

# **Raumakustische Simulation**

Toningenieurprojekt

durchgeführt von

**Patrick Stöhs**

Institut für Breitbandkommunikation  
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. DI. Dr. Gernot Kubin

Betreuer: DI. Dr. Franz Graf

Graz, im Juni 2010

## Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die raumakustische Simulation eines ellipsenförmigen großen Raums mit der Software CATT-Acoustics.

Die Pläne des Raumes entstammen der Diplomarbeit des Architekten DI Christoph Jahrman. In seiner Arbeit erstellte der Architekt den Entwurf für eine Moschee am Ostufer der Mur in Graz. Der zentrale Gebetsraum hat einen elliptischen Grundriss mit den Abmessungen 32m x 24m und vereinigt bautechnische Elemente der Gegenwart wie Glas und Sichtbeton mit Elementen „klassischer“ Islamischer Architektur (zum Beispiel Fliesen). In Kombination mit der Raumform ergeben sich akustische Probleme, die in folgender Arbeit simuliert, erkannt und verbessert sowie auralisiert werden sollen.

Es besteht keine konkrete Planung das Gebäude tatsächlich zu bauen. Nicht zuletzt deshalb beschränkt sich diese Arbeit hauptsächlich auf die Optimierung mittels Sekundärmaßnahmen, ohne die Geometrie des Raumes zu ändern.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Der Entwurf</b>	<b>7</b>
2.1	Der Raum in AutoCAD.....	7
2.2	Übertragung der Punkte von AutoCAD nach CATT.....	9
2.2.1	Namenskonvention der Eckpunkte (Corner).....	9
2.2.2	Ausnahmen.....	9
<b>3</b>	<b>Das Modell</b>	<b>10</b>
3.1	Der Raum.....	10
3.1.1	Boden.....	10
3.1.2	Vorhang.....	10
3.1.3	Außenwand.....	11
3.1.4	Innenwand/Trennwand.....	11
3.1.5	Gang.....	11
3.1.6	Decke.....	11
3.1.7	Galerie.....	11
3.1.8	Transparente „Segel“.....	11
3.1.9	Publikum.....	11
3.2	Schallquellen- und Hörerpositionen.....	12
3.2.1	Schallquellen.....	12
3.2.2	Hörer.....	12
<b>4</b>	<b>Modellierung und Simulation</b>	<b>14</b>
4.1	Version 1.....	14
4.2	Version 2.....	14
4.3	Version 3.....	14
4.3.1	Entfernen von Leaks.....	14
4.3.2	Simulation mit Version 3.....	15
4.3.3	Problematische Echos.....	17
4.4	Version 4.....	17
4.5	Version 5.....	17
4.6	„unoptimierte“ Version.....	18
4.7	Beschreibung des optimierten Modells.....	18
4.8	Elektroakustische Anlage.....	22
4.9	Überblick über die einzelnen CATT-Files.....	23

---

<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
5.1	Nachhallzeit.....	25
5.2	STI / RASTI.....	27
5.3	Deutlichkeitsgrad $D_{50}$ .....	32
5.4	Schalldruckpegelverteilung (SPL).....	35
5.5	Der Plot <i>Hits</i> .....	40
5.6	Weitere Ergebnisse.....	42
5.6.1	Seitenschallgrad (LF, <i>lateral energy fraction</i> ):.....	42
5.6.2	Klarheitsmaß $C_{80}$ .....	43
5.6.3	Schwerpunktszeit ( $T_s$ , <i>center time</i> ).....	44
<b>6</b>	<b>Auralisation</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>48</b>
<b>Anhang A</b>		<b>49</b>

---

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Inhalt dieser Arbeit ist die Simulation eines Raumes bei dem man bereits bei Betrachtung seiner Grundform von einer problematischen Akustik ausgehen muss. Aufgrund der Ellipsenform wird der Betrachter (mit einem Grundverständnis der Raumakustik) sofort auf mögliche Probleme schließen. So ist aufgrund der geometrischen Raumakustik eine Brennpunktbildung, oder zumindest eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Schallenergie zu erwarten.

Der Entwurf entstammt der Diplomarbeit von DI Christoph Jahrman [JAHRMANN] aus dem Jahr 2009 in welcher er den Plan einer Moschee am östlichen Murufer in Graz entwirft. Ist bereits die Grundform aus akustischer Sicht problematisch, so enthält der gesamte Entwurf moderne Baustoffe die zwar eine „schöne“ Gestaltung ermöglichen, in gleichem Maß aber die Raumakustik beeinträchtigen.

[JAHRMANN] verwendet moderne Baustoffe wie Glas und Sichtbeton, trägt aber auch der „klassischen“ islamischen Architektur Rechnung, indem er zum Beispiel großflächig Mosaikfliesen vorsieht. Optisch setzt er auf eine Kombination dieser Werkstoffe in einer funktionell „modernen“ Moschee, die aber die Elemente in einer für den Islam traditionellen Weise verbindet. So besteht der Großteil der Außenwand aus Glaselementen, die mit rautenförmigen Mustern durchzogen sind. Dies lässt zum einen viel Licht in den Innenraum und zum anderen wird das Muster auf den umlaufend hängenden Vorhang projiziert.

Es wird klar, dass beim Einsatz von akustisch „problematischem“ Material, es einer gezielten Optimierung Bedarf, um die vorhergesehene Nutzung als Gebetsraum zu ermöglichen.

Wie im Islam üblich trennt [JAHRMANN] den Gebetsraum zwischen Männern und Frauen. Während Männer auf der  $600\text{m}^2$  großen Bodenfläche beten, ist für die Frauen eine Galerie mit  $200\text{m}^2$  vorgesehen. Im Raum selbst ist eine Zwischenwand/Innenwand eingezogen welche die Hauptnutzungsfläche von den Zugängen trennt. In diesen Zugängen befinden sich die Ablageflächen für Schuhe, die beim Gebet abgelegt werden müssen. Der hintere Gang enthält die Stiege zur Frauengalerie. Weiters sind links vorne im Raum Gebetsnischen zum persönlichen Gebet, zum Lesen o.Ä. vorgesehen.

Der Hauptnutzungszweck ist aber das gemeinschaftliche Gebet. Das islamische Gebet ist eine Mischung aus Sprache und Sprechgesang.

Vor diesem Hintergrund ist es nun die Aufgabe den Raum mit CATT-Acoustics zu erstellen, die diversen raumakustischen Kenngrößen durch Simulation zu bestimmen und durch geeignete Maßnahmen in den gewünschten Bereich zu bringen. Es ist kein Einfluss auf den Planungsprozess mehr möglich, da es sich bei den Plänen um eine fertige Diplomarbeit handelt.

Bei der Optimierung wurde nach Möglichkeit versucht, den Raum in seiner geplanten Gestaltung nicht zu ändern. Es wurden daher (bis auf eine Ausnahme) keine Änderungen der Geometrie und nur wenige Änderungen bei der Wahl der vorgesehenen Oberflächen vorgenommen.

Für diese Vorgehensweise gibt es mehrere Gründe: Einerseits finde ich den Entwurf sehr stimmig und wollte daran nichts ändern, zumal die *möglichen* Änderung akustisch nicht allzu viel gebracht hätten. Demnach würde ein „ordentlicher“ akustischer Eingriff in die Raumform im Nachhinein ebenso unpassend aussehen. Es müsste eine ernsthafte Berücksichtigung der Akustik von Beginn an stattfinden und Zusammenarbeit von Architekt und Akustiker voraussetzen. Für mich ist der Entwurf eine geschlossene „Einheit“, eine Änderung an der Raumform hätte diese Einheit aufgebrochen und eine weitere architektonische Planung nötig gemacht.

An dieser Stelle sei gesagt, dass es möglich war, den Raum auch ohne grundsätzliche Änderung der Architektur zu optimieren.

Alle wichtigen Kenngrößen konnten in „gute“ Bereiche gebracht werden, die der vorgesehenen Nutzung entsprechen. Es wird aber auch gezeigt, was aufgrund der Raumform möglich ist und was nicht.

Schließlich muss noch festgehalten werden, dass ob der Voraussetzungen keine „Konzertsaal-Akustik“ erwartet werden darf und auch nicht erreicht wird.

## 2 Der Entwurf

### 2.1 Der Raum in AutoCAD

Für die Modellierung standen mir die von [JAHRMANN] gezeichneten Pläne als AutoCAD-Dateien zur Verfügung. Der Raum selbst hat eine elliptische Grundfläche, dessen Hauptdiagonale ca. 34m und Nebendiagonale ca. 28m messen. Zusammen mit der Raumhöhe von 14m gibt das ein Volumen von etwas mehr als 10000m<sup>3</sup>.

Entsprechend des islamischen Glaubens ist die Hauptdiagonale in Richtung der Kaaba in Mekka ausgerichtet. Die Gebetsrichtung beträgt für den Errichtungsort 134,05 Grad.

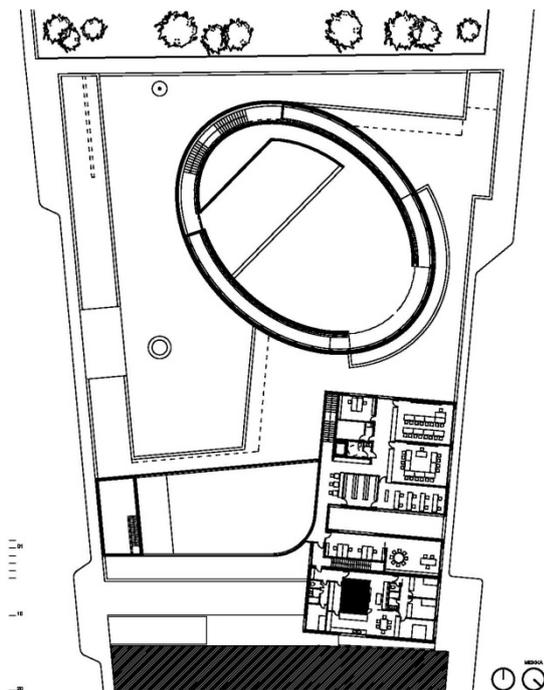


Abb. 2.2 Übersicht Grundstück mit Gebetsraum [JAHRMANN]

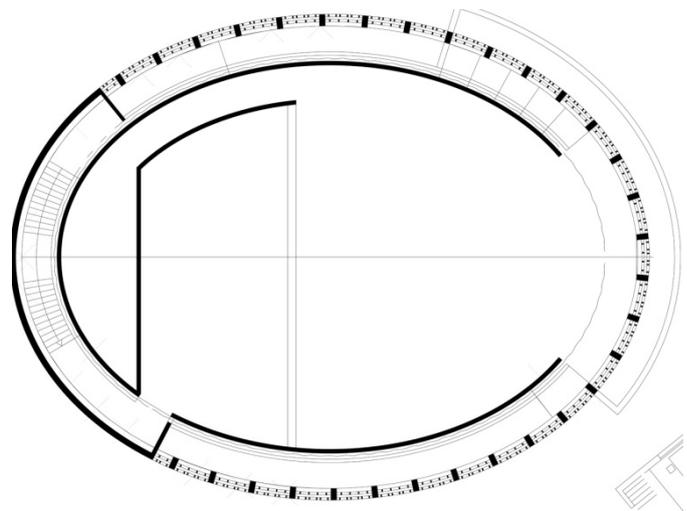


Abb. 2.1 Ellipsenförmiger Gebetsraum mit Stirnseite rechts [JAHRMANN]

Um in CATT-Acoustics (im Folgenden einfach als *CATT* bezeichnet) ein Modell zu erstellen mussten die dazu nötigen Punkte in AutoCAD gemessen werden. Dazu wurde der Raum in AutoCAD um 44,05 Grad (math. Positiv) gedreht. Die Stirnseite befindet sich nun rechts und das User Coordinate System (UCS) wurde an die Stirnseite gelegt, und zwar so, dass die x-Achse nach oben und die y-Achse nach links (in den Raum) zeigen.

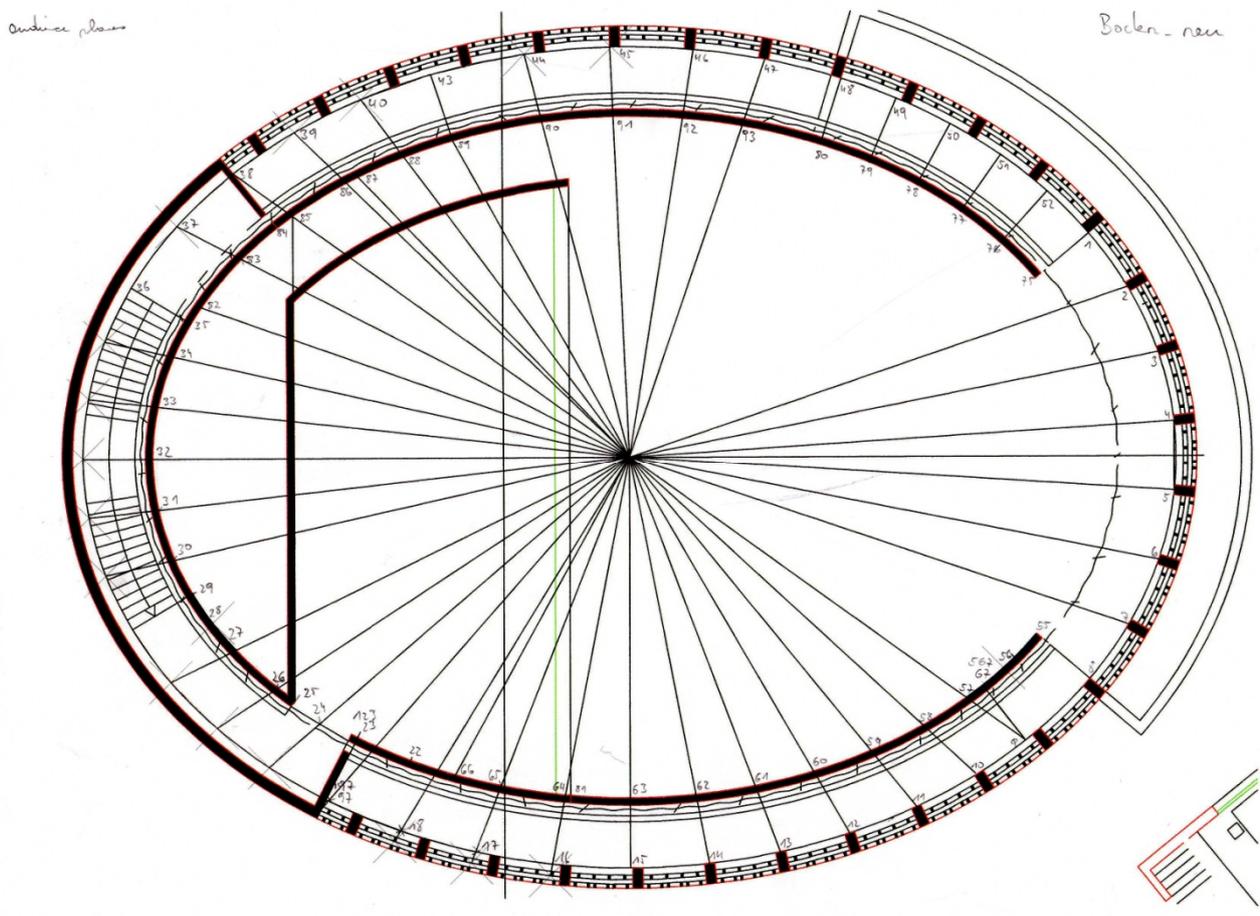


Abb. 2.3 Grundriss des Raums mit eingezeichneten Punkten des Bodens [vgl. JAHRMANN]

## 2.2 Übertragung der Punkte von AutoCAD nach CATT

Es gibt in CATT keine Kreise oder gekrümmten Flächen, daher wurden Kreise aus Geraden angenähert und darüber ebene Flächen aufgestellt. Der ellipsenförmige Grundriss wurde mit mehr als 40 Geraden approximiert, über die dann die Wandflächen „aufgestellt“ wurden.

Im ersten Schritt wurden die Punkte der Grundfläche auf einem Plot des Grundrisses (Abb. 2.3) eingezeichnet, in AutoCAD ausgemessen und im Masterfile eingetragen.

Die Punkte wurden dabei immer absolut ausgemessen, es fand keine mathematische Modellierung der Ellipse statt. Aufgrund der komplexen Innenstruktur des Raumes wäre eine math. Beschreibung der Abmessungen zu aufwendig (und auch nicht zielführend, da die Raumform vorgegeben war).

### 2.2.1 Namenskonvention der Eckpunkte (Corner)

Zu Beginn wurden die Eckpunkte (in CATT als „Corners“ bezeichnet) in der Basisebene (Boden) festgelegt. Von diesen Punkten aus erfolgt die Benennung aller darüber liegenden Punkte nach folgendem Schema:

Die Strahlen vom Mittelpunkt laufen zu charakteristischen Punkten an der Außenwand, wie Kanten von Eingängen, Fenstern, etc. Die Schnittpunkte der Strahlen an der im Raum stehenden Trennwand (innere Ellipse) wurden benannt und ermöglichen eine gleiche Anzahl an Teilflächen an der inneren sowie äußeren Ellipse, was die Modellierung zumindest teilweise vereinfacht.

Die Nummerierung folgt der Idee, dass die Punkte der Basis mit zunehmender Höhe eine größere „Hundert“ vorangestellt bekommen.

Als Beispiel dient der Punkt 25 der Bodenfläche:

In der Bodenfläche heißt er 25, die Punkte darüber haben die gleichen x- und y- Koordinaten, nur die z-Koordinate ändert sich: an der Unterkante des Galerie heißt er 125 [x(25) y(25) 2,25] an dessen Oberkante 225 [x (25) y(25) 3,10], an der Oberkante der Innenwand 425 [x (25) y(25) 6,10].

### 2.2.2 Ausnahmen

Die Nomenklatur ist keineswegs eindeutig, es ergeben sich von der Raumform abhängig vielfach Abweichungen. Auch durch später unterteilte Flächen mussten weitere Punkte verwendet werden, die sich nicht ins obige Schema fügen. Um wirklich zu wissen, wo sich welcher Punkt genau befindet muss der Plot COINFO.PLT in CATT betrachtet werden.

## 3 Das Modell

### 3.1 Der Raum

#### 3.1.1 Boden

Der „typischen“ Moschee entsprechend ist der Boden mit Teppich belegt. Nadelfilz wird üblicherweise auf stark beanspruchten Böden eingesetzt [WIKIPEDIA] und dementsprechende Absorptionsdaten wurden verwendet.

#### 3.1.2 Vorhang

Ein wichtiges Merkmal des Raumes ist ein dünner, transparenter Vorhang, der umlaufend von der Decke gehängt ist. Er reicht in einem Spalt zwischen Gangdecke und Trennwand bis zum Boden (siehe Abb. 3.1). An der Stirnseite hat er einen Schlitz, der den Gläubigen die Hauptgebetsrichtung nach Mekka zeigt.

Bei der Modellierung wurde darauf geachtet, dass die approximierten Flächen nicht zu denen der Wände parallel sind.

Der Vorhang besteht laut [JAHRMANN] aus einem sehr dünnen Stoff, der transparent ausgeführt ist und kaum Licht schluckt. Wenn Licht durch die Ornamente der Außenwand fällt, zeichnen sich diese auf dem Vorhang ab.

Der dünne Stoff wurde mit Hilfe der Software AbsTex von M.Ognedal [OGNEDAL] approximiert. Die Parameter berücksichtigen sowohl Transmission als auch Absorption.

Vorweg kann gesagt werden, dass der Vorhang wegen seiner Transparenz wenig Auswirkung auf die Akustik hat. Dies wurde in Simulationen überprüft. Jedenfalls ist er ein grundlegendes Element des Raums und daher in allen Ergebnissen enthalten.

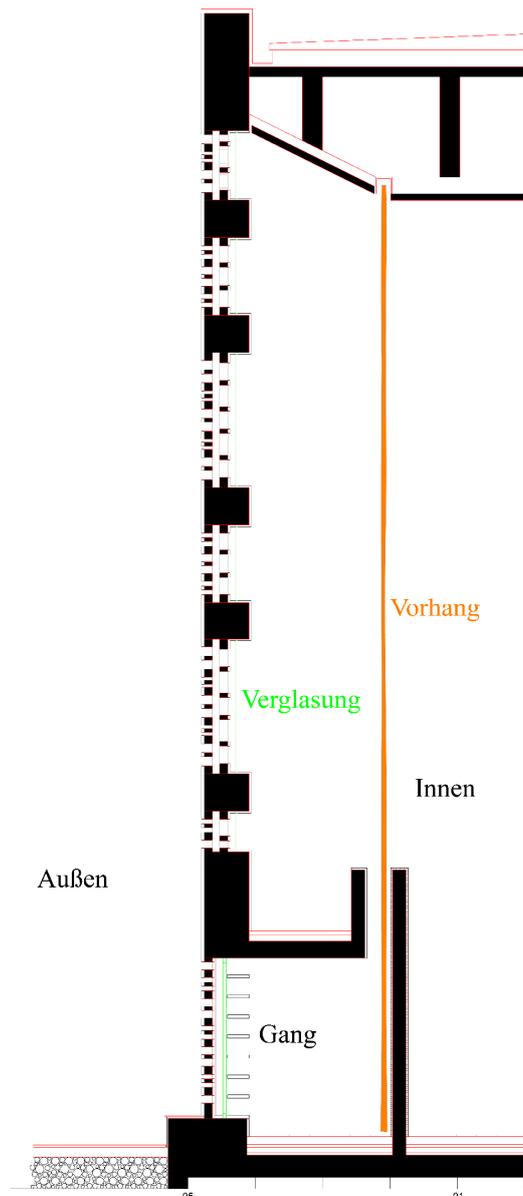


Abb. 3.1 Seitenriss durch Außenwand, Dach, Vorhang und Trennwand [vgl. JAHRMANN]

### 3.1.3 Außenwand

Die Außenwand besteht zum Großteil aus einer rautenförmigen Verglasung mit innenliegenden rautenförmigen Ornamenten. Die einzelnen Glasflächen sind von verputzten Bereichen getrennt, was eine Verteilung von ca. 20% Putz zu 80% Glas entspricht. Im Seitenriss in Abb. 3.1 erkennt man die in große Flächen unterteilte Außenwand, mit weiteren innenliegenden Unterteilungen (Ornamenten) der einzelnen Glasflächen. Die Glasflächen wurden im Zuge der Optimierung mit Mikroperforierten Absorbern (MPA) versehen.

### 3.1.4 Innenwand/Trennwand

Diese Wand trennt die Gänge vom Hauptgebetsraum und ist als innere Ellipse im Grundriss zu erkennen (Abb. 2.3). Sowohl Innen- als auch Außenseite sind mit Mosaikfliesen verziert und wurden im Zuge der Simulation mit MPA in Form einer einlagigen Acrylplatte versehen.

### 3.1.5 Gang

Der Gang hat einen Teppichboden und eine Sichtbetondecke. Diese Sichtbetondecke musste bei der Optimierung großen Tiefenabsorbern (Plattenresonatoren) weichen. Eine Wand wird von der gefliesten Ellipse gebildet, vor der der Vorhang hängt, die andere Wand ist die Außenwand, die im Bereich der Gänge zum Teil verputzt sind, zum Teil verglast.

### 3.1.6 Decke

Die Decke ist im ursprünglichen Plan verputzt, wurde im Zuge der Optimierung mit Mineralfaserplatten belegt.

### 3.1.7 Galerie

Die Frauengalerie ist wie die Grundfläche von gefliesten Wänden hinten und seitlich umgeben und hat einen Teppichfußboden. Über eine Stiege im hinteren Gang gelangt man hinauf und der Zugang erfolgt von der rechten Seite.

### 3.1.8 Transparente „Segel“

Diese sind nicht im Plan enthalten und wurden im Zuge der Optimierung vorgesehen. Wie in vielen großen Gebäuden üblich werden große Glasflächen über der Sprecherposition angebracht um den Schall besser an die Zuhörer zu verteilen. In diesem Fall sollen sie nicht der Beschallung der vorderen Reihen dienen, sondern den Schall Richtung Galerie lenken.

### 3.1.9 Publikum

Das Publikum wurde mit einer Dichte von 1,52 Personen pro m<sup>2</sup> angenommen und modelliert.

## 3.2 Schallquellen- und Hörerpositionen

### 3.2.1 Schallquellen

Im Islam hat die Rolle des Imam eine andere Bedeutung als die des uns bekannten Pfarrers in christlichen Religionen. Der Imam hat die Rolle des Vorbeters, das heißt er spricht nicht zu den Gläubigen, sondern leitet das gemeinsame Gebet und steuert dessen Ablauf. Folglich richtet er sich ebenso in die Gebetsrichtung und spricht in dieselbe Richtung wie alle Anderen (nach Mekka). Üblicherweise steht er vor den Betenden, bei besonders engen Verhältnissen mit den Gläubigen in der ersten Reihe.

Der Imam ist als Quelle A1 modelliert und spricht in Richtung Stirnseite. Die Richtcharakteristik wurde mit der eines Sängers angenommen, was durchaus angebracht ist, da islamisches Gebet dem Gesang ähnelt und sich der Sprecher nicht dreht, das heißt er ändert seine (Abstrahl-)Richtung nicht. Der Imam spricht grundsätzlich die gleichen Gebete wie alle Anwesenden, aber es kann durchaus vorkommen, dass er noch zusätzliche Suren spricht, oder andere Ergänzungen zum Pflichtgebet.

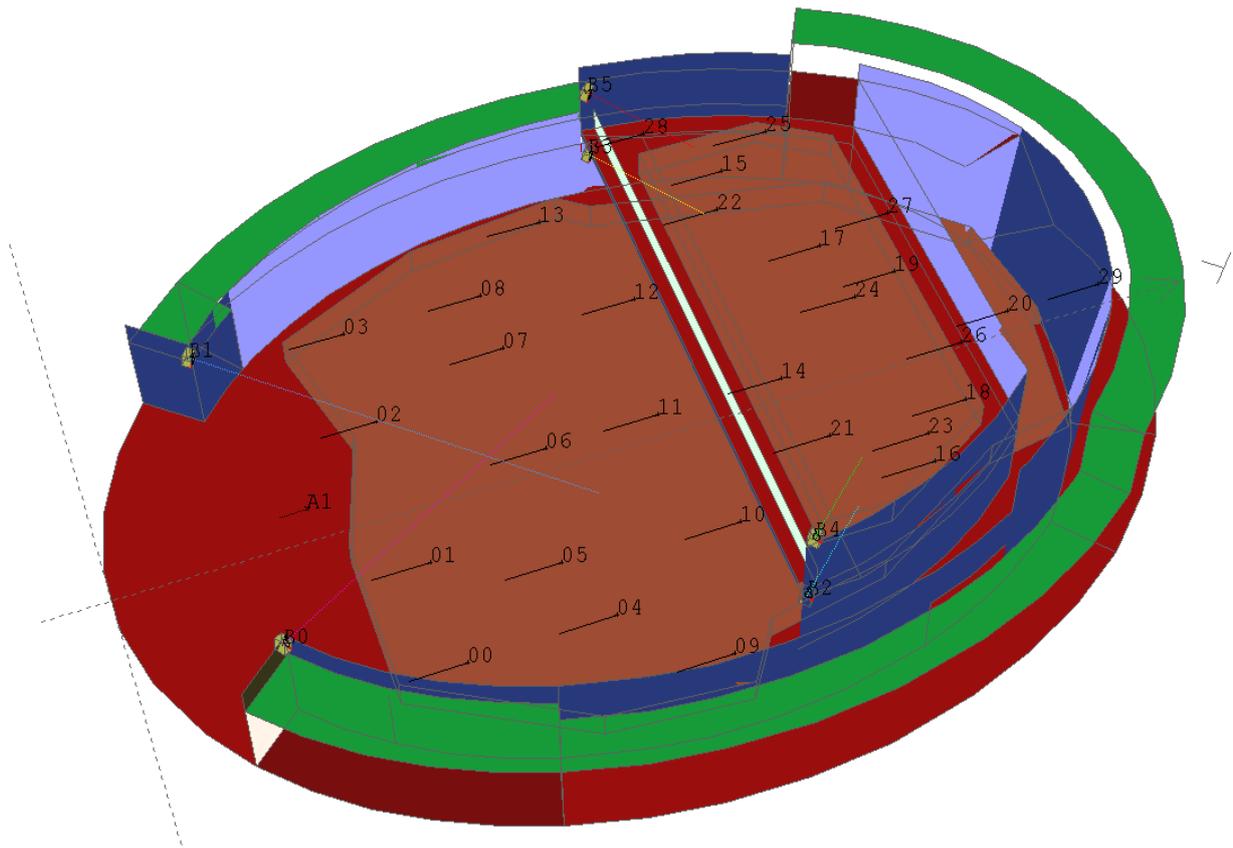
Das „Signal“ des Sprechers ist also zum Teil Sprache, aber auch mit erhobener Stimme ausgeführter, melismatischer Gesang.

Um den Raum allgemein besser zu beschallen ist eine elektroakustische Anlage (ELA) vorgesehen, welche aus jeweils zwei Lautsprechern vorne, zwei unter der Galerie und zwei oben an der Frauengalerie besteht. Die LS sind die Quellen B0, B1, B2, B3, B4, B5.

Auf die Ergebnisse vorausgreifend kann gesagt werden, dass der Sprecher den Raum auch ohne ELA akzeptabel beschallen kann, aber mit ELA eine deutliche Verbesserung in mehreren Bereichen erzielt wird.

### 3.2.2 Hörer

Ursprünglich wurden 14 Hörerpositionen erstellt, im Zuge der Auralisation, dem letzten Schritt dieser Arbeit, wurde die Anzahl auf 30 erhöht um ein besseres Ergebnis bei der Walk-Through-Simulation zu erhalten. Die alten Positionen wurden beibehalten, nur deren Nummer änderte sich (siehe Kap. 4.9).



**Abb. 3.2 Schallquellen und Hörerpostionen der finalen Version (offenes Modell)**

## 4 Modellierung und Simulation

Nach einer kurzen Beschreibung des Modells in Kapitel 3 folgt nun eine Übersicht über die Entstehung. Modellierung und Simulation gingen Hand in Hand, daher auch zusammengefasst in diesem Kapitel.

Zu Beginn erstellte ich das Modell mit der Demo-Version von CATT auf meinem PC. Hier reichten die beschränkten Simulationsmöglichkeiten um Fehler zu erkennen und Tendenzen festzustellen. Die vollständigen Simulationen wurde dann im Tonlabor des IBK und bei Joanneum Research gemacht.

### 4.1 Version 1

Nach den ersten Simulationen stellte ich fest, dass der Raum zu viele Leaks hatte (deutlich über 10%). Ich hatte den Raum in der ersten Version zu genau modelliert und erkannte, dass dies für weitere Simulationen nicht erforderlich sein würde. Der Schritt zur Version 2 bestand daher aus der Vereinfachung des Modells. Viele kleine Kanten und Wandflächen wurden entfernt. Dabei wurde darauf geachtet ein sauberes, geschlossenes Modell zu erstellen. Bereits hier wurden schnelle Simulationen mit einer Verbesserung des Modells kombiniert. Es wurden Probleme erkannt und bei der Korrektur des Modells wurden auch schon kleine Verbesserungen an der Akustik erreicht.

### 4.2 Version 2

Die nun vereinfachte Version brachte aber keine Reduktion der Leaks, also mussten weitere Maßnahmen ergriffen werden, die dann zu Version 3 führten.

### 4.3 Version 3

Hauptmaßnahme um zur Version 3 zu kommen, war das Entfernen von Leaks aus Version 2.

#### 4.3.1 Entfernen von Leaks

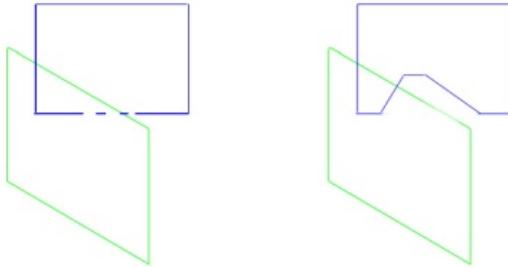
Um die Leaks zu entfernen wurden einige Veränderungen vorgenommen: Im ersten Schritt wurden alle „warped planes“ entfernt. Diese *warped planes* entstehen, wenn eine Fläche durch vier (oder mehr) Eckpunkte aufgespannt wird, die nicht alle in einer Ebene liegen. CATT erlaubt keine gekrümmten Flächen und daher wurden diese durch Zerlegen in dreieckige Teilflächen entfernt.

Eine weitere Fehlerquelle stellen wie in Abb. 4.1 schematisch dargestellt *sich schneidende Flächen* dar. Im Modell traten diese hauptsächlich beim Vorhang auf, der bestehende Flächen des Raums durchschnitten.

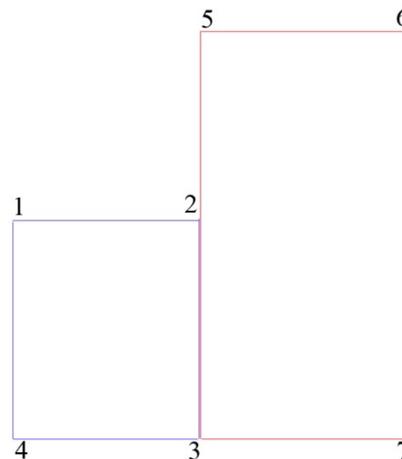
Probleme ergaben sich auch durch *angrenzende Flächen* wie Abb. 4.2 schematisch dargestellt. Um diese zu vermeiden muss wie in Abb. 4.2 die rechte (rote) Fläche mit allen enthaltenen Punkten modelliert werden! Es reicht nicht, die Fläche mit den Eckpunkten (3 7 6

5) zu erstellen sondern es muss auch der gemeinsame Punkte 2 verwendet werden (3 7 6 5 2).

Durch Beheben der angeführten Fehler konnten die Leaks auf 1-2% Prozent gesenkt werden.



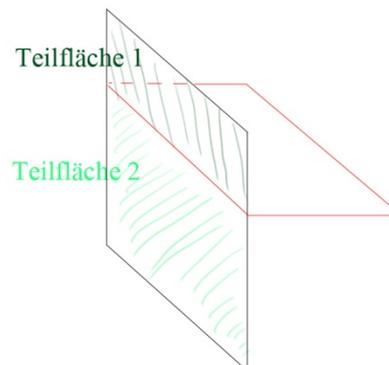
**Abb. 4.1** sich schneidende Flächen (links),  
Behebung des Problems (rechts)



**Abb. 4.2** angrenzende Teilflächen

Nun waren zwar die Leaks gering, dennoch konnte ich keine vollständige Simulation durchführen. Ich erhielt die Fehlermeldung „ERROR: at 00495C1E -> IMath: Making zero length 3D vector PROGRAM FAILURE“ und bei Bestätigung beendete CATT.

Mir war nicht klar was den Fehler verursachte, ich hatte aber die Vermutung, dass es an am Modell liegen könnte. Um die restlichen Leaks zu entfernen trennte ich alle Flächen, die sich entlang einer Linie berühren in Teilflächen auf (siehe Abb. 4.3). Dies senkte nicht nur die Leaks auf praktisch null, sondern ermöglichte erst eine vollständige, ausführliche Simulation

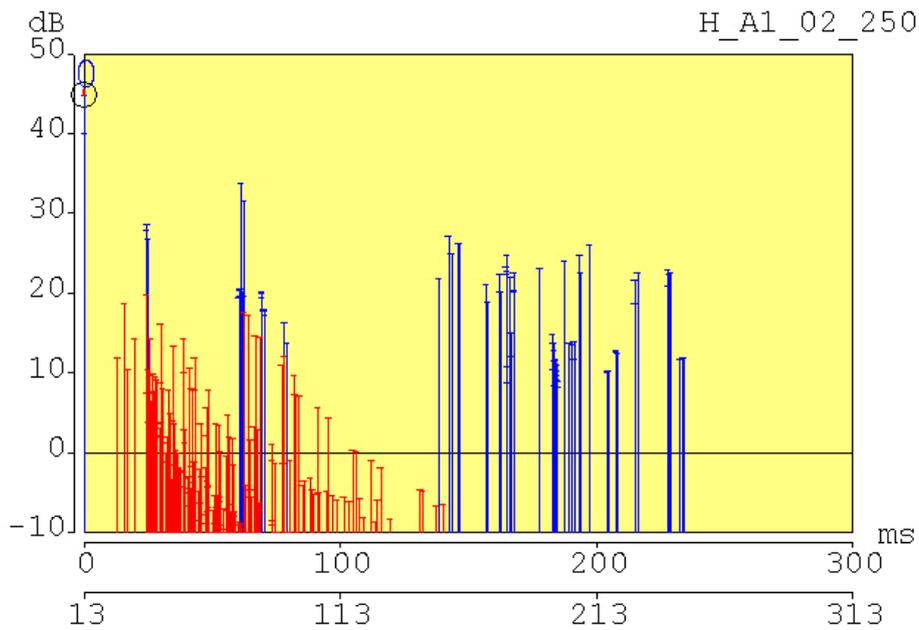


**Abb. 4.3** entlang einer Linie aneinanderstoßende  
Flächen

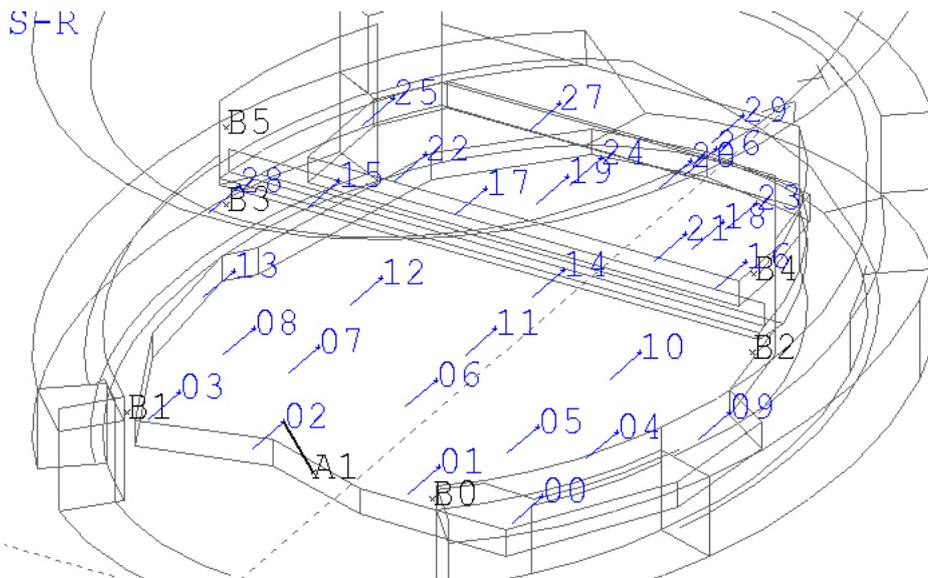
### 4.3.2 Simulation mit Version 3

Nun wurden mit Version 3 Simulationen durchgeführt und verschiedene Flächen mit unterschiedlichen Absorbern belegt. Dies führte zur Erkenntnis, dass die elliptische Form der inneren Wand das Hauptproblem darstellt (ein geometrisches Problem). Durch die Form werden viele Schallstrahlen in der Ebene der Ellipse reflektiert und wieder nach vorne geschickt wo sie dann bereits einen so langen Weg hinter sich haben, dass es zu Echos (Verzögerung >50ms) kommt. Selbst die Bedämpfung der Seitenwände mit MPA schwächt

die Strahlen nicht genug ab. (Aber auch die Decke reflektiert einige Strahlen und trägt zu den spät eintreffenden Reflexionen bei.)



**Abb. 4.4** Echogramm mit Spiegelreflexionen (*specular reflections*, blau) und diffusen Anteilen (rot). Berechnet von Quelle A1 zu Empfänger 02 bei 250Hz



**Abb. 4.5** Position von Quelle und Empfänger im Raum

### 4.3.3 Problematische Echos

In Abb. 4.4 sieht man deutlich, wie viel Schall nach 50ms eintrifft. Die Stärke und Bündelung des späten Schalls bewirkt eine verminderte Verständlichkeit vor Allem bei Sprache. Gesang wird dabei nicht so stark beeinflusst. Letztendlich hängt es vom Signal ab, wie stark störend diese Echos wahrgenommen werden (siehe Kap.5: Ergebnisse und Kap.6: Auralisation).

Das Problem der Echos wird Großteils von der inneren Ellipse verursacht, also musste zusätzlich zur schon vorhandenen Absorption auch eine geometrische Änderung stattfinden. In der Folge wurde die Rückwand der inneren Ellipse leicht abgeschrägt, sodass sie nach oben hin zurückfällt. Damit sollen Strahlen aus der Ebene heraus reflektiert und in den Rest des Raumes geleitet werden, wo sie absorbiert werden und nicht an den Hörer gelangen. Aus dieser Veränderung resultierte Version 4.

## 4.4 Version 4

Es folgten weitere Simulationen, die zu recht guten Ergebnissen führten. Allerdings stellte ich fest, dass an der Decke immer noch viele Strahlen reflektiert wurden und in weiterer Folge spät an die Hörerpositionen gelangten. Um dem zu Begegnen wurde die Decke mit abgehängten Absorbern versehen, was dann zur Version 5 führte.

## 4.5 Version 5

Durch Anbringen von abgehängten mikroperforierten Absorbern an der Decke entstand V5. Die Wahl fiel wiederum auf MPA, da diese, als Acrylplatte ausgeführt, optisch am wenigsten auffällig sind. Die Veränderungen führten zu deutlichen Verbesserungen, da viele Strahlen nun von der Decke nicht mehr reflektiert werden.

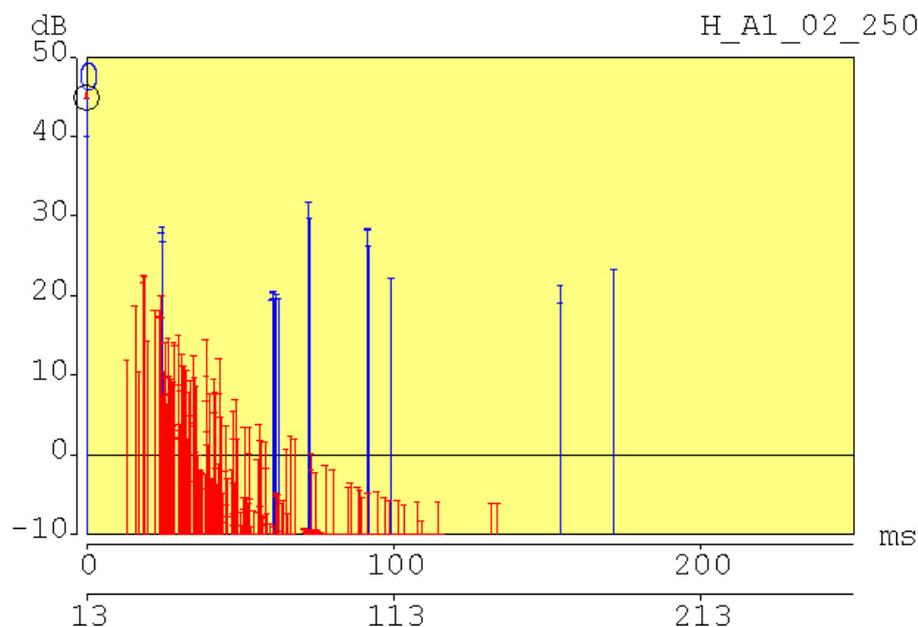


Abb. 4.6 Echogramm des optimierten Raumes

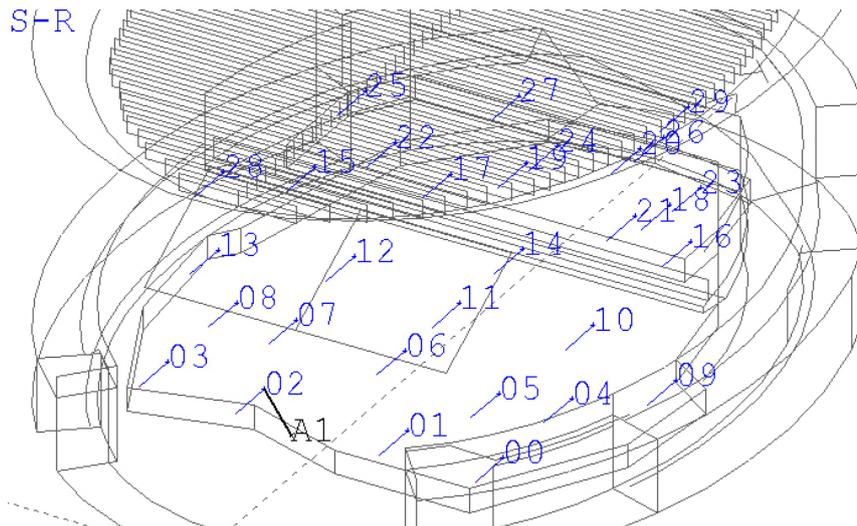


Abb. 4.7 Position von Quelle und Empfänger im Raum.

Das Echogramm spiegelt die Veränderung des Raumes von fast roh (Version 3 in Abb.4.4) bis optimiert (Version 5 Abb. 4.6) wider und zeigt, dass viele der Echos unterdrückt werden konnten und damit eine deutliche Verbesserung erzielt wurde.

Die vollständigen Ergebnisse werden im anschließenden Kapitel 5 diskutiert.

Es wurden noch weitere Simulationen durchgeführt, die aber nur unterschiedliche Ergebnisse, jedoch keine Verbesserung brachten.

## 4.6 „unoptimierte“ Version

In dieser Arbeit wird oft die Unterscheidung zwischen der „unoptimierten“ und der „optimierten“ Version gemacht. „Unoptimiert“ bezeichnet den Raum, wie vom Architekten vorgesehen. Dafür wurde die Version 4 des Modells verwendet und die geometrische Änderung der Rückwand rückgängig gemacht (wieder gerade gestellt), sowie alle Oberflächen wie vorgesehen belegt (Sichtbeton, Glas, Fliesen, ...).

## 4.7 Beschreibung des optimierten Modells

Abb. 4.8 zeigt den fertigen Raum. Um eine bessere Übersicht zu erhalten wurden hier die Außenwände, Decke sowie der umlaufende Vorhang ausgeblendet. Dies ist leicht möglich, da die Daten in mehreren .geo-files vorliegen (siehe Abschnitt 4.9).

Man erkennt die im Raum eingezogene Ellipse, welche an der Stirnseite (hier links) offen ist und den Mihrab (die Gebetsnische) symbolisiert. Die innere Ellipse ist im Entwurf mit Fliesen belegt und hier in Blautönen dargestellt. Hierbei entspricht Hellblau einem MPA vor Fliese mit den Absorberkennwerten  $\langle 5 \ 20 \ 70 \ 50 \ 20 \ 8 \rangle$ . Diese Kennwerte entsprechen der Absorption in Prozent in den Bändern 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz und 4kHz. Die dunkelblauen Flächen sind ebenfalls MPA vor Fliese mit den Absorberkennwerten  $\langle 05 \ 05 \ 15 \ 25 \ 50 \ 50 \rangle$ . Die Kennwerte eines MPA sind in weiten Bereichen durch die Lochung und den Abstand zur Wand beeinflussbar.



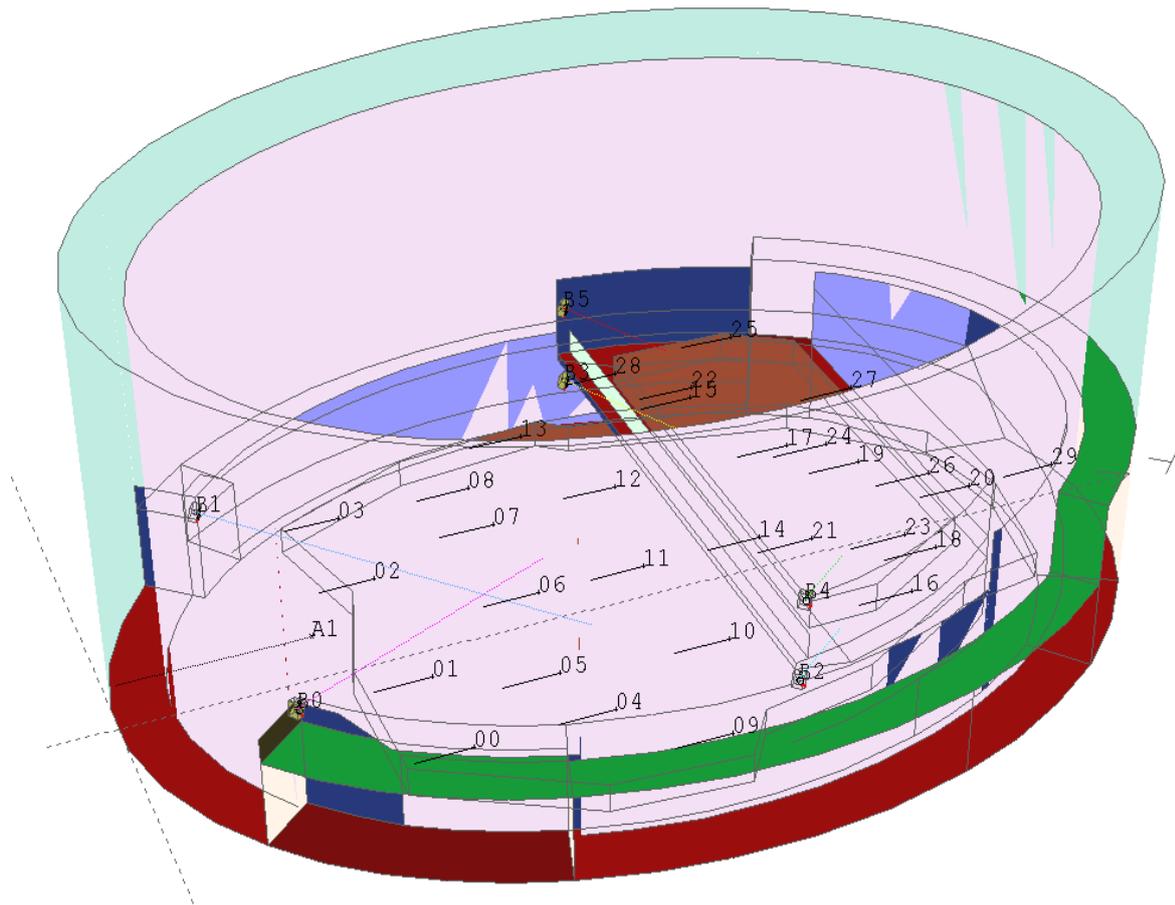


Abb.4.9 Ansicht des Raums mit Decke und Vorhang

In Abb.4.9 ist der Raum geschlossen und von der Decke hängt ein sehr dünner Vorhang (rosa). Die Außenwände sind hier in pastell-grün dargestellt und als Mischung von 20% verputzten Bereichen mit 80% MPA vor Glas modelliert. Die Außenwand ist im Entwurf in viele Rauten aufgeteilt und um eine gleichmäßigere Absorption zu erreichen werden diese abwechselnd mit 2 verschiedenen MPA belegt. Über alle Flächen erhält man einen mittleren Absorber mit den Absorptionswerten (in %) von: <30 60 48 22 10 6> jeweils in den Bändern 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz und 4kHz.

Der Vorhang ist sehr dünn ausgeführt und wurde durch Vergleich mit anderen Stoffen in der Software AbsTex von M.Ognedal [OGNEDAL] approximiert, mit einer Absorption von 5% und einer Transmission von 95% über alle Frequenzen.

Die Decke besteht aus Mineralfaserplatten mit den Absorberkennwerten <10 20 50 80 89 99>. Der „Ring“ an der Decke zwischen Vorhang und Außenwand ist mit Akustikputz versehen <17 36 66 65 62 68>, welcher aber kaum Auswirkung auf die Akustik hat.

Um die Reflexion in den Raum kontrolliert zu verteilen wurden über der Sprecherposition große gläserne Schallsegel gehängt. Diese sollen nicht frühe Reflexionen in die vorderen Reihen bringen, sondern mehr Schall Richtung Galerie lenken.

Um die Nachhallzeit noch etwas zu verringern wurden in Version 5 noch Mikroperforierte Absorber von der Decke gehängt, die wie in [FUCHS] vorgeschlagen eine Absorption von <10 12 16 20 25 25> besitzen.

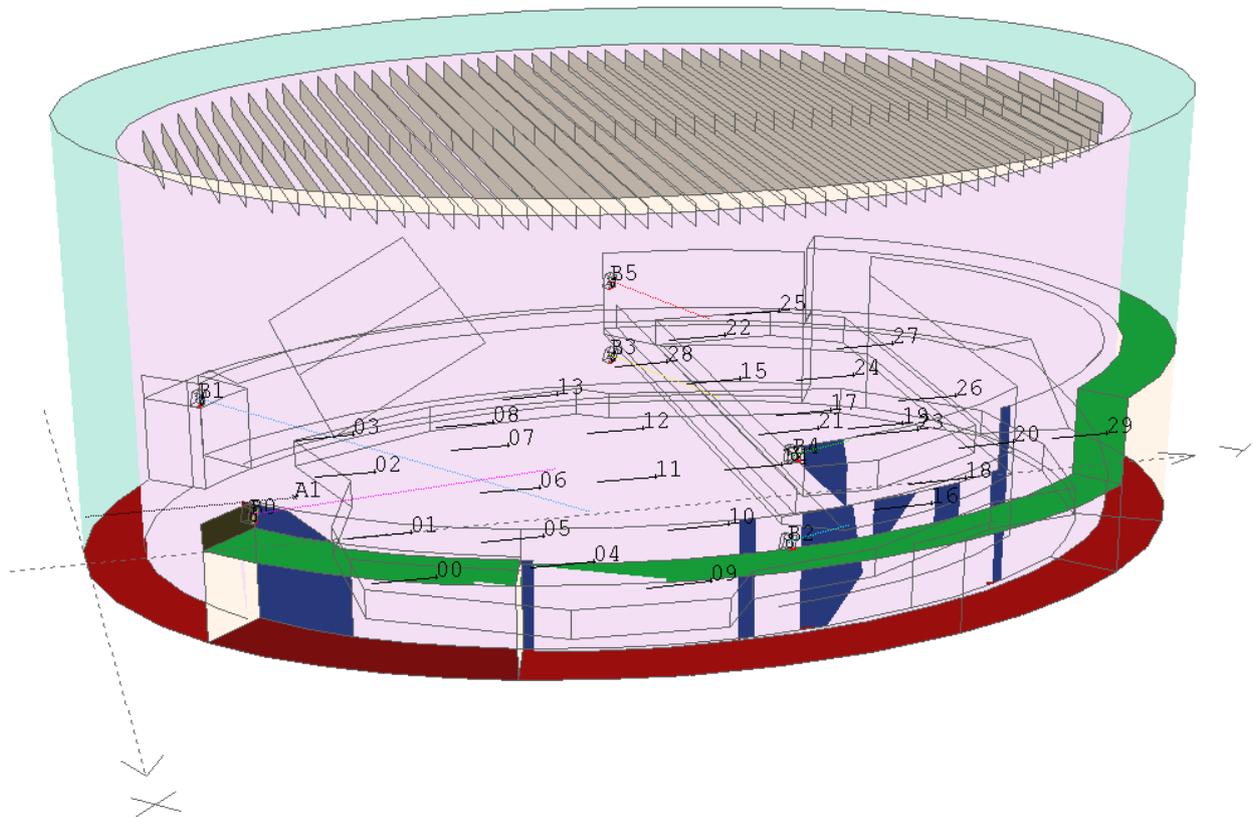


Abb. 4.10 Ansicht des fertigen Raums mit Schallsegeln und Deckenabsorbern

## 4.8 Elektroakustische Anlage

Wie bereits im Abschnitt 3.2.1 erwähnt, wurde im Raum eine elektroakustische Anlage vorgesehen. Dabei sind Lautsprecher links und rechts vorne an den Seiten, sowie links und rechts unter der Galerie und links und rechts oben an der Frauengalerie angebracht (siehe Abb. 3.2, Abb. 4.8, Abb.4.9, Abb. 4.10).

Die Verzögerungen wurden aus der Geometrie abgeschätzt. Die vorderen LS (B0, B1) wurden um 4ms verzögert. Für die hinteren LS (B2, B3, B4, B5) wurde die Verzögerung auf 33ms festgelegt. Der Wert wurde folgendermaßen ermittelt: Unter der Galerie wurde ein mittlerer Punkt angenommen, welcher etwa 17m (entspr. 50ms) von der natürlichen Quelle A1 entfernt ist. Zu diesem Punkt haben die Lautsprecher eine ungefähre Distanz von 10m (entspr. ca. 29ms).

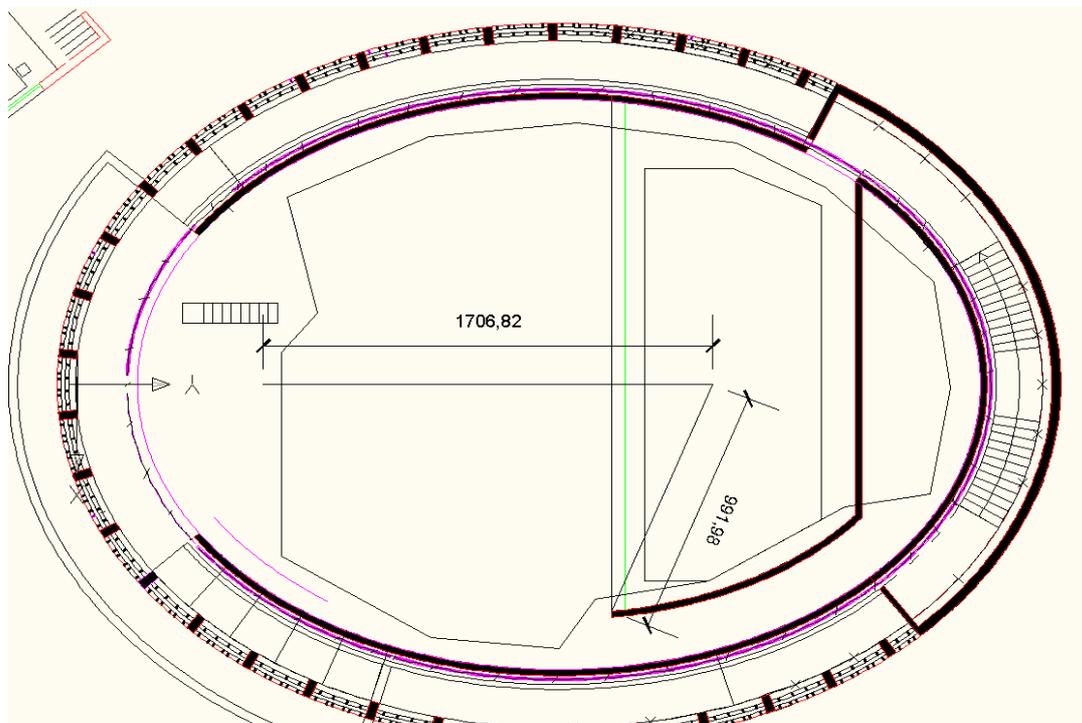


Abb. 4.11 Grundriss in AutoCAD mit Distanzen zu den Schallquellen in cm  
[vgl. JAHRMANN]

Um nun Direktschall und das von den Lautsprechern abgestrahlte Signal zeitgleich an dem Punkt zu überlagern, ist eine Verzögerung von 21ms für die LS nötig. Die Lautsprecher wurden aber um 33ms verzögert was zur Folge hat, dass deren Signal um 12ms nach dem des Sprechers eintrifft. Dies hat gemäß dem Gesetz der ersten Wellenfront den Vorteil, dass das Signal zwar lauter gehört wird, aber dennoch der Eindruck entsteht, das Signal käme vom Sprecher und nicht von den Boxen.

Die Lautsprecher müssen stark bündeln um Reflexionen im elliptischen Umfang der Innenmauer/Trennmauer zu vermeiden. Als Beispiel eines solchen LS wurde ein U14 von Duran Audio verwendet.

Der Pegel des Sprechers entspricht dem „lauten Sprecher“ nach ANSI S3.79 (draft) [CATT]. Dieser sendet einen Pegel von 58dB[125Hz], 64dB[250Hz], 70,3dB[500Hz], 70,7dB[1kHz],

65,9dB[2kHz], 59,9dB[4kHz], 48,9dB[8kHz], 47,8dB[16kHz], im Mittel 73,6dB gemessen in 1m Entfernung in Hauptabstrahlrichtung des LS (auf Achse).

Für die Lautsprecher wurde eine gleichmäßige Verstärkung von +10dB eingestellt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass das Signal von den Boxen an den Hörerpositionen mehr als 10dB über dem Direktschall liegt und daher das Gesetz der ersten Wellenfront nicht wirklich funktioniert. Man könnte die LS leiser machen, aber wie in Abschnitt 5.4 ersichtlich ist eine gewisse Verstärkung nötig um überhaupt brauchbare Pegel zu erreichen.

## 4.9 Überblick über die einzelnen CATT-Files

Die Grundlage zur Simulation bilden mehrere geo-Files in CATT, in denen die notwendigen Daten stehen. Der Einfachheit halber sind Teile des Raums in verschiedene Files geschrieben, was der Übersichtlichkeit dient und einzelne Teile „zu- und abschaltbar“ zu macht.

- **MASTER.geo:** Das Hauptfile in jedem CATT Projekt  
Enthält die Definition von Absorbermaterial und Punkten und daraus erstellten Flächen.  
Dieses File modelliert den Boden und die „Inneneinrichtung“ wie in Abb. 4.8 ersichtlich. Von diesem File aus werden andere geo-Files, welche weitere Teile des Raumes modellieren, aufgerufen. Diese Aufrufe kann man durch Setzen eines Kommentars ( ; ) vor entsprechenden Aufruf unterbinden (z.B. ;#I Vorhang.geo).
- **Vorhang.geo:** Modelliert den Vorhang
- **publikum\_viel.geo:** Wie der Name schon sagt, ist darin das Publikum des vollbesetzten Raums modelliert. Es enthält auch die Definitionen des umgebenden Bodens, da das Publikum nicht einfach auf den Boden gestellt werden darf, sondern anstelle dessen tritt! Dabei muss der ursprüngliche Boden im MASTER.geo ausgeschaltet werden!
- **publikum\_wenig.geo:** Um den Raum halb besetzt zu modellieren. Es wurde damit keine Simulation durchgeführt, da die ohnehin lange Simulationszeit damit verdoppelt würde. Für weniger Publikum darf ein „educated guess“ gemacht werden! Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass der Raum mit weniger Publikum immer noch gut klingen wird (vielleicht sogar besser, siehe Anmerkung zu den Soundbeispielen im Kap 6; Auralisation.)
- **wanddecke.geo:** Modelliert sowohl Wand als auch Decke
- **reflektor.geo:** Modelliert die aufgehängten Segel über der Quelle A1
- **deckenabsorber.geo:** Modelliert die von der Decke abgehängten Absorber

### Quellen und Empfänger:

- **SRC.geo:** Spezifiziert die Quellen, deren Positionen und Ausrichtung, Abstrahlcharakteristik, Pegel
- **REC.geo:** enthält die Empfängerpositionen. Im Zuge der Auralisation wurden Positionen ergänzt, die alten Positionen wurden beibehalten, aber anders benannt. Um den Vergleich zu ermöglichen folgt eine Tabelle, mit alten und neuen Namen:

Empfängerposition vor der Auralisation	Empfängerposition nach der Auralisation
0	1
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10
6	14
7	12
8	16
9	17
10	20
11	21
12	24
13	22
14	13

**Tabelle 4.1 Gegenüberstellung von ursprünglicher Empfängernummer mit neuer Nummer (die Position im Raum bleibt dabei gleich!)**

# 5 Ergebnisse

Bei der Simulation und Optimierung gilt es eine Vielzahl an Kennwerten zu betrachten. Ebenso liefert CATT-Acoustics eine Vielzahl von unterschiedlichen Darstellungen dieser Werte. Diese gilt es richtig zu interpretieren und eine Auswahl zu treffen, was für das gewünschte Ergebnis am wichtigsten ist. In diesem Fall wurden die frequenzabhängige Nachhallzeit und der STI/RASTI vorrangig berücksichtigt.

Kapitel 5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kenngrößen.

## 5.1 Nachhallzeit

Ohne viele Worte über die *Bedeutung* der Nachhallzeit zu verlieren, kann gesagt werden, dass sie eine zentrale Kenngröße wohl jeder raumakustischer Simulation ist.

Die Vorgabe war den Raum für die Verwendung als Gebetsstätte zu optimieren. Es ist also eine dem berechneten Volumen von ca. 10150 m<sup>3</sup> entsprechende (frequenzabhängige) Nachhallzeit erwünscht. Aus der DIN 18041:2004-05 „Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen“ stammt folgende Formel für die optimale Nachhallzeit:

$$T_{soll} = \left( 0,37 \log \frac{V}{m^3} - 0,14 \right) [s] \quad \dots \text{für Sprache}$$

Demnach liegt die optimale Nachhallzeit für Sprache knapp unter 1,35s

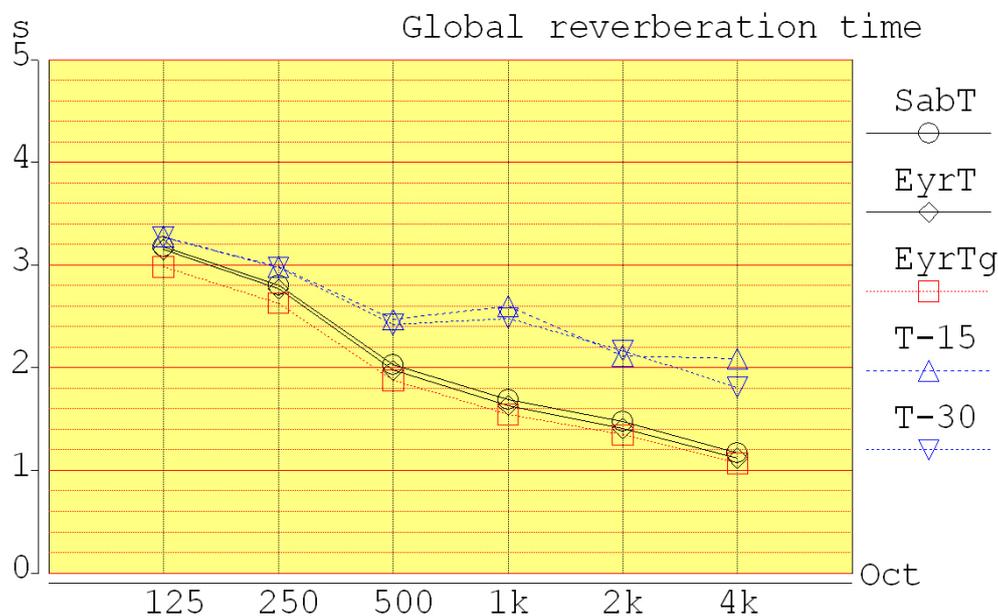


Abb. 5.1 Nachhallzeit vor der Optimierung

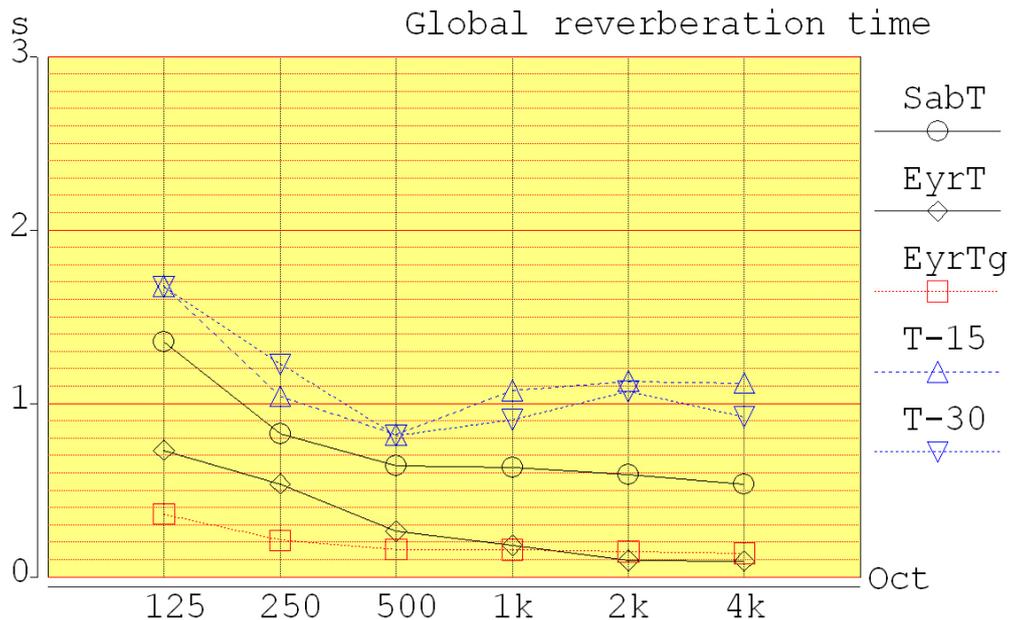


Abb. 5.2 Nachhallzeit nach der Optimierung

Die breite Streuung in Abb. 5.2 zwischen den berechneten Werten für die Sabine'sche / Eyring'sche Nachhallzeit und der simulierten  $T_{15}$  /  $T_{30}$  liegt darin begründet, dass sich der Schall im Raum nicht gut „durchmischt“, also ungleichmäßig verteilt ist, und daher die *mathematisch* berechnete mittlere Absorption falsche Ergebnisse liefert [CATT].

Die Optimierung der Nachhallzeit gestaltete sich schwierig. Das Hauptproblem lag nicht in der Reduktion der mittleren Nachhallzeit, sondern im ungleichmäßigen Verlauf über die Frequenz. Es gibt zwei Hauptprobleme bei der Optimierung dieses Raumes: Das erste ist eine Folge der unterschiedlichen akustischen Wirksamkeiten einzelner Flächen. Es gibt einige wenige Flächen, die eine sehr starke Auswirkung auf die Gesamtakustik (und damit auf die Nachhallzeit) haben. Diese sind die Decke, aber auch ganz bedeutend die Wand der inneren Ellipse. Die innere Ellipse kann aus praktischen Gründen nur mit einer Art Absorber belegt werden, nämlich transparenter mikroperforierter Absorber (MPA), ausgeführt als Acrylglasplatte. Die angesprochene Beschränkung der Materialien ist das zweite Hauptproblem bei der Optimierung: So sind viele Flächen nur mit bestimmten Absorbieren möglich. Die gesamte Außenhülle stellt dabei kein Problem dar, da hier sehr effektive mehrlagige mikroperforierte Absorberfolien zum Einsatz kommen können. Die Decke wurde auch in mehreren Schritten optimiert. Das Hauptproblem sind die gefliesten Flächen. Hier ist das Problem, dass nur MPA aus Acryl in Frage kommen. Mit dem Abstand kann man das Frequenzverhalten beeinflussen, aber Mehrlagigkeit kommt hier nicht in Frage. Weil diese Flächen direkt die Gebetsfläche begrenzen müssen angebrachte Absorber entsprechend optisch unauffällig und gleichzeitig robust sein. Daher scheiden Folien aus.

MPA sind zwar sehr weit einstellbar was ihr Absorptionsverhalten betrifft, aber ein breiteres Spektrum wird mit einem deutlich geringeren Absorptionsgrad erkauft.

Die Betrachtung der Nachhallzeiten an verschiedenen Hörerpositionen und für verschiedene Frequenzen bestätigt die Einschätzung, dass die Raumform zu einer ungünstigen Verteilung der Schallstrahlen führt. Diese treffen nicht regelmäßig verzögert ein, sondern in Paketen, wie

schon in Abb. 4.4 gezeigt. Die ungleichmäßige Verteilung führt zu einer  $T_{15}$  die stark von der Nachhallzeit  $T_{30}$  abweicht, und zwar in beide Richtungen, mal ist sie kürzer, mal länger.

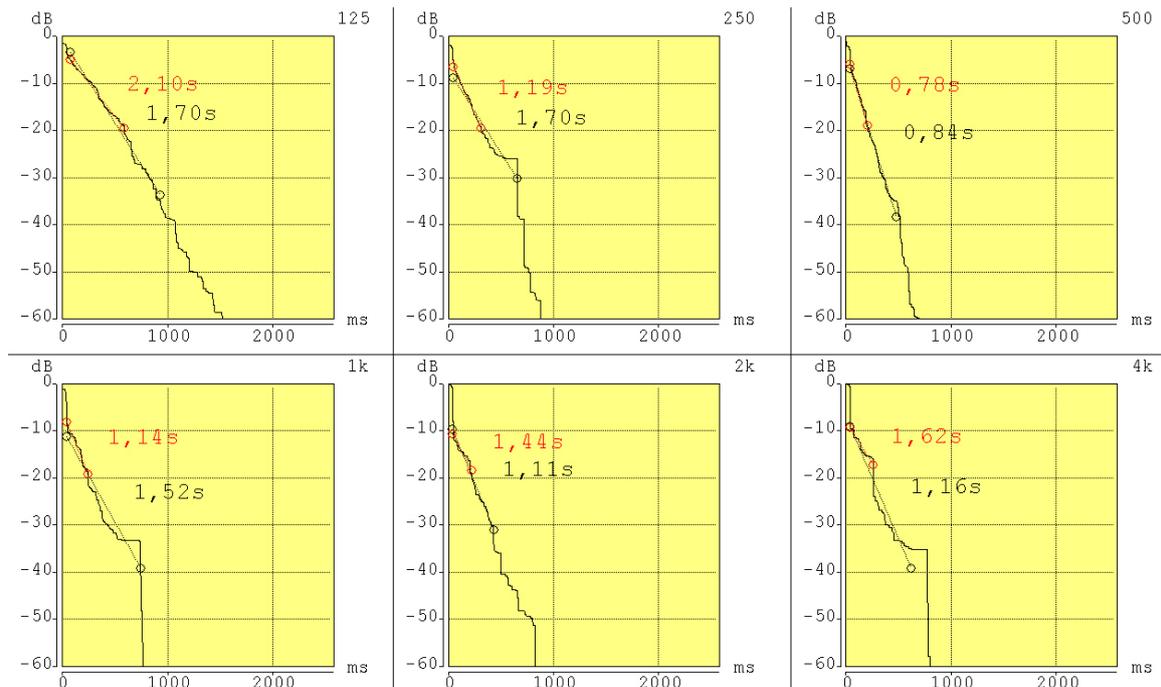


Abb. 5.3 Frequenzabhängige Nachhallzeit von einer Quelle zu einem Empfänger

Ein Beispiel für den Verlauf der Nachhallzeit an einer Position zeigt Abb. 5.3. Es ist ersichtlich, wie unregelmäßig der Nachhall am Empfänger eintrifft. So ergeben sich auch deutliche Unterschiede bei der Abschätzung der Nachhallzeiten  $T_{15}$  und  $T_{30}$ . Die  $T_{60}$  liegt in ausnahmslos allen Diagrammen unter 2 sec. CATT schätzt lediglich die Nachhallzeiten  $T_{15}$  und  $T_{30}$  ab. Diese liegen je nach Ausgleichsgerade über der  $T_{60}$  (manchmal darunter).

Man kann also festhalten, dass nicht die Dauer des Nachhalls ein Problem darstellt, sondern der extrem ungleichmäßig verlaufende Abfall.

## 5.2 STI / RASTI

Eine zweite wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Raumakustik ist der speziell auf Sprache bezogene *Speech Transmission Index* und in einfacherer Form der *Rapid Speech Transmission Index*.

Die Bildung des STI basiert auf einem Rauschsignal, welches durch das langzeitgemittelte Sprachspektrum in den Oktavbändern von 125Hz bis 8kHz gewichtet wird (Abb. 5.4 a). Diese gewichteten Oktavbänder werden nun von den charakteristischen Sprachfrequenzen mit 0.63 Hz bis 12,5 Hz im Terzabstand (=14 Terzen) moduliert. Es entstehen 98 Messsignale.

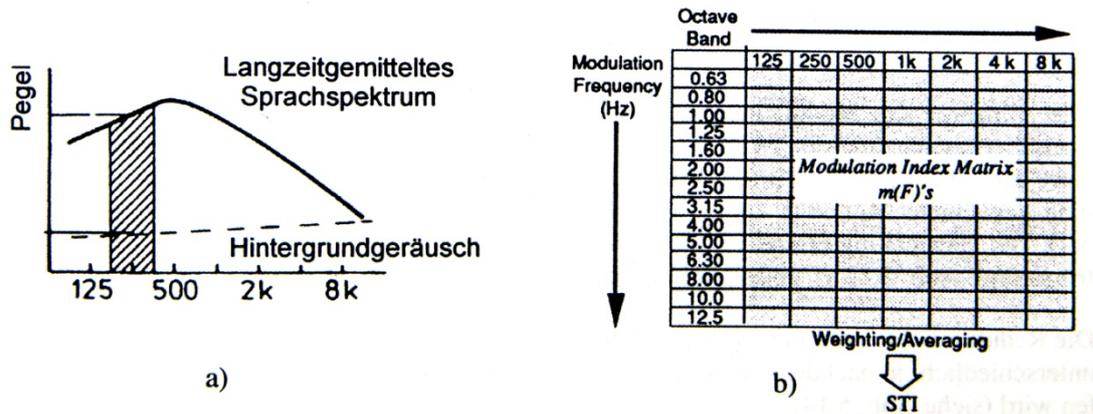


Abb. 5.4 a) gemittelttes Langzeitspektrum von Sprachsignalen b) für den Sprachübertragungsindex STI verwendete Oktavbänder und Modulationsfrequenzen [GRABER/WESELAK]

Wird nun dieses modulierte Oktavbandrauschen von einer Quelle abgestrahlt so nimmt durch Nachhall und Hintergrundgeräusche der Modulationsgrad bis zum Empfänger ab. Diese Abnahme der Modulation wird zur Bildung des STI herangezogen [GRABER/WESELAK].

Der RASTI ist eine Vereinfachung, hauptsächlich um den hohen Messaufwand mit 98 Signalen zu verringern. Dieser wird nur von den Bändern bei 500Hz und 2 kHz gebildet und die jeweiligen Bänder mit 4, bzw. 5 Frequenzen gleichzeitig moduliert.

Für die Praxis mag die reduzierte Messdauer ein nicht zu unterschätzender Vorteil sein, aber in der Simulation hat dies keine Bedeutung und so betrachten wir auch den aussagekräftigeren STI.

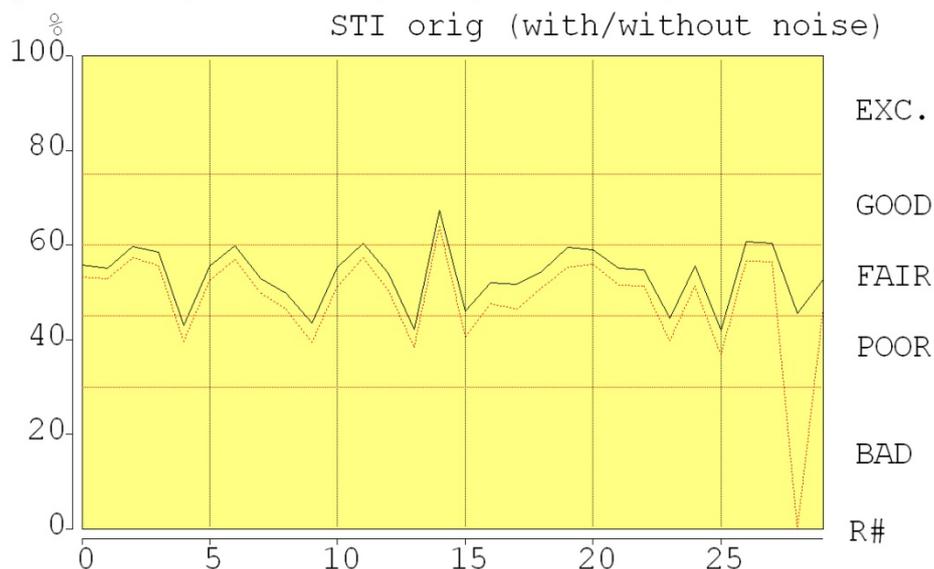


Abb. 5.5 STI über Empfänger 0-29 vor der Optimierung

In Abb. 5.5 ist zu sehen wie sich der STI über alle Empfängerpositionen verhält. Die schwarze Kurve stellt den STI bei völliger Abwesenheit jeglicher Störgeräusche dar. Wie schon in der Beschreibung zur Berechnung erwähnt nimmt durch Störgeräusche der Modulationsgrad ab. Der Störgeräuschpegel ist in CATT beliebig einstellbar und ist voreingestellt mit 45dB bei 125Hz, 38dB bei 250Hz, 32dB bei 500Hz, 28dB bei 1kHz, 25dB

bei 2kHz, 23dB bei 4kHz, 21dB bei 8kHz und 19dB bei 16kHz. Der reduzierte STI bei Vorhandensein von Hintergrundgeräuschen wird von der roten Kurve dargestellt.

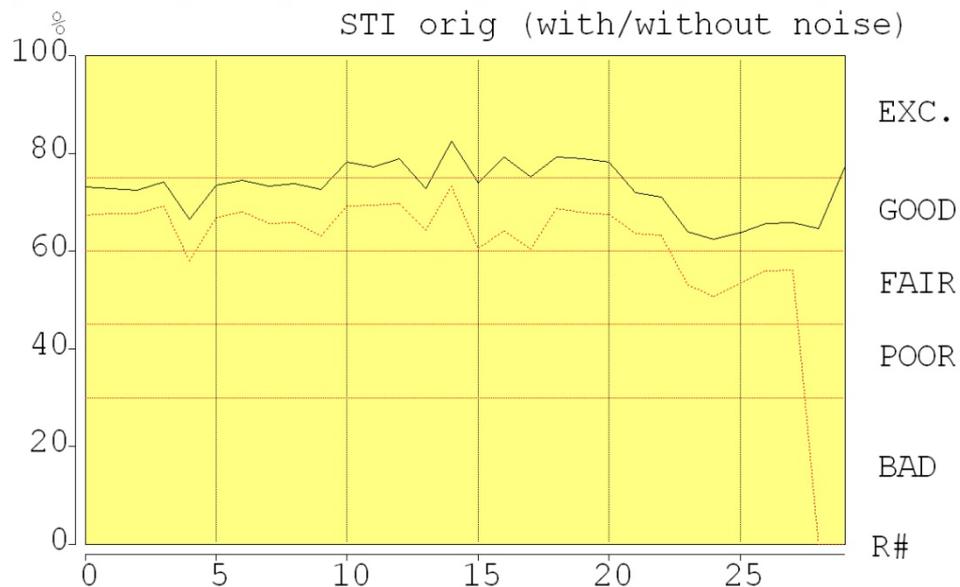


Abb. 5.6 STI über Empfänger 0-29 nach der Optimierung

Die Quellen 21-27 befinden sich auf der Galerie, 23-27 erhalten keinen Direktschall von der Quelle A1! Dies äußert sich im optimierten Raum (Abb. 5.6) durch einen Abfall der STI an diesen Empfängerpositionen. Auch die Quellen 28 und 29 haben einen geringeren STI, sie befinden sich in den Gängen.

Alle obigen Plots entstammen der *Full Detail Calculation*. Im Folgenden sollen noch weitere Ergebnisse aus der *Audience Area Mapping* gezeigt werden.



Genauso wenig verbessert sich aber der STI mit ELA im optimierten Raum. Deutliche Verbesserungen wurden durch die ELA in anderen Bereichen erzielt, wie zum Beispiel bei der Verteilung des Schalldruckpegels (siehe Kap. 5.4).

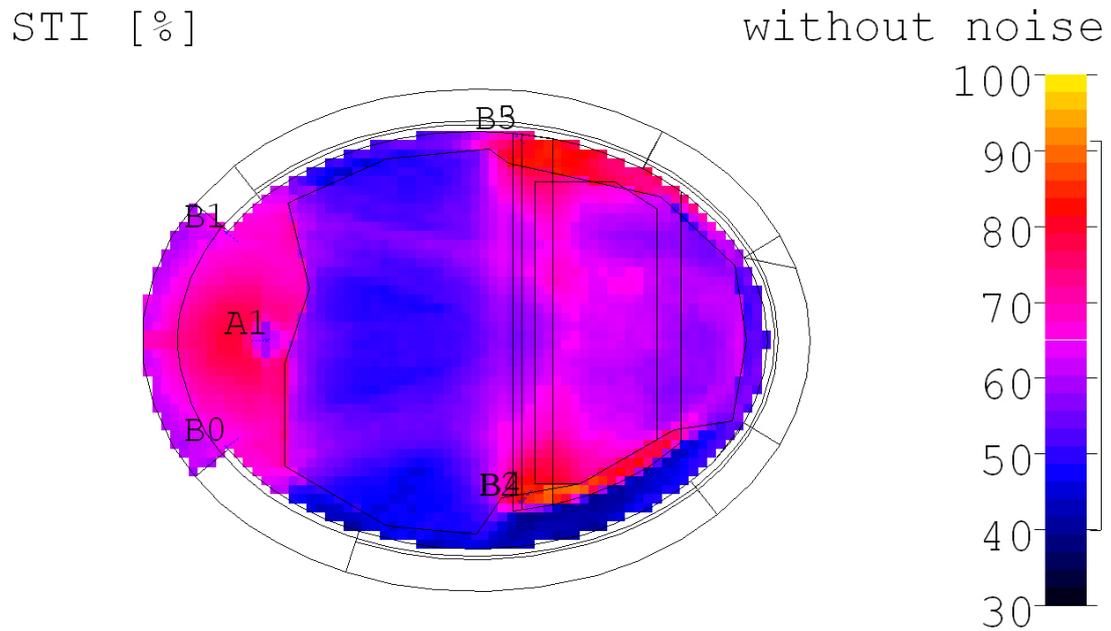


Abb. 5.9 STI im unoptimierten Raum mit ELA

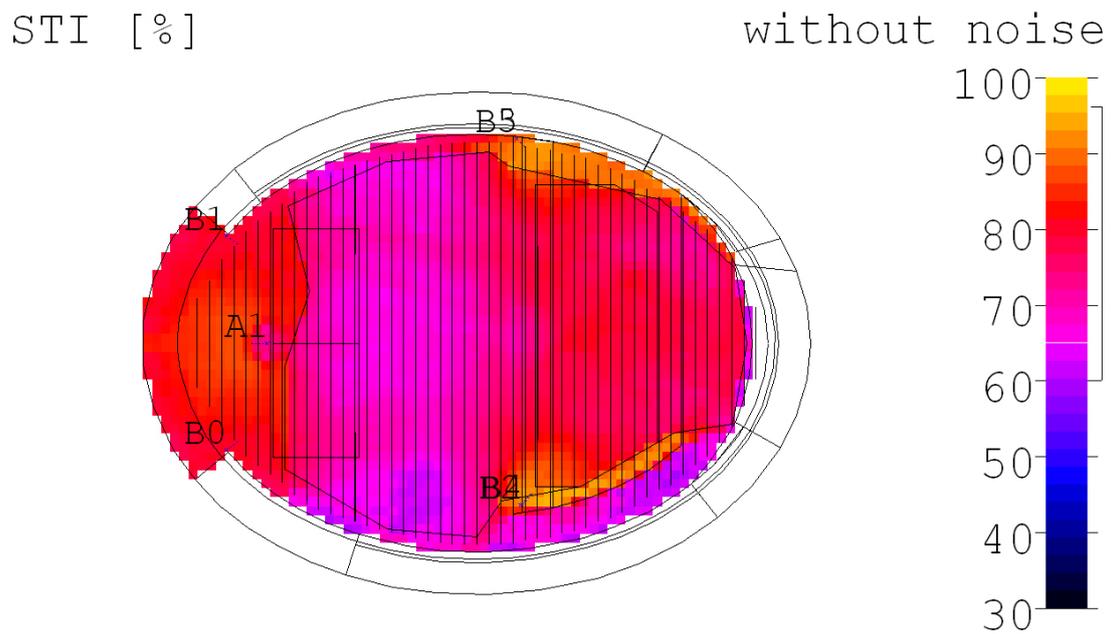


Abb. 5.10 STI im optimierten Raum mit ELA

### 5.3 Deutlichkeitsgrad $D_{50}$

Frühe Energie erhöht die Durchsichtigkeit und dadurch auch die Deutlichkeit. Bei Sprache liegt dieser Energieanteil etwa in einem Zeitbereich von 50ms nach dem Direktschall.

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

$W_{0...50}$  .....in der Zeit von 0 bis 50ms beim Hörer einfallende Energie

$W_{ges}$  .....gesamte beim Hörer einfallende Energie

$D_{50} > 50\%$      gute Verständlichkeit

D-50    [%]     sum

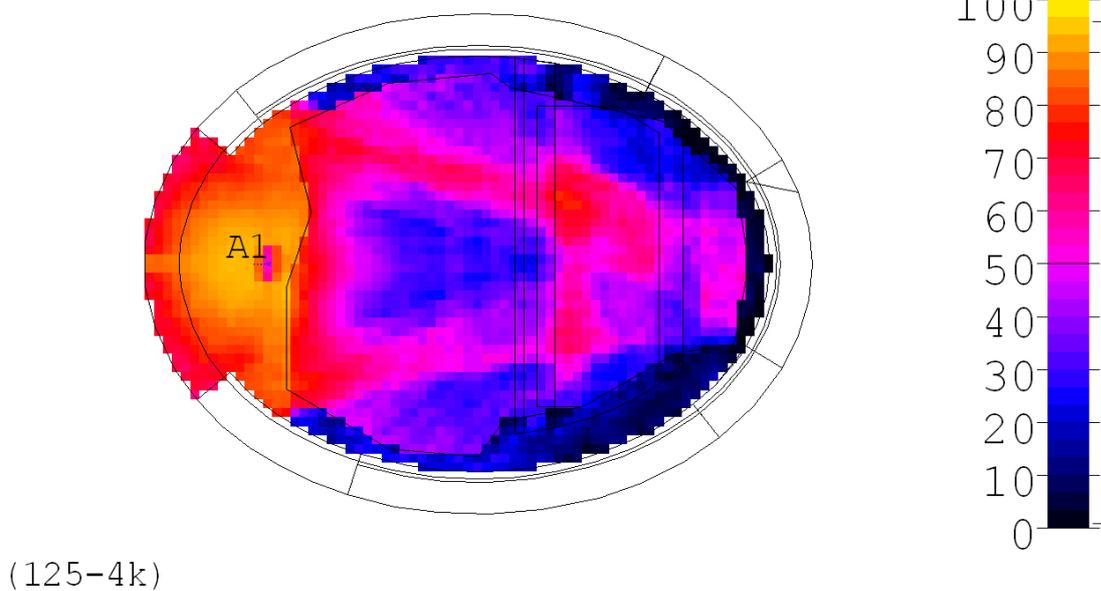


Abb. 5.11 Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  im unoptimierten Raum

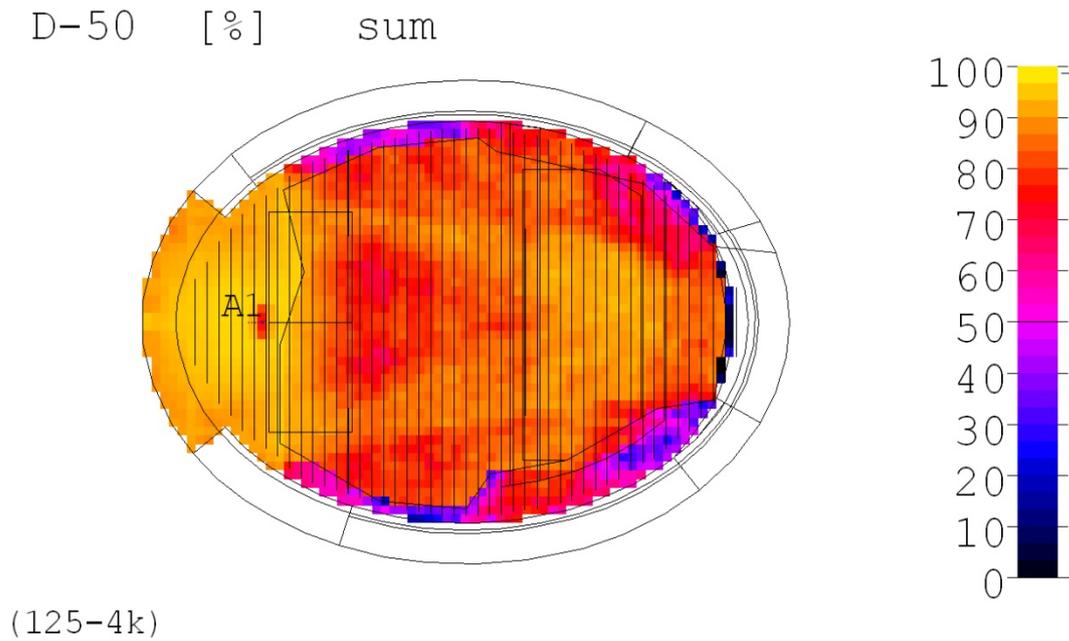


Abb. 5.12 Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  im optimierten Raum

Wie beim STI ist auch beim Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  eine wesentliche Verbesserung durch Reduktion des Nachhalls erkennbar: Man sieht, dass allein die Reduktion des Nachhalls bereits eine gute Verständlichkeit über den gesamten Raum bewirkt.

Mit ELA werden die  $D_{50}$ -Werte im vorderen Bereich schlechter. Das ist eine Folge von mangelndem frühem Schall bis 50ms. Der Bereich liegt zwar nah an den Quellen, aber außer dem Direktschall trifft dort in den ersten 50ms kaum Schall ein. In Abb. 5.12 kommen nach dem Direktsignal schon einige Reflexionen, was zu mehr Schall in den ersten 50ms führt. Die Segel über dem Sprecher dienen auch nicht dazu, mehr Schall in die vorderen Bereiche zu reflektieren, sondern diesen auf die Galerie zu lenken.

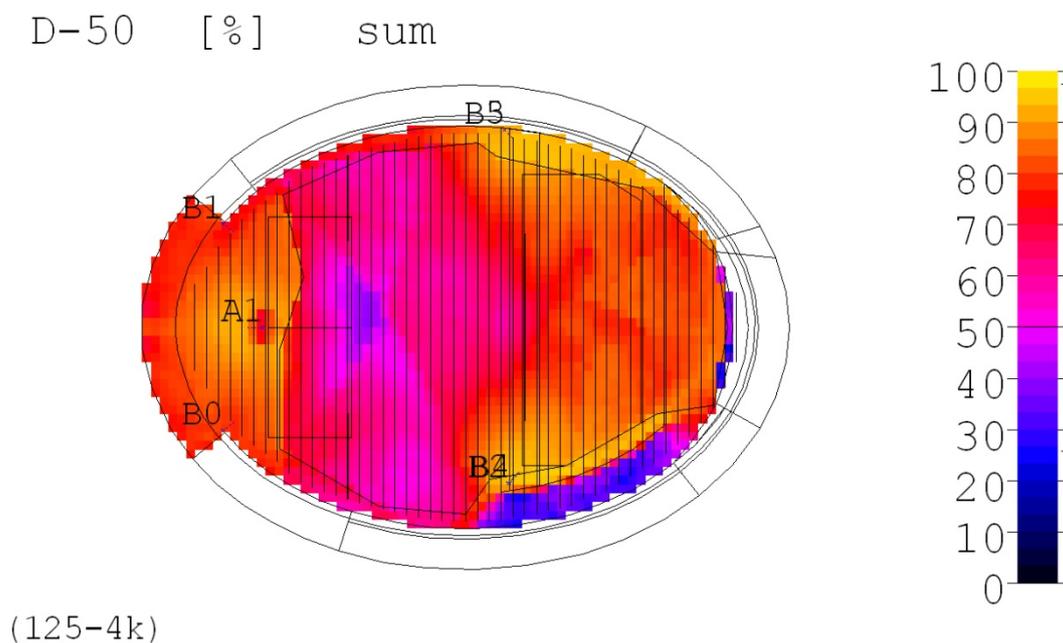
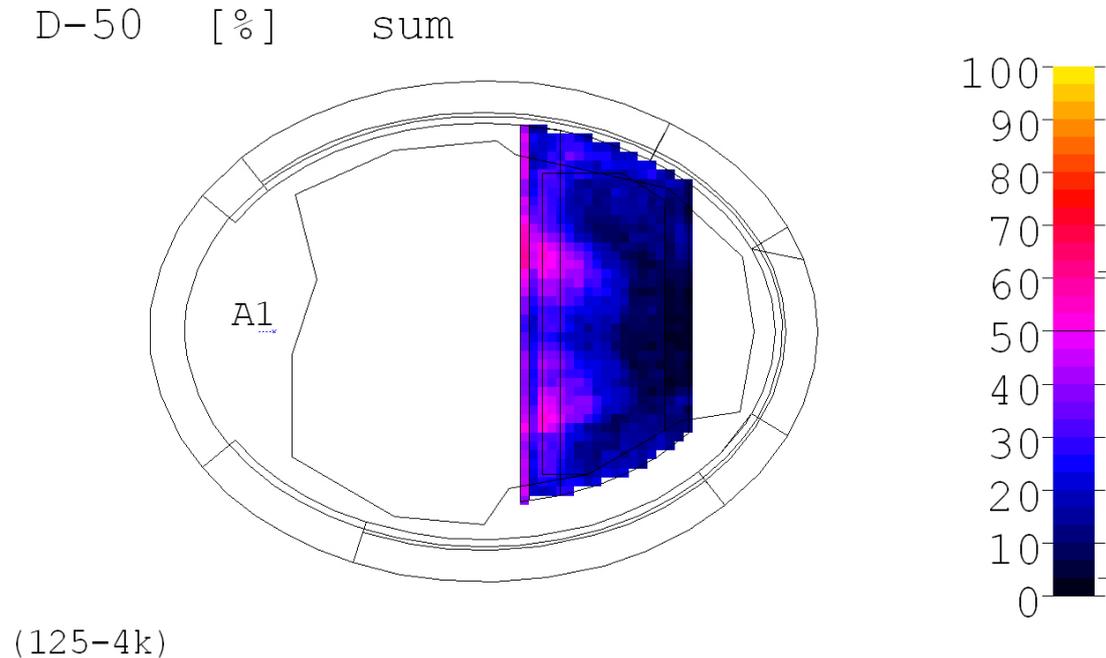


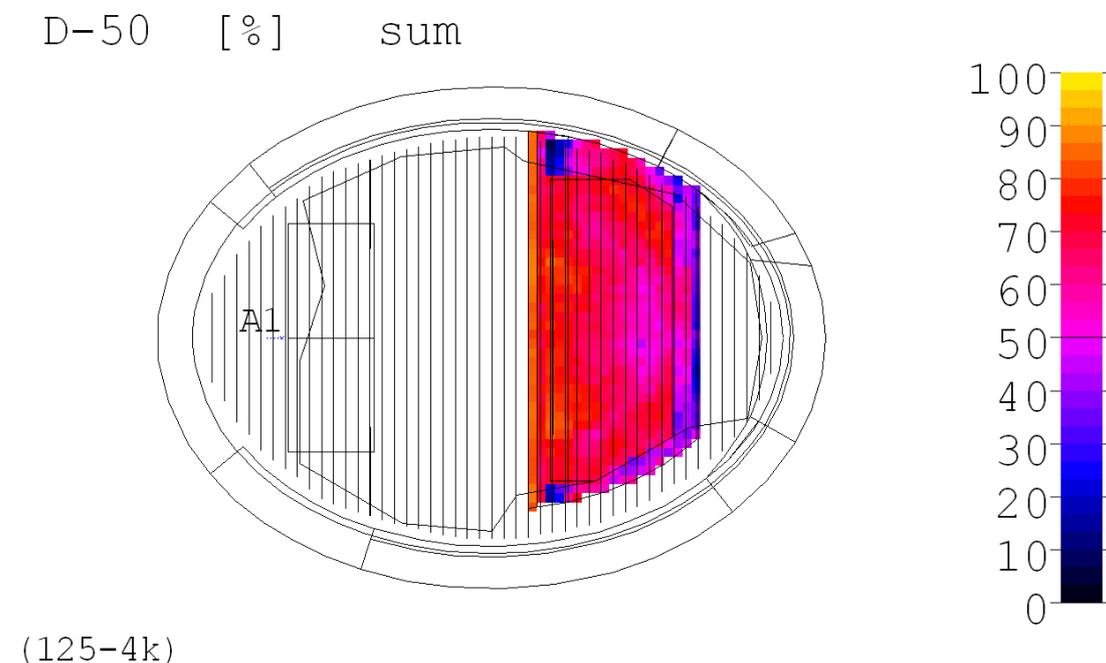
Abb. 5.13 Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  im optimierten Raum mit ELA

Obwohl die gleichmäßige Verteilung des Deutlichkeitsgrads mit der ELA schlechter wird, ist dies akzeptabel, da die ELA in anderen Bereichen Verbesserungen bringt.

Es folgen noch drei Plots, welche den großen Unterschied zwischen dem ursprünglichen Raum und nach der Optimierung verdeutlichen. Auf der Galerie ist der Unterschied nämlich noch deutlicher erkennbar:



**Abb. 5.14** Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  auf der Galerie vor der Optimierung ohne ELA



**Abb. 5.15** Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  auf der Galerie nach der Optimierung ohne ELA

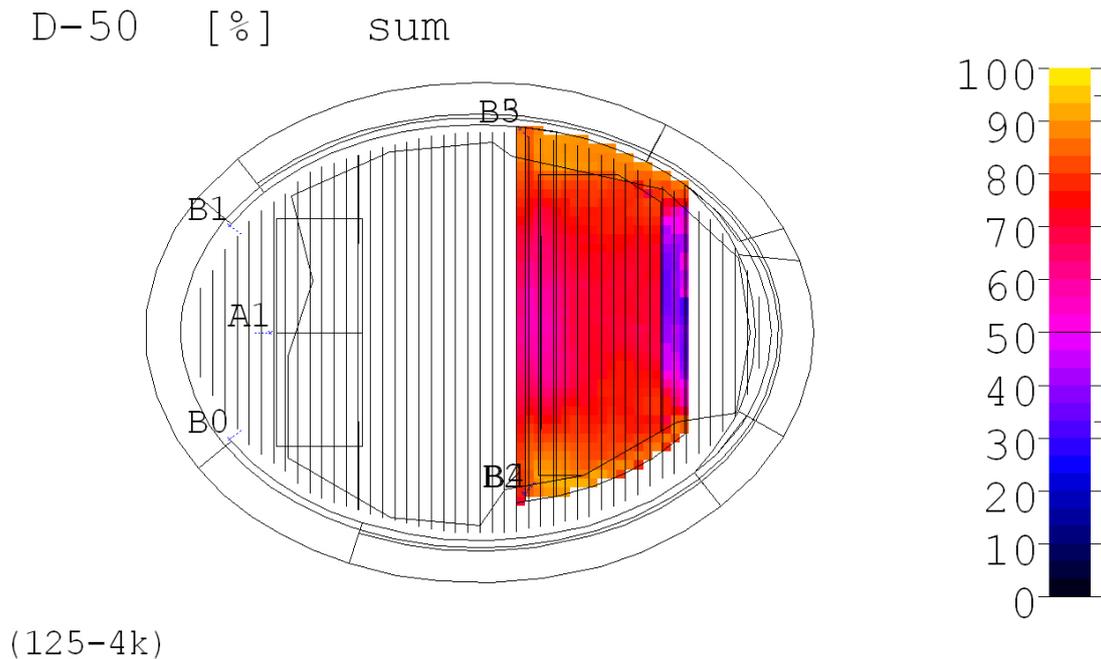


Abb. 5.16 Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  auf der Galerie nach der Optimierung mit ELA

## 5.4 Schalldruckpegelverteilung (SPL)

Die Quelle A1 ist der modellierte Sprecher. Nicht nur die Richtcharakteristik ist dem menschlichen Sprecher/Sänger nachempfunden, auch dessen produzierter Pegel wurde berücksichtigt. Der Pegel entspricht dem „lauten Sprecher“ nach ANSI S3.79 (draft) [CATT]. Dieser sendet einen Pegel von 58dB[125Hz], 64dB[250Hz], 70,3dB[500Hz], 70,7dB[1kHz], 65,9dB[2kHz], 59,9dB[4kHz], 48,9dB[8kHz], 47,8dB[16kHz], im Mittel 73,6dB gemessen in 1m Entfernung in Hauptabstrahlrichtung des LS.

Zu erkennen ist, dass die Pegel speziell im bedämpften Raum sehr gering werden und daher ermöglicht die elektroakustische Anlage eine bessere Beschallung. Weiters zeigt das abgebildete Stärkemaß G, dass der Sprecher den unoptimierten Raum zwar recht gut mit Energie „versorgen“ kann, aber aus anderen Kennwerten ist bekannt dass dabei die zu lange Nachhallzeit und ungleichmäßige Verteilung die Verständlichkeit senken.

Im optimierten Raum ist das Stärkemaß geringer, das heißt, der Sprecher kann den Raum nicht mehr gut mit Schall „versorgen“. Dies wird durch die ELA ausgeglichen und gleichzeitig eine gleichmäßige Verteilung des Schalldruckpegels erreicht

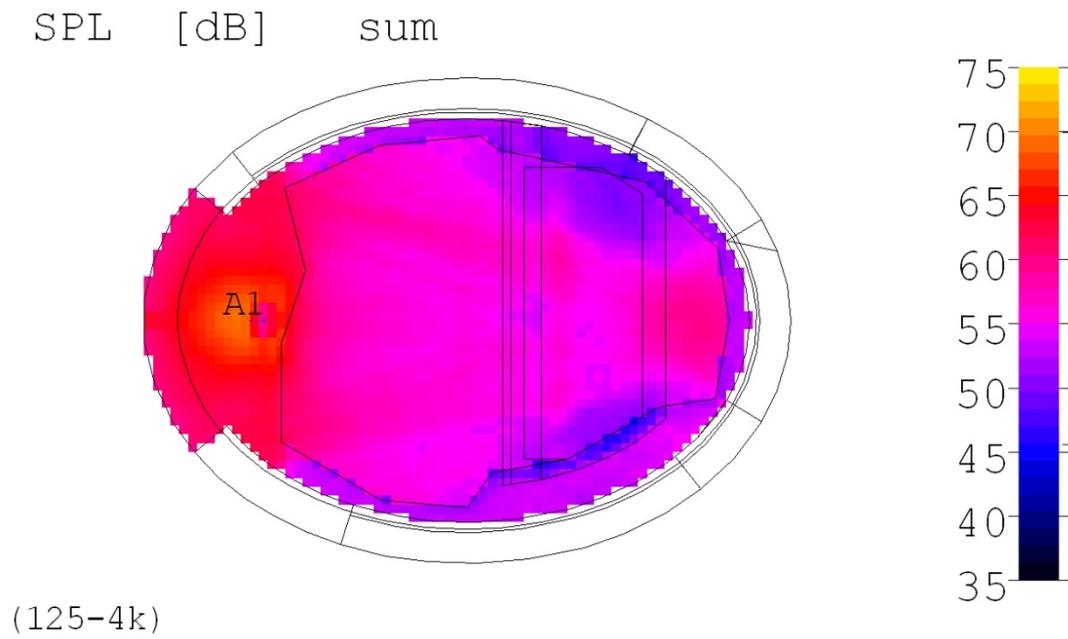


Abb. 5.17 Schalldruckpegel im unoptimierten Raum

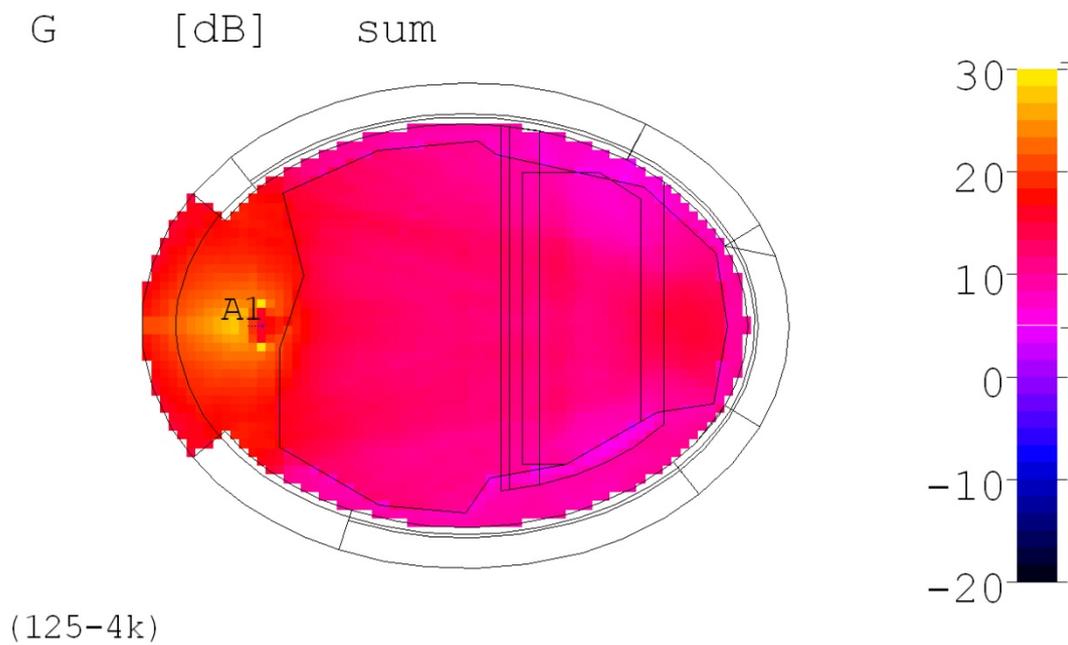


Abb. 5.18 Stärkemaß G im unoptimierten Raum

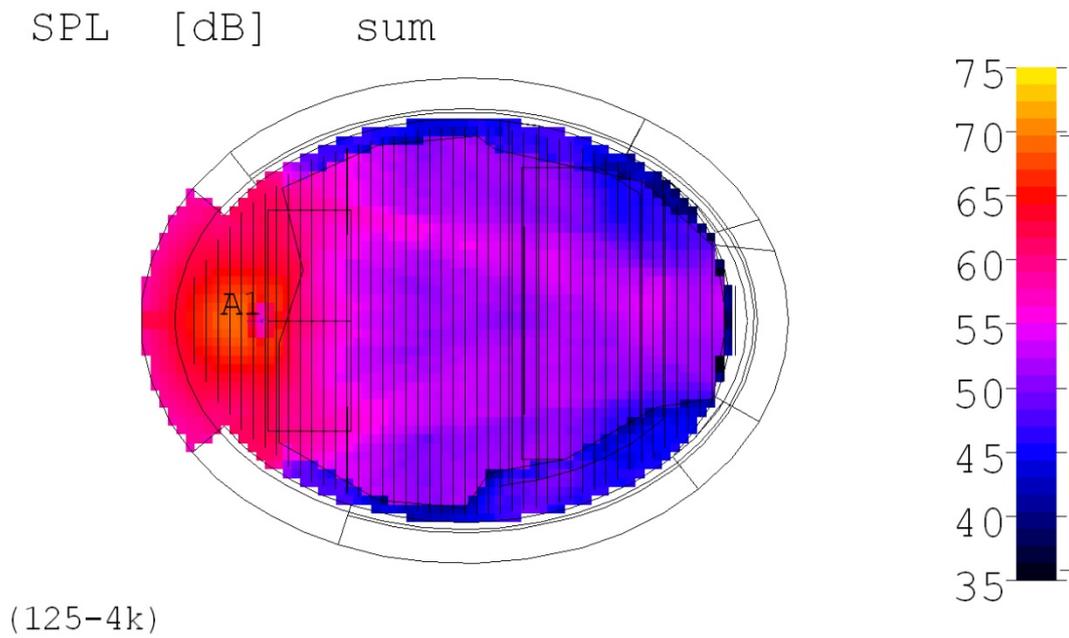


Abb. 5.19 Schalldruckpegel im optimierten Raum

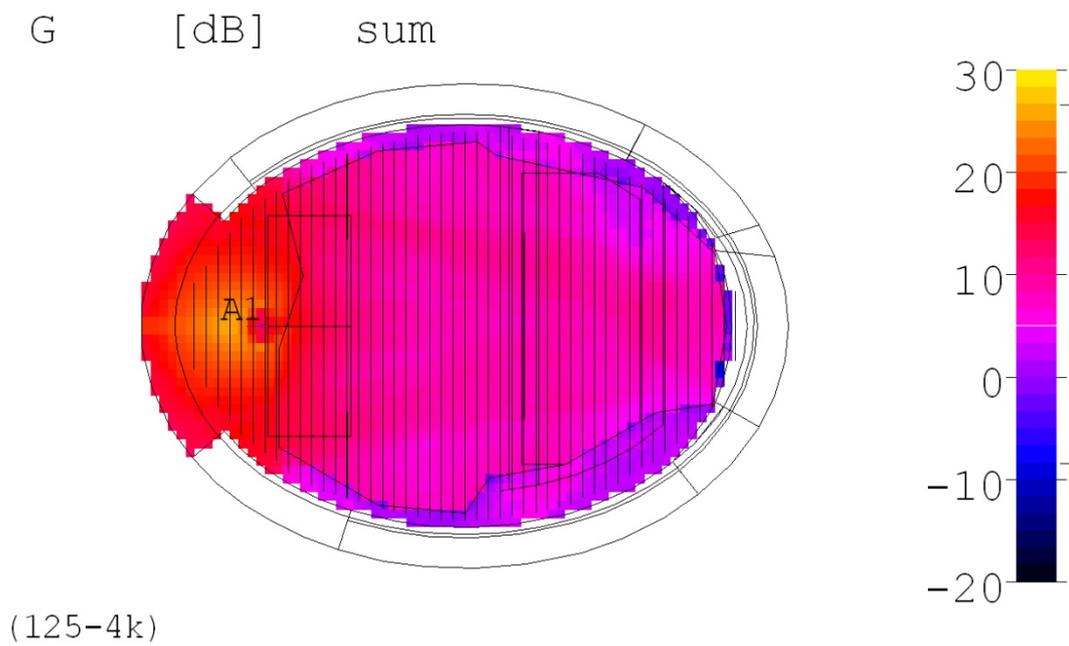


Abb. 5.20 Stärkemaß G im optimierten Raum

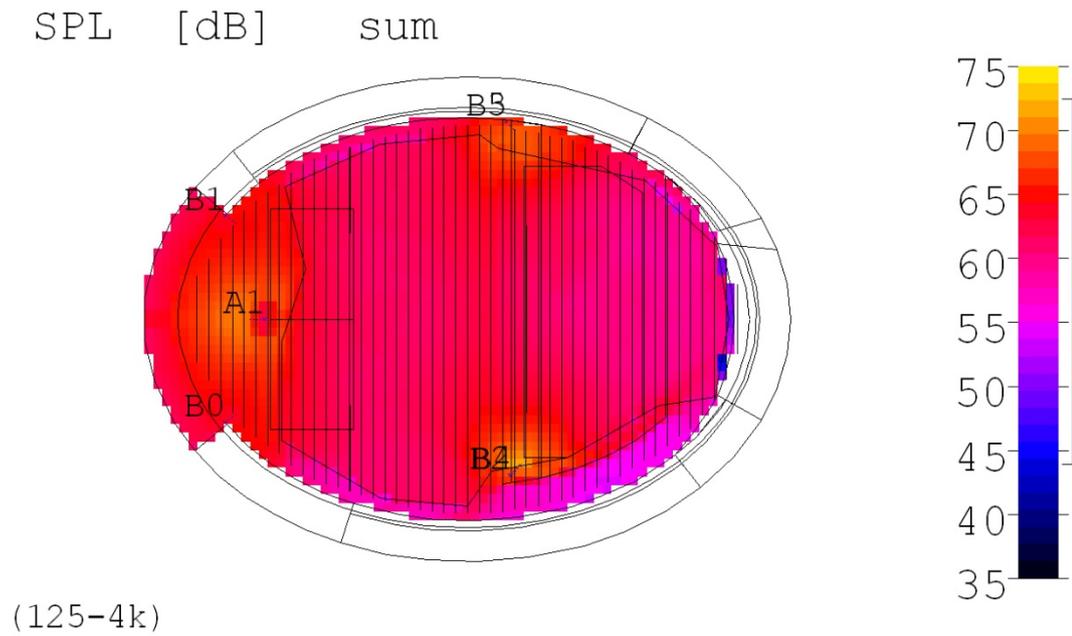


Abb. 5.21 Schalldruckpegel im optimierten Raum mit ELA

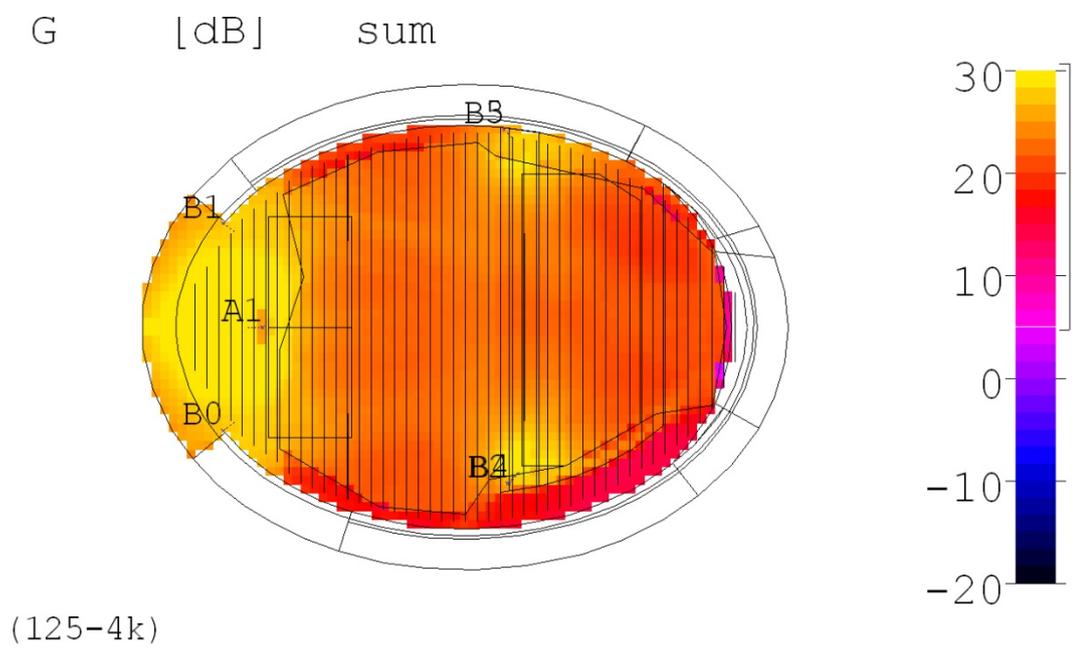


Abb. 5.22 Stärkemaß im optimierten Raum mit ELA

Die Galerie ist von der Abnahme des Schalldrucks in ähnlicher Weise betroffen, eine elektroakustische Verstärkung nötig:

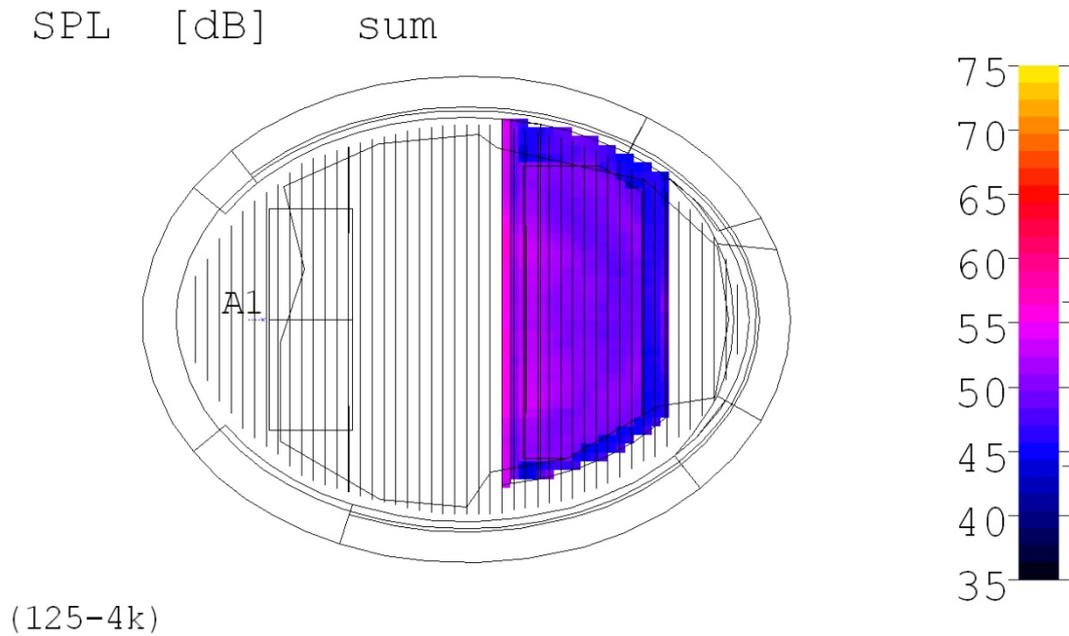


Abb. 5.23 Schalldruckpegel auf der Galerie im optimierten Raum ohne ELA

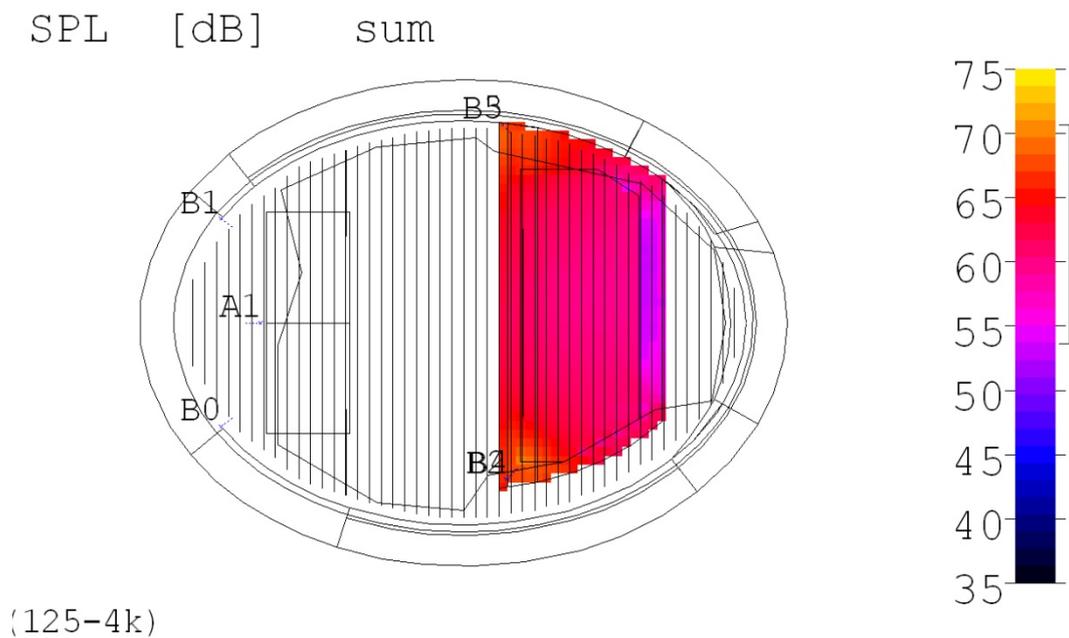


Abb. 5.24 Schalldruckpegel auf der Galerie im optimierten Raum mit ELA

## 5.5 Der Plot *Hits*

Im Zuge der Simulationen bemerkte ich großen Einfluss mancher Flächen, während andere kaum eine Rolle spielen. Die Raumform verhindert, dass sich der Schall grundsätzlich gleichmäßig verteilt, er ist sozusagen nicht gut „durchmischt“. Dies spiegelt sich im Plot *Hits* wider. In Abb. 5.25 sieht man die prozentuelle Anzahl der auf eine Fläche treffenden Schallstrahlen. Der Cursor steht über der Fläche 160, einer Teilfläche der inneren Rückwand, direkt daneben sind die Flächen 159 und 161, ebenso Teil der Rückwand. Der Höchste Marker gehört zur Decke. Über acht Prozent der Treffer werden darauf verzeichnet. Der Marker bei Fläche 515 gehört zur Oberseite des Publikums, direkt rechts davon sind Bodenflächen und ein bisschen weiter bei 537 ist die Oberseite des Publikums auf der Galerie.

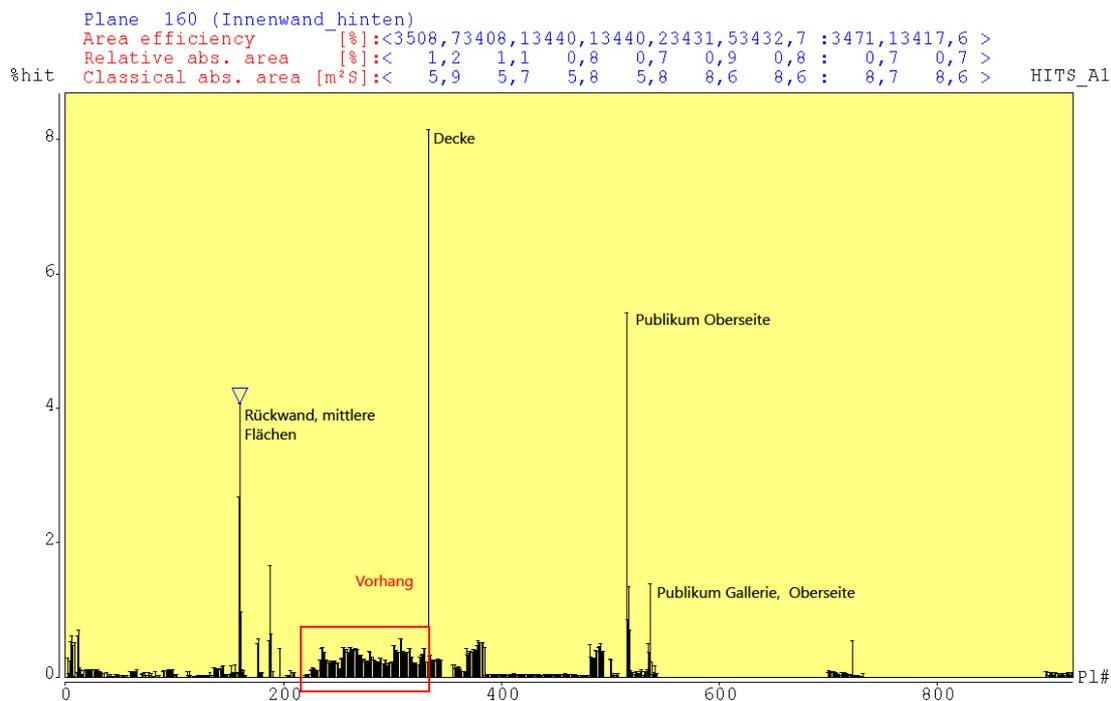


Abb. 5.25 *Hits* im unoptimierten Raum

Der Plot *Hits* kann ein wertvolles Tool zur Optimierung der Akustik sein. Bei Betrachtung von Abb. 5.25 kann man beginnen die am stärksten beteiligten Flächen zu optimieren. Allerdings passiert dann, dass durch genau diese Maßnahmen nun ganz andere Flächen ausschlaggebend werden. Im Vergleich zwischen Abb. 5.25 und Abb. 5.26 ist ersichtlich wie stark sich die Beteiligung der einzelnen Flächen geändert hat. Die hintere Rückwand hat stark an Bedeutung verloren (um Fläche 160), die Außenseite hat viel mehr Bedeutung (um Fläche 61). Es werden jetzt andere Teile der hinteren Trennwand angestrahlt (Flächen um 705).

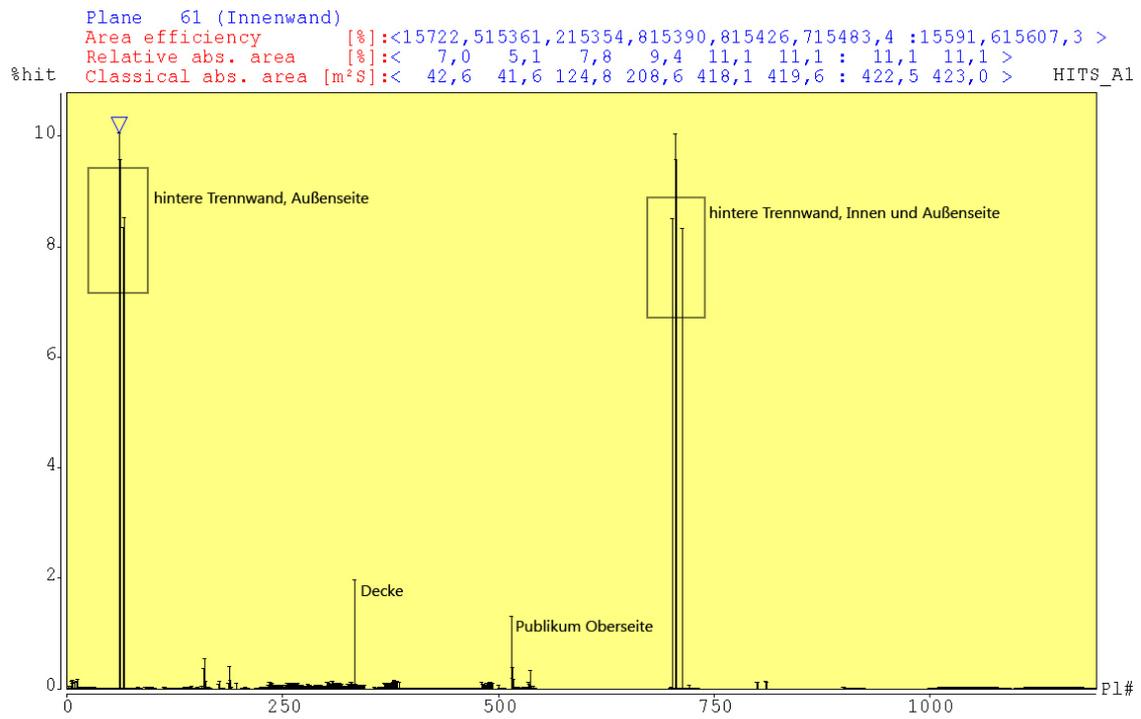


Abb. 5.26 Hits im optimierten Raum

Im Vergleich zu Abb. 5.25 sind in Abb. 5.26 mehr Flächen enthalten: Die Flächen ab 1000 modellieren die Deckenabsorber.

## 5.6 Weitere Ergebnisse

Mit den oben besprochenen Ergebnissen erhält man bereits einen guten Eindruck vom Raum. CATT-Acoustics liefert jedoch noch eine Vielzahl von weiteren Ergebnissen, die aber nicht alle für diesen Raum von Bedeutung sind.

Einige werden noch kurz beschrieben:

### 5.6.1 Seitenschallgrad (LF, *lateral energy fraction*):

Der Seitenschallgrad ist bei musikalischen Darbietungen wichtig, da er die Räumlichkeit beschreibt.

$$LF = \frac{(W_{5...80ms})_{seitl.}}{W_{0...80ms}} \quad 25\% < LF < 40\% \text{ wünschenswert für Konzertsäle}$$

$(W_{5...80ms})_{seitl.}$ .....Energie von 5-80ms, die seitlich eintrifft (gemessen mit einem Mikrofon mit der Richtcharakteristik einer liegenden 8, durch Beginn bei 5ms liefert der Direktschall keinen Anteil)

$W_{0...80ms}$ .....Energie von 0-80ms aus allen Richtungen

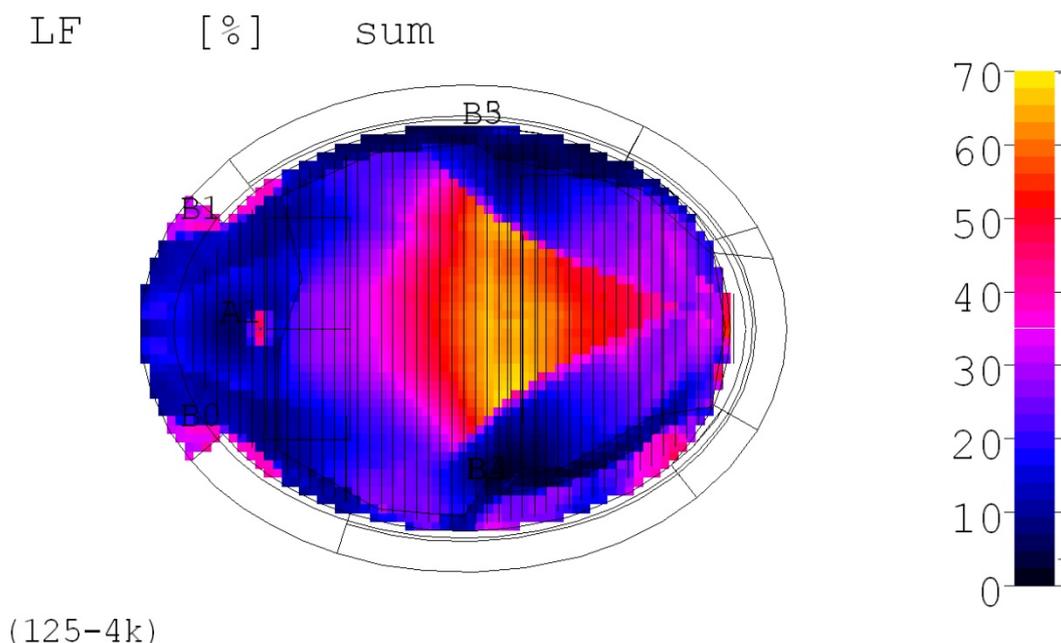


Abb. 5.27 Seitenschallgrad des optimierten Raums mit ELA

Die Verteilung nach Abb. 5.27 ist besonders in den auralisierten Beispielen gut hörbar, wenn der Hörer in den hinteren Bereich (unter die Galerie) wandert, wo der Anteil an seitlichem Schall sehr stark ansteigt.

## 5.6.2 Klarheitsmaß $C_{80}$

Das Klarheitsmaß entspricht dem Deutlichkeitsmaß für Sprache, wobei die Berechnung mit anderen Integrationsgrenzen erfolgt.

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

$0\text{dB} < C_{80}$  hohe Durchsichtigkeit von Musik

$-3\text{dB} < C_{80} < 0\text{dB}$  Musik umhüllt den Zuhörer

C-80 [dB] sum

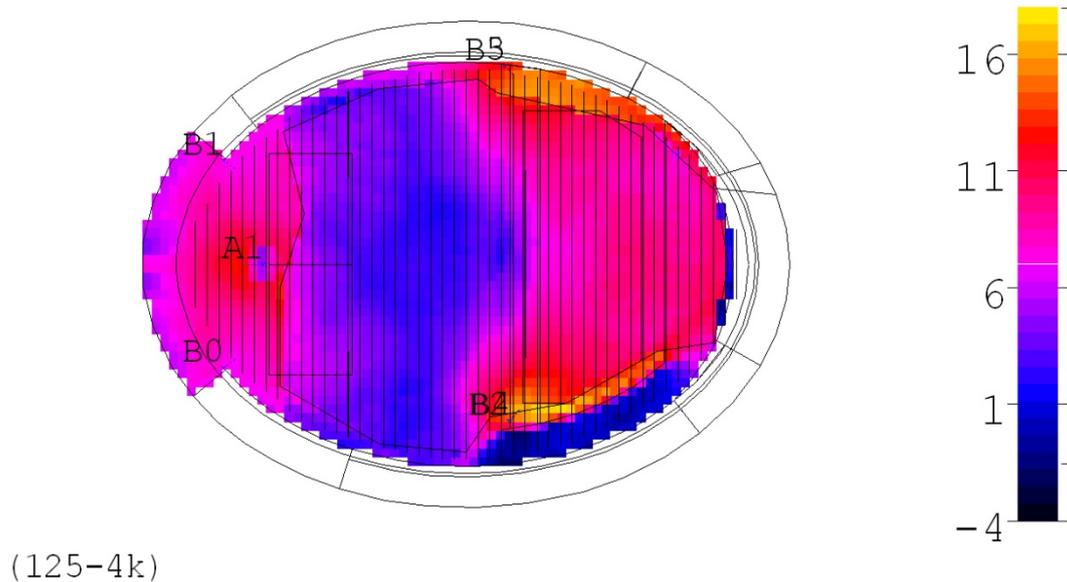


Abb. 5.28 Klarheitsmaß  $C_{80}$  des optimierten Raums mit ELA

Erkennbar wird, dass Aufgrund des Klarheitsmaßes der Raum für Musik eine hohe Durchsichtigkeit bietet, aber aufgrund des unausgewogenen Seitenschallgrads (Abb. 5.27) keine „gute“ Räumlichkeit aufweist.

### 5.6.3 Schwerpunktszeit ( $T_s$ , *center time*)

Die Schwerpunktszeit ergibt sich aus dem Flächenschwerpunktssatz und ist ein Maß für den Abfall der Energie.

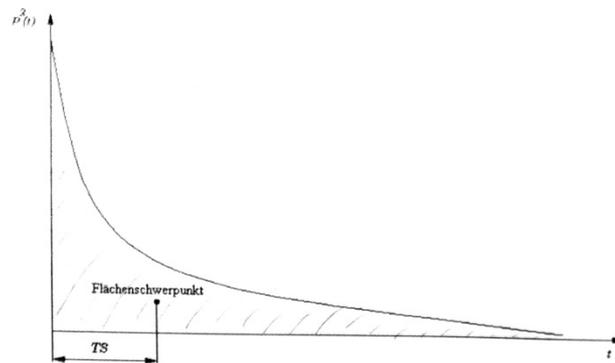


Abb. 5.29 Flächenschwerpunkt und Schwerpunktszeit[GRABER/WESELAK]

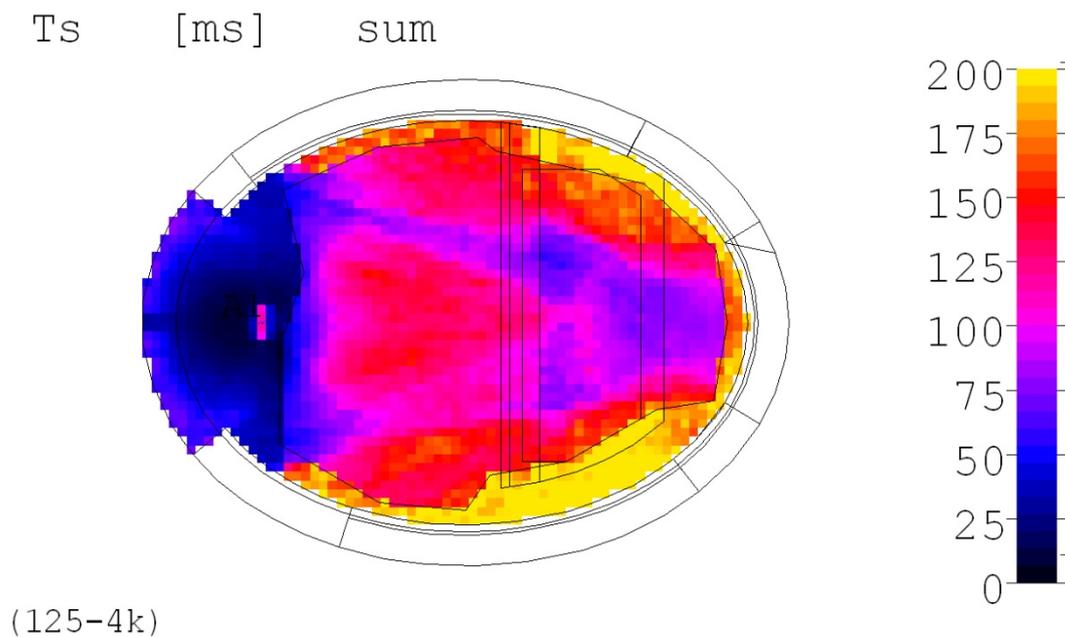


Abb. 5.30 Schwerpunktszeit im unoptimierten Raum

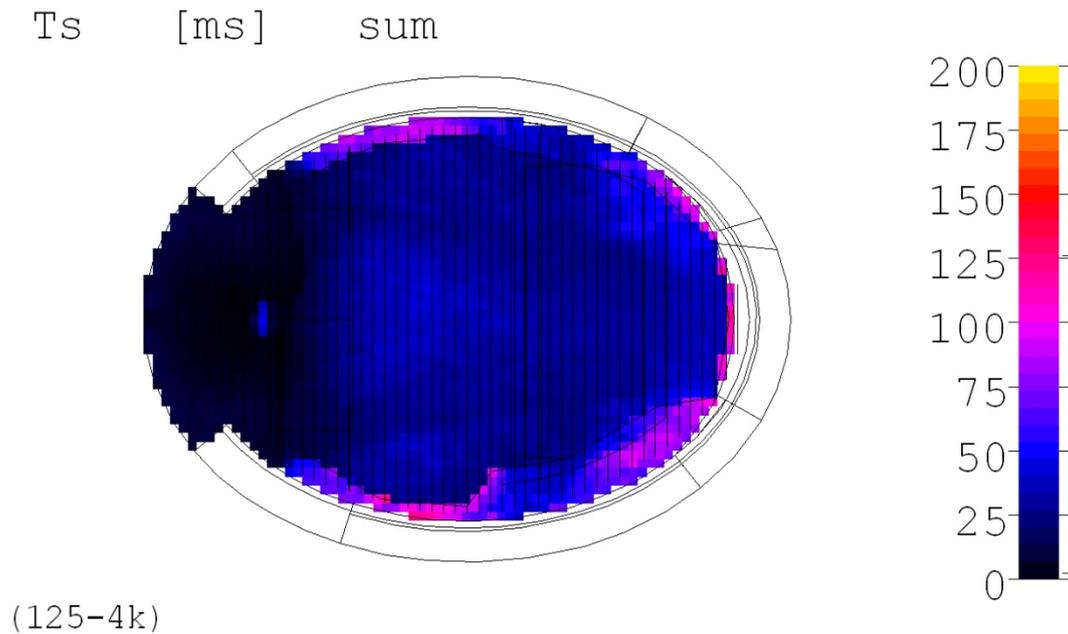


Abb. 5.31 Schwerpunktszeit im optimierten Raum

Wie aus Abb. 5.30 ersichtlich, ist im unoptimierten Raum die Schwerpunktszeit in einem für Musik gut geeigneten Bereich, aber besonders aus den Echogrammen (Abb. 4.4) wird ersichtlich, wie ungleichmäßig und gebündelt der Nachhall eintrifft, was zu deutlich hörbaren Echos führt.

Abb. 5.31 und Abb. 5.32 zeigen den optimierten Raum ohne und mit ELA. Dabei wird ersichtlich, dass die Schwerpunktszeit äußerst kurz ist, was auf einen sehr trockenen Raum schließen lässt.

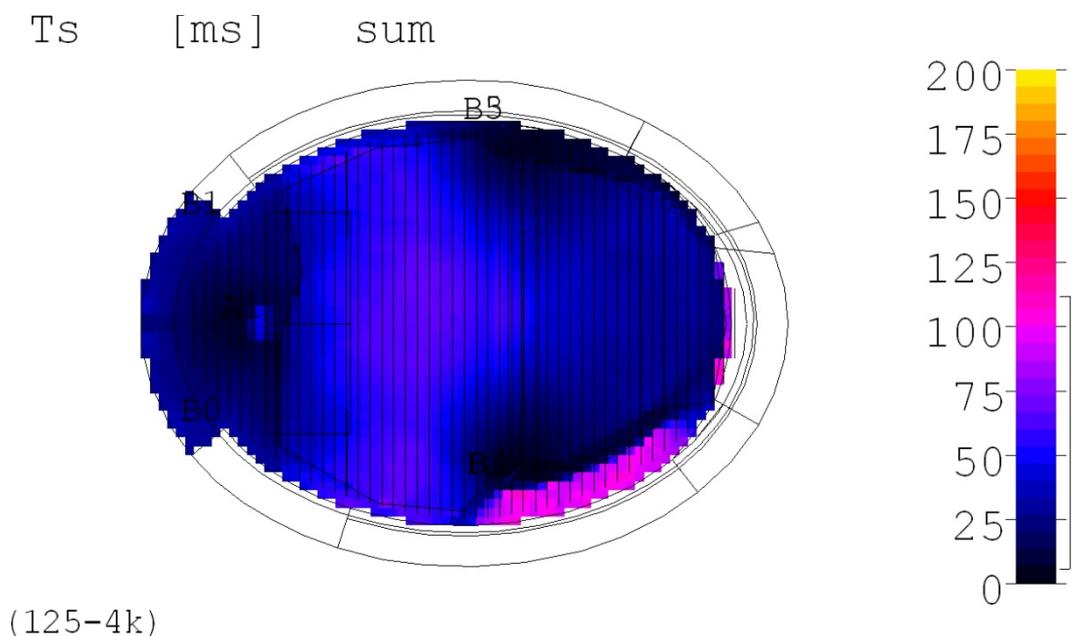


Abb. 5.32 Schwerpunktszeit im optimierten Raum mit ELA

## 6 Auralisation

Der letzte Schritt dieser Projektarbeit war die Auralisation, also das Hörbar Machen der simulierten Raumakustik. Dies geschieht in mehreren Schritten:

### ***Erzeugen der für die Impulsantwort nötigen Daten:***

Bei der *Full Detail Calculation* wird für jede Kombination aus Quelle und Empfänger eine .ECH-Datei angelegt, die ein Echogramm aus früher Antwort und Hallfahne enthält. Diese werden im nächsten Schritt zur Impulsantwort verarbeitet.

### ***Erzeugung der Impulsantworten an jedem Empfänger***

Für jede Empfängerposition wird im *Post Processing Module* die *binaurale* Impulsantwort für jede Quelle einzeln errechnet und als Lake-SIM Format (\*.SIM) gespeichert. In diesem Schritt kann nicht nur die gewünschte Wiedergabeart (in unserem Fall binaural) festgelegt werden, sondern auch die dafür nötigen HRTFs und Kopfhörer-EQ, sowie IR-Länge und Samplingfrequenz angegeben werden. Die verwendete HRTF war KEMAR0, welche so gemessen wurde, dass sie am besten mit diffusentzerrten Kopfhörern verwendet wird. Daher wird kein Kopfhörer-EQ ausgewählt (CATT lässt dies gar nicht zu!), was die Verwendung verschiedener Kopfhörer erleichtert. Mehr darüber lässt sich aus der CATT-Hilfe entnehmen.

### ***Zusammenfassen der Einzelschallquellen am Empfänger***

Da im Raum außer dem Sprecher (Vorbeter) auch sechs elektroakustische Quellen modelliert wurden, müssen diese an jeder Empfängerposition summiert werden. Dies geschieht über „Addition“ der Impulsantworten durch die Funktion *SIM-File Addition* im *Sequence Processing Module*.

### ***Festlegen des Wegs durch den Raum und Berechnung des Ergebnisses***

Der letzte Schritt benötigt die Vorgabe des Weges als *Walkthrough Convolution Script* (\*.wcs) File. Dieses gibt den Weg von Quelle zu Quelle an. Für diesen Schritt braucht man die für jede Empfängerposition errechnete Raumimpulsantwort (enthalten im .SIM-File).

Sinnvollerweise sollte für die Faltung mit der Raumimpulsantwort vollständig trocken aufgenommene Soundbeispiele verwendet werden. Auf der CATT-User Seite gibt es solche Beispiele die wie geschaffen für meine Arbeit sind. Es handelt sich um von der Universität von Ferrara aufgenommene islamische Lieder. Weiters wurden Trommeln, eine Gitarre, ein Cello und eine Trompete auralisiert. Bei den unterschiedlichen Quellen wurde aber das Abstrahlverhalten nicht geändert. Alle angeführten Instrumente richten wie der Sprecher. Eine dem Instrument entsprechende Modellierung hätte eine komplett neue Simulation, und alle obigen Schritte benötigt. Die Beispiele machen dennoch Unterschiede gut hörbar.

Der simulierte Weg führt in allen Beispiele über folgende Empfänger:

20-16-09-00-01-02-03-07-11-14-19-17-15-28 mit einer Verweildauer von 2,5s bei jedem Empfänger und 5s beim letzten.

Auf der Galerie wurde ebenso ein Weg erstellt: 25-22-21-23-26-27 mit einer Verweildauer von 2,5s, 3s bei 22 und 5s bei 27.

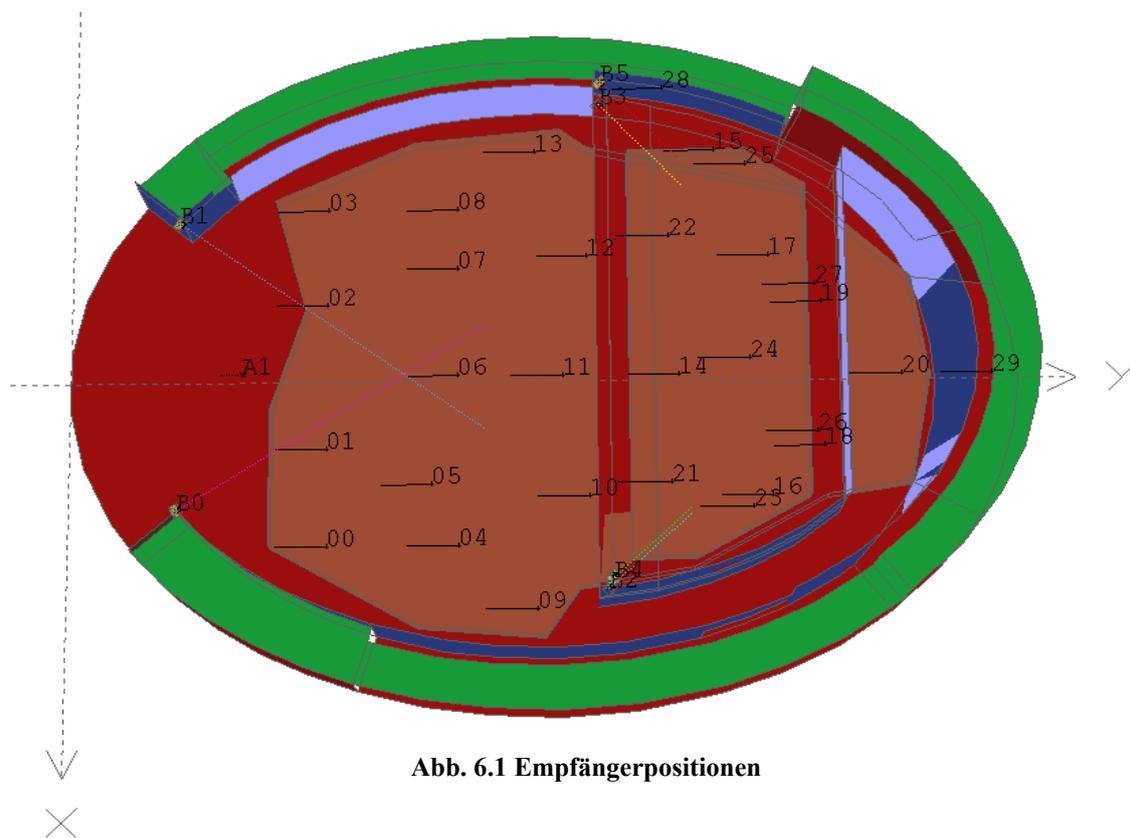


Abb. 6.1 Empfängerpositionen

Es wurden jeweils Soundbeispiele im unoptimierten Raum, ohne und mit elektroakustischer Anlage, am Boden und auf der Galerie erstellt. Ebenso wurden die gleichen Beispiele im fertigen Raum am Boden und auf der Galerie, sowie ohne und mit ELA erstellt.

Beim Sprechgesang der Islamischen Lieder klingt selbst der unoptimierte Raum ordentlich, bei perkussiven Instrumenten wie der Trommel klingt der unoptimierte Raum aufgrund der Echos nicht gut.

Die Soundbeispiele finden sich in den entsprechend benannten Ordnern, wobei die der Galerie mit der Erweiterung „UP“ (oben) im Namen gekennzeichnet werden.

#### Anmerkung:

Die Soundbeispiele klingen sehr trocken und nah. Für Sprache scheint der Raum sehr gut geeignet und auch perkussive Instrumente klingen im Gegensatz zur unoptimierten Version ziemlich sauber. Ob es nicht doch etwas zu trocken klingt würde ich als Geschmackssache bezeichnen. Der Architekt schreibt in seiner Arbeit [JAHRMANN], dass er eine intime Atmosphäre erzeugen möchte. Speziell wenn der Raum dunkel ist kann man durch tief von der Decke hängende Lichter diese Atmosphäre erzeugen. Dazu passt ganz gut die trockene Akustik.

Mir gefällt die Akustik, man könnte ja immer noch die Nachhallzeit künstlich verlängern ;-)

## 7 Literaturverzeichnis

[WIKIPEDIA] (kein Datum). Von <http://en.wikipedia.org/wiki/Carpet#Needlefelt> abgerufen

[FUCHS] FUCHS Helmut V.: *Schallabsorber und Schalldämpfer – 2. Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, 2007

[DAGA94] Fortschritte der Akustik – DAGA 94 Teil B. Bad Honnef: DPG GmbH 1994

[DAGA95] Fortschritte der Akustik – DAGA 95 Teil 1. Hrsg. W. Arnold und S. Hirsekorn, 1995

[JAHRMANN] JAHRMANN, Christoph.: *Moschee, Islamisches Kulturforum mit Gebetsraum für Graz*. Diplomarbeit, Inst. für Gebäudelehre TU Graz 2009

[CATT] CATT-Acoustics, Hilfe zur Version 8.0i, 2009

[OGNEDAL] The *AbsTex* software [www.ognedal.com](http://www.ognedal.com)

[GRABER/WESELAK] *Raumakustik, Skriptum zur Vorlesung*, erstellt von Ao.Univ.-Prof. Dr. Gerhard Graber und DI Dr. Werner Weselak, Version 4.0 2006

## Anhang A

In diesem Teil sind Scans von den ausgedruckten Plänen angeführt um das Modell besser nachvollziehen zu können. Ohne diese ganzen Zettel und darauf befindlichen Notizen wäre die Erstellung des Modells unmöglich gewesen und daher finden sie sich auch in der Dokumentaton. Damit sollte es etwas einfacher werden sich im Modell zurechtzufinden.

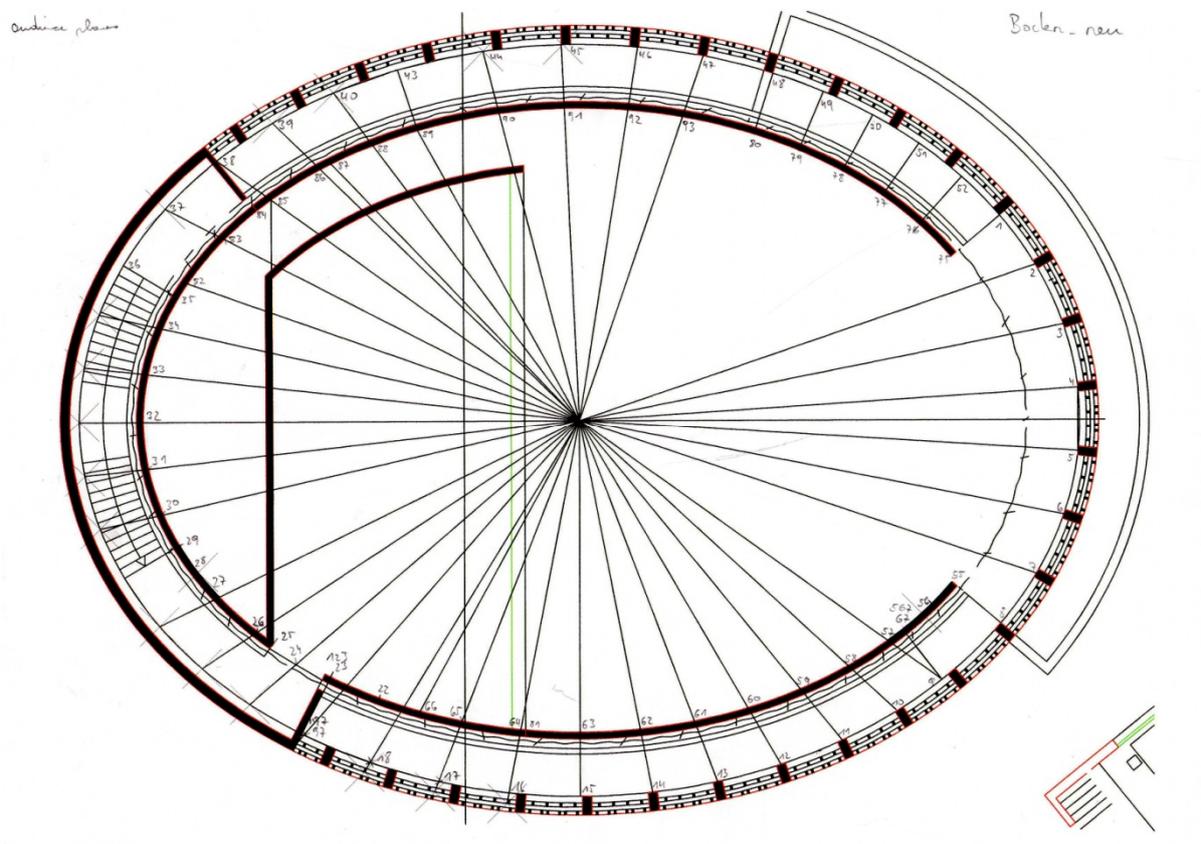


Abb. A.1 Boden mit eingezeichneten Punkten [vgl. JAHRMANN]

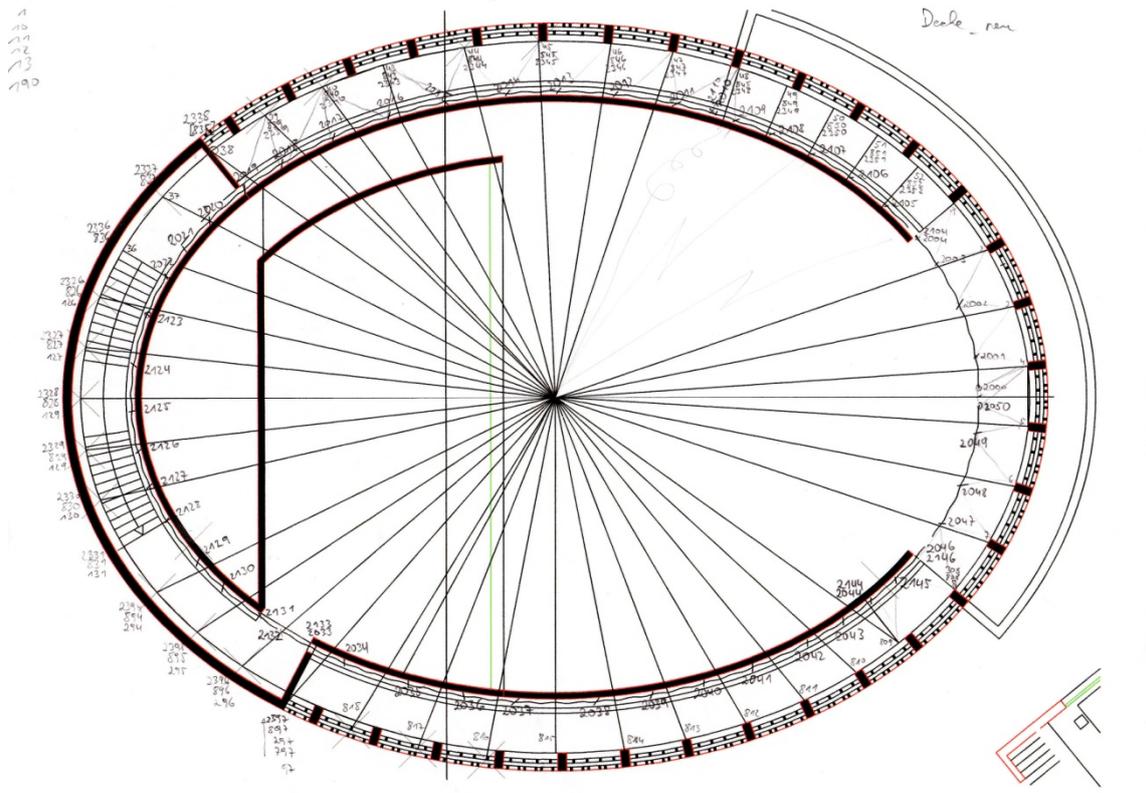


Abb. A.2 Plot mit eingezeichneten Punkten der Decke [vgl. JAHRMANN]

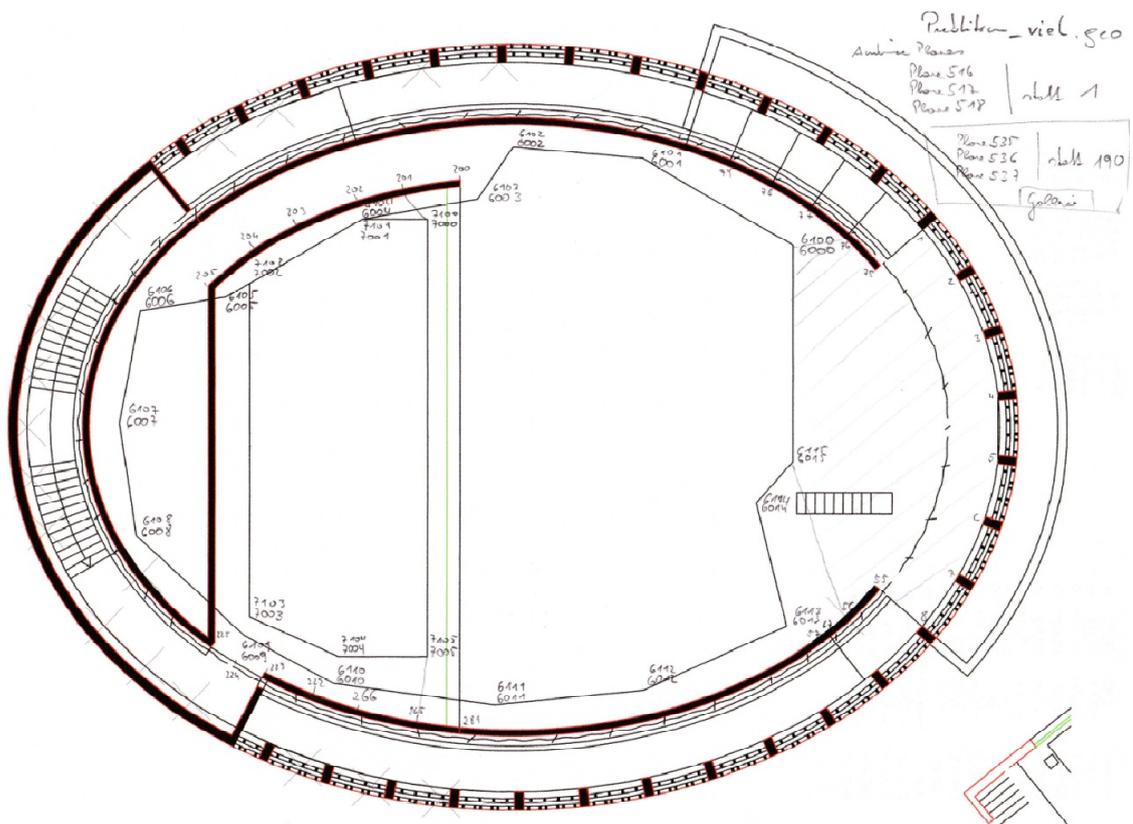


Abb. A.3 Plot mit eingezeichneten Punkten des Publikums. In der rechten oberen Ecke sieht man welche Flächen anstelle des ursprünglichen Bodens verwendet werden müssen. [vgl. JAHRMANN]

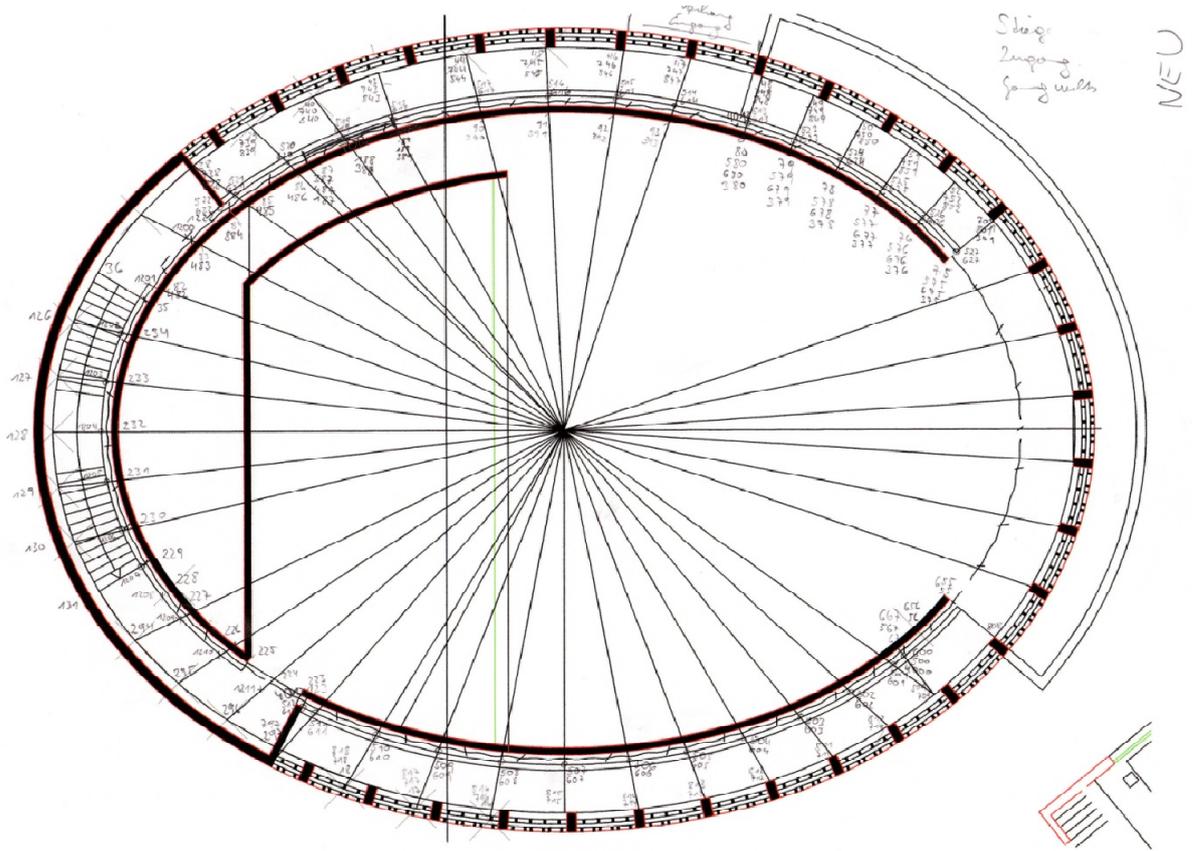


Abb. A.4 Plot mit Punkten der Stiege, Gänge [vgl. JAHRMANN]

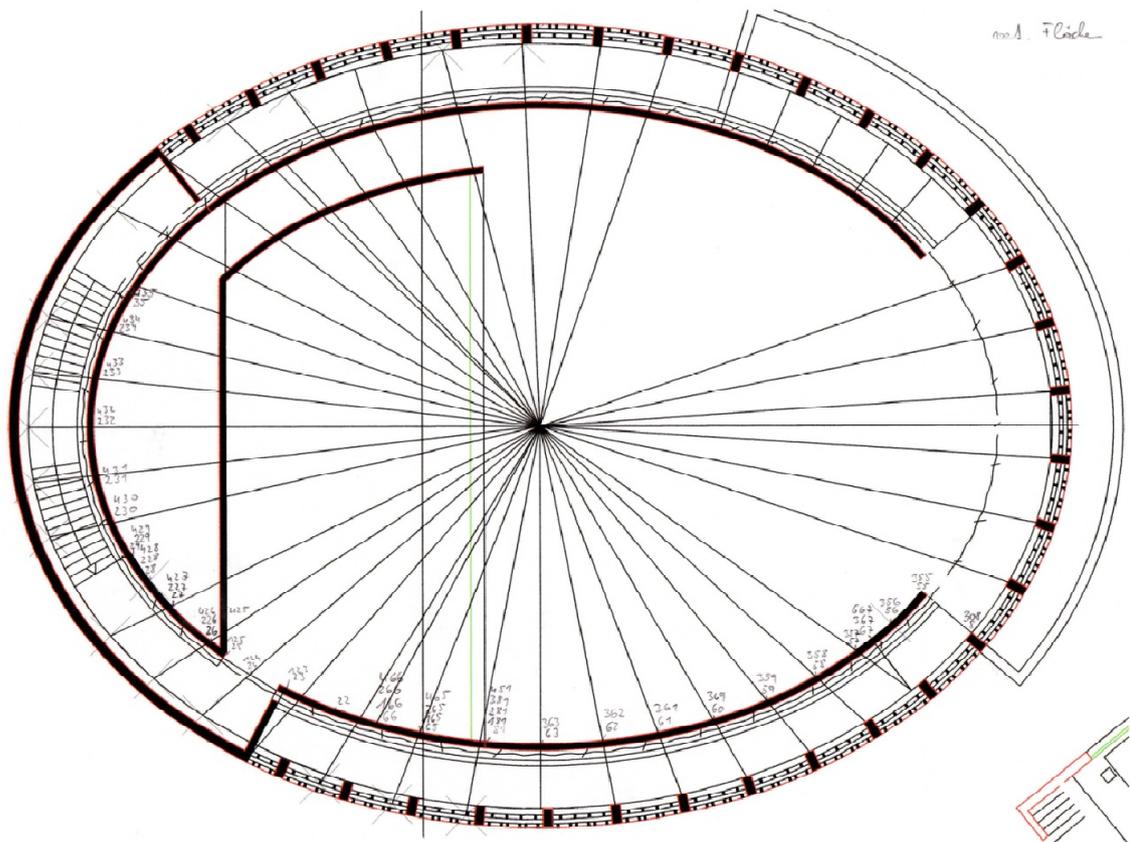


Abb. A.5 Plot mit Punkten der Vertikalen Flächen [vgl. JAHRMANN]