequenzen feststellbar. Eine sinnvolle Beurteilung von Audiomaterial erscheint also nur dann möglich, wenn man sich in einer idealen Position zum Lautsprechersystem befindet.



**Abbildung 5.10: Manger Schallwandler - Richtcharakteristik (horizontal)**



**Abbildung 5.11: Manger Schallwandler - Richtcharakteristik (vertikal)**

Für jeden dieser drei Lautsprechertypen wurden in CATT-Acoustic eigene Modelle erstellt, welche in den Simulationen verwendet wurden. Im Falle der Genelec 1032 A wurden auch Modelle erstellt, die einer liegenden Box entsprechen.

## 5.2.2 Vergleich der Simulation mit Messung 1

Messung 1 sollte Aufschluss über akustische Parameter und deren Tendenzen im Raum geben. Dazu wurde der Raum mit zwei Lautsprechern angeregt und die Impulsantworten an vielen Messpunkten im Raum engmaschig aufgenommen.

Im Idealfall sollte eine Simulation die selben Werte an den selben Punkten liefern wie die Messung.

Da sowohl die Messung einer Messabweichung unterlegen ist, also auch die Simulation nur ein Modell sein kann, werden Unterschiede auftreten. Das Ziel besteht also darin, ein Simulationsmodell zu entwerfen, welches dem realen Raum so nahe wie möglich kommt. Bei der Vielzahl an Parametern, die auf die Ergebnisse Einfluss nehmen, ist es schwierig, diese so zu optimieren, dass mangelhafte Ergebnisse zwar verbessert werden können, andere aber nicht wieder unrealistischer werden. Dadurch, dass die Oberflächen im Studio größtenteils in ihren akustischen Eigenschaften bekannt waren, blieben nur wenige unbekannt Materialgrößen, die mit Hilfe von entsprechender Literatur geschätzt werden mussten und in zahlreichen Simulationsdurchgängen optimiert werden konnten.

In der Simulation von Messung 1 wurden 19 Receiver im Raum verteilt, so dass das Raster aus Messung 1 sinnvoll abgedeckt wurde, aber auch eine gewisse Nähe zu Oberflächen bestand, um so die akustischen Werte dieser prüfen zu können.

In den Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 sind die entsprechenden Ergebnisse von  $T_{30}$  und EDT gegenübergestellt. Zum einfacheren Vergleich sind die Werte zu den 19 Messpunkten gemittelt worden.

<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
WinMLS	0,41	0,33	0,37	0,37	0,38	0,35	-	-
CATT	0,40	0,30	0,35	0,37	0,37	0,30	-	-

**Tabelle 5.5:  $T_{30}$  [s] - gemittelt über 19 Messpunkte (M1)**

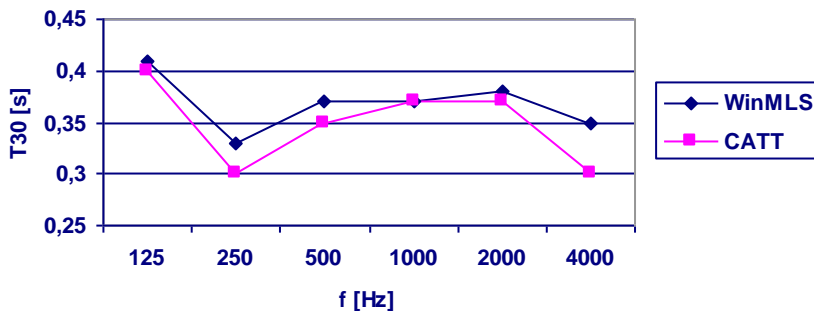


Abbildung 5.12: T<sub>30</sub> gemittelt über 19 Messpunkte (M1)

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
WinMLS	0,36	0,29	0,29	0,35	0,35	0,33	-	-
CATT	0,38	0,29	0,32	0,34	0,34	0,26	-	-

Tabelle 5.6: EDT gemittelt über 19 Messpunkte (M1)

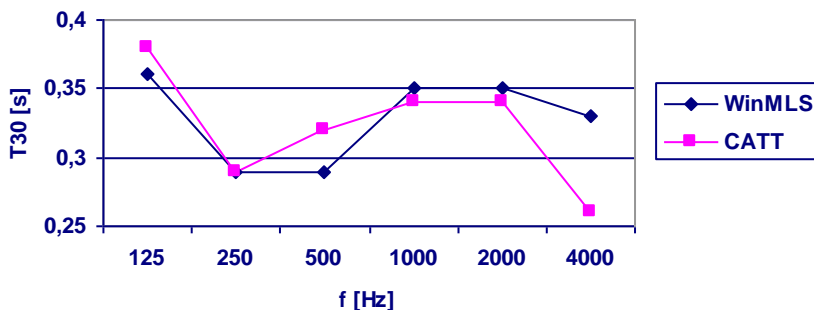


Abbildung 5.13: EDT gemittelt über 19 Messpunkte (M1)

Es zeigen sich deutliche Übereinstimmungen mit Abweichungen von selten mehr als  $\pm 0,05s$ . Auch im Vergleich der direkt korrespondierenden Werte ergeben sich im Allgemeinen Unterschiede dieser Größenordnung, wenn auch vereinzelt Ergebnisse größere Unterschiede aufweisen.

Sehr beeindruckend veranschaulichen die graphischen Ergebnisdarstellungen von CATT-Acoustic die Übereinstimmung mit den realen Werten. Abbildung 5.14 zeigt die Verteilung der  $C_{80}$  im gesamten Raum. Dargestellt sind der Grundriss und die Einrichtung des Studios, dem sich als Farbverlauf das Klarheitsmaß für 2000Hz überlagert. Deutlich erkennbar sind die

Maximalwerte in Quellnähe, sowie unterschiedliche Wertebereiche vor den rechten und linken Schlitzabsorbern. Ganz entsprechend zeigen sich diese Ergebnisse auch in den dargestellten Messwerten aus Messung 1 (Abbildung 5.15). Dass Ergebnisse weniger offensichtlich vergleichbar sind, wenn in CATT-Acoustic eine echte Kugelquelle verwendet wird, zeigt Abbildung 5.16 am Beispiel des  $D_{50}$ .

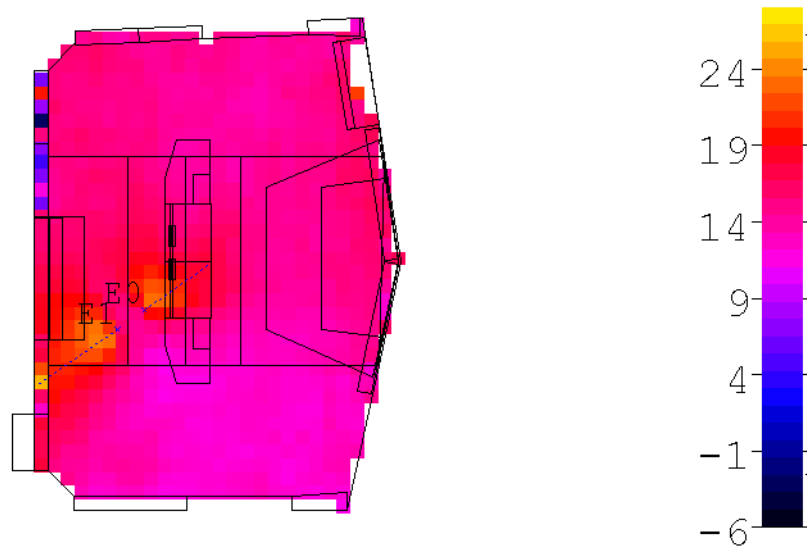


Abbildung 5.14:  $C_{80}$  [dB] - 2000Hz, CATT-Acoustic

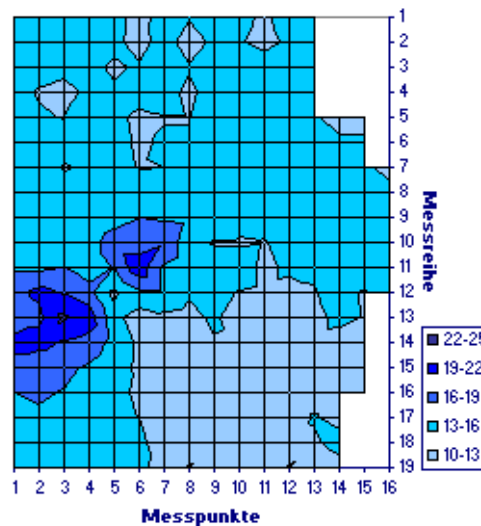


Abbildung 5.15:  $C_{80}$  [dB] - 2000Hz, WinMLS

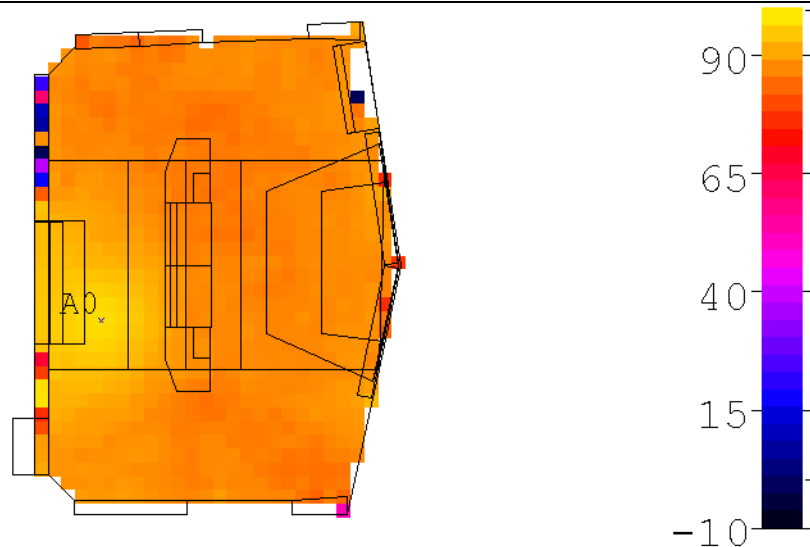


Abbildung 5.16:  $D_{50}$  [%] – 1000Hz, virtuelle Kugelquelle, CATT-Acoustic

### 5.2.3 Vergleich mit Messung 3

Die Motivation zu Messung 3 war die genaue Analyse der Akustik im und um den Abhörplatz einer Surround-Lautsprecheranordnung. Auch hier wurden wieder entsprechend dem Messraster repräsentative Punkte als Receiverstandorte ausgewählt. Ein Wertevergleich der Nachhallzeit zeigt Tabelle 5.7. Abgeführt sind die Mittelwerte der  $T_{30}$  von 14 Messpunkten entsprechend der Messung 3.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
WinMLS	0,39	0,32	0,38	0,40	0,39	0,33	-	-
CATT	0,39	0,30	0,34	0,38	0,36	0,30	-	-

Tabelle 5.7:  $T_{30}$  [s] gemittelt über 14 Messpunkte (M3)

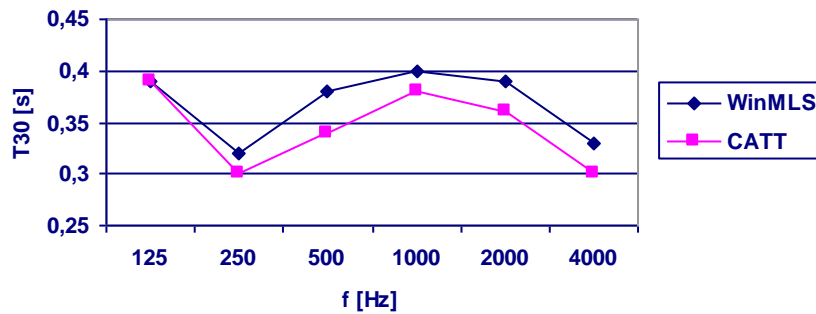


Abbildung 5.17:  $T_{30}$  gemittelt über 14 Messpunkte (M3)

Auch hier ergibt sich eine akzeptable Übereinstimmung der Werte.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Modell des Regieraumes in CATT-Acoustic wirklichkeitsnah implementiert ist und zuverlässige Aussagen über die Akustik mit Hilfe der Software möglich sind.

Das bedeutet, dass durch die Simulationsmöglichkeit zusätzlich zu den Messungen akustische Untersuchungen durchführbar sind, die durch die Messwerte allein nicht möglich wären. So können z.B. Schallstrahlen im Raum dargestellt und verfolgt werden, oder an Receivern eintreffende Reflexionen in wählbaren Zeitintervallen dargestellt werden.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass akustische Veränderungen, die in der Simulation getestet werden, realistische Vorhersagen liefern.

### 5.3 Auswertung der Simulation (normaler Zustand)

Neben den Messungen 3, 4 und 5, die die akustischen Eigenschaften am Abhörort für eine 5.0-Anordnung darstellen sollten, ist es durch die Simulations-Software CATT-Acoustic möglich, weitere detaillierte Untersuchungen durchzuführen. Die akustischen Gütemaße, die ja auch durch die Messungen gewonnen wurden, bestätigen die Glaubwürdigkeit der Simulation, so dass Ergebnisse, die zusätzlich nur durch die Software zugänglich sind, ebenfalls als realistisch anzusehen sind.

CATT-Acoustic arbeitet unter anderem mit der Strahlenverfolgung. Es sendet also von der Quelle Schallstrahlen aus und verfolgt sie mit allen auftretenden Reflexionen bis zum Eintreffen an einem Receiver.

Diese Strahlen kann CATT-Acoustic graphisch und interaktiv darstellen, sodass eine genaue Auswertung dieser Schallverläufe möglich wird.

Eine weitere Darstellung sind die so genannten „Sound Roses“, die alle eintreffenden Schallstrahlen am Receiver innerhalb eines wählbaren Zeitintervalls in Richtung und

relativem Pegel anzeigen.

### 5.3.1 Frühe Reflexionen am Abhörort

Alle Studiokonzepte haben trotz unterschiedlichster Ansätze die Forderung, frühe Reflexionen am Abhörplatz zu vermeiden. Das Ziel ist es, besonders in den ersten 15ms diese zu unterbinden, wenigstens aber so abzuschwächen, dass sie im Pegel deutlich unterhalb des Direktschalls liegen, also mindestens ein Pegelunterschied von 10dB vorliegt.

Wenn Reflexionen innerhalb dieser Zeit beim Hörer ankommen, bedeutet das, dass sie bis zu fünf Metern mehr Wegstrecke zurückgelegt haben als der Direktschall. Bei längeren Distanzen erreichen die Reflexionen den Hörer erst nach den kritischen 15ms.

Oberflächen, die im Vergleich zum Abhörplatz weit von der Quelle entfernt sind, werden also kein Problem darstellen. Ungünstig dagegen werden sich schallharte Flächen in der Nähe von Lautsprechern auswirken.

Im Regieplatz des Studios kommen hier neben der Fensterscheibe zum Aufnahmerraum vor allem auch die wenig absorbierenden Flächen im hinteren Raumteil als Ursache für frühe ungedämpfte Reflexionen in Frage. Aber auch der Fußboden und die Decke lassen bei den gegebenen Abmessungen Laufzeitunterschiede von deutlich weniger als 15ms bzw. 5m zu. Problematisch in Tonregieräumen sind auch immer das Mischpult und andere Studioteknik, die sich zum sinnvollen Arbeiten meist zwischen Lautsprechern und Hörer befinden.

Die aus CATT-Acoustic gewonnene Graphik in Abbildung 5.18 zeigt die eintreffenden Schallstrahlen für die Frequenz 1000Hz am Abhörort (Punkt 5/2 im Messraster für Messung 3, Abbildung 4.31) im Zeitintervall 0 bis 15ms. Die Quelle ist der rechte Frontlautsprecher (R) der Surround-Aufstellung mit dem Radius 1,50m. Die Darstellung erfolgt in drei Ebenen bezogen auf den Hörer. Das Verhältnis der Energie, die auf die jeweilige Fläche projiziert wird, zu der Gesamtenergie ist als Prozentwert angegeben. Alle schwarzen Linien stellen die eintreffenden Schallstrahlen dar. Die Längen entsprechen dabei nicht absoluten Pegeln, sondern sind auf das jeweilige Energiemaximum normalisiert. Der Abstand zwischen den konzentrischen Kreisen entspricht einem Pegelunterschied von 10dB.



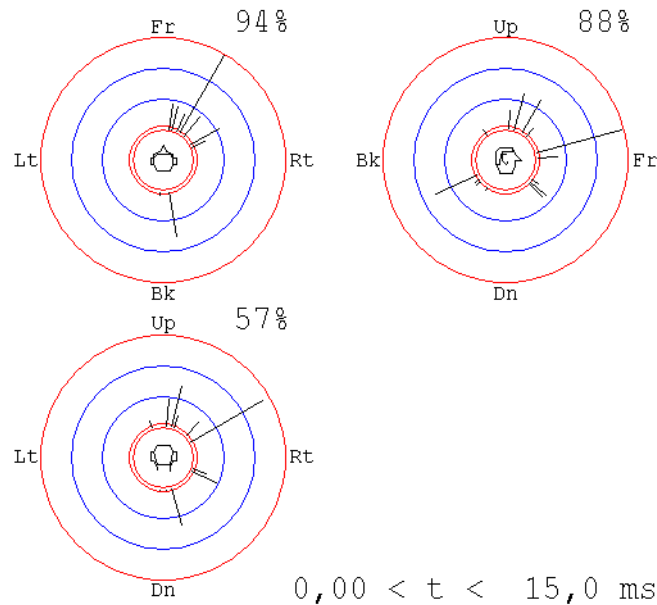
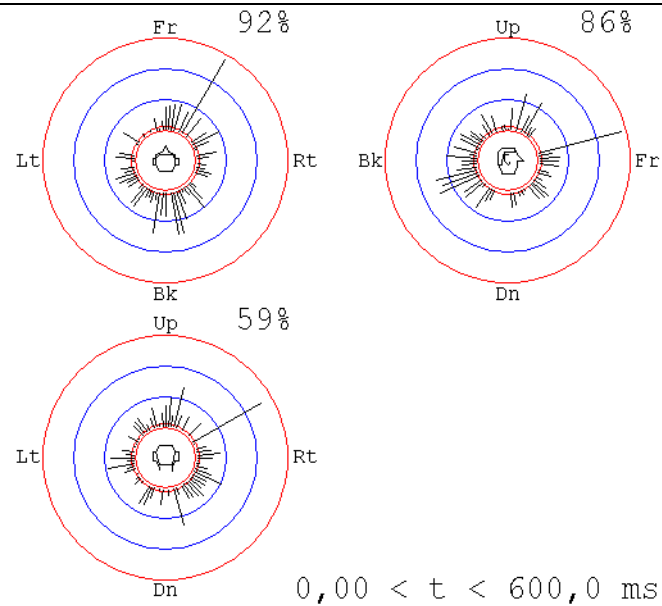


Abbildung 5.18: Eintreffende Schallstrahlen bei 1000Hz, Quelle R (R\_C0\_03\_1k<sup>1</sup>)

Deutlich ist der Direktschall als längste Linie zu erkennen, die auch aus der erwarteten Richtung des Lautsprechers einfällt. Dieser befindet sich schließlich auf 30° und ist ca. 15° geneigt. Alle folgenden Reflexionen sind deutlich schwächer, ein Pegelunterschied von mehr als 10dB ist immer gegeben. Die weiteren deutlichen Reflexionen stammen von der Decke. Im weiteren zeitlichen Verlauf kommen mehr und mehr Schallstrahlen beim Hörer an, die zusammen ein homogenes diffuses Schallfeld verdeutlichen. Abbildung 5.19 zeigt alle Reflexionen, die innerhalb der ersten 600ms beim Hörer eintreffen. Auf Grund der Nähe von Quelle und Hörer und der Nahfeldsituation fallen alle Reflexionen deutlich schwächer aus als der Direktschall.

<sup>1</sup> Bedeutung der Beschriftung: R steht für Sound Roses, C0 ist die Quelle, 03 der Receiver, 1k die Frequenz



**Abbildung 5.19: Eintreffende Schallstrahlen bei 1000Hz, Quelle R (R\_C0\_03\_1K)**

Erkennbar ist auch das LEDE-Konzept, da aus dem vorderen Raumbereich weniger Schallstrahlen zurückgeworfen werden bzw. vorhandene Strahlen deutlicher abgeschwächt worden sind. Ebenfalls begünstigt das Abstrahlverhalten des Lautsprechers den geringeren Pegel der frühen Reflexionen. Da bei 1000Hz schon eine deutliche Richtwirkung des Tonmonitors auftritt, fallen diese schwächer an Oberflächen hinter der Quelle aus. So kommt es bei tieferen Frequenzen zu deutlich größeren Pegeln durch Rückwürfe von Schall an der Frontseite des Studios, z.B. an der Studioscheibe. Durch die kugelförmige Abstrahlung bei diesen Frequenzen wird mehr Energie auch entgegen der eigentlichen Abstrahlrichtung frei, was natürlich auch höhere Pegel bei entsprechenden Reflexionen bedeutet. Abbildung 5.20 zeigt die Sound-Roses-Darstellung für den rechten Frontlautsprecher bei 250Hz.

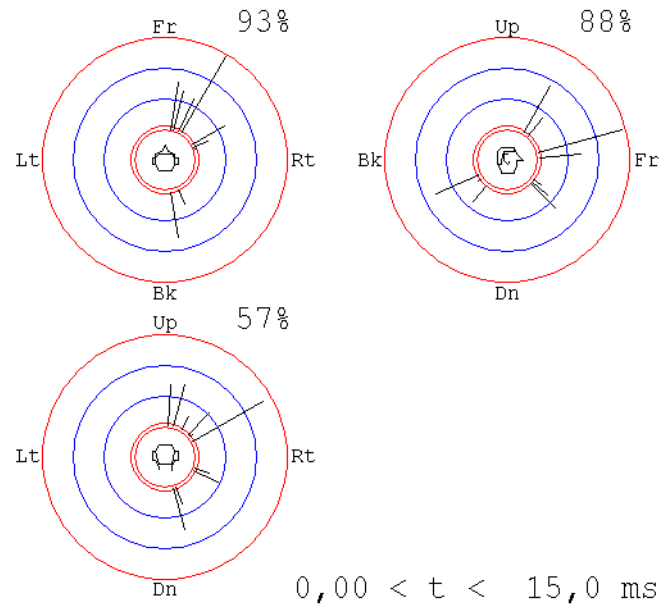


Abbildung 5.20: Eintreffende Schallstrahlen bei 250Hz, Quelle R (R\_C0\_03\_250)

Entsprechende Darstellungen mit dem Center-Lautsprecher (C) als Quelle zeigen wieder den Direktschall als stärksten Strahl, diesmal aus der 0°-Richtung (Abbildung 5.21).

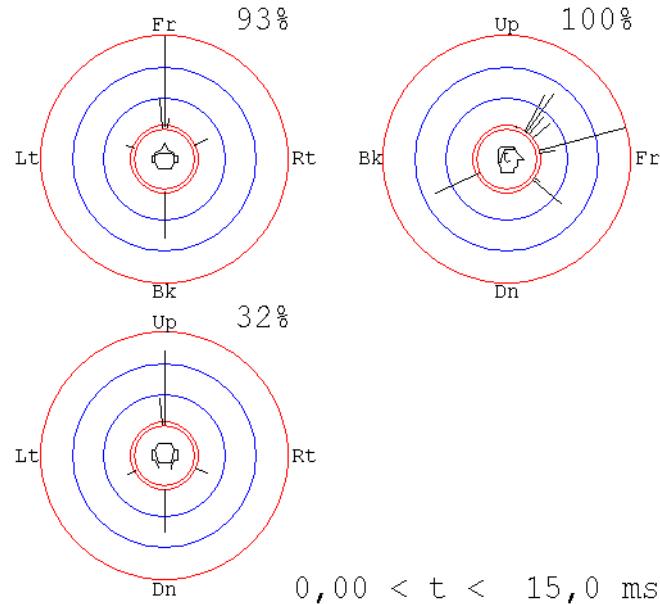


Abbildung 5.21: Eintreffende Schallstrahlen bei 250Hz, Quelle C (R\_C1\_03\_250)

Zusätzlich kommt es zu Reflexionen am Studiofenster und an der Decke. Der deutlich ausgeprägte Schallstrahl von schräg vorne unten kommt von der Mischpultoberfläche. Diese Reflexion ist aber bereits höherer Ordnung (Lautsprecher - Boden - Decke - Pult - Receiver

03).

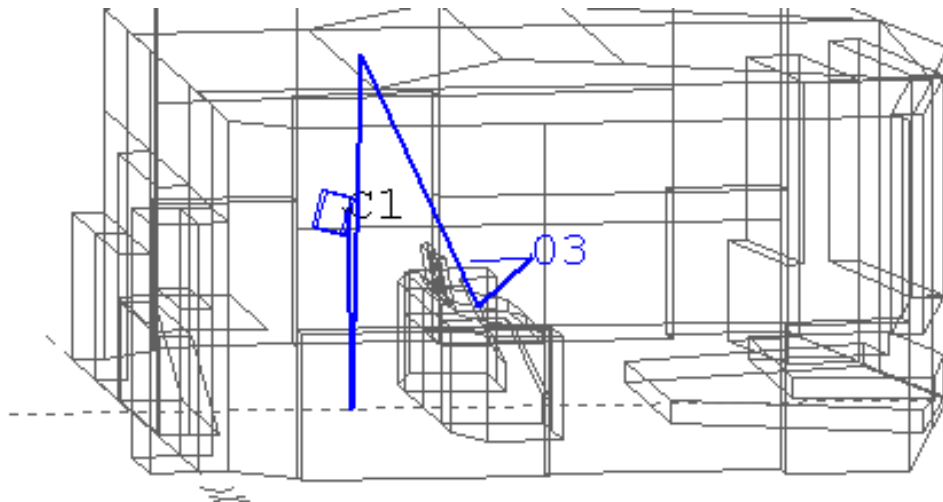


Abbildung 5.22: Strahlverfolgung in CATT-Acoustic

Beim linken Frontlautsprecher (L) kommt es ebenfalls zu Reflexionen, die kaum weniger Pegel aufweisen als der Direktschall (Abbildung 5.23). Hier ist es eine Pultreflexion erster Ordnung, die CATT-Acoustic ermittelt hat. Diese ist hier wesentlich deutlicher ausgeprägt als beim rechten Lautsprecher, da die unsymmetrische Anordnung der Bildmonitore frühe Pultreflexionen in diesem Fall verhindert. Alle übrigen Schallstrahlen erreichen eine ausreichende Pegeldifferenz zum Direktschall.

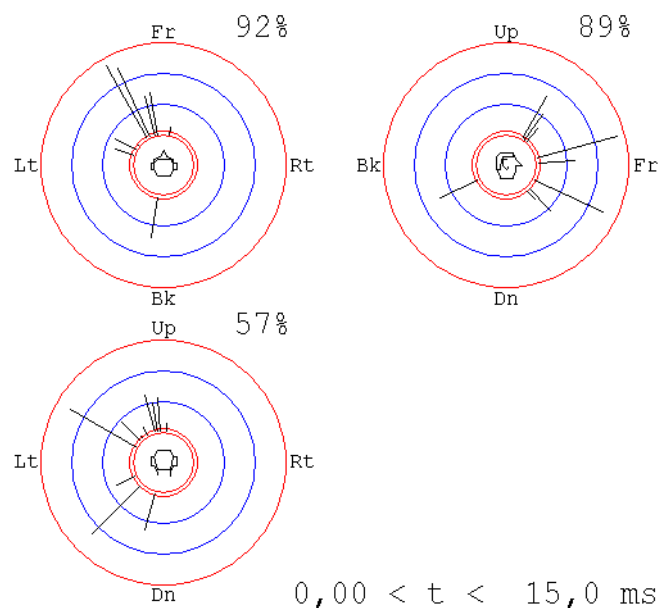


Abbildung 5.23: Eintreffende Schallstrahlen bei 250Hz, Quelle L (R\_C2\_03\_250)

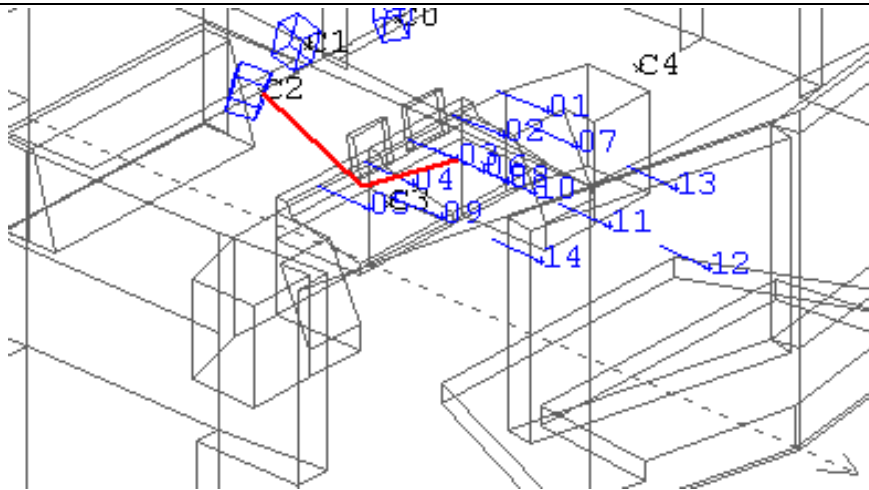


Abbildung 5.24: Strahlverfolgung in CATT-Acoustic - Reflexion am Mischpult

Alle drei Lautsprecher, die bis jetzt auf frühe Reflexionen untersucht wurden, befanden sich im Dead-End, also dort, wo sie entsprechend der akustischen Planung auch platziert sein sollen.

Bei einer Surround-Anordnung sind aber auch Lautsprecher im hinteren Raumteil nötig.

Abbildung 5.25 zeigt die eintreffenden Schallstrahlen am Abhörort unter Verwendung des linken Surround-Lautsprechers (LS) als Quelle.

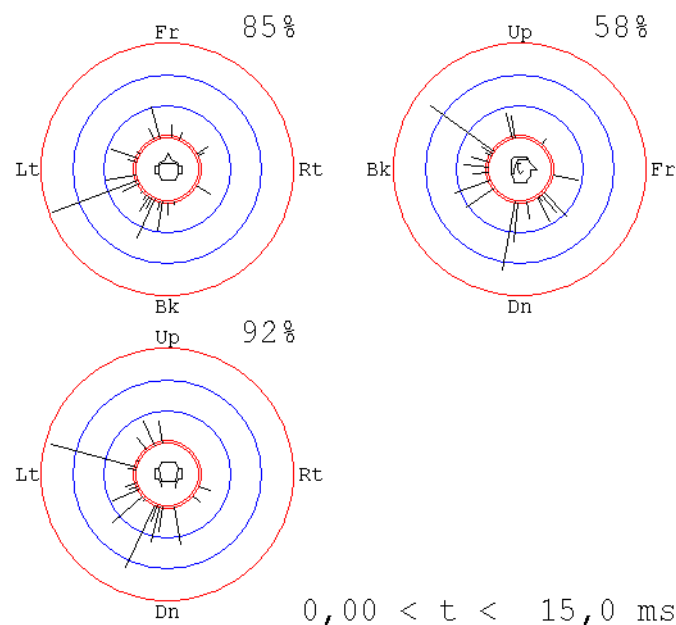
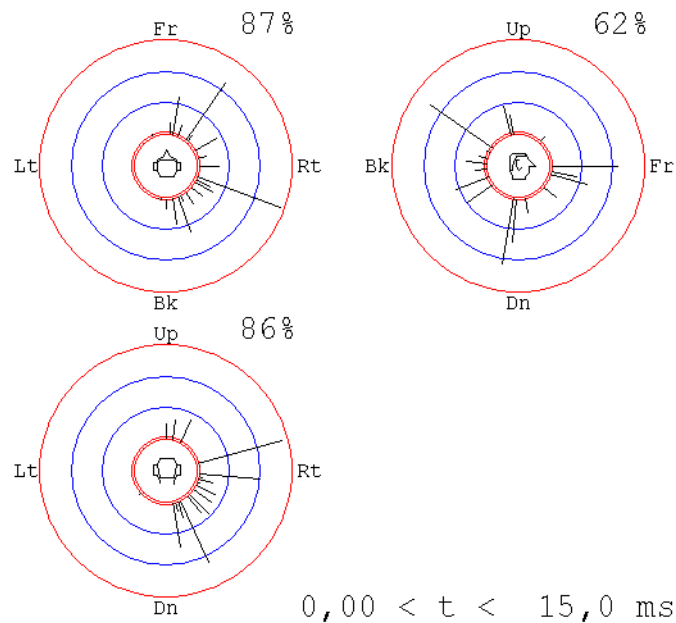


Abbildung 5.25: Eintreffende Schallstrahlen bei 250Hz, Quelle LS (R\_C3\_03\_250)

Hier kommt es zu einer sehr ausgeprägten Reflexion vom Fußboden, die im hinteren

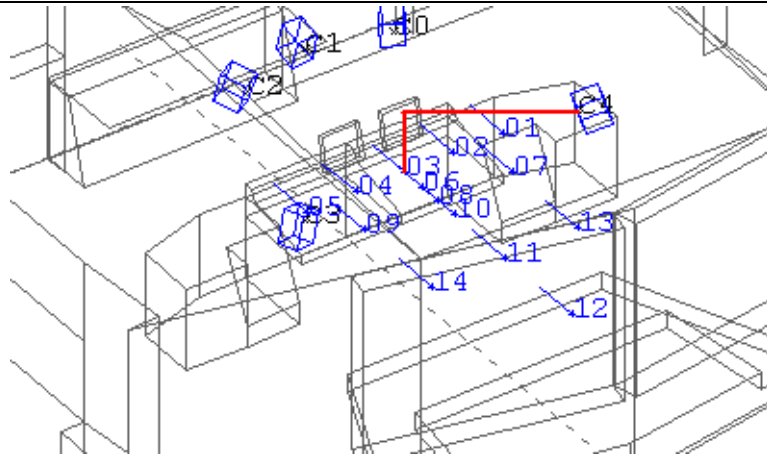
Raumteil nicht wie bei den Frontlautsprechern durch das Mischpult unterbunden wird. Weitere Rückwürfe, teilweise bereits zweiter Ordnung, stammen von der Decke und den begrenzenden Flächen der hinteren Raumhälfte. Diese liegen aber im Schalldruckpegel ausreichend unterhalb des Direktschallpegels.

Entsprechende Ergebnisse liefert Abbildung 5.26, die die Schallstrahlen ausgehend vom rechten Surround-Lautsprecher (RS) am Abhörort darstellt.



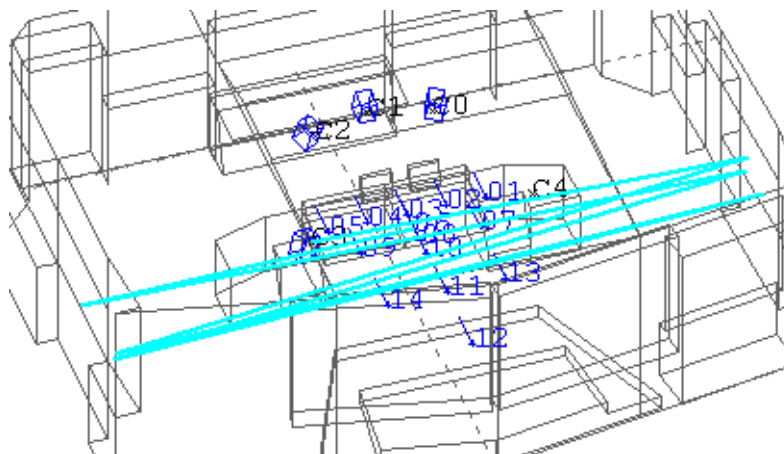
**Abbildung 5.26: Eintreffende Schallstrahlen bei 250Hz, Quelle RS (R\_C4\_03\_250)**

Zusätzlich findet sich hier aber eine starke Reflexion von schräg vorne, die nur einen unwesentlichen Pegelunterschied zum Direktschall aufweist. Diese wird durch den rechten Bildmonitor auf dem Mischpult verursacht. Durch die unsymmetrische Anordnung der Bildschirme kommt es nur ausgehend vom rechten Surround-Lautsprecher zu dieser Art der Reflexion, aber nicht beim linken.



**Abbildung 5.27: Reflexion am Bildmonitor**

Wie bereits in Kapitel 4.7 beschrieben, bilden sich zwischen den Schlitzabsorbern an den Seitenwänden Flatterechos aus, wenn sich Quellen in diesem Teil des Raumes befinden. Auch diese lassen sich mit Hilfe von CATT-Acoustic sichtbar machen (Abbildung 5.28).



**Abbildung 5.28: Flatterechos im Live-End (CATT-Acoustic)**

Alle Abbildungen bezüglich der frühen Reflexionen haben bis jetzt nur den idealen Abhörort der 5.0-Anordnung behandelt. Betrachtet man die eintreffenden Reflexionen an anderen Orten, also für andere Receiver in CATT-Acoustic, so kommt es mit zunehmender Entfernung zum Sweetspot zu immer deutlicheren Verschiebungen der Direktschallrichtungen. Eine genaue Beurteilung der Ortung von Audiomaterial ist also nicht mehr gegeben. Zusätzlich wird besonders bei Plätzen auf dem Holzpodest das Verhältnis von Direktschall und Reflexionen durch die größere Entfernung zur Quelle und durch den geringen Abstand zu den Diffusoren ungünstiger (Abbildung 5.29 und Abbildung 5.30).

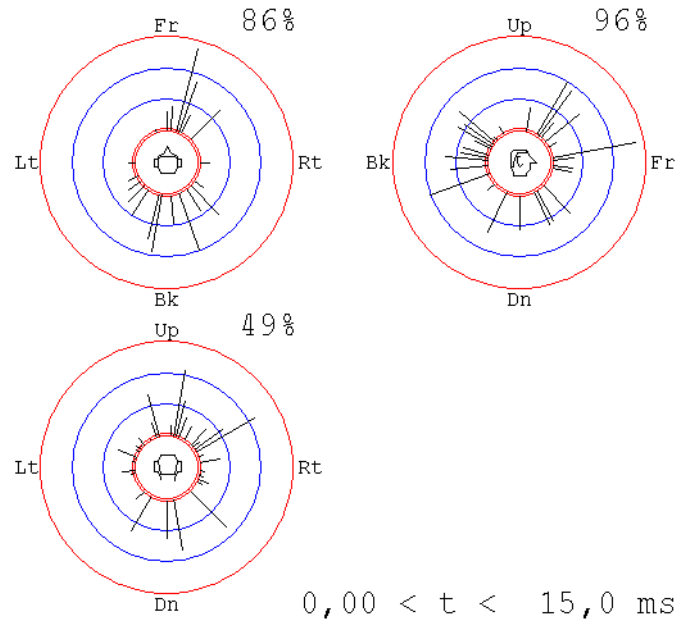


Abbildung 5.29: Eintreffende Schallstrahlen bei 1000Hz, Quelle R (R\_C0\_11\_1k)

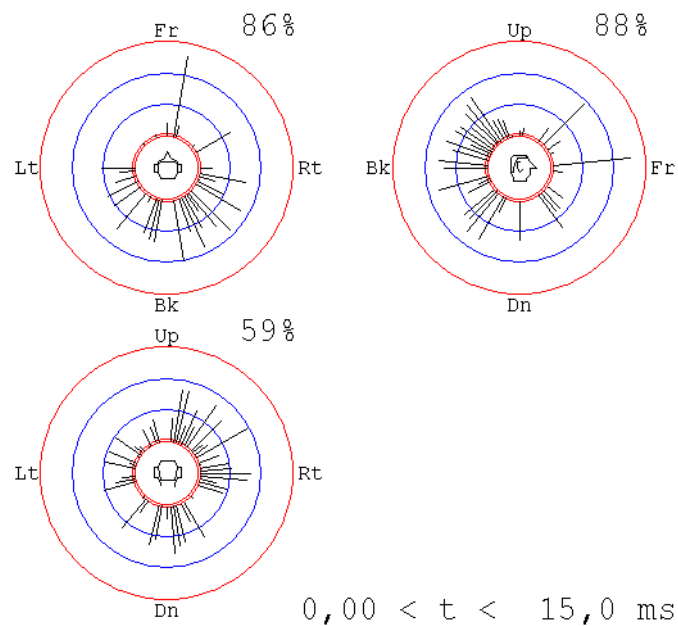


Abbildung 5.30: Eintreffende Schallstrahlen bei 1000Hz, Quelle R (R\_C0\_12\_1k)

Diese Receiver-Positionen befinden sich aber auch bereits deutlich hinter den Surround-Lautsprechern der 5.0-Anordnung und kommen daher als Abhörplatz überhaupt nicht in Frage.



## 5.4 Simulation von Studioveränderungen

Neben dem Verdeutlichen von weiteren akustischen Eigenschaften des Raumes, wie z.B. der Strahlverfolgung, die durch die Messungen allein nicht feststellbar sind, ist es mit Hilfe der Simulation vor allem möglich, Vorhersagen über die Auswirkung von akustischen Veränderungen zu treffen.

So können also verschiedene Möglichkeiten akustischer Optimierungen ausprobiert und verglichen werden, bis eine optimale Lösung gefunden ist. Es können dann gezielte Umbaumaßnahmen stattfinden, deren akustische Wirkungen bereits durch die Simulation bekannt und erprobt sind.

Durch die Integration einer Lautsprecheranordnung für Surroundwiedergabe kommt es im Regieraum zu folgenden akustischen Mängeln:

- Die Anregung des Flatterechos zwischen den Schlitzabsorbern wird durch die Surround-Lautsprecher begünstigt.
- Durch den Centerlautsprecher und die Nahfeld-Aufstellung der Frontlautsprecher kann es zu ungünstigen Reflexionen am Studiofenster kommen.
- Die Diffusoren an der Rückwand wirken dem Surround-Ansatz, einen Raumeindruck durch die Surround-Lautsprecher zu generieren, entgegen.
- Die Nachhallzeit entspricht nicht mehr der Norm.

In verschiedenen Simulationsdurchläufen in CATT-Acoustic ist versucht worden, Lösungen zu finden, um diese Fehler zu minimieren bzw. zu beheben.

### 5.4.1 Verhinderung des Flatterechos

Ein Flatterecho bildet sich aus, wenn sich eine Schallquelle zwischen den Schlitzabsorbern an den Seitenwänden befindet. Obwohl die beiden Wände nicht wirklich parallel verlaufen, reicht der geringe Winkel aus, um den Schall mehrfach hin- und zurückzuwerfen. Unterstützt wird dieses Phänomen noch durch die nach innen geneigten Plattenabsorber, die sich den Schlitzabsorbern nach hinten anschließen (Abbildung 5.28).

Flatterechos werden am einfachsten und wirkungsvollsten durch Vermeidung von parallelen Wänden unterbunden. Da die Schlitzabsorber in den Montagerahmen integriert sind, könnte durch eine geeignete Veränderung des Rahmens eine Drehung der Absorber erreicht werden, die ausreichend ist, das Flatterecho einzudämmen. Gleichzeitig ist es wünschenswert, bei einer Veränderung der Schlitzabsorber auch grundsätzlich frühe Reflexionen zum Abhörort zu verhindern. Ausgehend von der Surround-Anordnung mit dem Radius 1,50m (vgl. Messung 3) ist ein Herausdrehen der Absorber an der nach vorne gerichteten Seite von 0,5m

ausreichend, um sowohl das Flatterecho zu eliminieren als auch frühe Reflexionen am Abhörort zu vermeiden. Abbildung 5.31 zeigt diese Veränderung (Variante 1) und mögliche Reflexionen<sup>1</sup>. Sie zeigt aber auch, dass für Lautsprecheranordnungen, bei denen sich Boxen weiter hinten im Raum befinden, immer noch frühe Reflexionen in den Abhörbereich gelangen. Durch den größeren Abstand zum Hörer und den geringeren Abstand zur Wand sind diese zudem noch ungünstiger. Ein Drehen der Schlitzabsorber so weit, dass auch bei der großen Surround-Anordnung (2,50m Radius) eine reflexionsfreie Zone am Mischpult entsteht, ist unrealistisch.

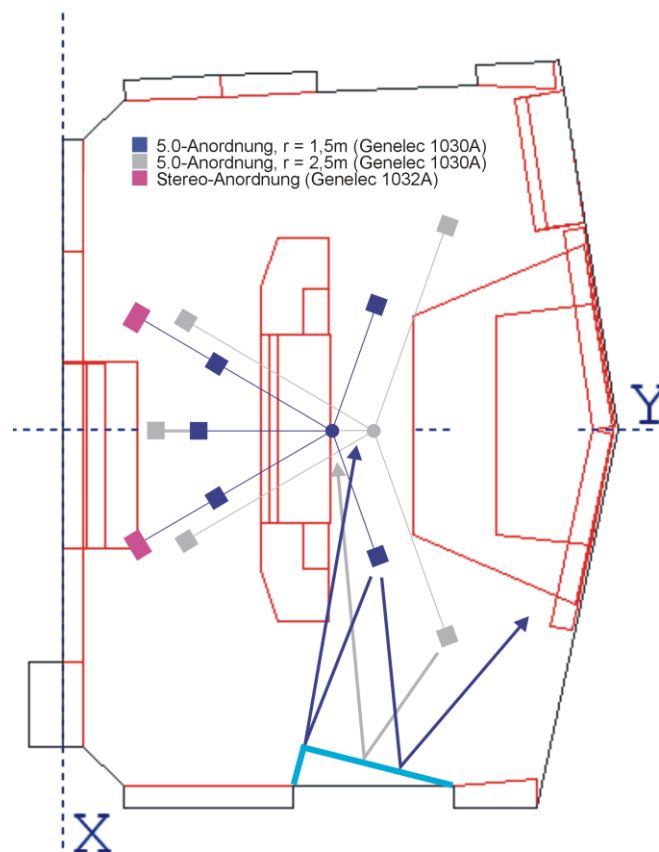


Abbildung 5.31: Veränderung der Schlitzabsorber - Var. 1

Soll eine Wandstruktur entstehen, die für alle Quellpositionen sicherstellt, dass keine frühen Reflexionen den Hörer erreichen, muss diese stumpfwinkelig sein, wie es in Abbildung 5.32 gezeigt wird (Variante 2). Hierbei befindet sich die Spitze ungefähr auf gleicher Höhe mit dem Abhörplatz, sodass in diese Richtung kein Schall reflektiert werden kann.

<sup>1</sup> Es werden immer beide Schlitzabsorber symmetrisch verändert, in den Abbildungen werden die Änderungen aber nur beispielhaft auf der linken Seite gezeigt.

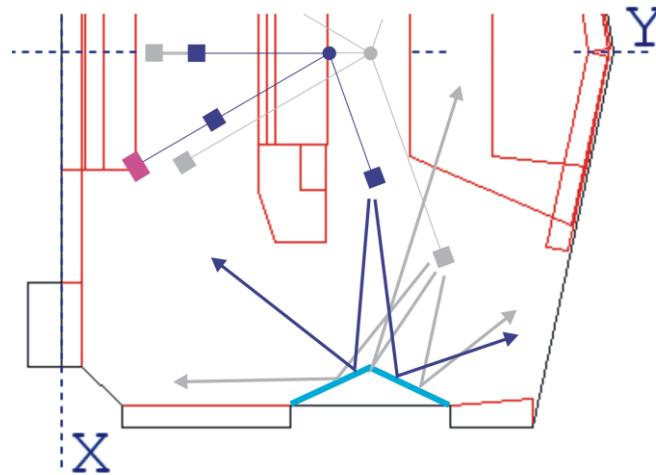


Abbildung 5.32: Veränderung der Schlitzabsorber - Var. 2

Führt man eine Simulation in CATT-Acoustic mit diesen beiden Varianten durch, zeigt sich, dass in der Strahlverfolgung keine Flatterechos mehr darstellbar sind. Darüber hinaus wird an Hand der Nachhallzeit deutlich, dass sich die Energie zwischen den Schlitzabsorbern nicht mehr so lange hält wie im ursprünglichen Zustand. Die Nachhallzeit nimmt im Frequenzbereich des Flatterechos deutlich ab, wenn die nahezu parallele Wandstruktur aufgelöst wird. Tabelle 5.8 zeigt die Nachhallzeiten am Abhörort (Receiver 08) der großen Surround-Anordnung (2,50m Radius) unter Verwendung des linken Surround-Lautsprechers (Quelle B3).

<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
WinMLS	0,34	0,32	0,38	0,40	0,44	0,39	0,32	0,28
CATT - normal	0,39	0,30	0,36	0,43	0,44	0,37	-	-
CATT - Var. 1	0,38	0,29	0,35	0,37	0,36	0,31	-	-
CATT - Var. 2	0,38	0,31	0,33	0,35	0,32	0,28	-	-

Tabelle 5.8:  $T_{30}$  [s] - Quelle B3, Receiver 08

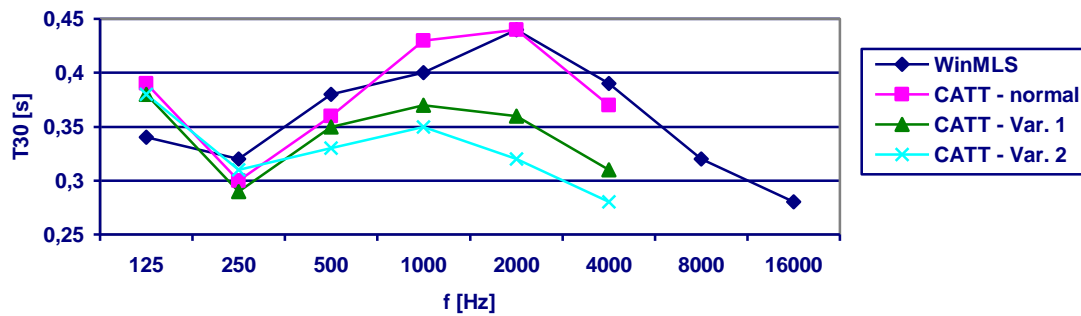


Abbildung 5.33:  $T_{30}$  [s] für Varianten der Seitenwände - Quelle B3, Receiver 08

Ebenfalls wird deutlich, dass Variante 2 eine noch geringere Nachhallzeit bewirkt. Die Veränderung der  $T_{30}$  muss allein durch die neue Struktur der Wand verändert worden sein, da in der Simulation für die entsprechenden Oberflächen immer dieselben Absorptionskoeffizienten verwendet wurden.

Offensichtlich ist eine derartige Veränderung der Seitenwände im hinteren Bereich sinnvoll, da sie auch für eine variable Lautsprecherposition der Surround-Lautsprecher das Flatterecho effektiv verhindert und sich dadurch auch begünstigend auf die Energieverteilung im Raum auswirkt. Durch die gezielte Lenkung der frühen Reflexionen um den Abhörbereich herum kann die Abhörsituation in diesem Bereich verbessert werden. Dies verdeutlicht auch ein Vergleich der simulierten Werte für das Klarheitsmaß  $C_{80}$ , dargestellt in Tabelle 5.9 und Abbildung 5.34. Alle Werte vergrößern sich durch die Veränderungen, belegen also eine bessere Durchsichtigkeit. Auch hier erzielt Variante 2 die besseren Ergebnisse.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
CATT - normal	12,7	17,8	15,8	14,6	15,6	19,5	-	-
CATT - Var. 1	13,2	18,8	16,0	15,2	16,8	21,0	-	-
CATT - Var. 2	13,7	18,7	16,5	16,3	18,5	22,9	-	-

Tabelle 5.9:  $C_{80}$  [dB] - Quelle B3, Receiver 08

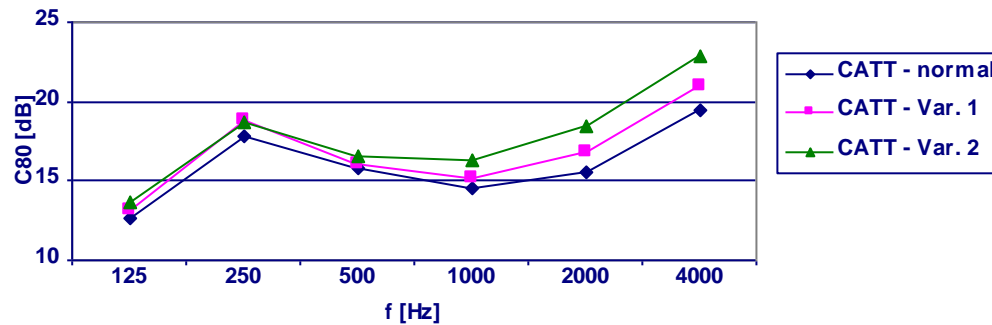


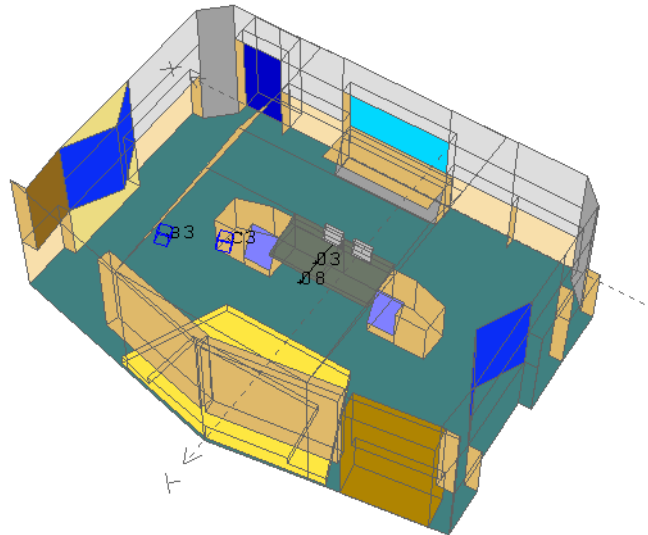
Abbildung 5.34:  $C_{80}$  [dB] für Varianten der Seitenwände - Quelle B3, Receiver 08

Als Alternative zur diesen Varianten, die mit Umbauarbeiten der akustischen Einbauten verbunden wären, könnten die parallelen Wandelemente durch das Anbringen von zusätzlichem absorbierendem Material so verändert werden, dass Reflexionen stark genug abgeschwächt werden und so ein wahrnehmbares Flatterecho verhindert wird.

Hier wäre die Verwendung von Mikroperforierten Folien (MPF) denkbar, da diese zeitgleich zu dieser Arbeit am Institut untersucht werden, also kostengünstig zur Verfügung stehen. Die Vorteile dieser Folien bestehen zum einen in der optisch unauffälligen Verwendung im Raum, da sie transparent sind und das Erscheinungsbild nur wenig beeinflussen, zum anderen müssen sie nicht fest montiert werden, sodass eine variable Akustik mit diesen Folien denkbar wäre. So könnte z.B. eine Rollo-Konstruktion vor den Schlitzabsorbern, die ein Herunterziehen der Folie bei Bedarf ermöglicht, bei Surround-Produktionen zum Einsatz kommen.

Die Folien, die im Besitz des Institutes sind, liegen in Bahnen von 0,96m vor. Aus diesem Grund und den Erkenntnissen der Simulationen mit veränderten Schlitzabsorbern bietet sich also eine Installation der Folienrollos ähnlich der oben beschriebenen Variante 2 in Abbildung 5.32 an. Es würden also pro Seitenwand zwei Rollos benötigt werden, die zusammen einen stumpfen Winkel auf der Höhe des Abhörplatzes aufspannen.

In CATT-Acoustic sind diese als blaue Flächen implementiert worden, die von der Decke bis auf eine Höhe von 1,20m herunterreichen (Abbildung 5.35).



**Abbildung 5.35: Simulation von MPF vor den Schlitzabsorbern**

Erwartungsgemäß bilden sich auch hier keine Flatterechos mehr aus, da die parallelen Wandstrukturen durch die Folien aufgelöst werden. Die Stahlverfolgung wird also in CATT-Acoustic identisch mit der entsprechenden Veränderung der Schlitzabsorber selbst sein.

Hat sich in den Varianten 1 und 2 praktisch die absorbierende Fläche weder in ihren Abmessungen noch in ihren Absorptionskoeffizienten verändert, so stellt die Mikroperforierte Folie zusätzliches Absorbermaterial dar.

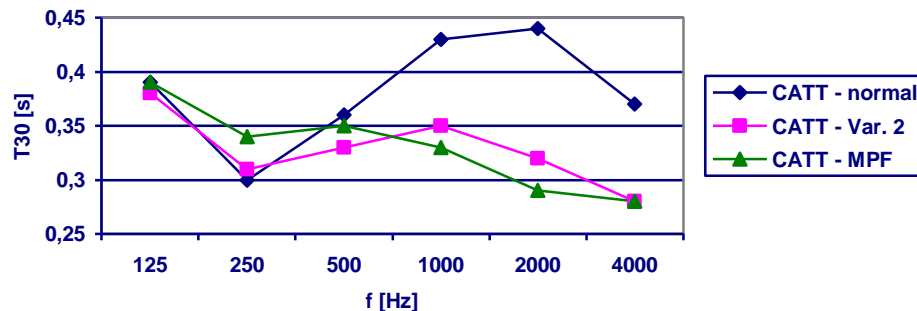
Die Werte der Absorptionskoeffizienten der Folie, die in CATT-Acoustic verwendet wurden, beruhen auf Herstellerangaben für einen Wandabstand von 30cm.

<b>Wandabstand</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
30cm	1	2	8	35	70	45	-	-
100cm	4	18	48	68	35	40	-	-

**Tabelle 5.10: Absorptionsgrad von Mikroperforierten Folien [%]**

In der Simulation zeigt sich, dass neben der Verringerung der  $T_{30}$  durch die schrägen Flächen auch die zusätzliche Absorptionsfläche die Nachhallzeit beeinflusst.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
CATT - normal	0,39	0,30	0,36	0,43	0,44	0,37	-	-
CATT - Var. 2	0,38	0,31	0,33	0,35	0,32	0,28	-	-
CATT - MPF	0,39	0,34	0,35	0,33	0,29	0,28	-	-

Tabelle 5.11:  $T_{30}$  [s] - MPF vor Schlitzabsorber, Quelle B3, Receiver 08Abbildung 5.36:  $T_{30}$  [s] - MPF vor Schlitzabsorber, Quelle B3, Receiver 08

In Tabelle 5.11 wird deutlich, dass die Nachhallzeit bei 1000 und 2000Hz, also dem Bereich der größten Wirksamkeit der Folien, geringer ausfällt, als es beim Schrägstellen der Schlitzabsorber der Fall war.

Grundsätzlich kann also durch eine geeignete Veränderung der Seitenwände das Flatterecho unterbunden werden. Zudem wirkt sich dies auch positiv auf die Energieverteilung im Raum aus.

## 5.4.2 Reflexionen am Studiofenster

Ein grundsätzliches Problem bei der Erweiterung der Abhöranlage auf ein Surroundformat in einem Tonregieraum stellt das Studiofenster dar, das sich oft in der  $0^\circ$ -Richtung des Studios befindet. Selbst wenn im Stereobetrieb keine frühen Reflexionen das Abhören gestört haben, ist das Ergänzen des Centerlautsprechers oft kritisch, da dieser zwischen dem Hörer und der schallharten Scheibe des Fensters aufgestellt werden muss. Ungünstige Reflexionen, die Klangverfärbungen verursachen, sind die Folge.

Da im Regieraum des TU-Studios die Lautsprecher für die 5.0-Anordnung höher als üblich gehängt und entsprechend geneigt werden müssen, um den Direktschall nicht durch die Bildmonitore zu behindern, kann es nicht zu Reflexionen kommen, die auf der Lautsprecherachse einfallen. Zusätzlich unterbinden die Bildmonitore zumindest auf den

idealen Abhörplätzen für eine Lautsprecherhöhe von 1,40m für die jeweilige Surround-Anordnung die frühen Reflexionen von der Scheibe. Da aber die Computermonitore nicht symmetrisch zur 0°-Abhörrichtung angeordnet sind, der Hörer beim Arbeiten am Mischpult also leicht aus dem akustischen Schatten dieser herauskommt, scheint eine Veränderung der akustischen Situation bezüglich des Fensters sinnvoll. Besonders wenn die Lautsprecher höher hängen, kann es wieder zu direkten Reflexionen von der Scheibe kommen (vgl. Abbildung 5.22).

Auch hier bietet sich die Verwendung der Mikroperforierten Folien an. Da diese transparent sind, werden sie die Sicht in den Aufnahmeraum nur unwesentlich beeinträchtigen. Entschließt man sich zu einer variablen Montage mit einem Rollo, kann in Aufnahmesituationen, in denen meist auf Stereobasis gearbeitet wird, auf die Folie vor dem Fenster verzichtet werden.

Neben der größeren Absorberwirkung im Vergleich zu der Glasscheibe kann durch eine geeignete Montage auch Einfluss auf die Schalllenkung genommen werden, um auch hier frühe Reflexionen zum Abhörort zu vermeiden. Spannt man die Folie schräg in das Einbaugerüst vor das Fenster, so dass es unten einen Abstand von 25cm vom Glas hat, erreicht man bereits einen Winkel, der ausreicht, Reflexionen am Abhörort vorbei zu lenken. Abbildung 5.37 zeigt Schallwege ausgehend vom Centerlautsprecher mit (rot) und ohne (blau) Folie.

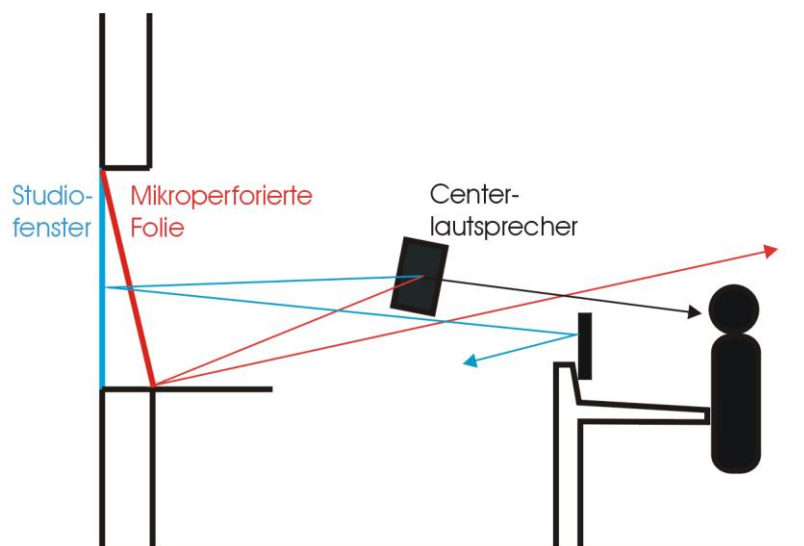


Abbildung 5.37: Mikroperforierte Folie vor dem Studiofenster

Durch diese Maßnahme kann erreicht werden, dass ungünstige Reflexionen von der Scheibe durch vergrößerte Absorption und günstigere Reflexionswinkel unterbunden werden.

Grundsätzlich sind Reflexionen von der Mischpultoberfläche geringer, je niedriger die



Lautsprecher platziert sind. Am günstigsten ist also eine Höhe entsprechend der Ohren des sitzenden Hörers, im Allgemeinen 1,20m. Stehen die Boxen dann nicht auf dem Pult sondern davor, kann durch geeignete Abmessungen erreicht werden, dass alle vom Pult verursachten Reflexionen 1. Ordnung am Abhörpunkt vorbeigeführt werden.

Auf Grund der Bildmonitore ist eine Lautsprecherhöhe von 1,20m nicht realisierbar. Im Gegensatz zu der Höhe von 1,60m, die in den Messungen verwendet wurde, können die Lautsprecher noch gesenkt werden, ohne dass der Direktschall zum Hörer behindert wird. Bei der Surround-Anordnung mit dem Radius von 1,50m kann eine Höhe von 1,40 erreicht werden, bei der Aufstellung mit dem Radius von 2,50m sind bei einem weiter hinten liegenden Sweetspot 1,45m realisierbar.

### 5.4.3 Optimierung der Diffusorwirkung

Die Diffusoren haben in einem LEDE-Konzept die Aufgabe, für eine gleichmäßige Verteilung des Schalls im Raum zu sorgen. Sie werden also im Live-End montiert und sollen hier Schallenergie an den Raum möglichst diffus zurückgeben, ohne störende Reflexionen zu verursachen.

Da der Regieraum der TU nun aber auch für Bearbeitung von Surroundformaten genutzt werden soll, wird der Einsatz der im Raum integrierten Diffusoren an der Rückwand fragwürdig. Zwar muss ein diffuses Schallfeld nicht nachteilig bei der Beurteilung von Surround-Material sein, da es im Verhältnis zum Direktschall zeitverzögert und abgeschwächt beim Hörer eintrifft und so das Hörereignis psychoakustisch nicht stört, doch erschwert es die Beurteilung des Raumanteils einer Produktion [Smith]. Wird in einer akustischen Umgebung ohne ein solches Diffusfeld Surround-Material bearbeitet, ist ein wesentlich detailreicheres Hören möglich und der Regieraum verfälscht den künstlichen Raumanteil der Produktion weniger. Diffusorelemente wirken also dem durch die Surround-Lautsprecher simulierten Raum entgegen.

Die Akustik für 5.1-Wiedergabe sollte also über den Raum homogen sein, eine Akustik wie LEDE sollte also vermieden werden [dynaudio].

Andererseits ist ein diffuses Schallfeld für ein natürliches Raumgefühl unerlässlich. Daher ist das LEDE-Konzept so zu verändern, dass es durch zusätzliche absorbierende Zonen um die Surround-Lautsprecher adaptiert wird [Storyk/Noy].

Da im Studio der TU neben 5.0- auch weiterhin Stereoproduktionen stattfinden werden, erscheint eine variable Akustik am sinnvollsten. Diese kann durch einen Vorhang im hintern Raumteil leicht realisiert werden.

Die einfachste Variante stellt ein Vorhang dar, der direkt vor die Diffusoren gezogen werden kann.

In der Simulation ist ein Vorhang verwendet worden, der mit einer Breite von 4,50m und einer Höhe von 2,30m die Diffusoren fast vollständig abdeckt. Er verläuft ca. über die Mitte der oberen Stufe des Holzpodestes, woraus Abstände zu den Diffusoren von wenigen Zentimetern bis zu 55cm resultieren.

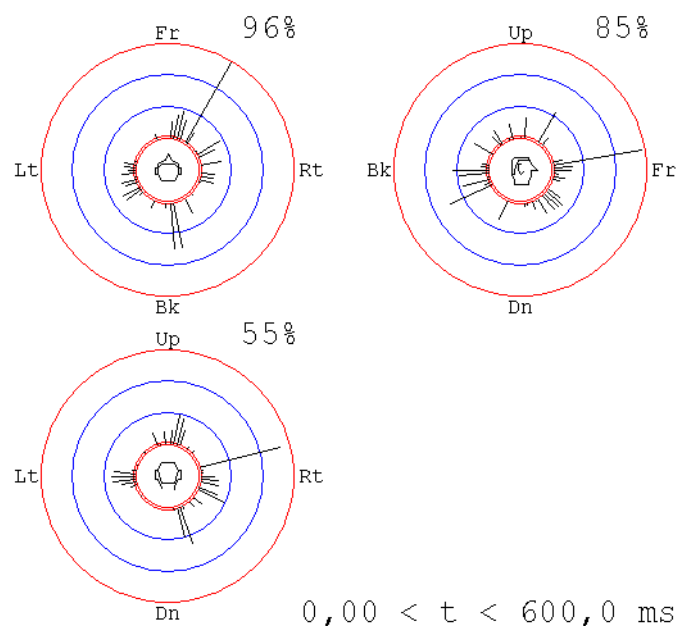
Die Absorptionskoeffizienten wurden aus entsprechenden Datenbanken herangezogen und wegen des wechselnden Wandabstandes entsprechend adaptiert.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Vorhang	15	25	44	67	99	80	-	-

**Tabelle 5.12: Absorptionskoeffizienten [%], Vorhang in CATT-Acoustic**

Ein Vorhang solcher Größe nimmt erwartungsgemäß wesentlichen Einfluss auf die Akustik im Raum. Ein Vergleich von einfallenden Schallstrahlen am Abhörpunkt mit und ohne Vorhang macht dies deutlich. Offensichtlich wird die Wirkung der Diffusoren erheblich unterbunden. Die folgenden Abbildungen zeigen die „Sound-Roses“ aus CATT-Acoustic für den rechten Frontlautsprecher (C0) und den idealen Abhörpunkt, Receiver 03.

Während in Abbildung 5.39 deutlich ein diffuses Schallfeld nach 600ms zu erkennen ist, sind in Abbildung 5.38 die eintreffenden Strahlen durch den Vorhang deutlich vermindert und auch weniger homogen um den Hörer verteilt.



**Abbildung 5.38: R\_C0\_03\_1k - mit Vorhang vor Diffusoren**

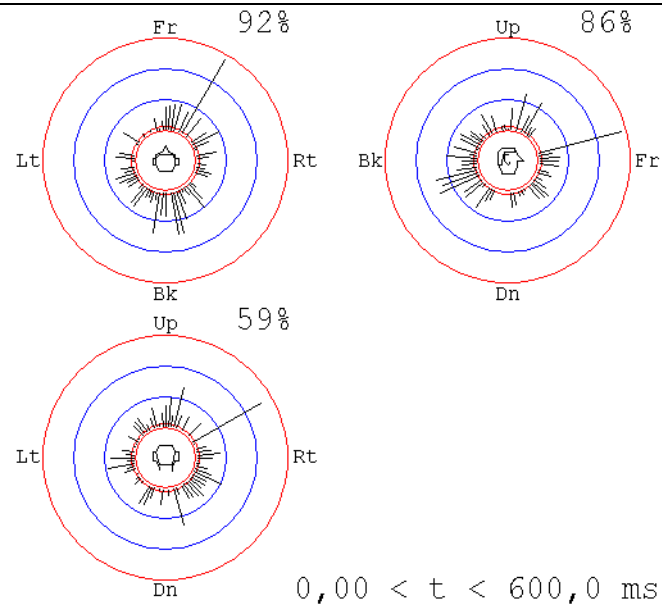


Abbildung 5.39: R\_C0\_03\_1k - ohne Vorhang vor Diffusoren

Auch an den Surround-Lautsprechern lassen sich diese Beobachtungen machen. Die Abbildung 5.40 und Abbildung 5.41 zeigen die Strahlverteilung, wenn mit dem linken Surround-Lautsprecher (C3) beschallt wird.

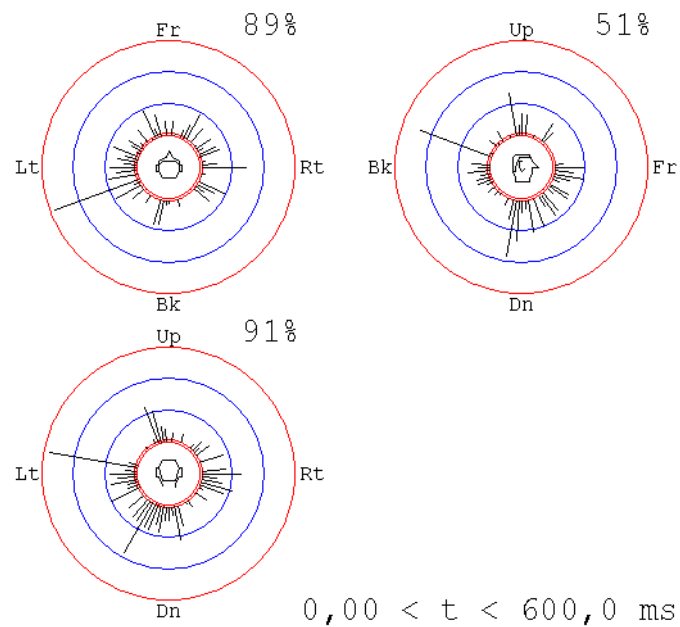
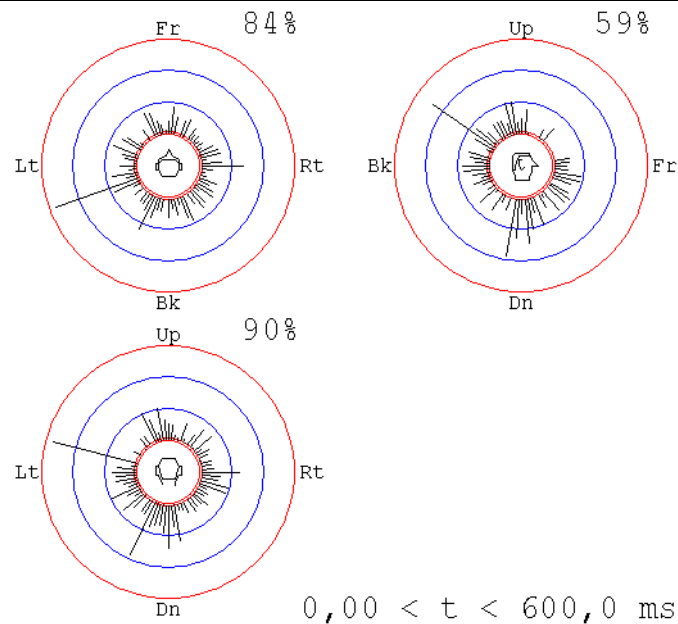


Abbildung 5.40: R\_C3\_03\_1k - mit Vorhang vor Diffusoren



**Abbildung 5.41: R\_C3\_03\_1k - ohne Vorhang vor Diffusoren**

Offensichtlich wird also das Diffusschallfeld durch den Vorhang massiv beeinträchtigt. Die zusätzliche enorme Absorptionsfläche sollte auch zu einem deutlich geringeren Nachhall führen. Tatsächlich kommt es auch zu einer Abnahme der  $T_{30}$ , wenn der Vorhang im Raum wirkt. Die teilweise nur geringen Änderungen beruhen auf der Tatsache, dass der Vorhang die Diffusoren abschirmt, dort also praktisch kein Schall auftrifft. So bleiben die Diffusorelemente für die simulierten Schallstrahlen also unwirksam. Vergleicht man die Absorptionskoeffizienten des Vorhanges mit denen der Diffusoren aus Tabelle 3.2, so wird klar, dass bei 250Hz sogar ein Anstieg der Nachhallzeit zu verzeichnen ist.

<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
Mit Vorhang	0,39	0,34	0,33	0,35	0,31	0,25	-	-
Ohne Vorhang	0,39	0,30	0,34	0,37	0,34	0,30	-	-

**Tabelle 5.13:  $T_{30}$  [s] - C0\_03**

Hier ist es also sinnvoll, auch die in der Simulation berechneten Werte der Nachhallzeit nach Sabine zu vergleichen. Tabelle 5.14 zeigt diese, die in CATT-Acoustic über alle verwendeten Receiver gemittelt ausgegeben werden (hier 03 und 11).

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Mit Vorhang	0,34	0,27	0,28	0,25	0,22	0,2	-	-
Ohne Vorhang	0,35	0,29	0,32	0,30	0,28	0,23	-	-

Tabelle 5.14: Nachhallzeit nach Sabine [s] - C0

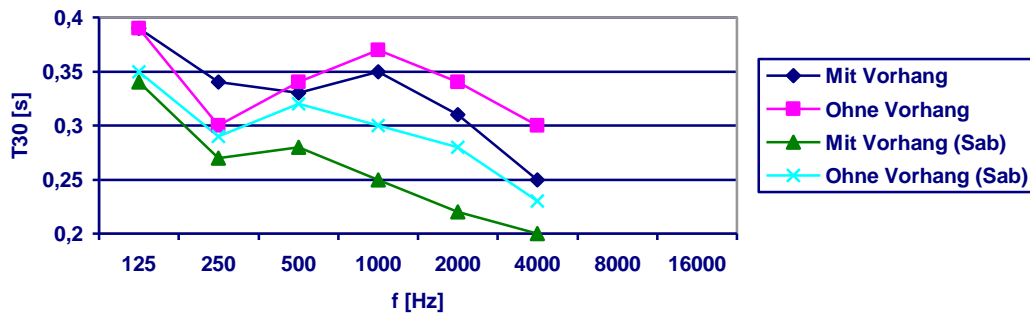


Abbildung 5.42: Nachhallzeiten mit und ohne Vorhang

Hier kommt es also zu den erwarteten Veränderungen im gesamten Frequenzbereich.

Eine Alternative zu einem Vorhang über die gesamte Diffusorbreite ist die Verwendung von zwei Vorhängen, die sich jeweils hinter den Surround-Lautsprechern befinden. Dabei wären nicht alle Diffusorelemente verdeckt, so dass mehr Diffusität im Schallfeld erreicht werden kann. Trotzdem kann dem Ansatz von Storyk und Noy [Storyk/Noy] nachgekommen werden, die in der Verlängerung der Lautsprecherachsen nach hinten schallschluckendes Material fordern.

In CATT-Acoustic ist ein Vorhang gewählt worden, der die Lautsprecher auf zwei Seiten nach hinten abschirmt. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass frühe Reflexionen aus gleicher oder ähnlicher Richtung wie der Direktschall beim Hörer eintreffen.

Abbildung 5.43 zeigt die Anordnung im virtuellen Regieraum. Die Position ist so gewählt, dass beide Aufstellungsvarianten, also sowohl der große als auch der kleine Radius, möglich sind. In diese Anordnung der Vorhänge kann es von dem Lautsprecher C3 am Diffusor noch zu Reflexionen zum Abhörort kommen, bei B3, dem linken Surround-Lautsprecher der großen Aufstellung hingegen ist dies nicht mehr möglich.

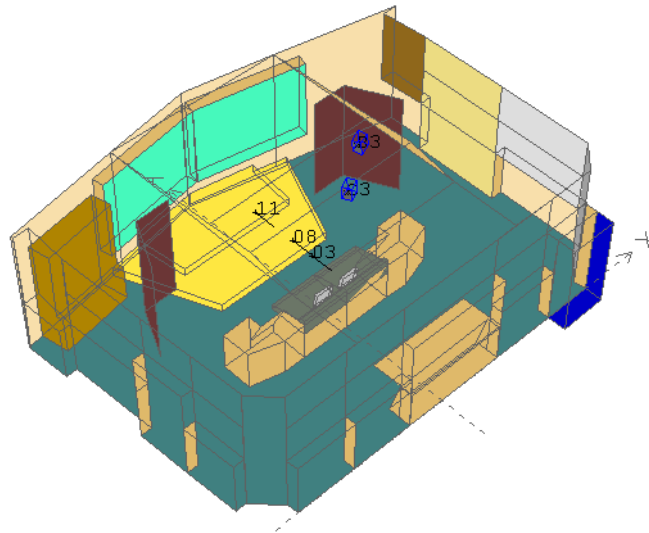


Abbildung 5.43: CATT-Acoustic - Simulation mit geteiltem Vorhang

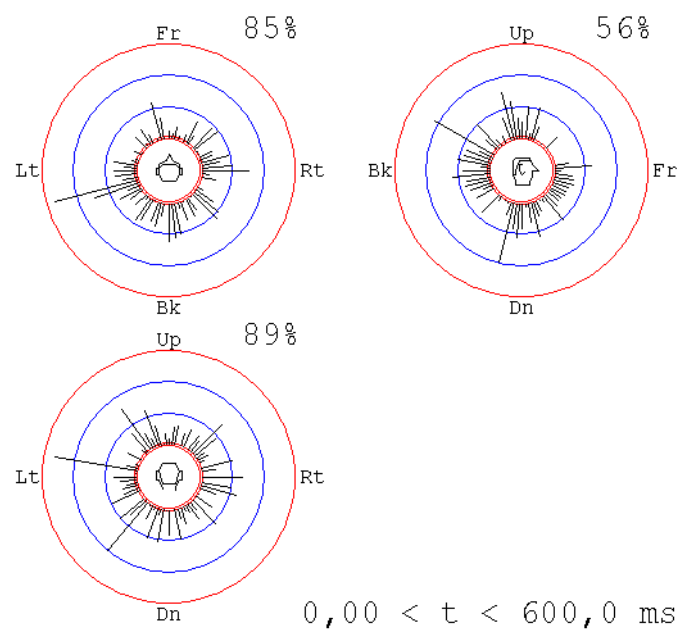
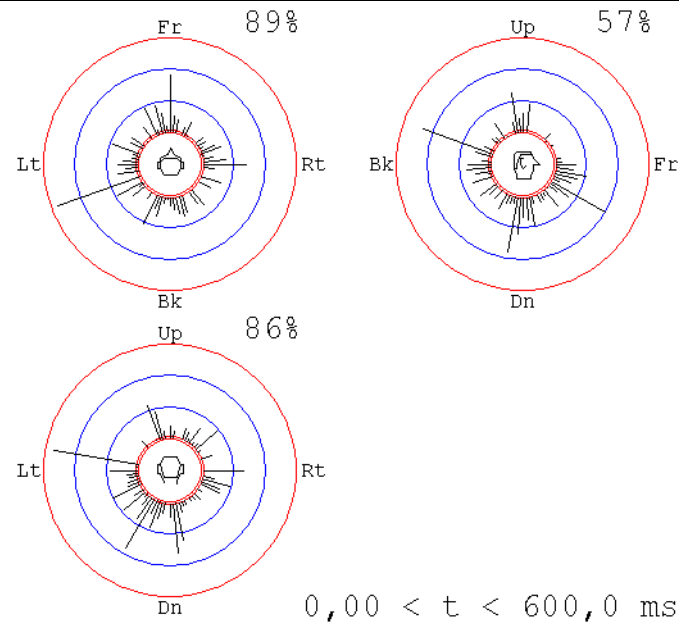


Abbildung 5.44: R\_B3\_08\_1k - geteilter Vorhang

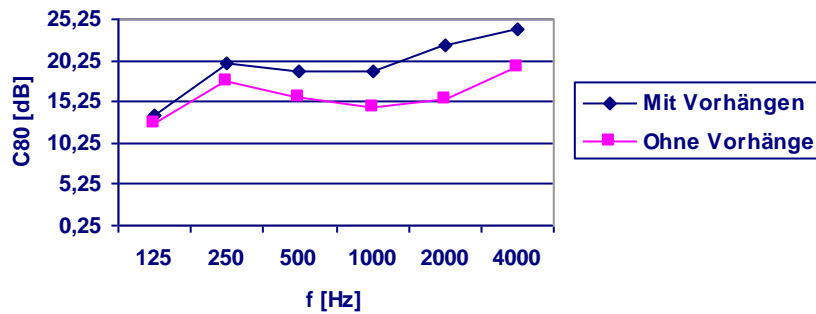


**Abbildung 5.45: R\_C3\_03\_1k - geteilter Vorhang**

Es zeigt, dass in dieser Variante deutlich mehr Diffusorwirkung erhalten bleibt, es ist also mit einem deutlich diffuseren Schallfeld zu rechnen. Dass diese akustische Maßnahme aber auch die Abhörqualität verbessert, zeigen die Werte des simulierten Klarheitsmaßes  $C_{80}$  in Tabelle 5.15.

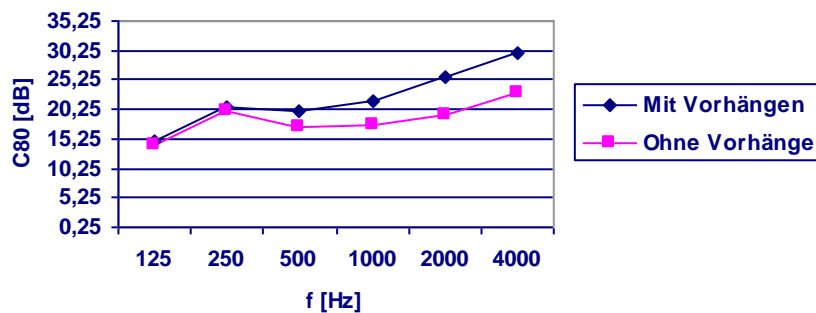
<b>f [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
Mit Vorhängen	13,7	20,0	19,0	19,0	22,0	24,0	-	-
Ohne Vorhänge	12,7	17,8	15,8	14,6	15,6	19,5	-	-

**Tabelle 5.15:  $C_{80}$  [dB] mit und ohne geteiltem Vorhang - B3 \_ 08**

Abbildung 5.46:  $C_{80}$  [dB] mit und ohne geteiltem Vorhang - B3 \_ 08

Obwohl der Lautsprecher C3 (LS, Radius 1,50m) weiter von den Vorhängen entfernt ist und auch weniger frühe Reflexionen an den Diffusoren unterbunden werden, verbessert sich auch hier die Abhörsituation. Tabelle 5.16 stellt die Werte denen ohne Vorhänge gegenüber.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Mit Vorhängen	14,9	20,8	20,1	21,5	25,8	29,7	-	-
Ohne Vorhänge	14,3	19,8	17,3	17,6	19,3	22,9	-	-

Tabelle 5.16:  $C_{80}$  [dB] mit und ohne geteiltem Vorhang - C3 \_ 03Abbildung 5.47:  $C_{80}$  [dB] mit und ohne geteiltem Vorhang - C3 \_ 03

Sowohl die Variante, einen Vorhang über die gesamte Diffusorbreite zu hängen, als auch die, zwei Stück jeweils hinter die Surround-Lautsprecher zu platzieren, verbessert die Klarheit beim Abhören. Offensichtlich lässt sich die Wirkung des Diffusors durch Vorhänge regulieren. Da ein Vorhang immer ein variables Element in der Raumakustik darstellt, kann



die Abhörsituation also durch Veränderung der Vorhänge leicht den gewünschten Verhältnissen angepasst werden. Daher erscheint eine Kombination aus beiden Vorhangvarianten gerade auch in Bezug auf die Funktion als Lehrstudio am sinnvollsten.

#### 5.4.4 Optimierung der Nachhallzeit

Die oben simulierten Veränderungen, wie Vorhänge und gezielte Schalllenkung, haben neben ihren Eigenschaften, Reflexionen zu kontrollieren, auch bereits Einfluss auf die Nachhallzeit genommen.

Hierbei hat die Eliminierung des Flatterechos erheblich dazu beigetragen, dass ein homogenerer Nachhall ausgehend von allen Lautsprechern erzielt werden kann. Aber auch die Vorhänge senken durch die zusätzliche absorbierende Fläche die Nachhallzeit.

Es bleibt also zu prüfen, in wieweit die Werte der Nachhallzeit die Norm erfüllen, wenn die erprobten Veränderungen zusammenwirken. In der folgenden Simulation sind stumpfwinklige Schlitzabsorber, die Mikroperforierte Folie vor dem Fenster und die zwei Vorhänge hinter den Surround-Lautsprechern kombiniert worden. Es werden also keine Flatterechos mehr auftreten und auch störende Reflexionen sollten eliminiert sein.

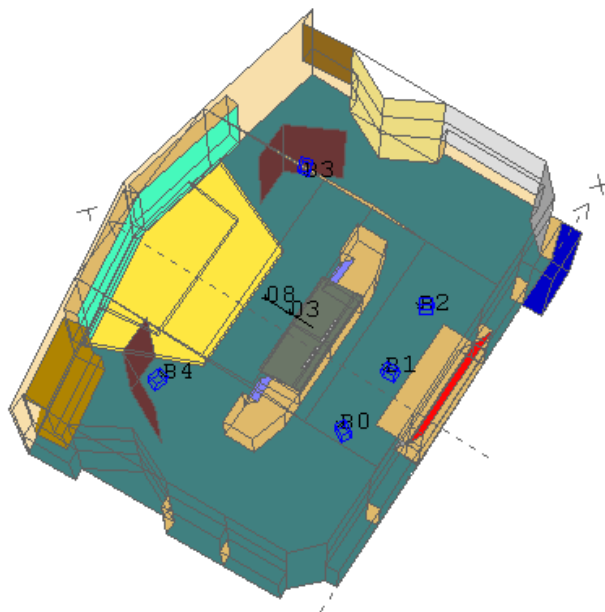
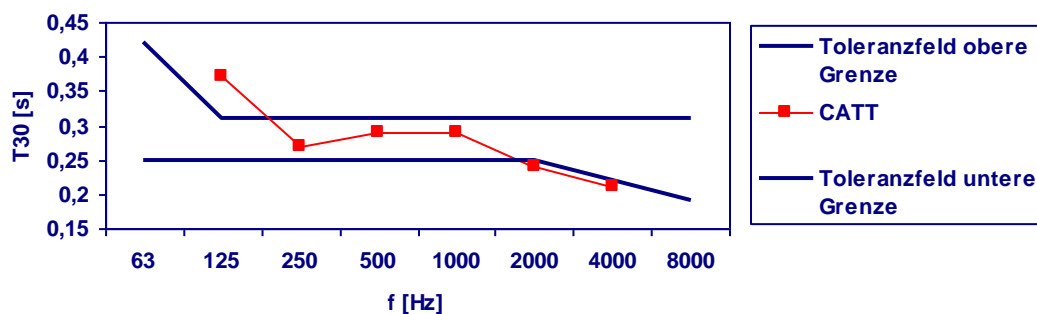


Abbildung 5.48: Kombinierte Maßnahmen im Regieraum (CATT-Acoustic)

Die Nachhallzeiten, die sich in dieser Simulation ergeben, wenn aus allen fünf Lautsprechern der „kleinen“ Surround-Anordnung (C0 bis C4) beschallt wird, zeigen Tabelle 5.17 und

Abbildung 5.49.

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Toleranzfeld obere Grenze	0,42	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	-
CATT	-	0,37	0,27	0,29	0,29	0,24	0,21	-	-
Toleranzfeld untere Grenze	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,19	-

Tabelle 5.17:  $T_{30}$  [s] - Kombinierte Veränderungen, ToleranzfeldAbbildung 5.49:  $T_{30}$  [s] - Kombinierte Veränderungen, Toleranzfeld

Zusätzlich ist hier auch das Toleranzfeld für die zulässige Nachhallzeit in Studioräumen dargestellt. Dies wird aus dem arithmetischen Mittelwert der Nachhallzeiten gewonnen (vgl. Abbildung 2.3). Es zeigt sich, dass die  $T_{30}$  bereits bei 125Hz zu hoch ausfällt. Der zulässige Anstieg sollte erst unterhalb dieser Frequenz beginnen. Auch bei 2000 und 4000Hz wird das Toleranzfeld nicht eingehalten. Hier wird es leicht unterschritten.

Es besteht also vor allem Bedarf, im tiefen Frequenzbereich die Nachhallzeit zu senken.

Dies kann durch zusätzliche Bassabsorber geschehen, die in den Regieraum integriert werden. Dies gestaltet sich aber als schwierig, da diese meist sehr groß sein müssen und im Studio bei bestehender akustischer Installation fast keine freie Fläche mehr zu Verfügung steht, an der raumsymmetrisch entsprechende Absorber montiert werden könnten.

Es müssen also bestehende Oberflächen so verändert werden, dass eine zusätzliche Absorption von tiefen Frequenzen auftritt. Hier würden sich im Prinzip die Vorhänge hinter den Surround-Lautsprechern eignen. Da die Absorptionskoeffizienten in Datenbanken für Vorhänge im Allgemeinen in Abhängigkeit vom Wandabstand angeführt werden, ist es schwierig abzuschätzen, wie die Vorhänge gerade im tiefen Frequenzbereich wirken, wenn sie wie in dieser Simulation frei, also ohne definierten Wandabstand, hängen. Natürlich könnten in der Simulation schnell Werte gefunden werden, die der Vorhang haben müsste, um ideale

Nachhallzeiten in CATT-Acoustic zu erhalten. Es bleibt aber fraglich, inwieweit ein solcher Vorhang dann auch realisierbar wäre.

Daher wurde versucht, durch zusätzliche Plattenabsorber unter den Diffusoren die Nachhallzeit entsprechend zu beeinflussen. Plattenabsorber bieten sich an, da sie sehr gut auf einen schmalen Wirkungsbereich bei geringer Einbautiefe abgestimmt werden können. Es kann also im Oktavband 125Hz eine Wirkung erzielt werden, ohne in höheren Frequenzen ebenfalls zusätzliche Absorption zu schaffen.

Um noch mehr zusätzliche Fläche in Form eines Plattenabsorbers in den Raum zu integrieren, wurden die untersten Schlitzabsorber auf beiden Seiten auch gegen Plattenabsorber ausgetauscht. Die stumpfwinklige Struktur der Oberfläche ist dabei beibehalten worden.

In der Folgenden Tabelle sind die simulierten Nachhallzeiten mit und ohne zusätzliche Bassabsorber dargestellt.

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Toleranzfeld obere Grenze	0,42	0,3	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	-
CATT	-	0,37	0,27	0,29	0,29	0,24	0,21	-	-
CATT - Plattenabs	-	0,34	0,29	0,29	0,28	0,25	0,21	-	-
Toleranzfeld untere Grenze	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,19	-

Tabelle 5.18:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber

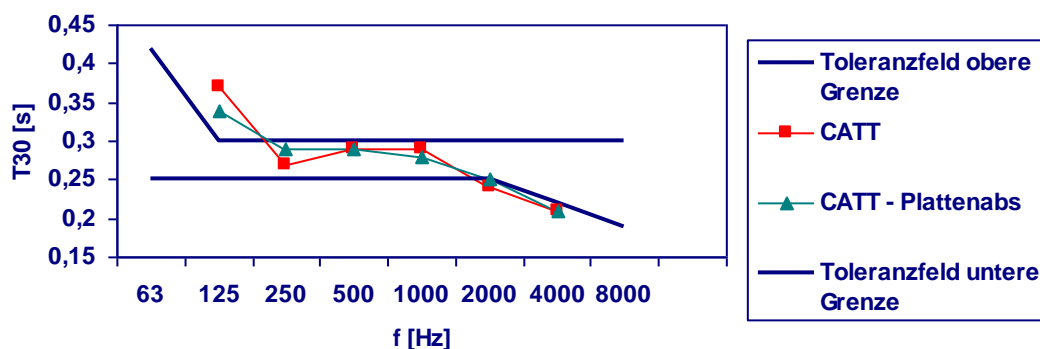


Abbildung 5.50:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - alle C

Es wird deutlich, dass die Nachhallzeit im Bereich von 125Hz gesenkt werden konnte. Auch in den darauf folgenden Oktavbändern zeigt sich der Verlauf gleichmäßiger als vorher. Die Tendenzen, zu tiefen Frequenzen anzusteigen und zu hohen abzufallen, spiegeln sich deutlich

wieder. Insgesamt ergibt sich aber ein zufriedenstellender Verlauf der  $T_{30}$ .

Die bisher erläuterten Nachhallzeiten entstammen alle Simulationen mit den Lautsprechern der Surround-Anordnung mit dem Radius 1,50m.

Im Folgenden werden die entsprechenden Werte für alle weiteren Lautsprecher-Konzepte dargestellt.

Ergebnisse bei Simulation mit der Surround-Anordnung mit dem Radius von 2,50m:

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Toleranzfeld obere Grenze	0,42	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	-
CATT alle B	-	0,33	0,29	0,30	0,28	0,26	0,21	-	-
Toleranzfeld untere Grenze	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	-

Tabelle 5.19:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - alle B

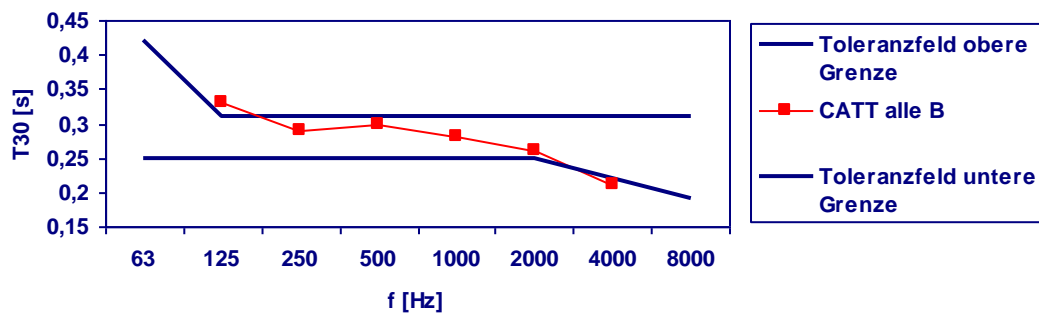


Abbildung 5.51:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - alle B

Ergebnisse unter Verwendung der Stereo-Anordnung mit den Genelec 1032 A:

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Toleranzfeld obere Grenze	0,42	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	-
CATT 1032A	-	0,34	0,30	0,30	0,28	0,25	0,22	-	-
Toleranzfeld untere Grenze	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,225	0,20	-

Tabelle 5.20:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - 1032A

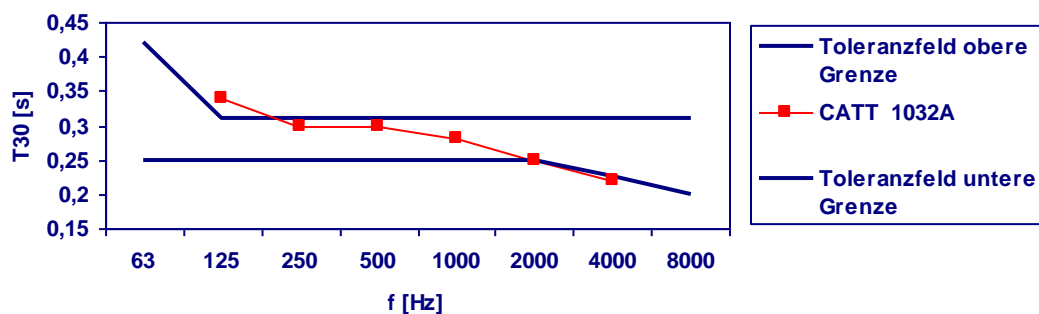


Abbildung 5.52:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - 1032A

Ergebnisse unter Verwendung der Stereo-Anordnung mit dem Manger Schallwandler:

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Toleranzfeld obere Grenze	0,42	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	-
CATT MSW	-	0,34	0,29	0,30	0,29	0,26	0,21	-	-
Toleranzfeld untere Grenze	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,225	0,20	-

Tabelle 5.21:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - MSW

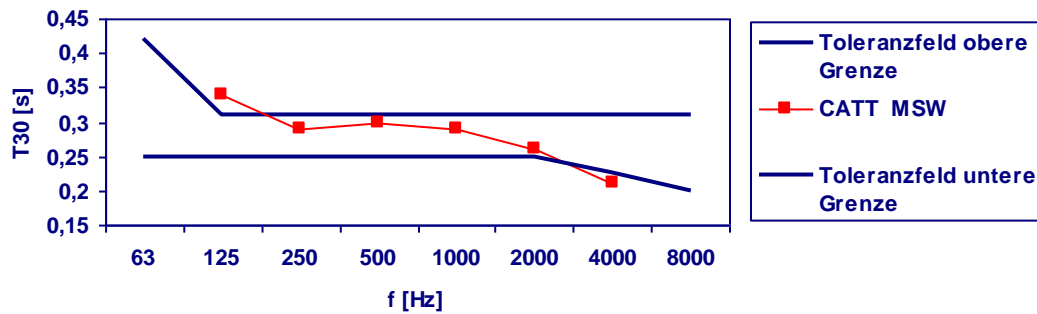
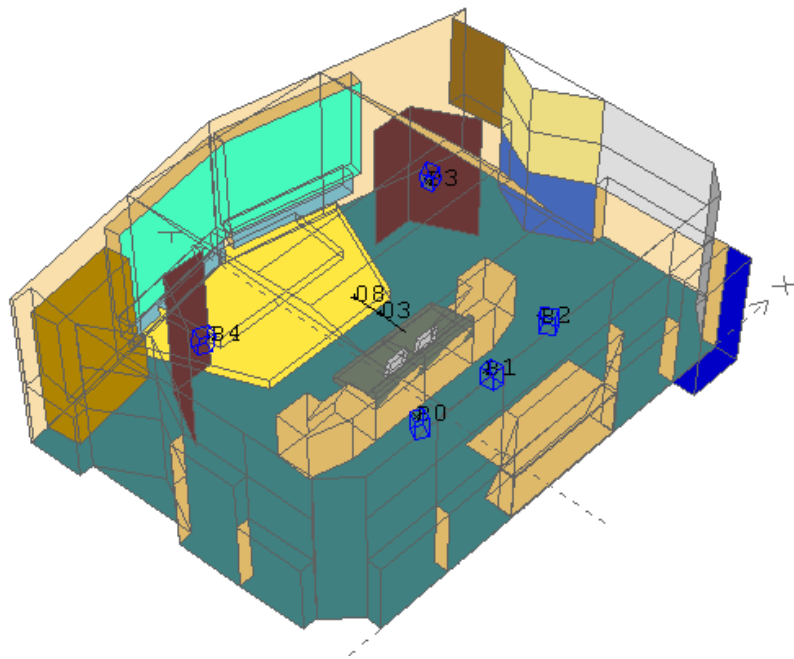


Abbildung 5.53:  $T_{30}$  [s] - zusätzliche Bassabsorber - MSW

Es zeigt sich, dass die Nachhallzeiten für alle Lautsprecheranordnungen sehr ähnlich verlaufen. Offensichtlich kann also durch die simulierten Veränderungen ein homogeneres Schallfeld erreicht werden, welches sich unabhängig von der Position der Quelle einstellt. Zusätzlich wird deutlich, dass im Regieraum auch ein sinnvolles Arbeiten mit Surround-Material aus akustischer Sicht möglich sein kann. Durch das Unterbinden der Flatterechos können Lautsprecher problemlos im hinteren Teil des Raumes betrieben werden. Gleichzeitig können Reflexionen erster Ordnung im Abhörbereich unterbunden werden. Durch geeignete Anordnung von Vorhängen kann die Nachhallzeit verbessert werden, aber auch die Wirkung der Surround-Lautsprecher optimiert werden. Versieht man schließlich noch das Studiofenster mit den schrägen Mikroperforierten Folien, ergibt sich eine Akustik, die das Arbeiten mit Stereo- und auch Surround-Material sinnvoll unterstützt.



**Abbildung 5.54: Regieraum mit optimalen Veränderungen**

## 6 Maßnahmen für 5.0

Nach langjährigem Betrieb als Stereoregieplatz wird die Möglichkeit, auch Surroundproduktionen durchführen zu können, von immer größerer Bedeutung. Immer häufiger wurden für einzelne Projekte Surround-Anordnungen individuell aufgebaut. Dies zeigt, dass besonders in einem Lehrstudio, wie es das Tonstudio des TU darstellt, eine dauerhafte Installation einer entsprechenden Lautsprecheranordnung unverzichtbar ist. Da die Akustik des Regieraumes für den Steregebrauch ausgelegt ist, bedarf es neben der Montage von geeigneten Lautsprechern auch einiger akustischer Adaptionen, die einen sinnvollen und möglichst repräsentativen Umgang mit Surround-Material ermöglichen.

### 6.1 Lautsprecher

Da im Studio bereits fünf Lautsprecher der Marke Genelec 1030 A vorhanden sind, soll mit diesen eine Surround-Anordnung realisiert werden. Um bei der Anordnung der Boxen flexibel zu bleiben, sollen diese nicht starr an einem Punkt im Raum montiert werden, sondern sollen beweglich an der Decke installiert werden. Dadurch bleibt zum einen die Möglichkeit, die Lautsprecher bei Bedarf aus dem Weg zu räumen, wenn sie nicht gebraucht werden, in dem sie nahe den Wänden „geparkt“ werden. Zum anderen können je nach Anforderung verschiedene Anordnungen schnell und zuverlässig hergestellt werden. Neben reproduzierbaren Standardaufstellungen bleibt so im Sinne eines Lehrstudios auch die Möglichkeit mit den fünf Monitoren zu experimentieren.

Als Standardaufstellung sollen zwei Surround-Anordnungen vorgegeben werden, die den Empfehlungen von Dolby Laboratories für die Wiedergabe von Dolby-Digital entsprechen.

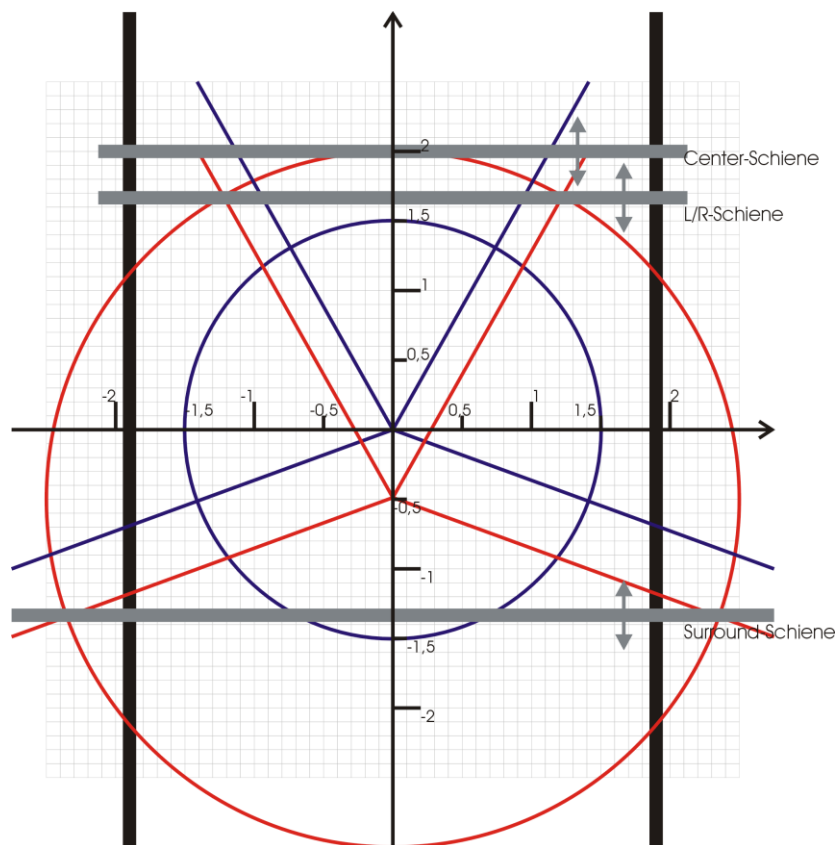
#### 6.1.1 Einrichten der 5.0-Lautsprecher

Die fünf Lautsprecher sind jeweils in drei Ebenen beweglich. An zwei fest montierten Schienen zwischen Vorder- und Rückwand laufen 3 Bewegliche Querschienen, an denen die Lautsprecher hängen. Diese lassen sich auf ihrer Schiene verschieben und durch die teleskopartige Aufhängung in der Höhe verstellen. Da jede Box mit einem Bügel an der Aufhängung befestigt ist, ist ebenfalls ein Neigen möglich. Dadurch können beliebige



Anordnungen für Surround realisiert werden. Je nach Lage des Sweetspots sind Radien von 1,50m bis 2,50m möglich.

Zum Einrichten der Lautsprecher befindet sich an den Führungsschienen eine Skalierung. Diese hat ihren Nullpunkt direkt vor der Pultmitte (klassischer Sweetspot) und spannt ein zweidimensionales Raster im Bereich der Lautsprecher auf (Abbildung 6.1). Durch eine Rastervorlage (im Anhang) kann mit Hilfe eines Zirkels schnell die gewünschte Einstellung durchgeführt werden. Dazu muss lediglich der Radius der geplanten Aufstellung um den Sweetspot geschlagen werden. Der Schnittpunkt mit den jeweiligen Lautsprecherachsen zeigt die Position im Raster. Auch wenn eigens ein Sweetspot definiert werden soll, können die Koordinaten für jeden Lautsprecher mit dem Raster bestimmt werden. Hierzu sind neben dem Kreis dann auch die neuen Lautsprecherachsen einzuzeichnen.



**Abbildung 6.1: Lautsprecherraster**

In Abbildung 6.1 sind die beiden Surround-Anordnungen, die die Grundlage für die Messungen und Simulationen dieser Arbeit darstellen, bereits eingezeichnet.

Da diese Anordnungen eine Standardkonfiguration darstellen, sind die Platzierungen der Querschienen und Lautsprecherhalterungen bereits an der Skalierung farblich markiert. Werden alle Schienen auf die blauen Markierungen gefahren, ist die Surround-Anordnung mit

dem Radius von 1,50m und dem Sweetspot an der Pultmitte eingestellt. Die roten Markierungen helfen, die Anordnung mit dem Radius von 2,50m und dem Sweetspot zwischen Pult und Holzpodest zu finden.

## 6.1.2 Nutzung der Stereo-Anordnung

Wie gewohnt werden auch künftig die Genelec 1032 A als Stereolautsprecherpaar zur Verfügung stehen. Sie werden nicht fest montiert, sondern sind nach wie vor auf beweglichen Stativen nutzbar. Angesteuert werden sie weiterhin über den Monitorweg B und die dafür vorgesehenen Anschlussbuchsen rechts und links neben dem Studiofenster.

Als weitere Abhörmöglichkeit im Stereobereich sollen die Manger-Schallwandler (MSW) dienen. Dadurch bietet sich eine alternative Abhörmöglichkeit zu den Genelec 1032 A, was zur Beurteilung von Klang sehr hilfreich ist.

Dieses Lautsprechersystem wird von einer externen Endstufe gespeist, an die sich jeweils eine Frequenzweiche anschließt. Audiomaterial kann vom Pult über den Monitorweg A zum Verstärker geroutet werden. Die Lautsprecher werden neben den Genelec im vorderen Studiobereich platziert werden. Wichtig ist bei der Aufstellung, dass sich der Hörer direkt auf der 0°-Achse der Manger Schallwandler befindet, da diese eine starke Richtcharakteristik aufweisen (vgl. 5.2.1.3). Will man also die Qualität der MSW nutzen, sollte eine ideale Aufstellung hergestellt werden.

## 6.2 Verkabelung und Routing

Wurde bisher eine Surround-Anordnung für ein Projekt benötigt, mussten alle Lautsprecher von der Patchbay aus verkabelt werden. Die nun fest installierten Boxen werden von der Decke aus mit Strom und einer Audioleitung versorgt.

Um vielseitig zu bleiben liegt jeder Lautsprechereingang an der Patchbay an. Auf diese Weise kann durch geeignetes Stecken jedes Signal direkt auf die Lautsprecher gelegt werden.

Für ein sinnvolles Arbeiten in Surround sind aber entsprechende Busse notwendig. Diese können auf dem Mischpult konfiguriert werden. Um möglichst wenige Kabel an der Patchbay stecken zu müssen, liegen die sechs Surround-Busse standardmäßig auf den Kanälen 17 bis 22.

An den Direct-Outs (DIR) dieser Kanäle sind die Surround-Lautsprecher direkt angeschlossen.

Soll also ein Signal aus einem bestimmten Lautsprecher kommen, so muss dieses auf den jeweiligen Surround-Bus (17 bis 22) geroutet werden. Ist in diesem Kanal „DIR“ als Ausgang

gewählt, kann man mit dem Fader die gewünschte Lautstärke regeln.

Die Lautsprecher sind folgendermaßen an die Patchbay angeschlossen:<sup>1</sup>

- DIR 17: L
- DIR 18: R
- DIR 19: C
- DIR 20: LFE (optional)
- DIR 21: LS
- DIR 22: RS

Im Prinzip ist es so möglich, jedes Signal über einen der fünf Lautsprecher wiederzugeben.

Da das Mischpult vor allem in Panning-Funktionen nicht für 5.0 ausgelegt ist, ist es ratsam, einen Surround-Mix komplett mit der Software im Computer (Samplitude) durchzuführen.

Auch dazu existiert eine Standardkonfiguration. Die analogen Ausgänge der MOTU, bisher an den Pulteingängen 9 bis 16 zu finden, sind nun zusätzlich auch auf die Kanäle 17 bis 24 geschaltet. Das hat den Vorteil, dass die Surround-Busse von Samplitude direkt auf die Surround-Busse des Mischpultes gelegt werden können. Am Mischpult muss dann nur jeder Surround-Bus eingepegelt werden und das Surround-Material aus Samplitude kann normgerecht abgehört werden. Wird am Pult ein Master-Fader (z.B. Fader 24) konfiguriert, der alle Surround-Busse steuert, kann die Abhörlautstärke beliebig verstellt werden, ohne die Bus-Pegel untereinander zu verändern.

Mit der internen Busstruktur des Euphonix können neben den MOTU-Ausgängen auch weitere Kanäle vom Pult auf die Surround-Busse geroutet werden. Dies kann z.B. für die Einbindung externer Effektgeräte nützlich sein.

Abbildung 6.2 verdeutlicht die Ansteuerung der Surround-Busse am Euphonix-Pult.

---

<sup>1</sup> Diese Reihenfolge entspricht allgemeinen Standards (IRT, Dolby), die besonders bei Speicherung auf Mehrkanalmedien Berücksichtigung finden. Aufgezeichnet wird dann in Achterblöcken, wobei die Kanäle 7 und 8 optional für Stereomaterial genutzt werden können.

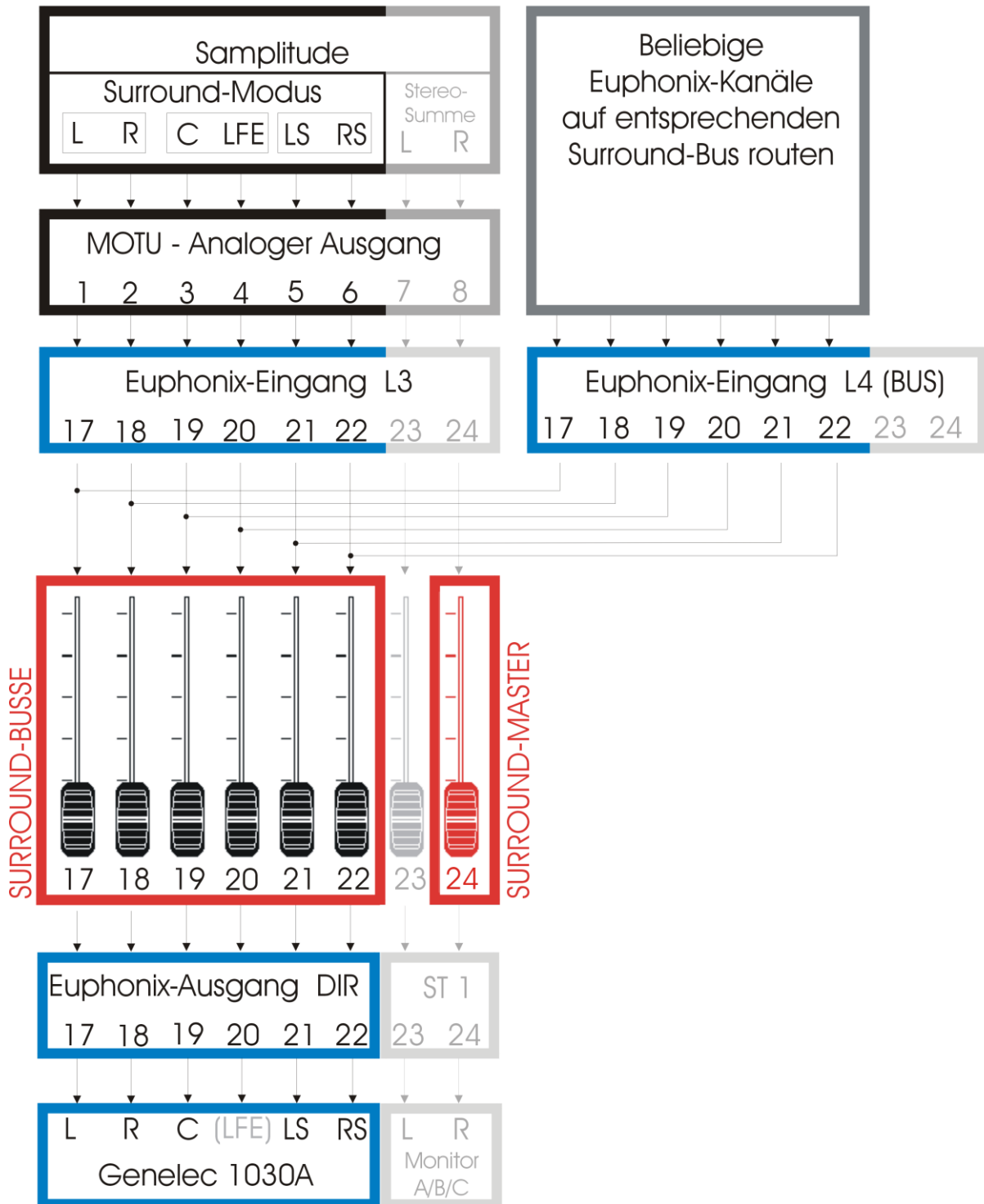


Abbildung 6.2: Ansteuerung der Surround-Busse

## 6.2.1 Kabelführung

Für die Umsetzung der fest installierten Surround-Anordnung im TU-Studio sind folgende

---

Verkabelungen notwendig.

### **6.2.1.1 Anschluss der 5.0-Lautsprecher**

Die Fader des rechten Achterblocks am Euphonix sollen als Surround-Busse genutzt werden. Über die Direct-Out (DIR) sollen die fünf Surround-Lautsprecher unmittelbar angesteuert werden können. Dazu ist eine Verbindung zwischen der Patchbay und den Boxen notwendig. Diese führt von den DIR-Buchsen der Kanäle der Surround-Busse über den Geräte Keller bis zu Anschlüssen im Deckenbereich.

Die Stromversorgung der Tonmonitore erfolgt ebenfalls über die Decke.

### **6.2.1.2 Verschaltung der analogen MOTU-Ausgänge**

Bisher lagen die acht analogen Ausgänge der MOTU an den Kanälen 9 bis 16 der Patchbay an. Um in Zukunft ohne zusätzliche Verkabelung die Ausgänge von Samplitude direkt auf die Surround-Busse routen zu können, werden die MOTU-Ausgänge parallel auch an die Kanäle 17 bis 24 angeschlossen.

### **6.2.1.3 Anschluss der Manger Schallwandler**

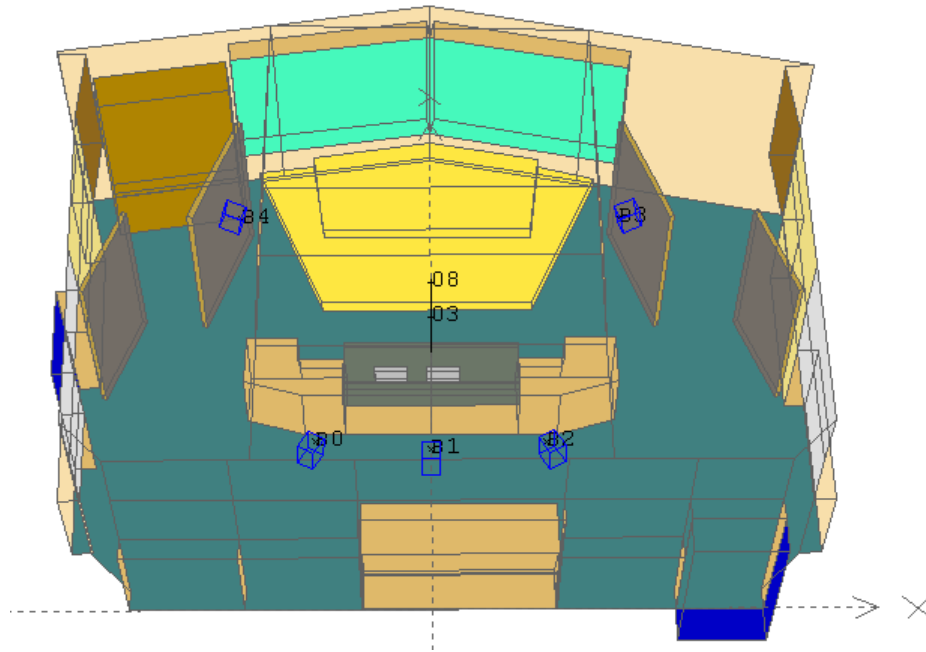
Die Manger Schallwandler (MSW) sollen als zusätzliche Stereoquelle dienen. Aus diesem Grund werden sie an den Monitor-Ausgang A des Euphonix angeschlossen. So kann wahlweise über die Genelec 1032 A (Monitor B) oder die MSW abgehört werden.

Dazu wird der Monitor-Ausgang A auf den Kabelkanal an der Frontseite des Studios gelegt. Hier kann dann die Endstufe angeschlossen und über die Frequenzweichen die MSW betrieben werden.

## **6.3 Akustische Veränderungen**

Die Simulationen des Regieraumes in CATT-Acoustic stellt eine Reihe von Möglichkeiten vor, die Akustik besonders für das Arbeiten mit Surround-Material zu optimieren. Dabei werden Veränderungen herbeigeführt, die in naher Zukunft nicht umgesetzt werden können. Um dennoch Ergebnisse dieser akustischen Simulationen im laufenden Studiobetrieb schnell und einfach zu berücksichtigen, ist eine Simulationsreihe durchgeführt worden, in der versucht wird, mit einfachen Mitteln die Akustik für Surround-Anordnungen zu verbessern.

Dazu wurden die vorhandenen Trennwände aus dem Aufnahmeraum herangezogen, die normalerweise dazu benutzt werden, Musiker, die gleichzeitig im Studio aufnehmen, akustisch zu trennen. Es existieren vier solche Wände in zwei unterschiedlichen Breiten. Durch ihre absorbierende Eigenschaft sollen sie einerseits die Vorhänge hinter den Surround-Lautsprechern ersetzen, andererseits sollen sie das Flatterecho unterbinden.



**Abbildung 6.3: Optimierung durch Trennwände**

Die Aufstellung der Trennwände zeigt Abbildung 6.3. Hier wird die Funktion der Vorhänge, Reflexionen aus dem Live-End aus der Richtung der Lautsprecher zu verhindern, durch die breiteren Trennwände übernommen. Die schmaleren lösen die nahezu parallel verlaufende Struktur der Seitenwände auf der Höhe des Abhörplatzes auf, unterbinden also das Flatterecho.

<b>f [Hz]</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>
Toleranzfeld obere Grenze	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	-
CATT TW	-	0,36	0,28	0,27	0,28	0,25	0,21	-	-
Toleranzfeld untere Grenze	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,21	0,18	-

**Tabelle 6.1:  $T_{30}$  [s] - Trennwände, B0 bis B4, gemittelt**

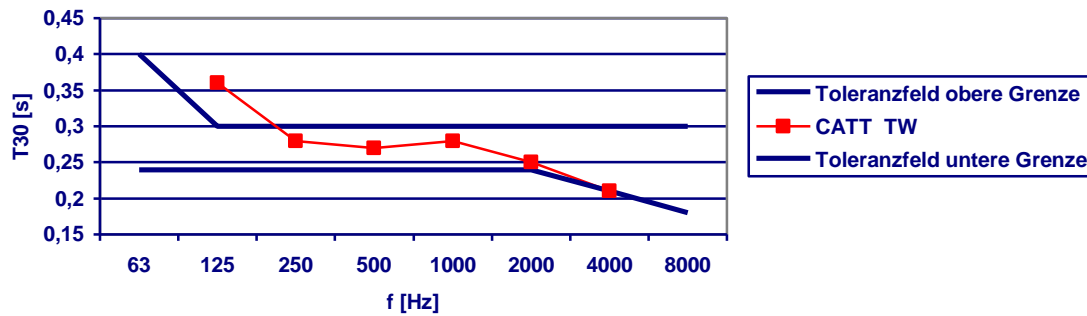


Abbildung 6.4:  $T_{30}$  [s] - Trennwände, B0 bis B4, gemittelt

Durch die absorbierenden Eigenschaften der Trennwände kann ein ähnlich guter Verlauf der Nachhallzeit wie in der optimierten Version erreicht werden. Im Bassbereich ist die Wirkung gleichsam wie beim Vorhang allerdings auch zu gering.

Da im Gegensatz zu den Optimierungsvorschlägen aus Kapitel 5.4 diese Maßnahmen mit den Trennwänden einfach im Regieraum umzusetzen ist, konnte die Wirksamkeit dieser durch eine weitere Messung mit WinMLS überprüft werden.

Die Durchführung der Messung erfolgte entsprechend der Messung 5 (Kapitel 4.6). Ein Vergleich der simulierten und gemessenen Werte zeigt Tabelle 6.2.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
CATT TW	0,36	0,28	0,27	0,28	0,25	0,21
WinMLS TW	0,40	0,28	0,31	0,32	0,31	0,26
Differenz	0,04	0	0,04	0,04	0,06	0,05

Tabelle 6.2:  $T_{30}$  [s] - mit Trennwänden

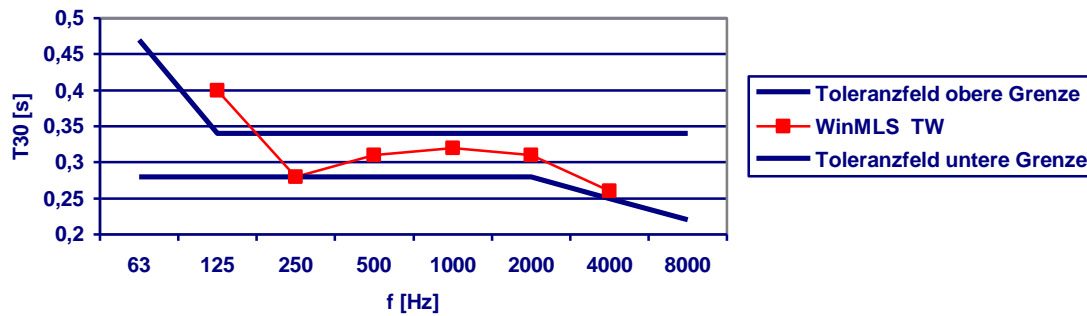


Abbildung 6.5:  $T_{30}$  [s] - Trennwänden, B0 bis B4 - gemessen

Insgesamt ergeben sich Unterschiede von maximal 0,06s zwischen simulierter und gemessener Nachhallzeit. Es bestätigt sich also Glaubwürdigkeit der akustischen Vorhersagen von CATT-Acoustic.

Die mit WinMLS ermittelten Werte der  $T_{30}$  liegen außer im Oktavband 250Hz über den entsprechenden simulierten Ergebnissen. Dadurch verschiebt sich auch das Toleranzfeld zu höheren Werten. Wie in der Simulation vorhergesagt, liegen aber alle Werte mit Ausnahme des Oktavbandes 125Hz innerhalb der zulässigen Norm. Es bestätigt sich die Notwendigkeit zusätzlicher Bassabsorber. Wie in der Simulation wird auch im realen Raum der Bassbereich durch die Trennwände nicht ausreichend beeinflusst.

Insgesamt kann aber durch diese einfache Maßnahme die Nachhallzeit erheblich verbessert werden.

Nachteilig wirkten sich die zusätzlichen Wände allerdings auf die frühen Reflexionen aus. Durch die größere Nähe zu den Lautsprechern kommt es zu stärker ausgeprägten Reflexionen als zuvor. Ein Vergleich der „Sound-Roses“ aus CATT-Acoustic in den Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 veranschaulicht dies. Es kommt in den ersten 15ms zu Reflexionen, die weniger als 10dB Unterschied aufweisen als der Direktschall. Zudem fallen durch die kürzeren Distanzen zwischen begrenzenden Flächen und der Hörerposition Reflexionen 2. Ordnung über die Trennwand und die Decke im Zeitbereich von 15ms.



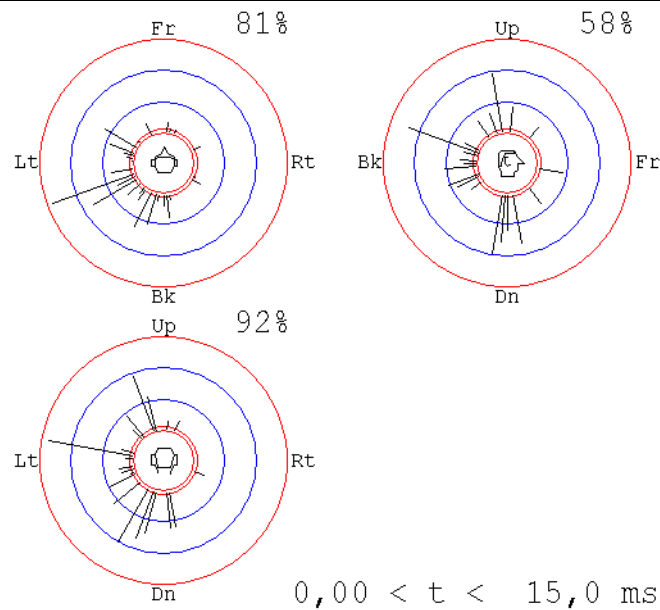


Abbildung 6.6: R\_C3\_03\_125 - mit Trennwänden

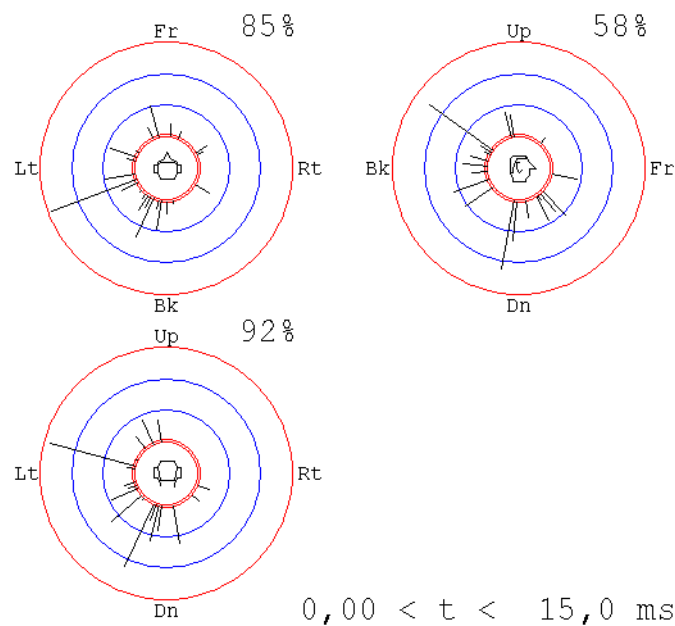


Abbildung 6.7: R\_C3\_03\_125 - normaler Zustand

Grundsätzlich stellt aber die Variante mit den Trennwänden eine Verbesserung der Abhörsituation im Vergleich zu der Raumsituation ohne Veränderungen dar. Besonders die Nachhallzeit verläuft homogener, wenn Trennwände entsprechend aufgestellt werden. Lediglich im Bassbereich schaffen die Wände keine Verbesserung.

Bedenkt man, dass bei einem kleinen Surroundradius die Nahfeldwirkung der Lautsprecher den Einfluss des Raumes mindert, kann auch auf diese Weise sinnvoll mit Surround-

Anordnungen gearbeitet werden.

## 7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die akustischen Eigenschaften eines Raumes nicht global mit wenigen Werten ausreichend beschrieben werden können. Erst durch die Wahl eines engmaschigen Rasters der Messpunkte werden Regionen ähnlicher Wertebereiche erkennbar und lassen sich Tendenzen dieser Parameter veranschaulichen. Durch die Darstellung solcher Zonen werden auch Rückschlüsse auf die Wirkung der verschiedenen Oberflächen möglich. All diese Erkenntnisse bleiben bei klassischen raumakustischen Messungen, bei denen Werte weniger Messpunkte zusammengefasst werden, verborgen.

Auf Grund der verschiedenen Messungen und der Simulation mit CATT-Acoustic war es möglich, die akustische Eignung des Regieraumes für die Wiedergabe von Surroundformaten zu prüfen und Lösungsmöglichkeiten für akustische Mängel zu finden und zu optimieren. So sind verschiedene Ansätze entstanden, die die Abhörsituation im Studio verbessern können. Es hat sich gezeigt, dass bereits mit wenigen Maßnahmen deutliche Verbesserungen in Bezug auf das Flatterecho und die Schalllenkung erzielt werden können. Mit diesen Optimierungen werden gleichzeitig auch normgerechtere Nachhallzeiten erreicht.

Durch das installierte Surroundsystem können in Zukunft sinnvoll Mehrkanalproduktionen stattfinden. Neben erprobten Standardkonfigurationen, die schnell und einfach reproduzierbar sind, wird aber auch ein Experimentieren mit der Aufstellung der Lautsprecher im Sinne eines Lehrstudios jederzeit möglich sein.

## 8 Literaturverzeichnis

[Catt]

DALENBÄCK Bengt-Inge: *Benutzerhandbuch. CATT-Acoustic v8*, 2002

[Cremer1]

CREMER Lothar, MÜLLER Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik – Band I*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978

[Dickreiter 1]

DICKREITER Michael: *Handbuch der Tonstudioteknik - Band I*. K-G-Saur Verlag München, 1997

[Dickreiter 2]

DICKREITER Michael: *Handbuch der Tonstudioteknik - Band II*. K-G-Saur Verlag München, 1997

[DIN]

DIN-Taschenbuch 342 (DIN 15996 : 1996-04): *Veranstaltungstechnik : Theater-, Studio- und Hallentechnik*. Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. - Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2001

[Dolby]

DOLBY LABORATORIES, INC: *5.1-Channel Music Production Guidelines*. Issue 2, 2003

[dynaudio]

DYNAUDIO: *Knowledge Base*. <http://www.dynaudioacoustics.com/default.asp?id=413>

[Fasold]

FASOLD Wolfgang, SONNTAG Ernst, WINKLER Helgo: *Bau- und Raumakustik*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987

[Graber 1]

GRABER Gerhard: *Elektroakustik*. Vorlesungsskriptum Version 4.0, Institut für Breitbandkommunikation TU Graz, 2000/01

[Graber 2]

GRABER Gerhard: *Ausgewählte Kapitel Elektroakustik*. Vorlesungsskriptum Version 6, Institut für Breitbandkommunikation TU Graz, 2001

[Henle]

HENLE Hubert: *Das Tonstudio Handbuch*. GC Gunther Carstensen Verlag, München 1993

[ITU]

ITU-R BS.1116-1: *Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems*. International Telecommunication Union, 1997

[Müller]

MÜLLER Gerhard, MÖSER Michael: *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer, 2003

[Owsinski]

OWSINSKI Bobby: *Calibrating The 5.1 System*. Surround Professional, October 1998

[Quiring]

QUIRING Karl Bernd: *Raumakustik und Beschallungstechnik*. Vorlesungsskriptum 2. Auflage, Institut für elektronische Musik der KU Graz, 1996

[Smith]

SMITH Eric, Auralex Acoustics Inc.: *Control Room Design For 5.1 Channel Surround Mixing*, 2001

[Storyk/Noy]

STORYK John, NOY Dirk: *Acoustical Design Criteria for Surround Sound Control Rooms*. AES-Preprint, 106<sup>th</sup> Convention 1999

[Toyoshima]

TOYOHIMA Sam M., SUZUKI H.: *Control Room Acoustic Design*. AES Preprint, 80<sup>th</sup> Convention, 1986

[Voelker]

VOELKER E. J.: *Acoustics in Control Rooms - That Recurring Burdensome Subject*. AES Preprint, 105<sup>th</sup> Convention, 1998

[Walker]

WALKER R.: *A Controlled-reflection Listening Room for Multichannel Sound*. AES Preprint, 104<sup>th</sup> Convention, 1998

[WinMLS]

WinMLS: *Benutzerhandbuch*. WinMLS2004 v1.02, 2004

## 9 Anhang A

Die folgenden Kapitel dienen als Hilfe für Studio-Benutzer, um sich schnell mit der neuen Surround-Installation vertraut machen zu können.

### 9.1 Einrichten einer 5.0-Aufstellung

#### 9.1.1 Einstellung der Standard-5.0-Aufstellung

- Alle Querschienen auf die markierten Positionen fahren.
- Alle Lautsprecheraufhängungen auf die Markierungen fahren.
- Lautsprecher entsprechend neigen.

Standard 1 (Blau):

- Sweetspot direkt an der Pultmitte (klassischer Sweetspot)
- Radius: 1,50m

Standard 2 (Rot):

- Sweetspot zwischen Pult und Holzpodest (50cm vor der Pultkante)
- Radius: 2,50m

#### 9.1.2 Ermittlung der Position der Lautsprecher für individuelle Surround-Aufstellungen

1. Sweetspot im Raster festlegen.
2. Radius um den Sweetspot schlagen.
3. Ggf. Lautsprecherachsen einzeichnen.
4. Positionen der Schienen und Lautsprecher ablesen.

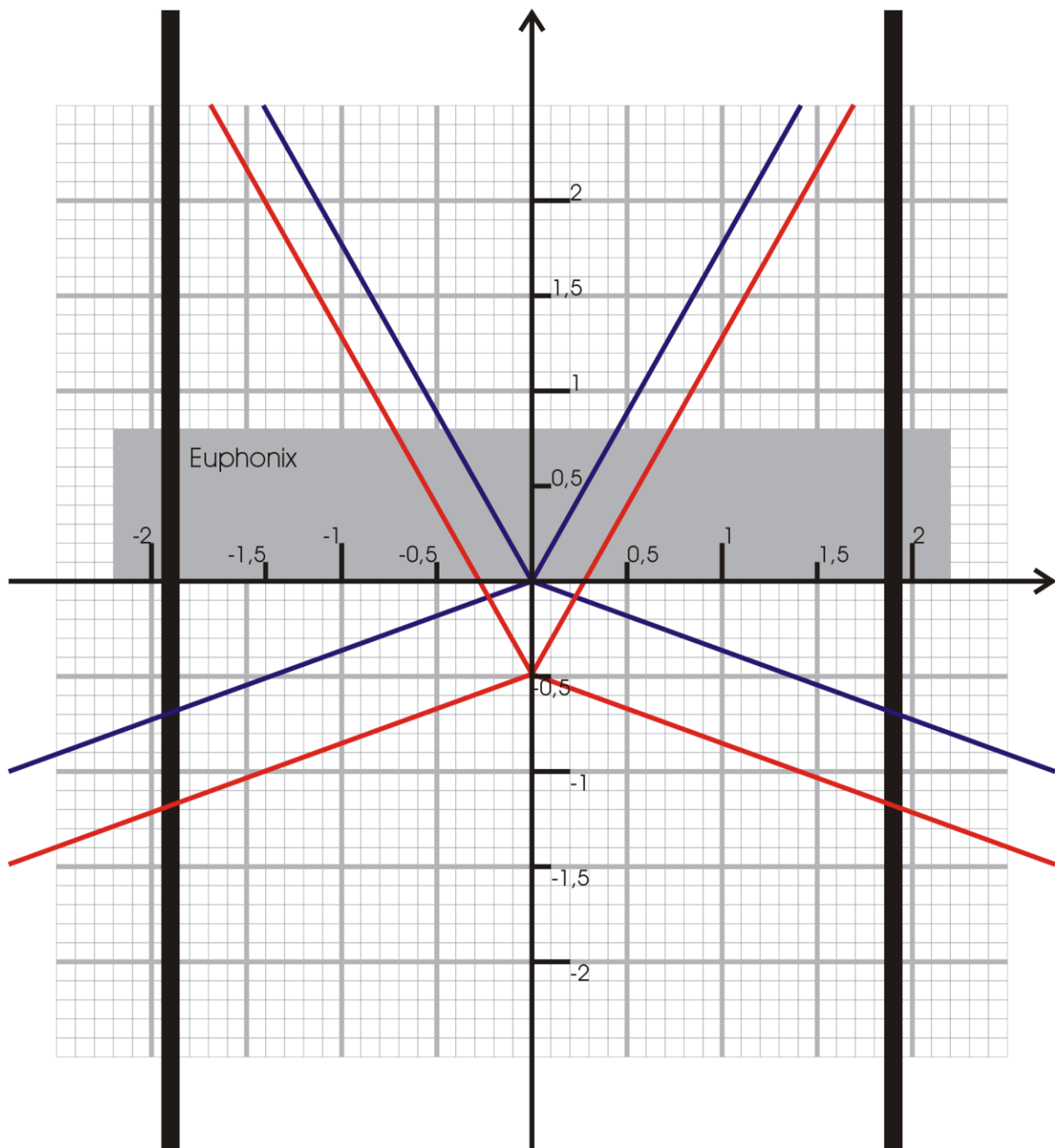


Abbildung 9.1: Lautsprecherraster (Vorlage)

## 9.2 Konfigurierungsbeispiele für 5.0-Anordnungen

Die folgenden Beispiele sollen als Einführung dienen und einen schnellen Start zur Arbeit mit der 5.0-Anordnung ermöglichen.



Selbstverständlich sind über diese Beispiele hinaus diverse Routingmöglichkeiten denkbar und es steht jedem Nutzer frei, eine Konfiguration zu finden, die für sein jeweiliges Arbeiten ein Optimum darstellt.

In den folgenden Beschreibungen wird der grundlegende Umgang mit dem Euphonix-Pult, mit der MOTU und Samplitude vorausgesetzt.

### 9.2.1 Was man für die Nutzung von 5.0 wissen sollte

Die fünf Lautsprecher hängen direkt an den Direct-Outs (DIR) der Kanäle 17 bis 22 und sind über die Patchbay erreichbar.

- DIR 17     L
- DIR 18     R
- DIR 19     C
- DIR 20     freigehalten für optionalen LFE-Kanal
- DIR 21     LS
- DIR 22     RS

Die Kanäle 17 bis 22 stellen also die Surround-Busse dar. Alles was an diesen Kanälen anliegt kann mit „DIR“ auf dem jeweiligen Lautsprecher abgehört werden. Der Fader steuert dabei direkt die Lautstärke des Surround-Busses. Die Kanäle 23 und 24 sind für eine optionale Stereo-Spur freigehalten, wie es für achtkanalige Speichermedien üblicher Standard ist.

### 9.2.2 Konfigurierungsbeispiel 1

*„5.0 aus Samplitude abhören“*

#### **In Samplitude:**

- Surround-Modus wählen
- Surround-Busse in Samplitude auf die analogen Ausgänge der MOTU schicken:
  - L/R auf 1/2
  - C/LFE auf 3/4
  - LS/RS auf 5/6

Dadurch liegen diese Ausgänge automatisch an den L3-Eingängen der Kanäle 17 bis 22 an.

(Nach wie vor kommen die acht analogen Ausgänge der MOTU auch auf den Kanälen 9 bis 16 an, sind aber nun auch an den Kanälen 19 bis 24 verfügbar.)

### **Am Euphonix:**

- An den Kanälen 17 bis 22 (upper oder lower Fader möglich):
  - Source: L3
  - Assign: DIR
  - Pan: mono
  
- Einmessen der Kanäle (s.u.)
- Master-Fader definieren, der die Fader 17 bis 22 als Slave steuert, um die Abhörlautstärke regeln zu können, ohne die relativen Pegel der Surround-Busse untereinander zu verändern.

**ACHTUNG:** Track-Bouncing in Samplitude durchführen, da durch das Verstellen des Master-Faders auch die Pegel der einzelnen Surround-Busse verstellt werden. Eine Abschwächung der Abhörlautstärke führt zu reduzierten Surroundbus-Pegeln.

## **9.2.3 Konfiguratoionsbeispiel 2**

*„5.0 am Pult mischen und abhören“*

**Quelle:** Einzelspuren aus Samplitude und/oder der Mackie-Maschine

### **Am Euphonix:**

- Upper Fader 1 bis 16:
  - Source: L4
  - Assign: interne Busse 17 bis 22
  - Pan: MonoPan (ermöglicht Pan zwischen benachbarten Bussen (z.B. links-rechts))
  
- Lower Fader 17 bis 22 (Surround-Busse):
  - Source: L4(BUS)
  - Assign: DIR
  - Pan: mono

Benötigt man mehr als 16 Eingangskanäle, also z.B. alle 24 Spuren der Mackie, müssen an

der Patchbay die Returns 17 bis 22 der Mackie von L4 auf L3 „umgepatcht“ werden, da der L4 auf diesen Kanälen bereits für die internen Busse verwendet wird.

- Einmessen der Kanäle (s.u.)
- Master-Fader definieren, der die Fader 17 bis 22 als Slave steuert, um die Abhörlautstärke regeln zu können, ohne die relativen Pegel der Surround-Busse untereinander zu verändern.

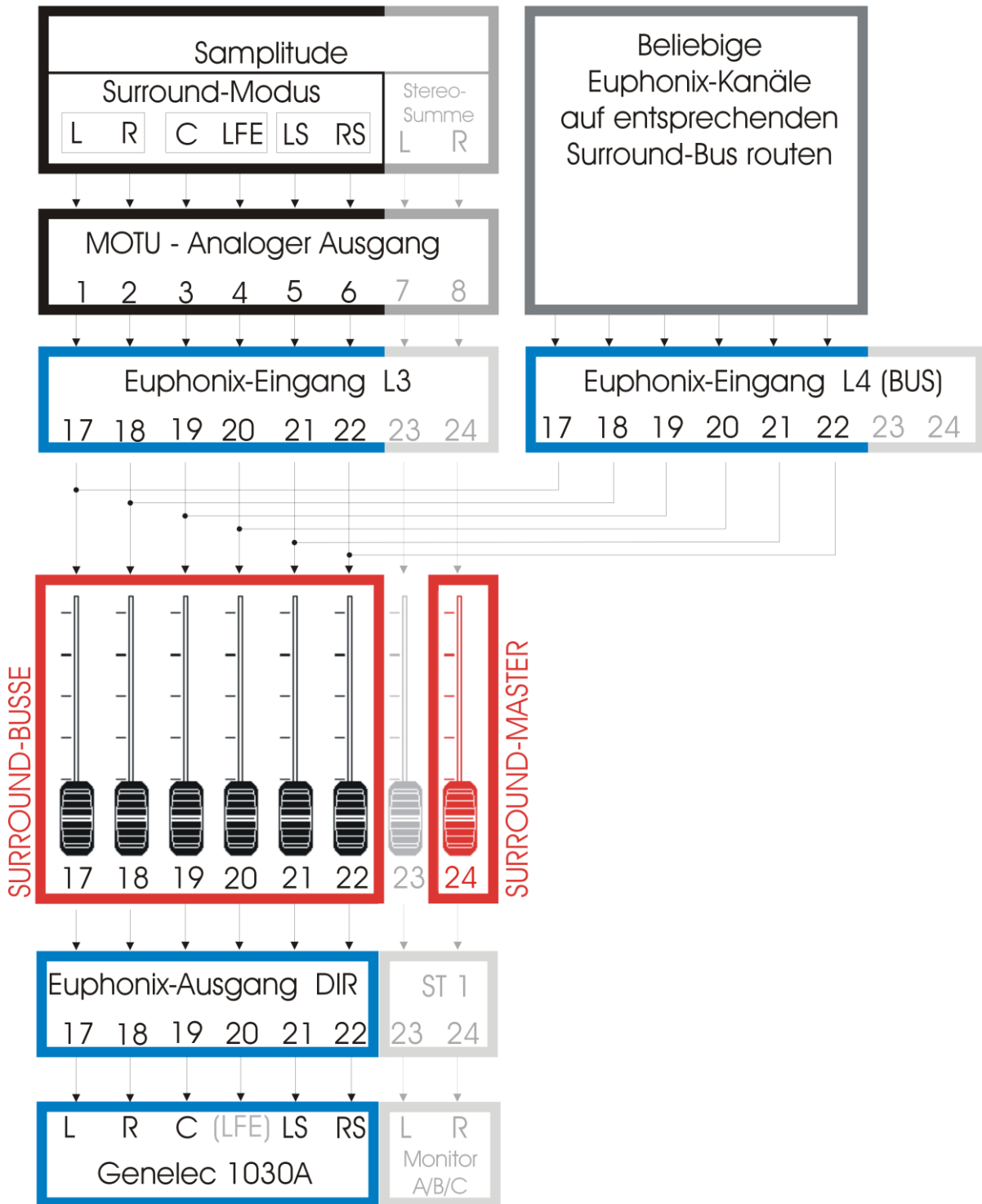
**ACHTUNG:** Durch Verstellen des Master-Faders werden auch die Pegel der einzelnen Surround-Busse verstellt, daher ist Track-Bouncing über das Pult (= Aufnahme der Euphonix-Surround-Busse in Samplitude) nur bei eingemessenem 0dB-Pegel möglich, also der vollen Abhörlautstärke!

Daher ist es sinnvoll, sich zusätzliche Surround-Busse zu konfigurieren, die hinter den DIR den „offiziellen“ Surround-Busse hängen, um hier die Abhörlautstärke unabhängig vom eingemessenen Bus-Pegel regeln zu können.

Diese beiden Beispiele sind grundsätzlich auch kombinierbar, da die Surround-Busse gleichzeitig mehrere Eingänge (L1 bis L4) wiedergeben können.

Durch entsprechendes Verkabeln an der Patchbay und die diversen Routingmöglichkeiten sind viele weitere Möglichkeiten, Signale auf die Surround-Busse zu legen, denkbar, die hier aber nicht weiter beschrieben werden.

Aufbauend auf diesen Beispielen wird jeder Nutzer „seine Idealkonfiguration“ finden.



### 9.3 Einmessen der Anlage

Vor jedem Gebrauch ist eine Kontrolle der Pegel unerlässlich, da die Surround-Anlage nicht fest installiert ist und in unterschiedlichsten Konfigurationen genutzt wird. Daher ist die Anlage zu Beginn einer Produktion einzumessen.

Zu diesem Zweck ist ein VIP-File („5.0\_Einmessen.vip“) in Samplitude angelegt worden, das alle notwendigen Testsignale bereitstellt<sup>1</sup>.

	Marker	Signal	Kanäle	Pegel
Kanalidentifikation	1	Kanäle werden angesagt	alle	
Pegelkontrolle	2	1kHz Sinus	alle	+4dBu = 0dB
Referenz-Abhörpegel	3-7	Rosa Rauschen, 200Hz bis 20kHz, -20dBFS (RMS)	einzeln	78dB(A) SPL
	8		alle	85dB(A) SPL
Individuelle Lautsprecher/Raum-Übertragungskurve	9	Rosa Rauschen, 20Hz bis 20kHz, -18dBFS (RMS)	alle	70dB SPL
Musikbeispiel 5.0	10	„Evolution“ von K. Schulze	alle	

Tabelle 9.1: Messsignale

### 9.3.1 Kanalidentifikation

Jeder der fünf Lautsprecher wird separat angesprochen, sodass ein korrektes Routing überprüft werden kann.

### 9.3.2 Pegelkontrolle

Auf allen Kanälen wird gleichzeitig ein Sinus (1kHz) wiedergegeben. Stellt man an der Pegelanzeige am Mischpult den Eingangspegel L3 dar, so sollte diese den Studionormpegel von +4dBu anzeigen. Das ist der Fall, wenn die LED-Kette bis zur „7“ reicht (erste gelbe LED).

**ACHTUNG:** Abhörlautstärke reduzieren!

### 9.3.3 Referenz-Abhörpegel $L_{LIST\ ref}$

- Über jeden der fünf Kanäle wird bandbegrenzt Rosa Rauschen wiedergegeben.

<sup>1</sup> Der Einmessvorgang entspricht den Empfehlungen des Surround Sound Forums (VDT, IRT, SRT).

Mit Hilfe eines Schallpegelmessers ist der jeweilige Kanal-Fader so einzustellen, dass ein Pegel von 78dB(A) (slow) gemessen wird (Faderstellung ca. bei 8).

- Ist ein Masterfader für die fünf Surround-Busse eingerichtet worden, ist dieser bei den Messungen auf 0dB zu belassen. Besser ist es, den Master erst nach dem Einmessen zu definieren.
- Über alle fünf Kanäle wird gleichzeitig bandbegrenzt Rosa Rauschen wiedergegeben. Es sollte ein Schalldruckpegel von 85dB(A) (slow) gemessen werden.
- Steht kein Schalldruckmesser zur Verfügung, kann der Frequenz-Analysator benutzt werden. Dieser zeigt dann je nach Wahl der Darstellung geringere Pegel entsprechend Tabelle 9.2 an.

Darstellung	Bereich	Differenz SPL [dB]	SPL [dB]
Terzband	20 Terzen	-13	72
	30 Terzen	-14,8	70,2
Oktavband	6 Oktaven	-8,2	76,8
	10 Oktaven	-10	70

Tabelle 9.2: Pegelvergleich (Bezug: 85 dB SPL)

### 9.3.4 Messung der individuellen Lautsprecher/Raum-Übertragungskurve

Hierfür steht Rosa Rauschen von 20Hz bis 20kHz zur Verfügung. Es dient dazu, den raumbehafteten Frequenzgang zu korrigieren. Dies kann mit Equalizern in den Kanälen der Surround-Busse durchgeführt werden.

**ACHTUNG:** Ein verwendeter Master-Fader greift direkt in die Pegel der Surround-Busse ein. Zwar stimmen die Pegel immer noch relativ zueinander, aber der absolute Pegel entspricht nicht mehr dem eingemessenen Standard!

## 10 Anhang B - Hinweise zur Daten-CD

Die folgenden Kapitel sollen den Umgang mit den Daten der Messungen und der Simulation auf der CD erläutern.

### 10.1 Daten der Messungen

Auf der Daten CD befinden sich in komprimierter Form alle Messdaten inklusive der Auswertung in Excel.

Für jede Messung existiert ein Ordner, der alle Messdateien aus WinMLS 2004 (\*.wmb) enthält. Diese Daten können jederzeit wieder im Programm geladen und ausgewertet werden.

Die Messdaten sind entsprechend dem jeweiligen Raster in Unterverzeichnissen zu acht Messpunkten gespeichert. Da mit acht Kanälen gleichzeitig gemessen wurde, besteht für jeden Durchlauf ein Ordner.

Zu jeder Messung befinden sich ebenfalls Excel-Dateien im komprimierten Ordner, die die exportierten Gütemaße aus WinMLS enthalten.

Pro Messreihe existiert ein Tabellenblatt, welches die Werte aller Messpunkte dieser Reihe enthält. Die Ergebnisse in den Spalten A bis J beruhen auf einer MLS-Messung, ab Spalte L sind Werte aus der entsprechenden Sweep-Messung aufgeführt.

Alle weiteren Tabellenblätter enthalten entsprechend dem Messraster sortierte Werte eines Parameters und ggf. eine Graphik dazu.

### 10.2 Daten zu CATT-Acoustic

In dem Ordner CATT-Acoustic befinden sich alle Dateien, die für die Simulation benötigt werden.

Das Projekt kann mit der Datei „Regieraum.PRD“ geöffnet werden.

Bei der Abarbeitung der GEO-Files greift CATT-Acoustic als erstes auf „Definition.geo“ zu. Hier besteht die Möglichkeit, globale Variablen (GLOBAL) festzulegen, um bestimmte

Veränderungen zu wählen bzw. zu kombinieren. Diese sind in „Definition.geo“ dokumentiert.

Die verschiedenen Lautsprecher, die im Studio zum Einsatz kommen, sind Tabelle 10.1 zu entnehmen.

<b>Lautsprecher-Anordnung</b>	<b>Kugelquelle</b>	<b>R</b>	<b>C</b>	<b>L</b>	<b>LS</b>	<b>RS</b>
Kugelquelle	A0					
1030A, Radius 2.50m		B0	B1	B2	B3	B4
1030A, Radius 1.50m		C0	C1	C2	C3	C4
Stereo, 1032A		D0		D1		
Kugel, 1032A	E0 + E1					
Manger Schallwandler		G1		G0		

**Tabelle 10.1: Lautsprecher in CATT-Acoustic**

Um diese Lautsprecher zu nutzen, müssen die Dateien (\*.sd0) aus dem Ordner „Directivity“ in den Programmordner von CATT-Acoustic kopiert werden. Im Allgemeinen ist das der Ordner „C:\Programme\CATT\sd“.

Wird die Simulation gestartet, ist die Wahl der gewünschten Receiver (Tabelle 10.2) einzugeben (GLOBAL: RECEIVER).

<b>GLOBAL: RECEIVER</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Verteilung</b>
1	19	Regieraum
3	14	Abhörort

**Tabelle 10.2: Receiver in CATT-Acoustic**

## 10.3 Daten zum Einmessen

Zum Einmessen der 5.0-Anordnung steht ein Samplitude-Projekt mit dem Namen „5.0\_Einmessen.vip“ zur Verfügung. Weitere Informationen hierzu sind in Kapitel 9.3 zu finden.