

Projektarbeit | Bachelorarbeit

**Vermessung und Erarbeitung von  
Optimierungsvorschlägen für die  
Raumakustik mehrerer Räume im Palais  
Herberstein in Graz**

Felix BRIELMAIER  
Ben-Daniel KELLER  
Benjamin VONRHEIN

eingereicht an das  
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation  
der  
Technischen Universität Graz  
im Oktober 2012

**Betreuer:**  
DI Dr. Franz GRAF  
DI<sup>in</sup> Maria FELLNER, MBA



## Kurzfassung

Inhalt dieser Arbeit ist in erster Linie die Behandlung der Problematik einer raumakustischen Optimierung in denkmalgeschützten Räumlichkeiten. Das Objekt in der Leonhardstraße 59 in Graz ist aktueller Hauptsitz der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH und einige Räume im Haus benötigen eine akustische Verbesserung. Die hier behandelten Räumlichkeiten sind der große Konferenzsaal, das Besprechungszimmer, das Foyer mit Empfang, der Sozialraum und der Meeting Point.

Wichtig ist hierbei die Optimierung der Sprachverständlichkeit, sowie die Senkung der Nachhallzeit. Es wurden raumakustische Messungen mit dem MLS-Messverfahren, sowie Simulationen aller Räume mit der Software CATT-Acoustic durchgeführt und aus deren Ergebnissen Lösungsvorschläge mit Kostenschätzungen erarbeitet.

## Abstract

This paper is designed to examine issues concerning the optimisation of room acoustics in listed buildings. To this end, we will look at the headquarters of the Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, located at Leonhardstraße 59, Graz, as some of the rooms require improvement in terms of acoustics. The rooms dealt with in this paper include the great conference room, the meeting room, the entrance hall including the reception, the social room and the meeting point.

The main aim is the reduction of the reverberation time as well as optimising the speech transmission quality. For this purpose, the room acoustics were measured using the MLS measurement method. Furthermore, all rooms were simulated using the CATT-Acoustic software. The data obtained were then used to suggest solutions including the approximate costs.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Hintergründe</b>	<b>2</b>
2.1	Geschichte des Palais Herberstein . . . . .	2
2.2	Denkmalschutz . . . . .	3
2.2.1	Allgemeines . . . . .	3
2.2.2	Denkmalschutz und Raumakustik . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Theorie</b>	<b>4</b>
3.1	MLS–Messverfahren . . . . .	4
3.2	Allgemeine Durchführung der Messung . . . . .	6
3.3	Raumakustische Gütemaße . . . . .	8
3.3.1	Nachhallzeit . . . . .	8
3.3.2	Early Decay Time (EDT) . . . . .	9
3.3.3	Deutlichkeitsgrad/Deutlichkeitsmaß . . . . .	10
3.3.4	Klarheitsmaß . . . . .	10
3.3.5	STI . . . . .	11
3.3.6	RASTI . . . . .	12
3.3.7	Artikulationsverlust . . . . .	12
3.4	Absorber und Schallführende Elemente . . . . .	13
3.4.1	Poröse Absorber . . . . .	13
3.4.2	Helmholtzresonator . . . . .	14
3.4.3	Plattenresonator . . . . .	15
3.4.4	Diffusoren . . . . .	15
3.4.5	Reflektoren . . . . .	15
3.5	Kombinierte Schallabsorber und Stand der Forschung . . . . .	16
3.5.1	Alternative poröse Absorber (ALFA) . . . . .	16

3.5.2	Verbundplatten-Resonator (VPR) . . . . .	16
3.5.3	Breitband-Kompakt-Absorber (BKA) . . . . .	17
3.5.4	Mikroperforierte Absorber (MPA) . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Konferenzsaal</b>	<b>20</b>
4.1	Die Räumlichkeiten . . . . .	20
4.2	Durchführung der Messung . . . . .	23
4.3	Messergebnisse . . . . .	26
4.4	Erstellung des Simulationsmodells . . . . .	29
4.4.1	3D-Modell . . . . .	29
4.4.2	Akustisch relevante Oberflächen . . . . .	32
4.5	Simulationsergebnisse . . . . .	33
4.6	Optimierungen . . . . .	36
4.7	Kosten . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Besprechungszimmer</b>	<b>43</b>
5.1	Die Räumlichkeiten . . . . .	43
5.2	Durchführung der Messung . . . . .	44
5.3	Messergebnisse . . . . .	47
5.4	Erstellung des Simulationsmodells . . . . .	48
5.5	Simulationsergebnisse . . . . .	49
5.6	Optimierungen . . . . .	51
5.7	Kosten . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Foyer mit Empfang</b>	<b>55</b>
6.1	Die Räumlichkeiten . . . . .	55
6.2	Durchführung der Messung . . . . .	55
6.3	Messergebnisse . . . . .	58
6.4	Erstellung des Simulationsmodells . . . . .	58

6.5	Simulationsergebnisse . . . . .	60
6.6	Optimierungen . . . . .	62
6.7	Kosten . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Sozialraum</b>	<b>66</b>
7.1	Die Räumlichkeiten . . . . .	66
7.2	Durchführung der Messung . . . . .	69
7.3	Messergebnisse . . . . .	70
7.4	Erstellung des Simulationsmodells . . . . .	71
7.5	Simulationsergebnisse . . . . .	71
7.6	Optimierungen . . . . .	73
7.7	Kosten . . . . .	76
<b>8</b>	<b>Meeting Point</b>	<b>77</b>
8.1	Die Räumlichkeiten . . . . .	77
8.2	Durchführung der Messung . . . . .	79
8.3	Messergebnisse . . . . .	79
8.4	Erstellung des Simulationsmodells . . . . .	81
8.5	Simulationsergebnisse . . . . .	83
8.6	Optimierungen . . . . .	83
	8.6.1 Variante 1: BKA und BASO100 . . . . .	84
	8.6.2 Variante 2: BKA und abgehängte Lochplattendecke . . . . .	85
8.7	Kosten . . . . .	88
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>89</b>
	<b>Anhang</b>	<b>94</b>

# 1 Einleitung und Motivation

Schon im antiken Zeitalter wurde darauf Wert gelegt, dass Sprache und Musik bei Veranstaltungen gut zu verstehen sind. Amphitheater beispielsweise wurden auch nach akustischen Richtlinien gebaut. So waren die Darbietungen an jedem Platz verständlich.

Heute ist dieses Thema durch die vielen Forschungsgebiete der Akustik und das Wissen über sehr viele unterschiedliche Materialien zu einem elementaren Bereich der Bauphysik geworden und wird bei der Konstruktion von Theatern, Konzertsälen, Radio- und Fernsehstudios, Tonstudios, Vortragsräumen, Kirchen, Unterrichtsräumen, aber auch bei Wohnhäusern und Wohnungen von vorn herein mit eingeplant.

Die Raumakustik ist auch stark an das Empfinden der sich im Raum aufhaltenden Personen gekoppelt. So kann es gut sein, dass man sich in einem Raum mit schlechten Werten für Nachhallzeit und Sprachverständlichkeit unwohl fühlt, da man sich selbst oder andere schlecht oder nur verschwommen versteht. Dies merkt man schon, wenn man einmal alle Möbel und Einrichtungsgegenstände aus seinem Wohnzimmer geräumt hat und sich dann dort aufhält.

Im Fall des Konferenzraumes im Palais Herberstein wurde damals nicht sehr darauf geachtet, wie man die Raumakustik optimieren könnte. Eventuell waren viele Polstermöbel und schwere Vorhänge im Raum, die zu einer Reduzierung der Nachhallzeit führten und so eine „angenehmere“ Raumakustik schufen.

In einigen, kulturell besonders wertvollen Fällen von älteren Gebäuden oder Räumlichkeiten tritt das Denkmalschutzamt für den besonderen Schutz der Bauwerke ein. Hier werden dann oft Restaurationen und Renovierungen durchgeführt. Dabei gilt es darauf zu achten, dass der ursprüngliche Zustand erhalten bleibt, beziehungsweise wieder hergestellt wird.

Auch bei einer akustischen Optimierung müssen diese Anforderungen eingehalten werden und dies erfordert oft eine „unsichtbare“ raumakustische Lösung [DSZ00].

## 2 Hintergründe

### 2.1 Geschichte des Palais Herberstein

Das Gebäude in der Leonhardstraße 59 (Bezirk II. Leonhard) in Graz steht auf dem ehemaligen Ferdinandeumsgarten des Jesuitenordens, der das Gelände 1603 vom Freiherrn von Stadl kaufte. Der Ferdinandeumsgarten diente als Erholungsheim für Lehrer und Schüler des Ordens.

1715 ist das ganze Gelände abgebrannt und 1716 ließ Kaiser Karl für seinen Sohn ein neues Gebäude errichten. 1847 wechselte das Gebäude erneut seinen Besitzer, als Prinz Alexander von Württemberg für sechs Jahre einzog.

Seit 1853 trägt das Gebäude den Namen *Palais Herberstein*, bedingt durch den Kauf von Johann Friedrich und Theresia Graf und Gräfin von Herberstein, die 1854–56 einige Um- und Anbauten durchführen ließen (umgesetzt von Christoph Stadler).

Ihr Sohn Johann Joseph Graf von Herberstein und zu Proskau (1854–1944) erbte die Besitztümer und veranlasste den Stadtbaumeister Karl Walenta 1907 nochmals zu Umbauten, die den heutigen Stand des Gebäudes markieren [Rei03].



**Abbildung 2.1:** Palais Herberstein

Bis 2010 hatte die Steirische Wasserkraft- und Elektrizitäts-AG (Stewag) ihren Firmensitz im Palais Herberstein und seit 2010 ist es im Besitz der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH.

## 2.2 Denkmalschutz

### 2.2.1 Allgemeines

Was ist ein Denkmal?

Die Definition des österreichischen Verfassungsgerichtshof zum Begriff *Denkmal* lautet folgendermaßen:

„Denkmale sind bewegliche und unbewegliche von Menschen geschaffene Gegenstände von historischer, künstlerischer oder sonst kultureller Bedeutung . . .“

Der Schutz dieser Denkmäler umfasst die Bewahrung vor Zerstörung, Veränderung und Verbringung ins Ausland. Hierbei ist die oberste Instanz im Allgemeinen das Bundesdenkmalamt. Doch der Denkmalschutz befasst sich eher mit der Bestimmung der Denkmäler und den Rechtsgegebenheiten, die dadurch entstehen. Die Denkmalpflege dagegen befasst sich mit der Förderung der Restaurierung, Instandhaltung und Instandsetzung von Denkmälern [Bun11].

### 2.2.2 Denkmalschutz und Raumakustik

Denkmalgeschützte Gebäude oder Räume sind meist ältere Bauwerke und die Verwendung war oft eine andere als heute. Deshalb und wegen nicht vorhandenem Wissen über Raumakustik wurden damals oft keine Optimierungen durchgeführt. Eine Ausnahme sind hier sicherlich Konzertsäle und Theaterräume.

Es ist verständlich, dass eine raumakustische Veränderung oder Optimierung bei Räumlichkeiten, die unter dem Denkmalschutz stehen, eine eigene Herangehensweise erfordert. So können beispielsweise die gängigen Befestigungsmethoden nicht verwendet werden, da sonst Oberflächenmaterialien beschädigt würden oder die Anbringung von Absorbern oder Reflektoren würde Teile verdecken und so den optischen Gesamteindruck stören. Es gilt also die nötigen Veränderungen einer Optimierung so anzubringen, dass sie nicht auffallen und den Raum nur akustisch beeinflussen. Hierfür gibt es in der Praxis verschiedenste Lösungsansätze, auf die im jeweiligen Kapitel dann näher eingegangen wird.

## 3 Theorie

### 3.1 MLS–Messverfahren

MLS bedeutet *Maximum Length Sequence* (Maximalfolge) und steht für ein pseudo-zufälliges Binärrauschen, das einem weißen Rauschen sehr ähnlich, aber immer wieder exakt reproduzierbar ist [Wes08].

Das im Computer generierte MLS–Signal (aus der Software *WinMLS*) wird über das Audiointerface und einen Leistungsverstärker zum Dodekaeder<sup>1</sup> geführt. Der Dodekaeder strahlt das MLS–Signal in den Raum ab, wo die Schalldruckänderungen von den Mikrofonen aufgezeichnet werden. Nun wird mit Hilfe der Kreuzkorrelation die Impulsantwort berechnet, deren Fouriertransformierte weiters den Amplituden- und Phasenfrequenzgang darstellt. Auch die Sprungantwort kann aus der Impulsantwort abgeleitet werden. Die Fehler der Übertragung und des Audiointerfaces werden hier auch berücksichtigt und aus diesen Daten können nun alle wichtigen akustischen Gütemaße berechnet werden.

Ein großer Vorteil gegenüber einem Impuls–Messverfahren ist der höhere Energiegehalt bei gleicher Amplitude, was für die Anregung der tiefen Frequenzen im Raum relevant ist.

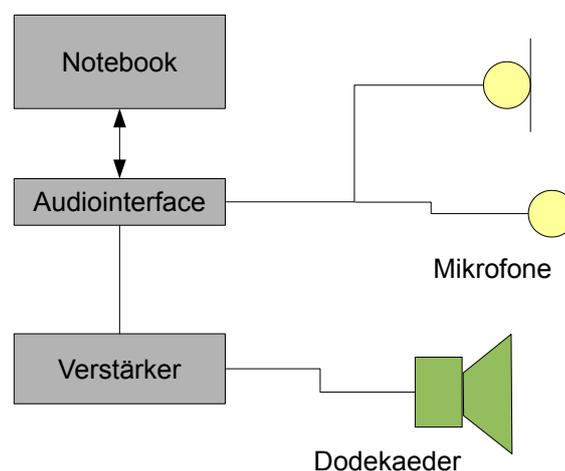


Abbildung 3.1: Messaufbau

<sup>1</sup> Lautsprecher mit 12 Membranen in alle Richtungen, ähnlich einem Kugellautsprecher

Des Weiteren werden bei MLS-Messungen keine wiederholten Messungen benötigt, da durch die Sequenzlänge des MLS-Signals bereits eine Mittelung eingestellt werden kann. So wurde von mir nur eine Messung pro Quell- und Mikrofonposition durchgeführt.

### Messequipment

- Lenovo T500 Notebook
- M-Audio Fast Track Pro (Audiointerface)
- 2 x Beyerdynamic MM1 (Messmikrofone)
- Center 326 (Kalibrator)
- Norsonic AS 270 H (Dodekaeder)
- Norsonic Power Amp 260 (Leistungsverstärker)
- Sowie alle nötigen Kabel und Stative



(a) Messmikrofon Beyerdynamic MM1



(b) Kalibrator Center 326

**Abbildung 3.2:** Messequipment

## 3.2 Allgemeine Durchführung der Messung

Um eine Akustikmessung durchzuführen bedarf es immer einer exakten und sorgfältigen Herangehensweise.

Besonders wichtig sind hierbei die Erstellung eines Messplans und die Erfassung der äußeren Einflüsse. Es soll der Schall im Raum möglichst an jeder Stelle erfasst werden, was aber einen großen Aufwand mit sich bringt, da sehr viele Mikrofonpositionen gewählt und Messungen durchgeführt werden müssten. Außerdem reicht es aus das Schallfeld an den Positionen im Raum zu erfassen, an denen sich Personen aufhalten.

Prinzipiell gilt es die Räume so zu vermessen, wie sie auch genutzt werden. Bei den Konferenzräumen soll darauf geachtet werden, dass die Türen geschlossen sind, die Tische und Stühle so stehen, wie es bei einer Konferenz wäre und die Leinwand ausgefahren ist. Aber da die Räume auch für andere Veranstaltungen genutzt werden sollen, wurden sie leer und mit eingefahrener Leinwand ausgemessen. Der Konferenzsaal wurde in ganz leerem Zustand gemessen, beim Besprechungszimmer und dem Meeting Point wurde ohne die Polstermöbel und die Clipboards gemessen und im Foyer sowie beim Meeting Point wurde auch der Zustand der offenen Türen für die Messung berücksichtigt.

Um einen möglichst großen Signal-Rausch-Abstand zu erhalten wurde die Klimaanlage (mit Lüftung) allerdings abgeschaltet.

Zu den äußeren Einflüssen zählen unter anderem die Lufttemperatur, die  $22^{\circ}\text{C}$  betrug und die Luftfeuchtigkeit, die mit 30% erfasst wurde.

Um die Mikrofonpositionen für den Messpläne zu bestimmen, ist es notwendig einige Regeln zu befolgen, die sich teilweise aus der Praxis und teilweise aus akustischen Gegebenheiten zusammen setzen:

Der Abstand von einem Mikrofon zu einer Wand sollte mindestens  $1m$  betragen (dies entspricht etwa  $\frac{\lambda}{4}$  der kleinsten interessanten Frequenz der Messung), da das Schallfeld in Wandnähe einige Artefakte aufzeigt, wie Schalldrucküberhöhungen im tiefen Frequenzbereich.

Der Mindestabstand zwischen zwei Mikrofonen sollte  $2m$  betragen (entspricht etwa  $\frac{\lambda}{2}$  der kleinsten interessanten Frequenz der Messung).

Für den Minimalabstand zwischen Mikrofon und Quelle gilt mit dem Volumen  $V$  und Schätzung der Nachhallzeit  $T$ :

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad [m] \quad (3.1)$$

Mit den Werten  $c = 344m/s$ ,  $V \approx 422m^3$  und  $T \approx 4s$  bekommt man beispielsweise für den Konferenzsaal einen Wert von  $d_{min} \approx 1,1m$ .

Aus diesen Werten und der Überlegung an welchen Stellen im Raum sich die Personen am häufigsten aufhalten ergeben sich die Messpläne [WG07].

### 3.3 Raumakustische Gütemaße

Die meisten raumakustischen Gütemaße lassen sich durch Betrachten der Schallenergie herleiten.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p^2(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

Durch das Einsetzen verschiedener Integrationsgrenzen zur Betrachtung der akustische relevanten Energieteile und dem Vergleich mit der Gesamtenergie können die akustischen Gütemaße hergeleitet werden. So bekommt man ein objektive Größe für die Akustik eines Raumes [WG07].

Die wichtigen drei Schallereignisse sind:

- Direktschall
- Anfangsreflexionen (Early Decay Time)
- Diffus-schall (Nachhall)

Im Folgenden gehe ich auf die Gütemaße genauer ein, die bei meiner Messung und Simulation ausgewertet werden.

#### 3.3.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist definiert als der Abfall der mittleren Schallenergie im Raum um einen bestimmten Pegel. Das Zeitintervall, wenn dieser Pegelabfall 60dB (ein Tausendstel des Anfangspegels) beträgt, wird *Nachhallzeit*  $T_{60}$  genannt. Sie wird im allgemeinen in Oktav- oder Terzbändern über den gesamten Hörbereich (20 Hz – 20 kHz) angegeben. Es zwei verschiedene Definitionen:

Nachhallzeit nach *Sabine* (über die Schallenergie):

$$T_{60} = 0,161 \left[ \frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{A_{ges}} \quad (3.3)$$

Nachhallzeit nach *Eyring* (über Weglängen und Reflexionen):

$$T_{60} = -0,161 \left[ \frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{S_{ges} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_m)} \quad (3.4)$$

Bei sehr hoher Absorption ist die Formel nach Eyring etwas genauer [Wei08].

### 3.3.2 Early Decay Time (EDT)

Die frühen Reflexionen im Raum werden exakter wahrgenommen und bestimmen deshalb die subjektive Empfindung eines Raumklangs.

Gemessen wird definitionsgemäß der Pegelabfall zwischen 0 und -10 dB, der dann auf -60 dB extrapoliert wird.

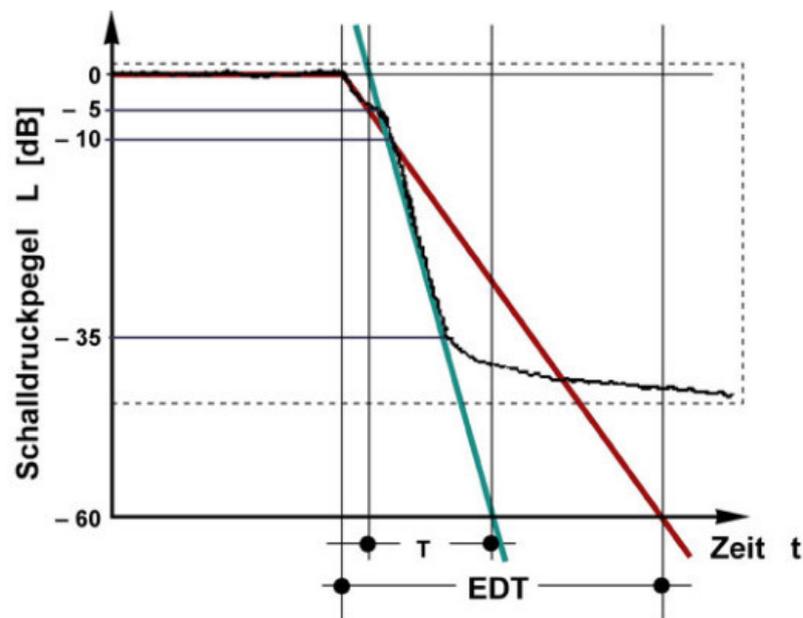


Abbildung 3.3: Nachhallzeit und Early Decay Time [Wei08]

### 3.3.3 Deutlichkeitsgrad/Deutlichkeitsmaß

Wie die frühen Reflexionen, so bezieht sich auch der Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  (definiert von R. Thiele<sup>2</sup>) auf den Energieanteil, der unmittelbar nach dem Direktschall beim Hörer ankommt. Die Definition beschreibt damit die Hörsamkeit von Räumen und für Sprache gilt ein Zeitbereich bis etwa 50 ms. In diesem Zeitintervall führen alle Reflexionen zu einer Erhöhung der Lautstärke ohne ein Echo hervor zu rufen oder zu einem Verlust der Schallquellenlokalisierung zu führen. Diese Lautstärkezunahme führt in Räumen zu einer besseren Durchsichtigkeit und damit beispielsweise auch zu einer besseren Silbenverständlichkeit [Wei08].

$$D_{50} = \frac{W_{0...50}}{W_{ges}} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{+\infty} p^2(t) dt} \quad [\%] \quad (3.5)$$

Für  $D_{50} > 50\%$  wird *gute Verständlichkeit* angenommen.

Anstelle des Deutlichkeitsgrades kann auch das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  angegeben werden:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...50}}{W_{50...∞}} = 10 \cdot \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} [dB] \quad (3.6)$$

Hier wird die Pegeldifferenz zwischen der Schallenergie vor und nach 50 ms angegeben. Als Richtlinie für gute Sprachverständlichkeit gilt:

$$C_{50} > -3dB$$

### 3.3.4 Klarheitsmaß

Das Klarheitsmaß  $C_{80}$  beschreibt die Durchsichtigkeit von Musik. Der Unterschied zum Deutlichkeitsmaß ist in den Integrationsgrenzen zu sehen. Hier wird nun eine etwas längere Anfangsnachhallzeit angenommen, denn die Energie in den ersten 80 ms nach dem Direktschall trägt zur Durchsichtigkeit der Musik bei [Wei08].

<sup>2</sup> Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}} \quad [dB] \quad (3.7)$$

Für Werte von  $C_{80} > 0$  dB wird eine hohe Durchsichtigkeit von Musik im Raum wahrgenommen und für Werte kleiner null ( $C_{80} < 0$  dB) hat der Zuhörer den Eindruck, dass er von der Musik umhüllt ist.

### 3.3.5 STI

Der *Speech Transmission Index* beschreibt ein Verfahren, bei dem die menschliche Sprache durch eine Modulation von bandbegrenztem Rauschen in mehreren Frequenzbändern simuliert wird.

Die raumakustischen Gütemaße, wie Nachhallzeit, Hintergrundrauschen oder durch den Raum hervorgerufene Verzerrungen und Auslöschungen verändern die Modulationen (Verringerung des SNR). Diese Veränderungen werden erfasst und über alle Modulationsfrequenzen und das gesamte Spektrum gemittelt [Wei08].

<b>Frequenzbänder [Hz]</b>	125 250 500 1000 2000 4000 8000
<b>Modulationsfrequenzen [Hz]</b>	0,63 0,8 1,0 1,25 1,6 2,0 2,5 3,15 4,0 5,0 6,3 8,0 10,0 12,0

Wie man sieht ergeben sich 98 Messungen und dies ist mit viel Aufwand verbunden, weshalb man als Vereinfachung den RASTI eingeführt hat.

<b>STI</b>	<b>Bewertung</b>
0–0,3	Unverständlich
0,3–0,43	Schlecht
0,43–0,6	Angemessen
0,6–0,75	Gut
0,75–1,0	Ausgezeichnet

### 3.3.6 RASTI

Die Abkürzung steht für *Rapid Speech Transmission Index* und das Verfahren ist eine Vereinfachung des *Speech Transmission Index (STI)*.

Dieser Wert zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit ist eine Mittelung aus 9 Messungen des scheinbaren Signal-Rausch-Abstandes (SNR)  $X_i$  in zwei sprachrelevanten Frequenzbändern (500 Hz und 2 kHz) [Wei08].

$$RASTI = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{X_i + 15}{30} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

RASTI > 80 % ... sehr gute Sprachverständlichkeit

RASTI < 50 % ... schlechte Sprachverständlichkeit

### 3.3.7 Artikulationsverlust

Der Artikulationsverlust oder  $Al_{cons}$  (articulation loss of consonants) beschreibt den Deutlichkeitsverlust von gesprochenen Konsonanten [Wei08].

$$Al_{cons} \approx 0,652 \cdot \left( \frac{r_{LH}}{r_R} \right)^2 \cdot T \quad [\%] \quad (3.9)$$

$T$	.....	Nachhallzeit
$r_{LH}$	.....	Abstand von Quelle zum Empfänger
$r_R \approx \sqrt{\gamma} \cdot 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$	.....	Richtentfernung
$\gamma$	.....	Bündelungsgrad der Schallquelle

$Al_{cons} < 2\%$  ... sehr gute Sprachverständlichkeit

$Al_{cons} < 7\%$  ... gute Sprachverständlichkeit

$Al_{cons} < 20\%$  ... befriedigende Sprachverständlichkeit

$Al_{cons} > 20\%$  ... schlechte Sprachverständlichkeit

### 3.4 Absorber und Schallführende Elemente

In diesem Kapitel werden einige klassische und kombinierte Absorbermodelle und ihre Funktion kurz theoretisch erklärt.

#### 3.4.1 Poröse Absorber

Auch bekannt als *Asymmetrisch strukturierte Absorber (ASA)* in Keilformen an den Wänden von reflexionarmen Messräumen. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Faserabsorbieren und Schaumstoffabsorbieren.

Hier verliert der Schall seine Energie im Inneren des Absorbers durch Reibungs- und Wärmeverluste. Im Folgenden will ich kurz die wichtigsten Parameter und ihre Zusammenhänge aufzeigen [FBZ04].

Die *Porösität*  $\sigma$  (s. Gl. 3.10) beschreibt das Verhältnis von eingeschlossener Luft zu Absorbermaterial. Mit diesem Verhältnis lässt sich das *einfache Rayleigh-Modell* erstellen, bei dem die Wandimpedanz und der Absorptionsgrad allerdings nur bei senkrechtem Schalleinfall aussagekräftig sind.

$$\sigma = \frac{V_P}{V_A} \approx 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} < 1 \quad (3.10)$$

Für das *erweiterte Rayleigh-Modell* wird zusätzlich der *Strukturfaktor*  $\chi$  (s. Gl. 3.11) eingeführt, der das Verhältnis von gesamten Porenvolumen zu akustisch wirksamen Porenvolumen beschreibt. Für das erweiterte Rayleigh-Modell gilt  $\chi = \frac{3}{2}$ .

$$\chi = \frac{V_P}{V_{akP}} \geq 1 \quad (3.11)$$

Beim *Strömungswiderstand*  $\Xi$  (s. Gl. 3.12) ist abhängig von der Geometrie des Materials, sowie dessen Reibungseigenschaften und beschreibt die Schalldruckdifferenz (vor/nach der Probe) in Abhängigkeit von der Materialstärke und der Strömungsgeschwindigkeit.

$$\Xi = \frac{\Delta p}{d \cdot v} \quad \left[ \frac{Ns}{m^4} \right] \quad (3.12)$$

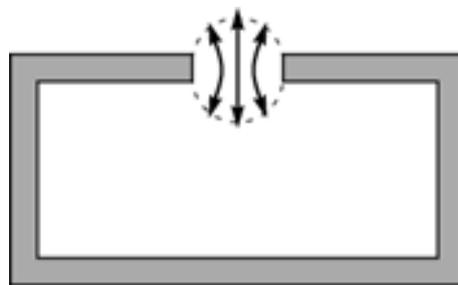
So ergibt sich für das erweiterte Rayleigh-Modell folgende *Wandimpedanz*  $\underline{W}$  (s. Gl. 3.13 mit der *Schallkennimpedanz*  $Z_0$  für Luft und der *Absorptionsgrad*  $\alpha$  (s. Gl. 3.14) [Wes08].

$$\underline{W} = Z_0 \cdot \frac{\sqrt{\chi}}{\sigma} \quad Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 \quad (3.13)$$

$$\alpha = \frac{4}{2 + \frac{\sigma}{\sqrt{\chi}} + \frac{\sqrt{\chi}}{\sigma}} \quad (3.14)$$

### 3.4.2 Helmholtzresonator

Ein Helmholtzresonator<sup>3</sup> besteht aus einem Volumen mit einer runden Öffnung der Querschnittsfläche  $A$  und des Radius  $r$ . Die Luft in der Öffnung ist die akustische Masse, das Volumen die akustische Feder. So ergibt sich im Idealfall genau eine Resonanzfrequenz und relativ schmalbandiger Arbeitsbereich.



**Abbildung 3.4:** Helmholtz-Resonator-Prinzip [DH98]

$$f_{res} = \frac{c_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V \cdot (l + 2\Delta l)}} \quad [Hz] \quad (3.15)$$

Mit  $\Delta l = 0,85 \cdot r$  als Mündungskorrektur und dem Durchmesser  $l = 2 \cdot r$  [WG07] [?].

<sup>3</sup> auch Helmholtzabsorber oder Lochabsorber genannt

### 3.4.3 Plattenresonator

Auch der Plattenresonator ist ein akustisches Feder-Masse-System, bei dem die einfallende Schallenergie durch Dämpfung reduziert wird. Durch variieren der Plattenfläche, der Plattenstärke und/oder der Tiefe des Absorbers kann die Resonanzfrequenz eingestellt werden, bei der der Absorber dann die größte Dämpfung aufweist.

$$f_{res} = \frac{51}{\sqrt{d \cdot m'}} \quad [Hz] \quad (3.16)$$

$m'$  steht hier für die spezifische Masse und wird in  $[\frac{kg}{m^2}]$  angegeben. Die Tiefe  $d$  des Absorbers in diesem Fall in  $[m]$ .

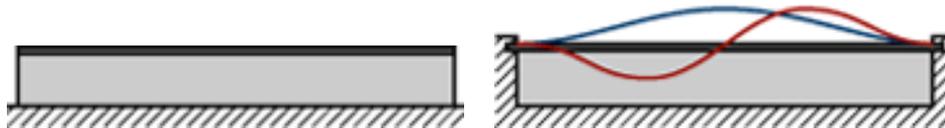


Abbildung 3.5: Plattenabsorber [DH98]

### 3.4.4 Diffusoren

Ein Diffusor zerstreut den einfallenden Schall im Idealfall so, dass ein diffuses Schallfeld entsteht und keine parallelen Reflexionen mehr auftreten. Hierfür werden meist uneben strukturierte Oberflächen herangezogen. Aber auch ein Bücherregal funktioniert oft sehr gut als Diffusor.

Sie werden häufig an Abhörpositionen in Tonstudios eingesetzt, da man dort die störenden Reflexionen von hinten auslöschen möchte [FXB04].

### 3.4.5 Reflektoren

Bei Räumen, in denen Reflexionen vorkommen, die eine Wegdifferenz von mehr als  $17m$  zurücklegen, bevor sie beim Hörer ankommen, kann es Sinn machen den Weg dieser Reflexionen mit Reflektoren zu verkürzen. So können Reflexionen, die eigentlich als Echo wahrgenommen werden in den Bereich der frühen Reflexionen verschoben werden. Auch Flatterechos oder stehende Wellen zwischen zwei parallelen Wänden können damit vermieden werden.

Dies führt oft zu einer Verbesserung der Verständlichkeit von Sprache und Musik, kann aber auch eine Verschlechterung des Seitenschallgrades oder des Raumeindrucksmaßes mit sich bringen [FXB04].

## 3.5 Kombinierte Schallabsorber und Stand der Forschung

Vor allem das Institut Bauphysik (IBP) der Fraunhofer-Gesellschaft, aber auch andere Forschungseinrichtungen und Hochschulen haben in den letzten Jahren die Entwicklung im Bereich von alternativen Absorbern und kombinierten Absorbern intensiv vorangetrieben.

### 3.5.1 Alternative poröse Absorber (ALFA)

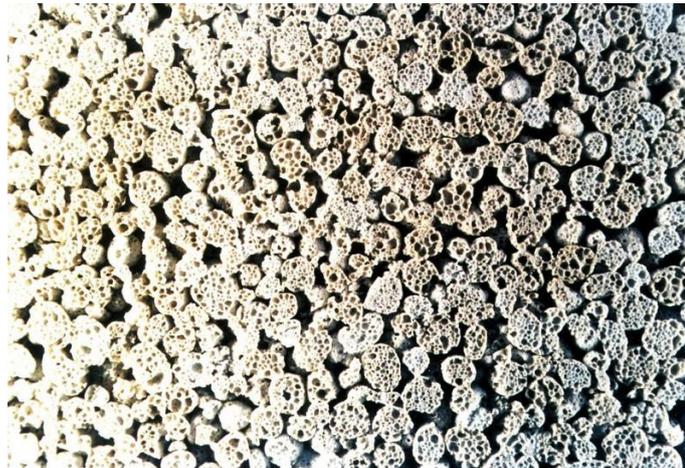
Bei der Weiterentwicklung der porösen Absorber ging es darum die Materialien so zu wählen, dass sie einen guten Kompromiss aus den folgenden Punkten bilden:

- Wartungsaufwand
- Chemische Beständigkeit
- Thermisches Verhalten und Grenzen der Einsatztemperatur
- Brennbarkeit und Entstehen toxischer Gase
- Physiologische Unbedenklichkeit
- Verarbeitbarkeit und Recyclingfähigkeit
- Kosten

Hierbei haben im Bereich der Schaumstoffe Melaminharzschäume und Mineralschäume gut abgeschnitten. Bei den Faserstoffen sind es Alu-Silikat-Verbindungen und Nadelfilze. Die Fraunhofer-Gesellschaft hat bei der Entwicklung ihrer *Alternativen faserfreien Absorber (ALFA)*, zum Beispiel auch beim Glasschaum REAPOR® (Abbildung 3.6), in bestimmten Frequenzbereichen sehr gute Ergebnisse erzielt und dieser wird fast durchweg aus Altglas hergestellt [BEK93] [WDS02].

### 3.5.2 Verbundplatten-Resonator (VPR)

Zur Gruppe der neu entwickelten Tiefenabsorbern zählt der Verbundplatten-Resonator. Er soll ähnlich wie ein Plattenresonator zur Glättung der Raumresonanzen beitragen.



**Abbildung 3.6:** REAPOR® Glasschaum

Das Maximum des Absorptionsgrades liegt bei diesen Absorbern zwischen 50 Hz und 500 Hz.

Aufgebaut ist der Absorber folgendermaßen: Eine Metallplatte dient als Membran, wie beim Plattenresonator, nur dass in diesem Fall ein Melaminharzschaum hinter der Metallplatte in einem Lochblechrahmen für eine zusätzliche Dämpfung sorgt. So ist der VPR nicht so tief, wie ein Plattenresonator, der den selben Frequenzbereich bedämpft. Außerdem lässt sich ein VPR sehr gut als Blackboard oder Magnettafel benutzen und ist relativ günstig herzustellen.

Auf den folgenden Bildern sieht man wie die Firma *Renz GmbH* Verbundplatten-Resonatoren als akustische Bilder realisiert hat [FBZ04] [FXB04].

### 3.5.3 Breitband-Kompakt-Absorber (BKA)

Bei diesem Absorbertyp wird ein VPR mit einem hochwirksamen porösen Absorber oder mit Keilen (ASA) kombiniert. So kann durch die Wirkung des Plattenresonators im VPR und der Schicht aus porösem Absorbermaterial erstmals ein annähernd konstanter Absorptionsgrad erreicht werden.

Die Absorber finden Anwendung beispielsweise in Messräumen, in denen ein sehr gleichmäßiger Verlauf des Absorptionsgrades und gleichzeitig eine sehr hohe Absorption vorhanden sein sollte.

Auch bei den BKA bietet die Firma *Renz GmbH* vielseitige Absorbermodelle an (siehe Anhang) [FBZ04] [FXB04].



**Abbildung 3.7:** VPR als akustische Bilder (Firma Renz-Systeme)

### 3.5.4 Mikroperforierte Absorber (MPA)

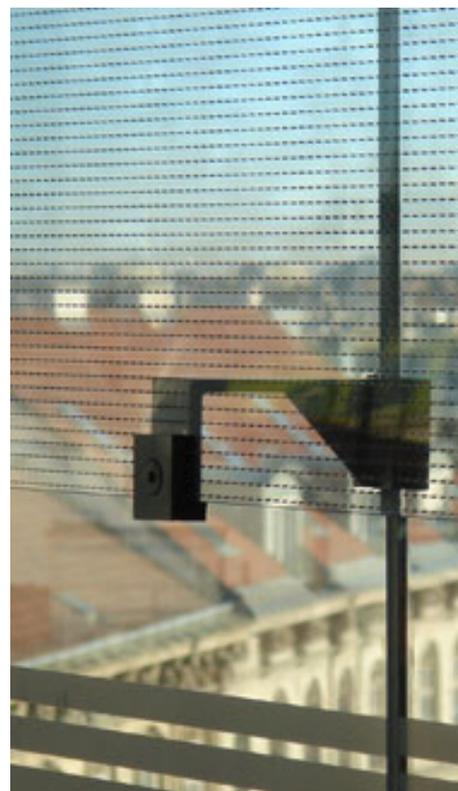
Folien oder Kunstglaselemente werden mit Löchern (Durchmesser: 0,2 mm bis 1 mm) perforiert. Wenn nun Schall auf die Löcher trifft entsteht eine Reibung und die Schallenergie wird in aWärmeenergie umgewandelt. Sie wirken prinzipiell wie ein Helmholtz-Resonator, nur ohne ein angehängtes Volumen.

Größere Materialstärken des Kunstglases und mehrschichtige Folien erhöhen die Absorption und durch das Verhältnis von Lochfläche zu Gesamtfläche, sowie durch Materialstärke und Lochdurchmesser lassen sich mikroperforierte Absorber für verschiedenste Frequenzbereich optimieren. Sie bieten eine sehr vielfältige Anwendung als Folien, Akustiksegel, Jalousien, Deckenabhängung, akustische Bilder, an Glasflächen oder als Kunstglas.

So vereint ein MPA Vorteile wie Transparenz, UV-Stabilität, das Einstellen verschiedener



(a) MICROSORBER®-Folie



(b) Mikroperforiertes Kunstglas

**Abbildung 3.8:** MPA der Firma *KAEFER Construction GmbH*

Frequenzbereiche und guten Brandschutz. Außerdem lassen sich Folien und Plexiglasplatten leicht und unauffällig montieren und haben ein relativ geringes Gewicht [ZZK94] [WF04] [FXB04].

## 4 Konferenzsaal

### 4.1 Die Räumlichkeiten

Der Konferenz- und Veranstaltungssaal des Palais Herberstein befindet sich im ersten Obergeschoss auf der westlichen Seite. Der Saal hat eine rechteckige Grundfläche, einen antiken Parkettboden und zwei Zugänge durch Glastüren. Der Stil des Raumes ist durch die verzierte Stuckdecke, die Stuckmarmorverkleidung der Wände und die Goldrahmen um Fenster und Spiegel geprägt.



**Abbildung 4.1:** Konferenzsaal

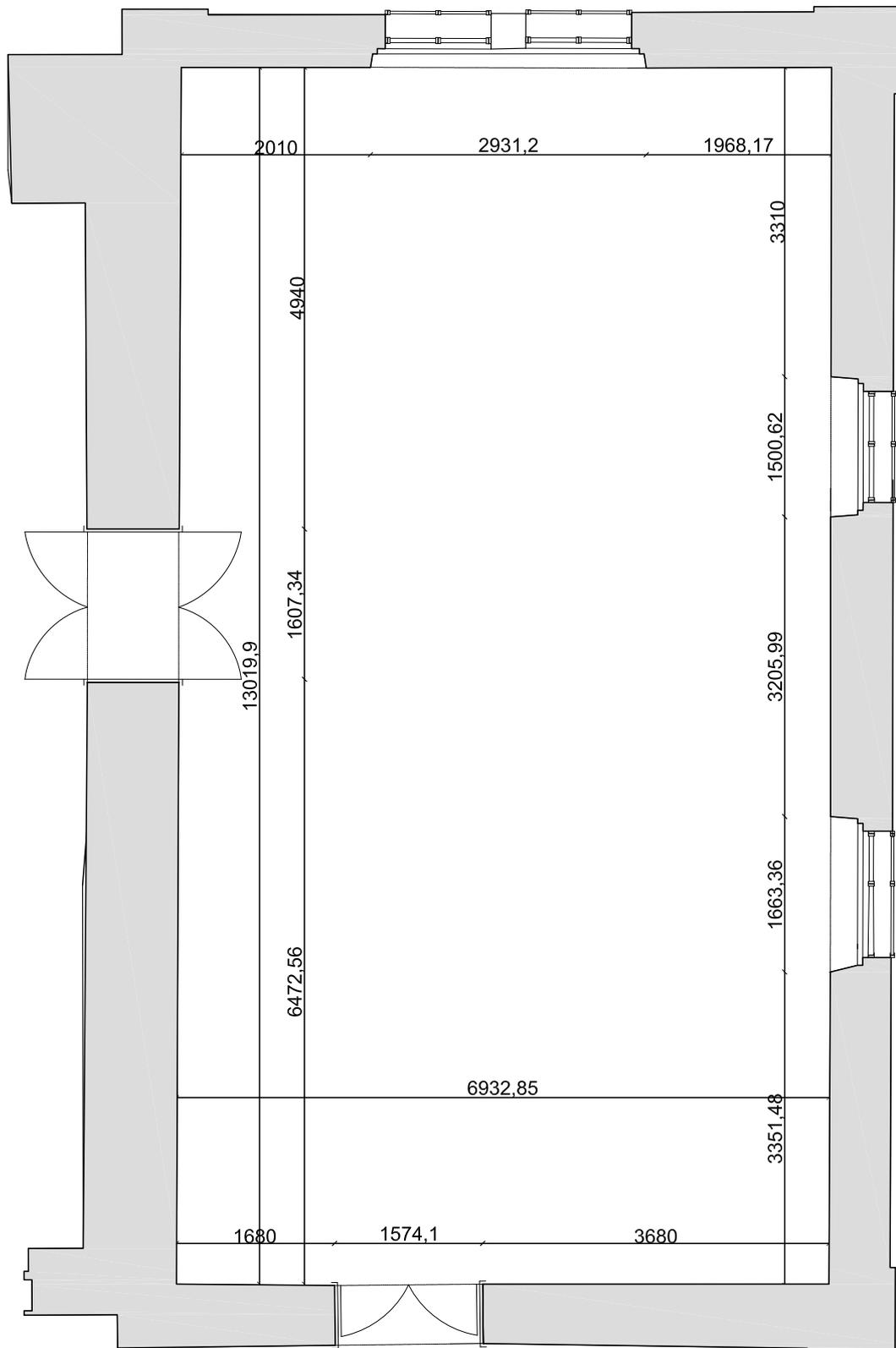
Im Saal steht meistens eine U-förmige Tischanordnung mit Bestuhlung (Polsterstühle) für Konferenzen, Besprechungen oder Präsentationen. Eine große, fest installierte

Leinwand mit Projektor, sowie eine PA-Anlage, Clipboards und ein Rednertisch gehören ebenso zum Inventar (s. Abb. 4.1). Für die Messung wurde das Inventar aus dem Raum entfernt und die Leinwand eingefahren (s. Abb. 4.2).



**Abbildung 4.2:** Konferenzsaal ausgeräumt (Messzustand)

Weiters gilt es zu erwähnen, dass die Maße des CAD-Plans, den ich von der Haustechnik erhalten habe, doch erheblich von den realen Maßen abweichen. Deshalb habe ich alle Maße mit dem Laserabstandsmesser nachgemessen und den Plan für den Konferenzsaal überarbeitet und korrigiert (s. Abb. 4.3).



**Abbildung 4.3:** Grundriss vom Konferenzsaal (korrigiert)

## 4.2 Durchführung der Messung

Im Messplan sind die Positionen der Quelle mit Q1 bzw. Q2 bezeichnet. Die Mikrofonpositionen sind von M1 bis M11 durchnummeriert, wobei die Position M11 bei der Messung mit Q1 und die Position M10 bei der Messung mit Q2 weggelassen wurde. Daraus ergeben sich dann fünf Messungen mit je zwei Mikrofonen pro Quellposition.

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Personen im Raum bei einer Konferenz oder Präsentation Zuhörer sind und somit sitzen werden, wurde eine Mikrofonhöhe von  $1,2m$  gewählt.

Die Höhe des Dodekaeders konnte leider nicht auf die gewünschte Höhe von  $1,7m$  (entspricht etwa der Kopfhöhe einer stehenden Person) gebracht werden, da sich das Stativ nicht weiter ausfahren lies. So hatte die Quelle (Mittelpunkt des Dodekaeders) eine Höhe von  $1,35m$ .

Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 zeigen die beiden Positionen des Dodekaeders im Konferenzraum.



**Abbildung 4.4:** Die Quelle steht vorne auf Höhe der Leinwand

Nach dem Messaufbau wurden die beiden Mikrofone eingepegelt und kalibriert. Hierfür wurde er Kalibrator auf  $94\text{ dB}$  bei  $1\text{ kHz}$  (quarzugesteuerter Oszillator) eingestellt und



**Abbildung 4.5:** Die Quelle steht etwa in der Mitte des Raumes

auf die Mikrofone gesteckt. Nun stellt die Messsoftware WinMLS die Eingangspegel so ein, dass die *Absoluten Schalldruckpegel* gemessen werden.

Die Bestimmung der Länge der MLS-Sequenz erfolgt aufgrund einer Testmessung. Die Impulsantwort muss vollständig ausschwingen können und dafür sollte eine maximale Nachhallzeit abgeschätzt werden. Da ich aufgrund der Simulation des leeren Raumes schon vorgewarnt war, dass mich lange Nachhallzeiten erwarten werden, bin ich lieber auf Nummer sicher gegangen und habe für den Konferenzraum eine MLS-Sequenz von  $8s$  Länge gewählt, die sich vier mal wiederholt und man somit auf eine effektive Messdauer von  $32s$  pro Messung kommt.

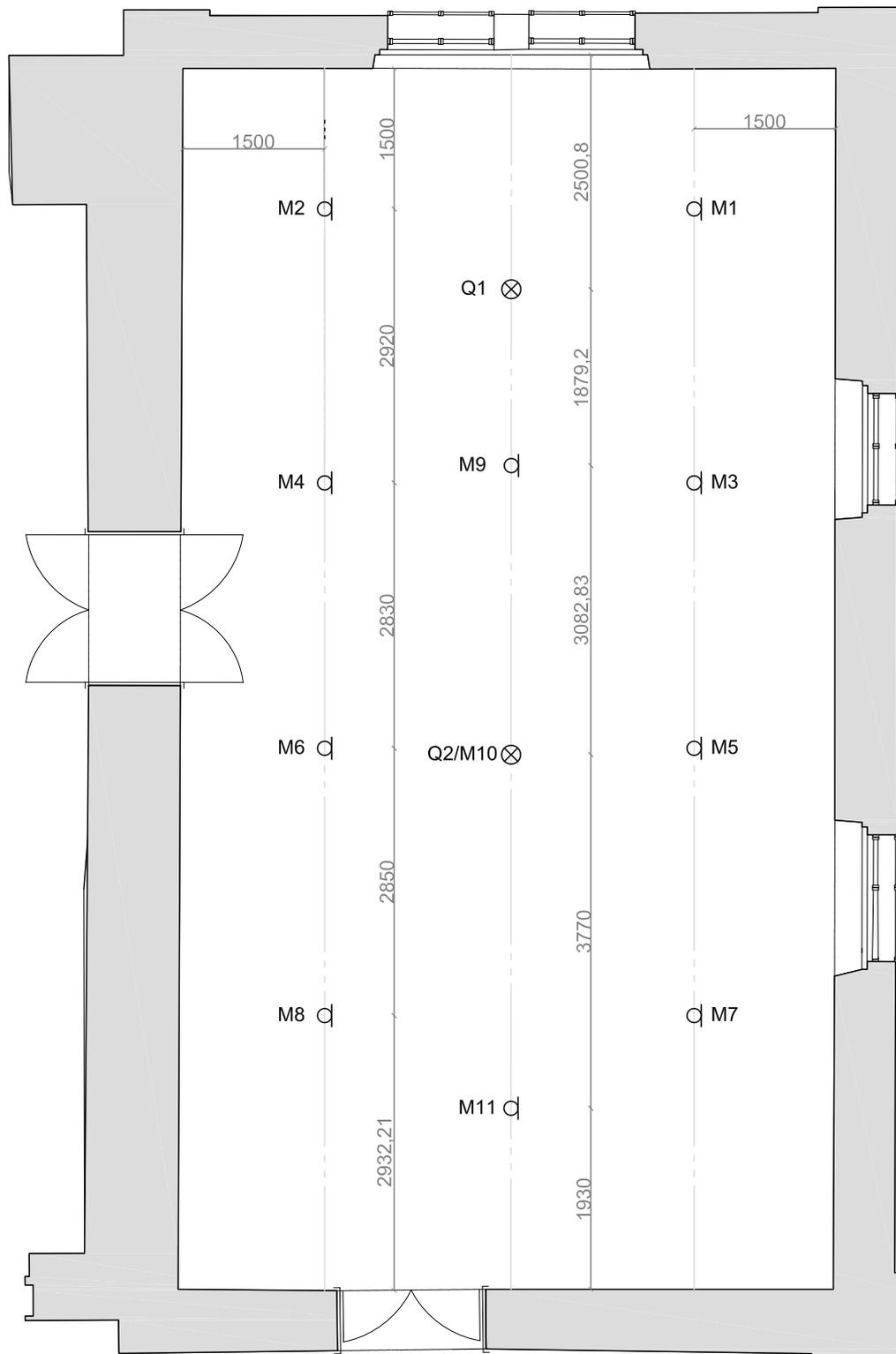


Abbildung 4.6: Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen

### 4.3 Messergebnisse

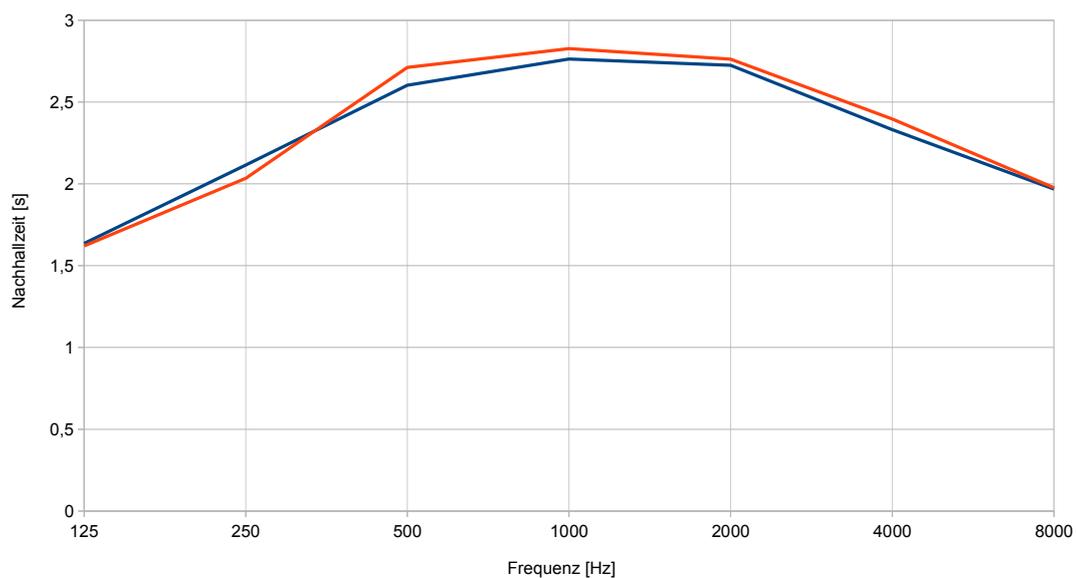
Die Messergebnisse wurden aus *WinMLS* exportiert und teilweise in einem Tabellenkalkulationsprogramm neu gemittelt und dargestellt.

Ich beschränke mich hierbei auf die für diese Situation relevanten raumakustischen Gütemaße (Nachhallzeit in Terz- und Oktavbändern, STI, RASTI und Deutlichkeitsgrad), jeweils für beide Quellpositionen angegeben.

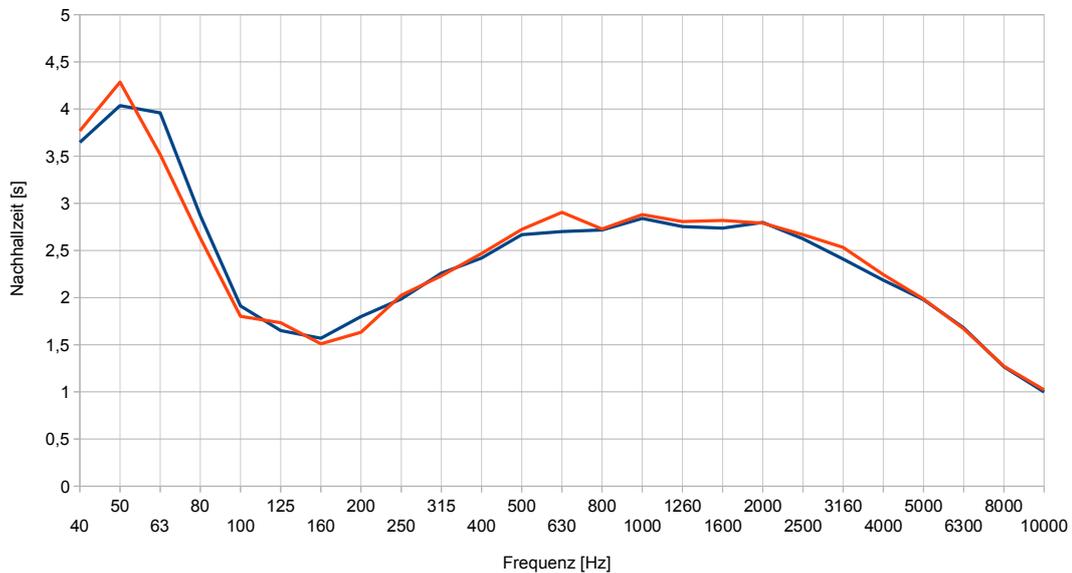
Man erkennt bei beiden Frequenzauflösungen und beiden Quellpositionen deutlich die Überhöhung im tiefen Frequenzbereich, in dem bei etwa 50 Hz Nachhallzeiten um die 4s erreicht werden. Auch sonst gleichen sich die Messungen der zwei Quellpositionen sehr, denn die maximale Abweichung voneinander beträgt etwa 0,2s (s. Abb. 4.7 und Abb. 4.8).

Vor allem bei der Nachhallzeit gibt es bei den Messwerten kaum Unterschiede zwischen den Mikrofonpositionen, was bedeutet, dass sich die Schallenergie sehr gleichmäßig im Raum verteilt.

Was besonders negativ auffällt ist die lange Nachhallzeit von ca. 2,8s im sprachrelevanten Bereich zwischen 500 Hz und 2000 Hz, die auch für die schlechten Werte der Sprachverständlichkeit verantwortlich ist.



**Abbildung 4.7:** Nachhallzeit T30 (Oktavbänder) gemittelt für beide Quellpositionen (blau: Q1 | rot: Q2)



**Abbildung 4.8:** Nachhallzeit T30 (Terzbänder) gemittelt für beide Quellpositionen (blau: Q1 | rot: Q2)

In den Abbildungen 4.9, 4.10 und 4.11 sind die Werte für den Speech Transmission Index (STI), den Rapid Speech Transmission Index (RASTI) und den Deutlichkeitsgrad (D50) eingezeichnet. Die Punkte, an denen die Werte stehen symbolisieren den Messmikrofonstandort im Raum und der erste Wert steht jeweils für die Messung an der Quellposition 1 und der zweite Wert für die an Quellposition 2.

Wie man sieht liegen die Werte für den STI und den RASTI an alle Positionen unter 0,5 und an einigen sogar unter 0,4 was bedeutet, dass die Sprachverständlichkeit durchweg als schlecht zu bewerten ist.

Auch wenn man sich den Deutlichkeitsgrad D50 anschaut sieht man schnell, dass hier eine schlechte Deutlichkeit vorliegt, da die Werte mit 20–36% weit unter den 50% liegen und für einen Raum, in dem Konferenzen und Vorträge stattfinden sollen, die Werte auf jeden Fall über dieser Grenze liegen müssen.

Insgesamt habe ich durchaus mit diesen schlechten Werten gerechnet, da man schon beim Betreten des Raumes ein Gefühl für die Akustik bekommt und man merkt, dass man sogar seine eigene Stimme schlecht versteht.

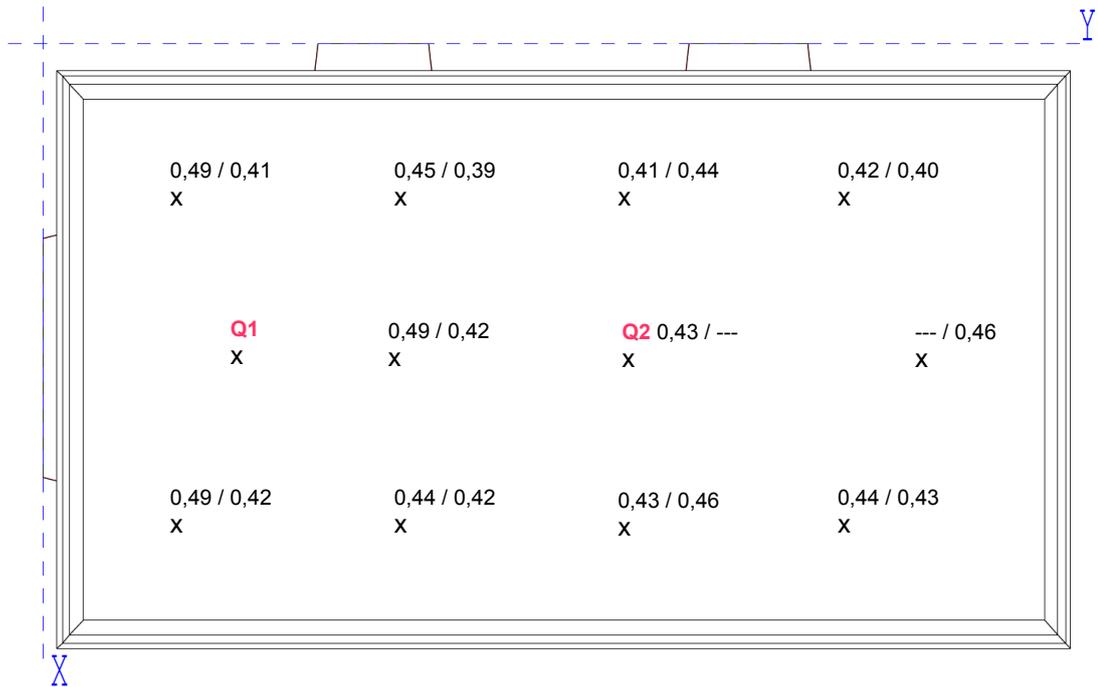


Abbildung 4.9: Messwerte für STI (Q1/Q2)  
0 ... STI ... 1

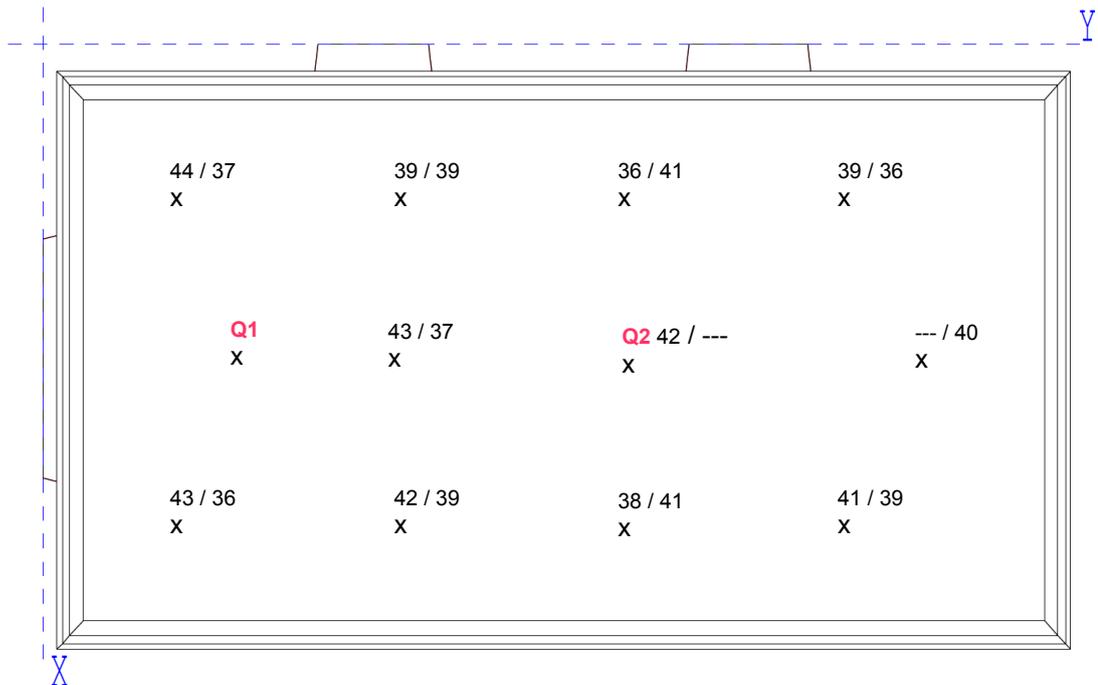
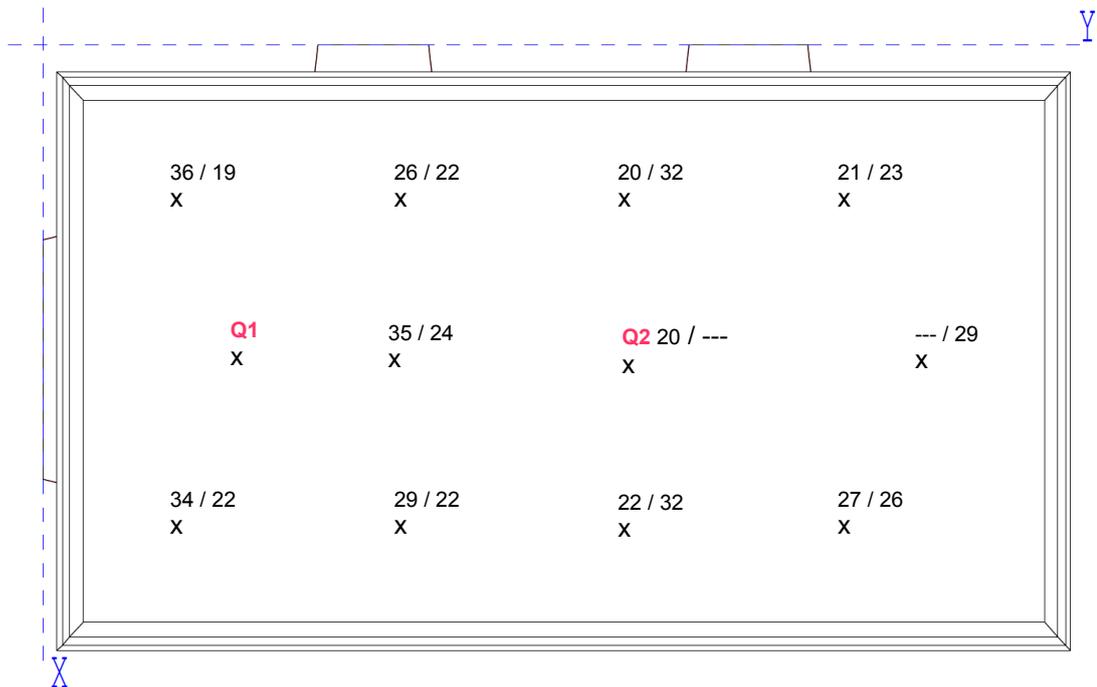


Abbildung 4.10: Messwerte für RASTI (Q1/Q2) [%]



**Abbildung 4.11:** Messwerte für den Deutlichkeitsgrad (Q1/Q2) [%]

## 4.4 Erstellung des Simulationsmodells

Für die Simulation des Konferenzsaals wurde das Computerprogramm CATT-Acoustic<sup>4</sup> verwendet. Mit dessen Hilfe lässt sich ein 3D-Modell des Raumes erstellen, bei dem die verschiedenen akustisch wirksamen Oberflächen mit eingebunden werden.

In das Modell können dann Sender und Empfänger eingebracht werden, um eine Simulation durchzuführen.

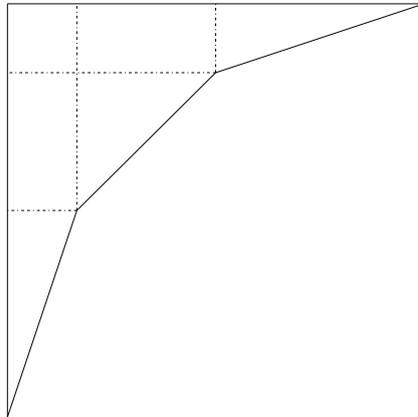
### 4.4.1 3D-Modell

Die Konstruktion eines Raumes in CATT-Acoustic basiert auf der Definition von Raumpunkten (drei Koordinaten) und der Verbindung dieser Raumpunkte zu Flächen.

Aufgrund dieser etwas eingeschränkten Möglichkeiten bei der Konstruktion habe ich einige Vereinfachungen vorgenommen. So ist beispielsweise nicht jede kleine Kante des Fensterrahmens oder der Stuckdecke umgesetzt worden und die Rundung beim Über-

<sup>4</sup> Raumakustisches Simulationsprogramm

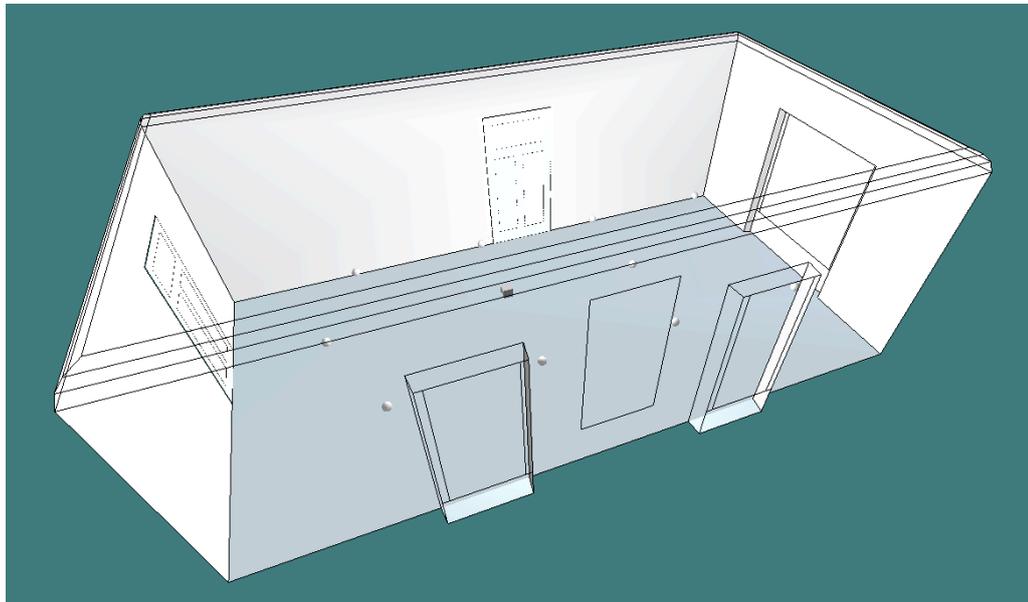
gang von den Wänden zur Decke wurde durch drei Flächen approximiert (s. Abb. 4.12).



**Abbildung 4.12:** Approximation der Rundung

Mit dem 3D-Modell als Basis für die Simulation werden nun im nächsten Kapitel noch die akustisch relevanten Oberflächen definiert und mit den Koordinaten der Mikrofon- und Quellpositionen kann dann die Simulation durchgeführt werden.

Der modellierte Raum mit den Mikrofonpositionen der Messungen ist in den folgenden Abbildungen zu sehen (Abb. 4.13 und Abb. 4.14).



**Abbildung 4.13:** 3D-Modell des Konferenzraumes

Die Auf- und Grundrisse mit Quell- und Mikrofonpositionen ist in folgender Abbildung zu sehen (Abb. 4.15).

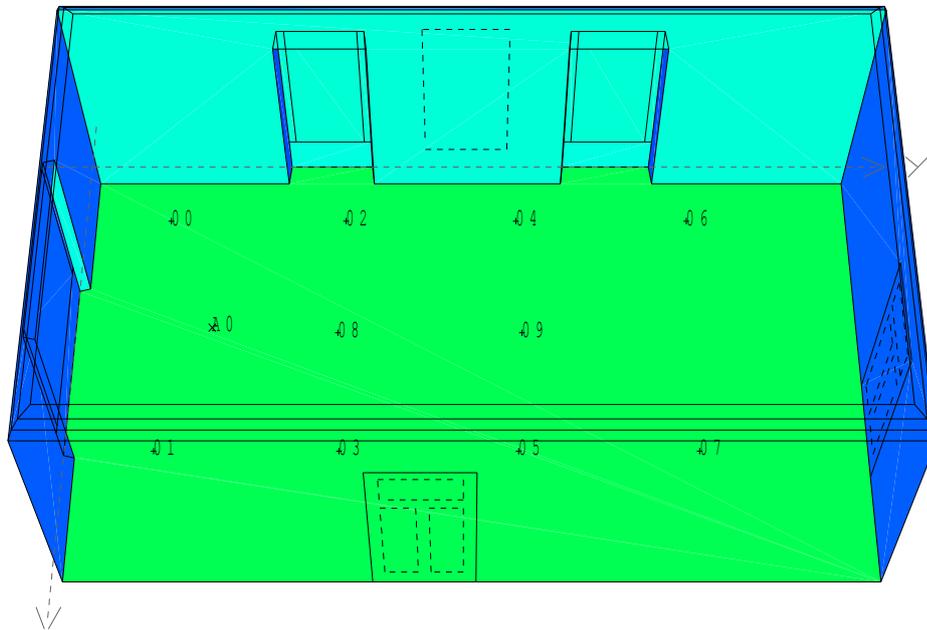


Abbildung 4.14: 3D-Modell mit Mikrofonpositionen

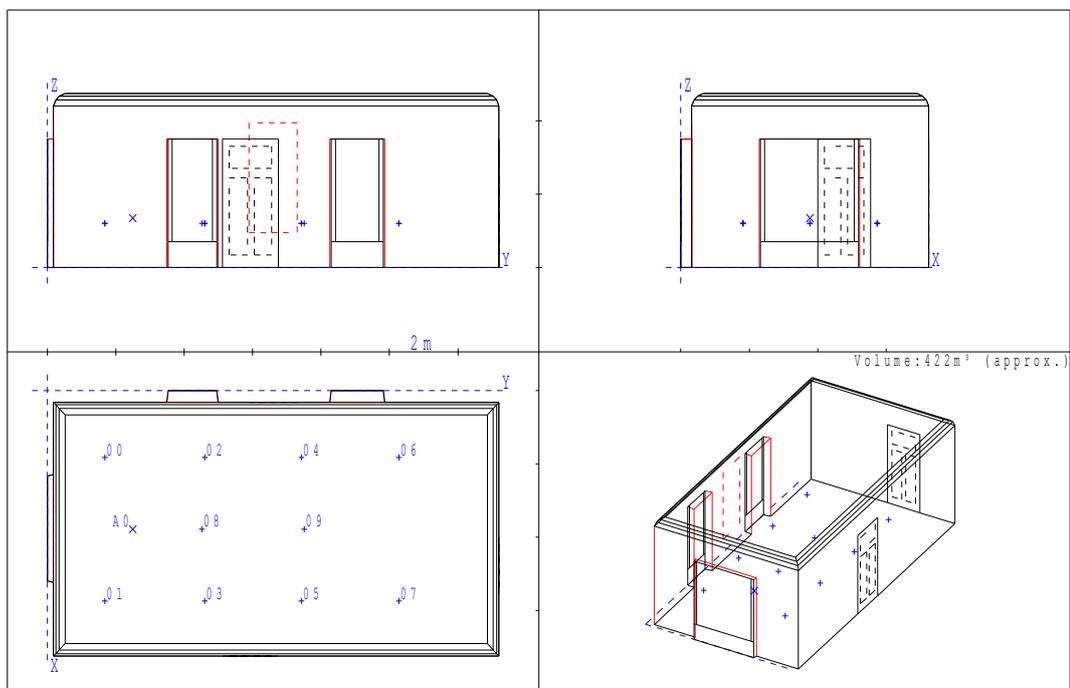


Abbildung 4.15: Auf- und Grundrisse

#### 4.4.2 Akustisch relevante Oberflächen

Für die verschiedenen Oberflächen wurden die Werte der Absorptionsgrade aus zwei unterschiedlichen bauakustischen Tabellen gewählt.

Die Bestimmung der Absorptionsgrade für das Holz von Parkett und Türen ist nicht ganz einfach, da man die genaue Beschaffenheit des Parketts und des Bodens darunter nicht kennt. Für andere Oberflächen wie den Stuckmarmor oder das Glas der Türen findet man exaktere Angaben zu den Absorptionsgraden.

Auch die Tatsache, dass die Simulation im unbesetzten Zustand, d. h. ohne Personen im Raum durchgeführt wird gilt es zu erwähnen. Dies habe ich so gewählt, da bei der Messung auch der leere Raum Messobjekt war und sonst Messung und Simulation nicht verglichen werden können.

Die Tabelle (Tab. 4.1) zeigt die von mir gewählten Werte für die Absorptionsgrade der akustisch relevanten Oberflächen meiner Simulation. Hierbei wurde der Spiegel auch mit dem Absorptionsgrad von Glas simuliert.

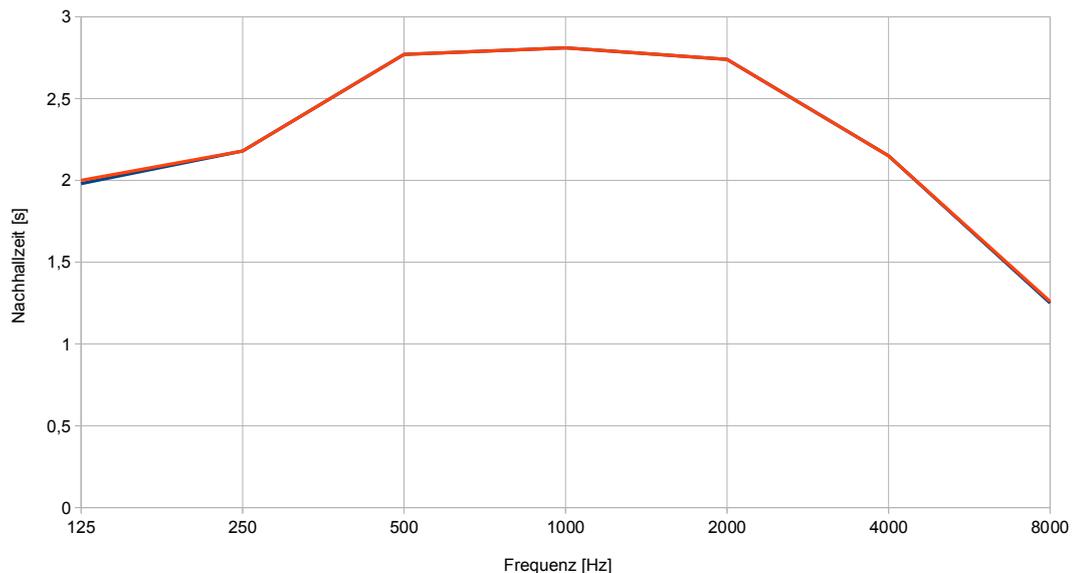
**Tabelle 4.1:** Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Parkett</b>	24	19	14	12	9	8
<b>Stuckputz</b>	5	6	6	6	6	4
<b>Stuck</b>	5	7	6	6	6	3
<b>Türholz</b>	18	14	6	10	12	7
<b>Stuckmarmor</b>	3	3	2	2	2	1
<b>Glas</b>	8	5	3	2	2	1
<b>Holz</b>	22	16	12	19	8	7

Weiters mussten einige Einstellungen in CATT-Acoustic durchgeführt werden. Der *Scattering-Faktor* wurde so eingestellt, dass er zu den hohen Frequenzen etwas ansteigt, was der Diffusion der Schallwellen an den Oberflächen in Abhängigkeit des Absorptionsgrades nahe kommt. Wenn hier keine Korrektur vorgenommen wird, stimmen bei niedrigen Absorptionsgraden und niedrigen Scattering-Faktoren die simulierte Nachhallzeit  $T_{30}$  und die errechneten Nachhallzeiten nach *Eyring* und *Sabine* nicht mehr überein [HB08].

## 4.5 Simulationsergebnisse

Simuliert wurde mit den beiden Quellpositionen und den selben Mikrofonpositionen, die auch bei der Messung verwendet wurden, um die Simulation bestmöglich mit der Messung zu vergleichen.



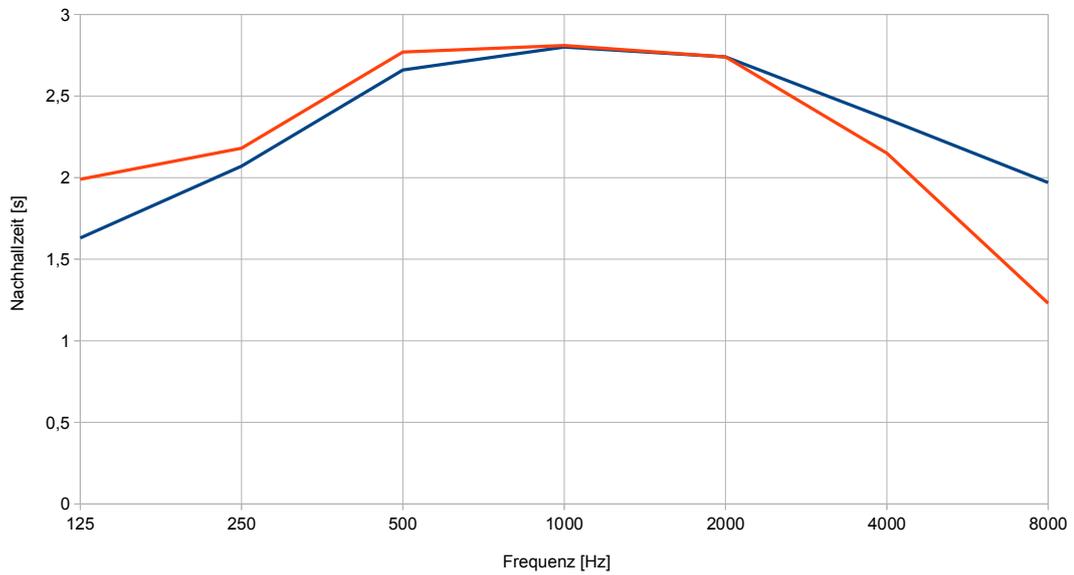
**Abbildung 4.16:** Simulierte Nachhallzeit [s] beider Quellpositionen (blau: Q1 | rot: Q2)

Wenn man sich die Werte aus Abbildung 4.16 genau anschaut, sieht man sofort, dass hier die Simulationen beider Quellpositionen annähernd ident sind.

Nun galt es die Werte der simulierten Nachhallzeit an die der Messung anzupassen, was mit den Absorptionsgraden aus Tabelle 4.1 schon relativ gut passte. Denn nur wenn Messung und Simulation überein stimmen, liefern die simulierten Optimierungsvorschläge auch sinnvolle Ergebnisse (s. Abb. 4.17).

Weiters sind in den Abbildungen 4.18, 4.19 und 4.20 die Simulationenwerte für den Speech Transmission Index (STI), den Rapid Speech Transmission Index (RASTI) und den Deutlichkeitsgrad (D50) zu sehen.

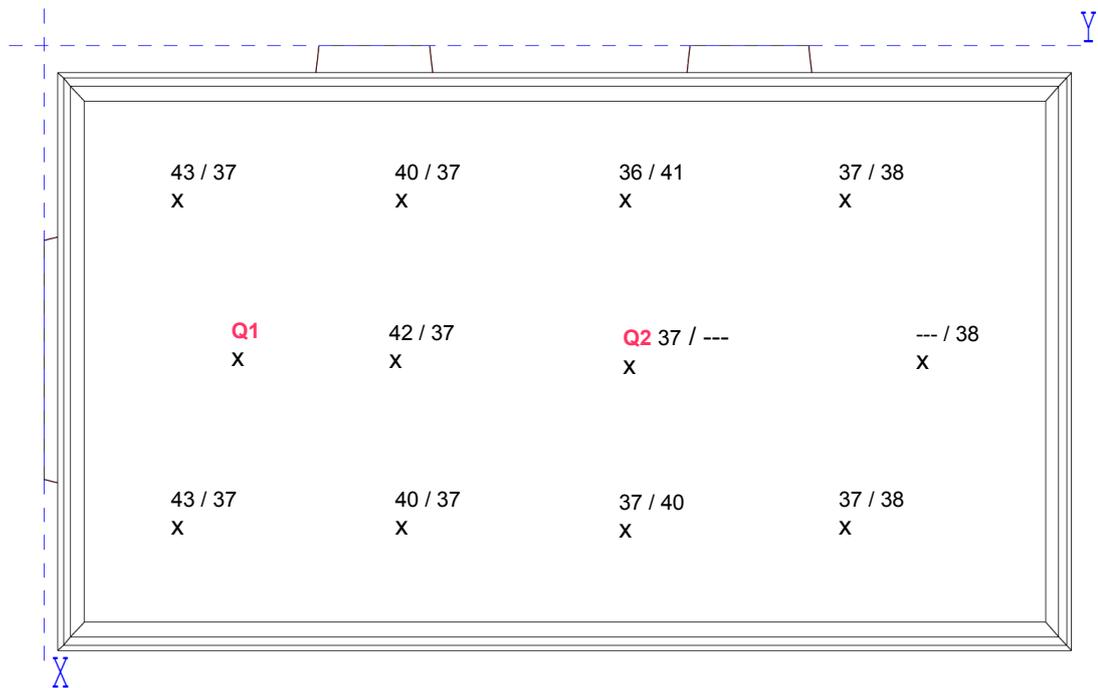
Und auch hier sind Messung und Simulation im direkten Vergleich jetzt sehr ähnlich. Bei allen drei Gütemaßen sind die Abweichungen fast zu vernachlässigen, da die Abweichung meist nur 1 – 2% beträgt.



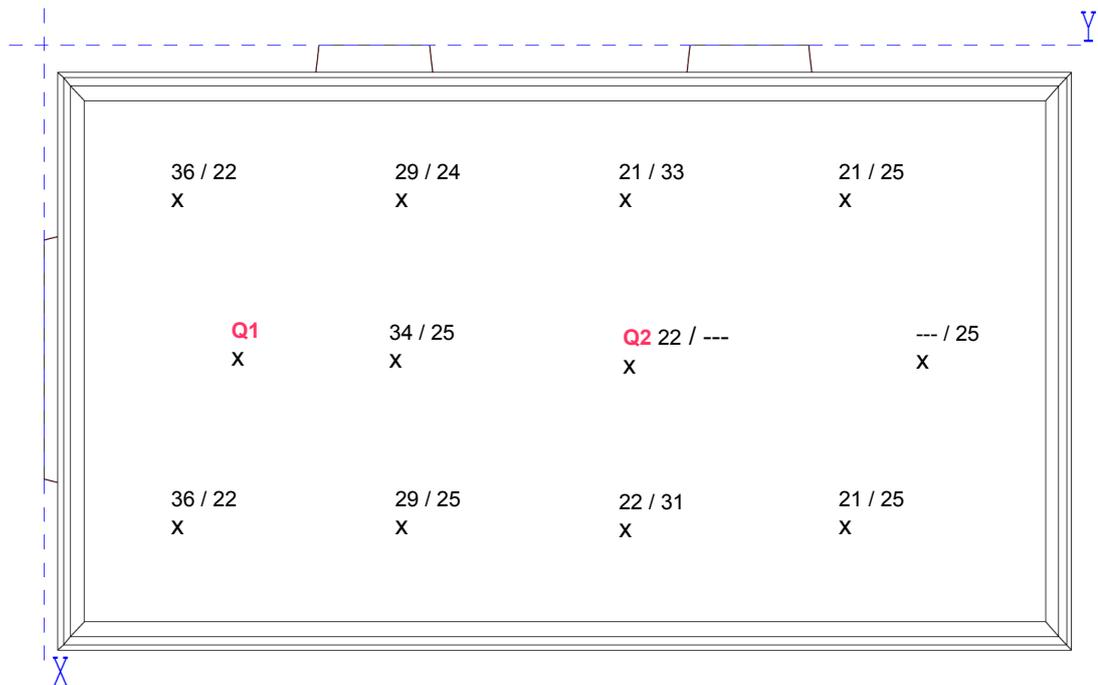
**Abbildung 4.17:** Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich  
(blau: **Messung** | rot: **Simulation**)



**Abbildung 4.18:** Simulationswerte für STI (Q1/Q2)  
0 ... STI ... 1



**Abbildung 4.19:** Simulationswerte für RASTI (Q1/Q2) [%]



**Abbildung 4.20:** Simulationswerte für den Deutlichkeitsgrad (Q1/Q2) [%]

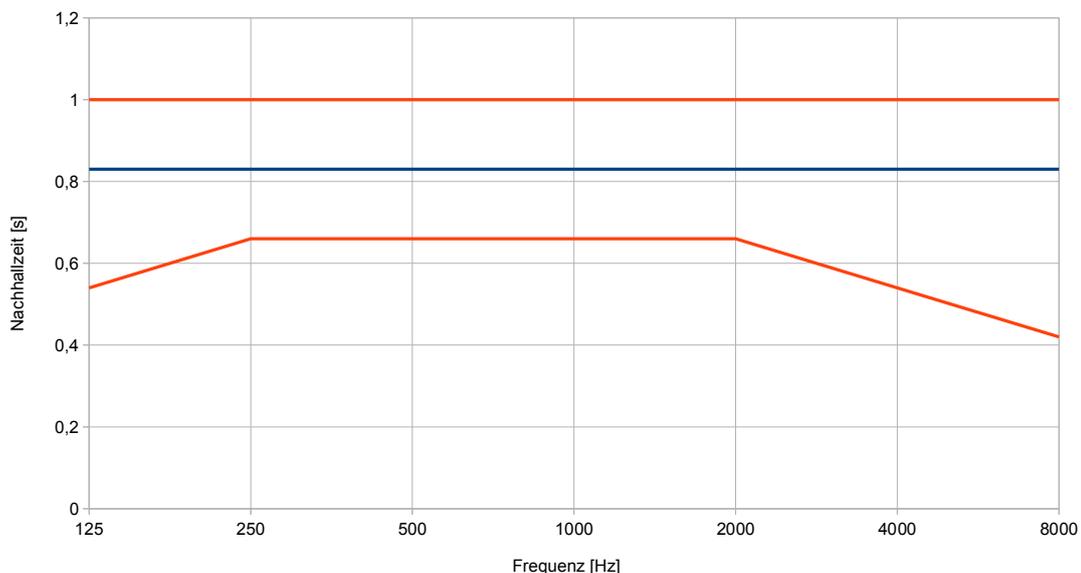
Mit diesen Simulationsergebnissen für den leeren Raum können nun im nächsten Kapitel die Optimierungsvorschläge simuliert werden.

## 4.6 Optimierungen

Die optimale Nachhallzeit für Sprache berechnet sich aus folgender Formel und ist vom Volumen abhängig [Fuc03]:

$$T_{opt} = (0,37 \cdot \log \frac{V}{m^3} - 0,14) \quad [s] \quad (4.1)$$

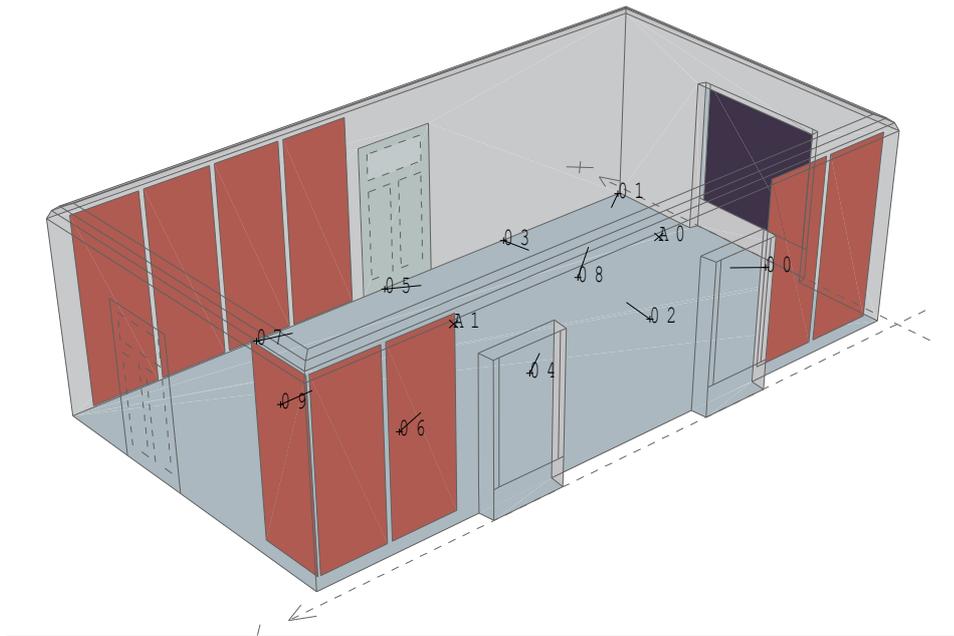
Mit einem Volumen von  $422m^3$  ergibt sich für den Konferenzraum eine optimale Nachhallzeit von  $0,83s$ . Siehe Abbildung 4.21.



**Abbildung 4.21:** Optimale Nachhallzeit (**blau**) mit Toleranzgrenzen (**rot**)

Um diese Nachhallzeitwerte und damit die Verbesserung der Sprachverständlichkeit zu erreichen wurden nun vier verschiedene Optimierungen mit CATT-Acoustic simuliert. Die Absorbermaterialien wurden aufgrund ihrer Eigenschaften wie Absorptionsgrad (s. Tabelle 4.2) und Brandschutzklasse, sowie nach ihrem optischen Erscheinen und ihrer Befestigung (wichtig bei Beachtung des Denkmalschutzes) ausgewählt. Alle Datenblätter und Bilder sind im Anhang zu finden.

In den Abbildungen 4.22, 4.23 und 4.24 ist das Modell mit den möglichen Optimierungen zu sehen.



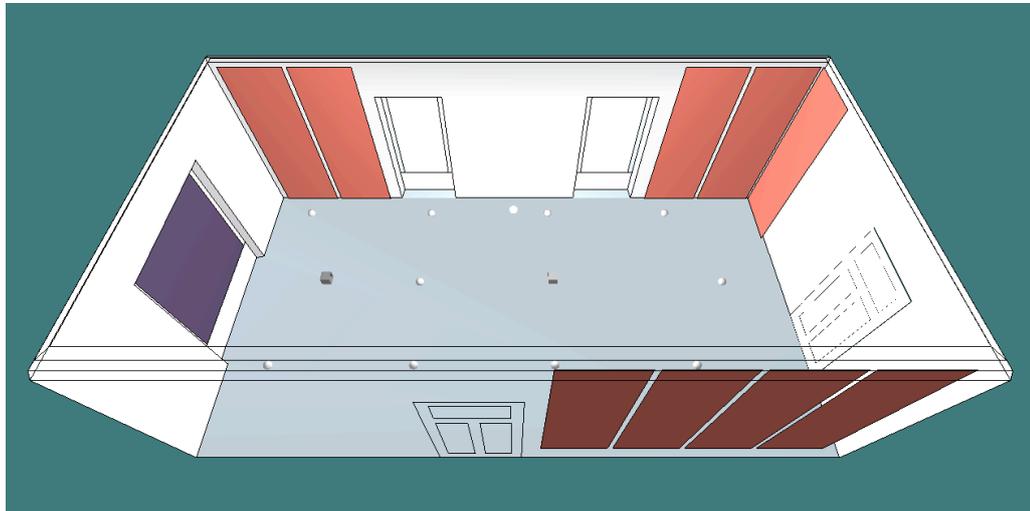
**Abbildung 4.22:** Modell vom Konferenzraum mit Optimierungen

Im Folgenden werden kurz die Absorber und Vorhänge, die für diese Simulationen verwendet wurden vorgestellt (im Anhang sind die genauen Produkt- und Datenblätter zu finden):

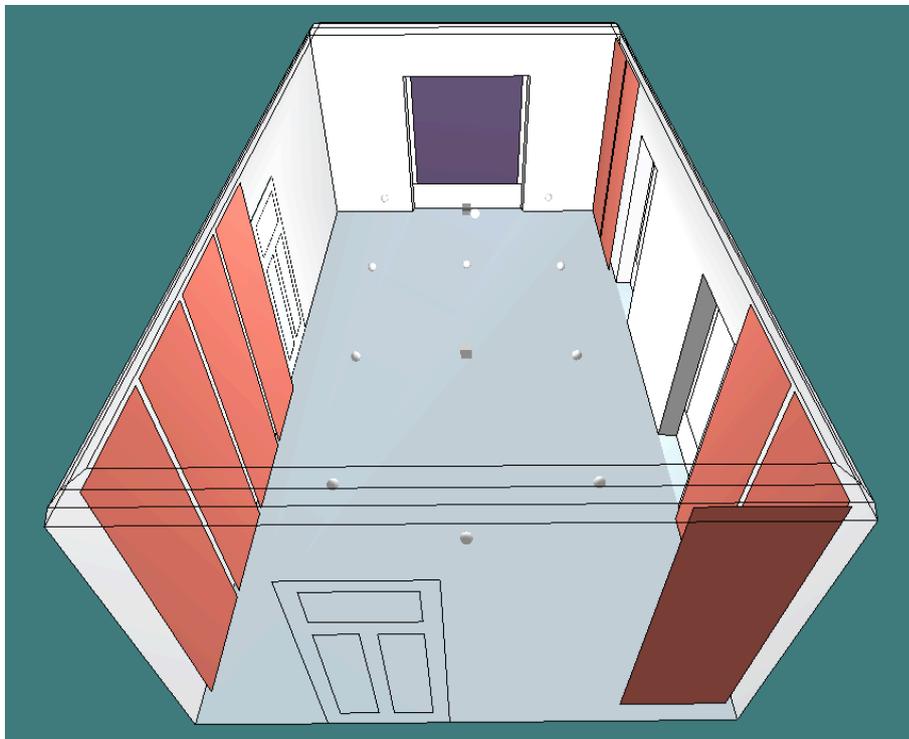
Der Akustikboden ist ein Hohlraumboden der Firma *LINDNER* aus Arnstorf / Deutschland. Die genaue Bezeichnung lautet *Floor and more<sup>®</sup> acoustic3* und ist in der Aufbauhöhe variabel, sowie mit verschiedensten Materialien belegbar. Für die Simulationen hier wurde ein Nadelvlies gewählt.

Der Breitband-Kompakt-Absorber (BKA) der Firma *RENZ-Systeme*, der in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut entwickelt wurde, lässt sich in verschiedenen Größen und sogar mit verschiedenen Frontmaterialien anfertigen.

Die Mikroperforierten Folien der Firma *KAEFER Construction GmbH* werden unter der



**Abbildung 4.23:** Modell vom Konferenzraum mit Optimierungen



**Abbildung 4.24:** Modell vom Konferenzraum mit Optimierungen

Gruppe der *MICROSORBER*<sup>®</sup> in Bremen / Deutschland gefertigt und sind entweder als Folien oder als fertige Rollos in verschiedenen Größen zu bestellen.

Um einen besseren Vergleich anstellen zu können, habe ich zwei verschiedene Vorhänge ausgewählt und zusätzlich für den *STREAMER* der Firma *Douglas-Textiles* aus der Schweiz auch noch den glatt hängenden Zustand und den Zustand mit 100% Faltenwurf simuliert.

Der zweite Vorhang ist das Modell *AV20* der Firma *mb akustik* mit Sitz in Osnabrück / Deutschland.

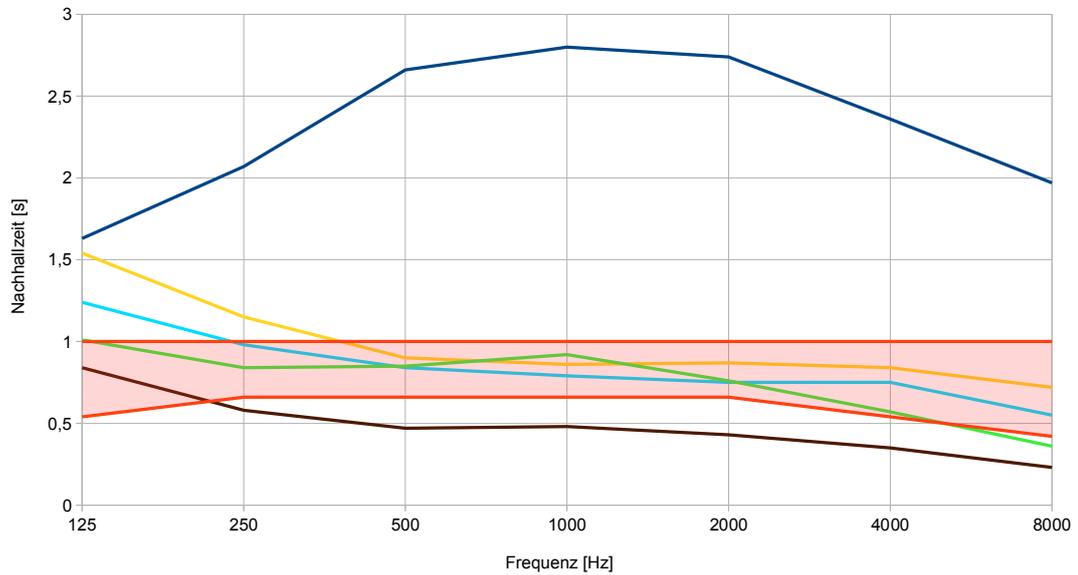
Beide Vorhänge sind in verschiedenen Farbtönen und auf Größenzuschnitt lieferbar.

**Tabelle 4.2:** Absorptionsgrade der Absorber [%]

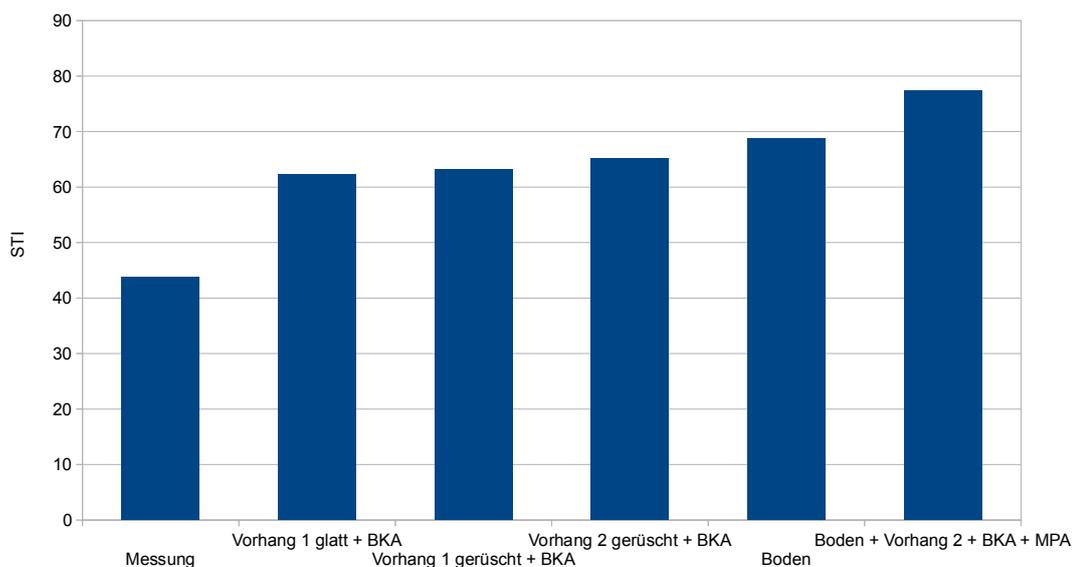
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Bodenkonstruktion</b>	56	68	70	58	68	83
<b>Vorhang 1 glatt</b>	4	26	66	73	74	72
<b>Vorhang 1 gerüsch</b>	6	32	70	76	78	81
<b>Vorhang 2 gerüsch</b>	17	45	76	89	91	88
<b>BKA</b>	85	99	97	99	99	75
<b>MPA-Rollos</b>	3	14	45	65	31	37

Die Simulationen mit verschiedenen Kombinationen dieser Absorber und Vorhänge führen alle zu einer raumakustischen Verbesserung. Es ist dann eine Frage der Optik und der Kosten eine geeignete Kombination auszuwählen.

Abbildung 4.25 zeigt die verschiedenen Nachhallzeiten der Simulationen in Vergleich und Abbildung 4.26 vergleicht die Simulationswerte des Sprachverständlichkeitsindex (STI) der verschiedenen Optimierungen. Als Referenz sind auch die Messwerte und das Toleranzband der optimalen Nachhallzeit nochmals eingezeichnet.



**Abbildung 4.25:** Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen  
**blau:** Messung | **gelb:** Vorhang 1 glatt + BKA | **türkis:** Vorhang 2 gerüsch + BKA | **grün:** Akustikboden |  
**braun:** Akustikboden + Vorhang 2 gerüsch + BKA + MPA || **rot:** Toleranzgrenzen der optimalen Nachhallzeit



**Abbildung 4.26:** Vergleich des STI aller simulierten Optimierungen

## 4.7 Kosten

Für die Kostenkalkulation habe ich jetzt nur die reinen Materialkosten der Absorber und Vorhänge erarbeitet. Die Kosten für Anlieferung und Montage müssen hierzu noch addiert werden.

Für eine Lösung mit dem *LINDNER Akustikboden Floor and more<sup>®</sup> acoustic3* mit Nadelvlies-Belag veranschlagt die Firma 217 EUR pro  $m^2$ . Das macht bei der Grundfläche des Konferenzsaales von  $90 m^2$  einen Gesamtpreis von **19530 EUR**. Für die Montage und die Lieferung des Bodens veranschlagt die Firma ca. **3950 EUR**.

Zwei Breitband-Kompakt-Absorber der Firma *RENZ-Systeme* mit einer Größe von je  $2,7m \times 1m$  kosten zusammen **1202 EUR**. Montagekosten hierfür liegen etwa bei **150 EUR**.

Für die lichtdurchlässigen, mikroperforierten Folien-Rollos der Firma *KAEFER Construction GmbH* habe ich auf meine Preisanfrage leider keine Rückmeldung bekommen.

Und die 9 Vorhänge à  $1,35m$  Breite der Firma *mb akustik* kosten im glatt hängenden Zustand **3622 EUR** und im Zustand mit 100% Faltenwurf das Doppelte, also **7245 EUR**, da doppelt so viel Stoff nötig ist. Für die Montage der Vorhänge muss mit etwa **400 EUR** gerechnet werden.

Die Schweizer Firma *Douglas-Textiles* konnte leider keine Preisangaben zu ihrem Produkt *STREAMER* machen.

Wenn man nun die Resultate der Optimierungen betrachtet, ist für mich die Lösung mit den Vorhängen der Firma *mb akustik* kombiniert mit den Breitband-Kompakt-Absorbern der Firma *RENZ-Systeme* hinter der Leinwand am sinnvollsten, da der Akustikboden doch relativ teuer sein wird und der Raum durch eine Verkleidung des Parketts einiges von seinem Charakter einbüßt.

Andererseits würde ein solcher Akustikboden die Möglichkeit bieten Strom- und Netzwerkleitungen für Konferenzen darunter zu verlegen.

So würden sich die Materialkosten wie folgt zusammen stellen:

**Tabelle 4.3:** Kostenrechnung Variante 1

	<b>Firma</b>	<b>Größe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Kosten</b>
<b>AV20 gerüsch</b>	mb akusik	4,2m x 2,7m	9	7.245 EUR
<b>BKA</b>	Renz-Systeme	2,7m x 1m	2	1.120 EUR
<b>Montage</b>				ca. 550 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				<b>8.915 EUR</b>

**Tabelle 4.4:** Kostenrechnung Variante 2

	<b>Firma</b>	<b>Größe</b>	<b>pro m<sup>2</sup></b>	<b>Kosten</b>
<b>Akustikboden</b>	LINDNER	90m <sup>2</sup>	185 EUR	16.650 EUR
<b>Nadelvliesbelag</b>	LINDNER	90m <sup>2</sup>	32 EUR	2.880 EUR
<b>Montage   Lieferung</b>				ca. 3.950 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				<b>23.480 EUR</b>

## 5 Besprechungszimmer

### 5.1 Die Räumlichkeiten

Das Besprechungszimmer des Palais Herberstein befindet sich im ersten Stock und hat eine rechteckige Grundfläche. Der Boden ist aus antikem Parkett, es gibt zwei Zugänge über Holztüren. An der Wand in Richtung Norden zwei Fenster und eine Balkontür, sowie ein Fenster in Richtung Osten. An drei Wänden ist eine Holzvertäfelung bis auf 0,85m Höhe angebracht, der Rest der Wände ist verputzt. In der Mitte des Raumes steht ein großer ovaler Tisch umrundet von bepolsterten Stühlen, an der südlichen Wand gibt es ein kleines Holzregal, sowie einen antiken Kamin. Zudem gibt es eine fest installierte Leinwand mit Projektor, ein Clipboard und noch einige kleinere Schränke, Polstersessel und Beistelltische.

Das Problem im Besprechungszimmer ist, dass eine geringe Verständlichkeit herrscht und es bei Anwesenheit mehrerer Personen schwer ist Gesprächen zu folgen bzw. einzelne Vortragende gut zu verstehen.



**Abbildung 5.1:** Messaufbau im Besprechungszimmer

Für die Messung wurden die Polsterstühle, sowie das Clipboard entfernt und die Leinwand eingefahren. Den Tisch, sowie die kleineren Möbelstücke haben wir im Raum belassen (siehe Abbildung 5.1).

Ebenso wie beim großen Konferenzsaal wurden, als Basis für die Modellierung, alle Maße mit dem Laserabstundsmesser nachgemessen (s. Abb. 5.2).

## 5.2 Durchführung der Messung

Gemessen haben wir mit zwei Quellpositionen, eine am Ende des Tisches, etwa dort wo sich die Leinwand befindet und die andere auf mittlerer Länge des Tisches jeweils wieder auf 1,35m Höhe. Im Messplan bezeichnet mit Q1 und Q2. Zu jeder Quelle gab es vier Mikrofonpositionen um den Tisch herum verteilt auf 1,2m Höhe, also auf Höhe einer sitzenden Person, bezeichnet mit M1 bis M4 (s. Abb. 5.3).

Nach dem Aufbau der Messung erfolgte die Messung analog zur vorherigen Messung, nur dass die erwartete Nachhallzeit deutlich kleiner ist und daher die Sequenzlänge der MLS auf  $4s$  reduziert wurde, was zu einer resultierenden Messdauer von  $16s$  führte, da auch hier viermal gemittelt wurde.

Dies wurde für alle Messungen im Foyer, im Sozialraum und im Meeting Point so beibehalten.

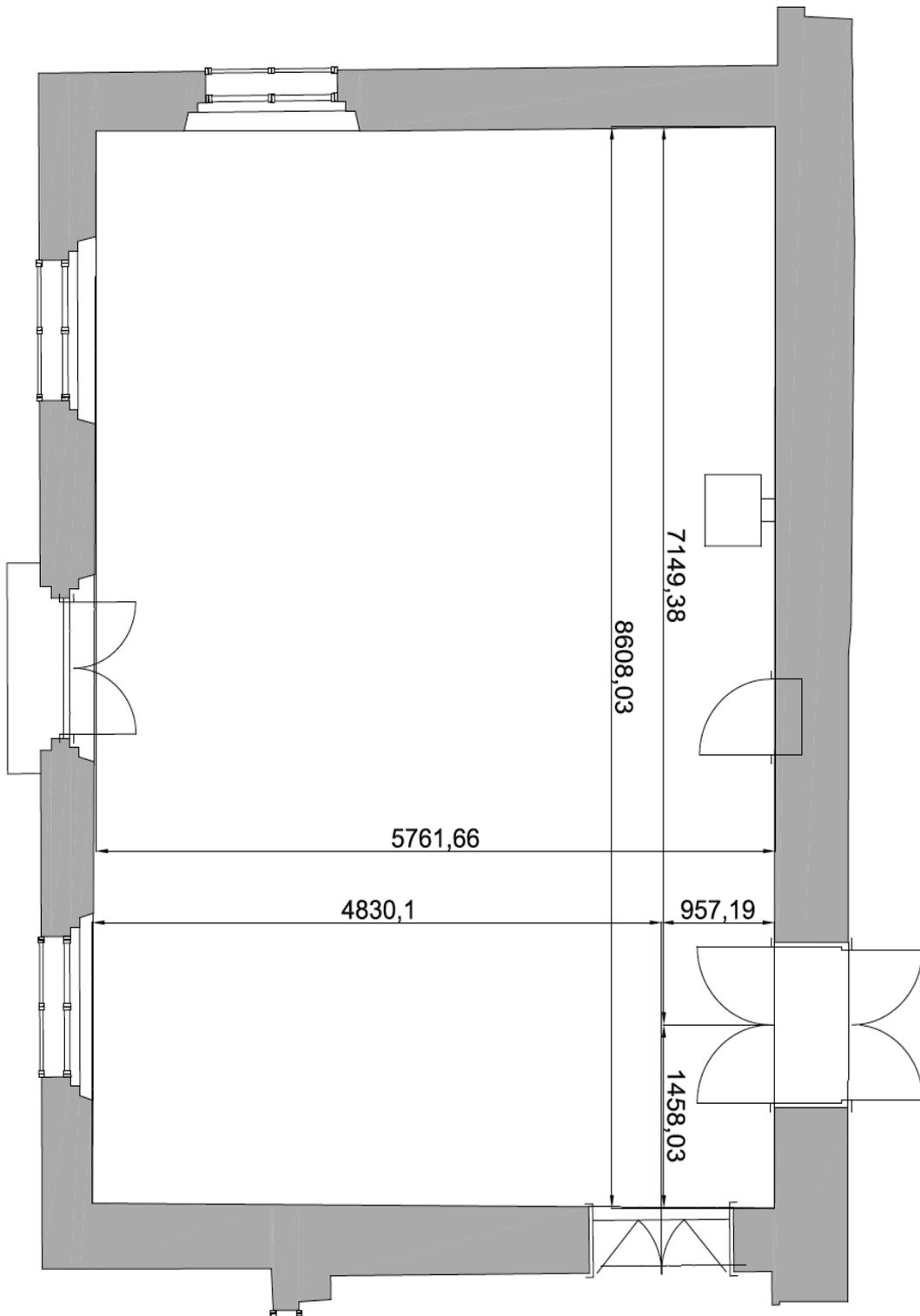


Abbildung 5.2: Grundriss vom Besprechungszimmer

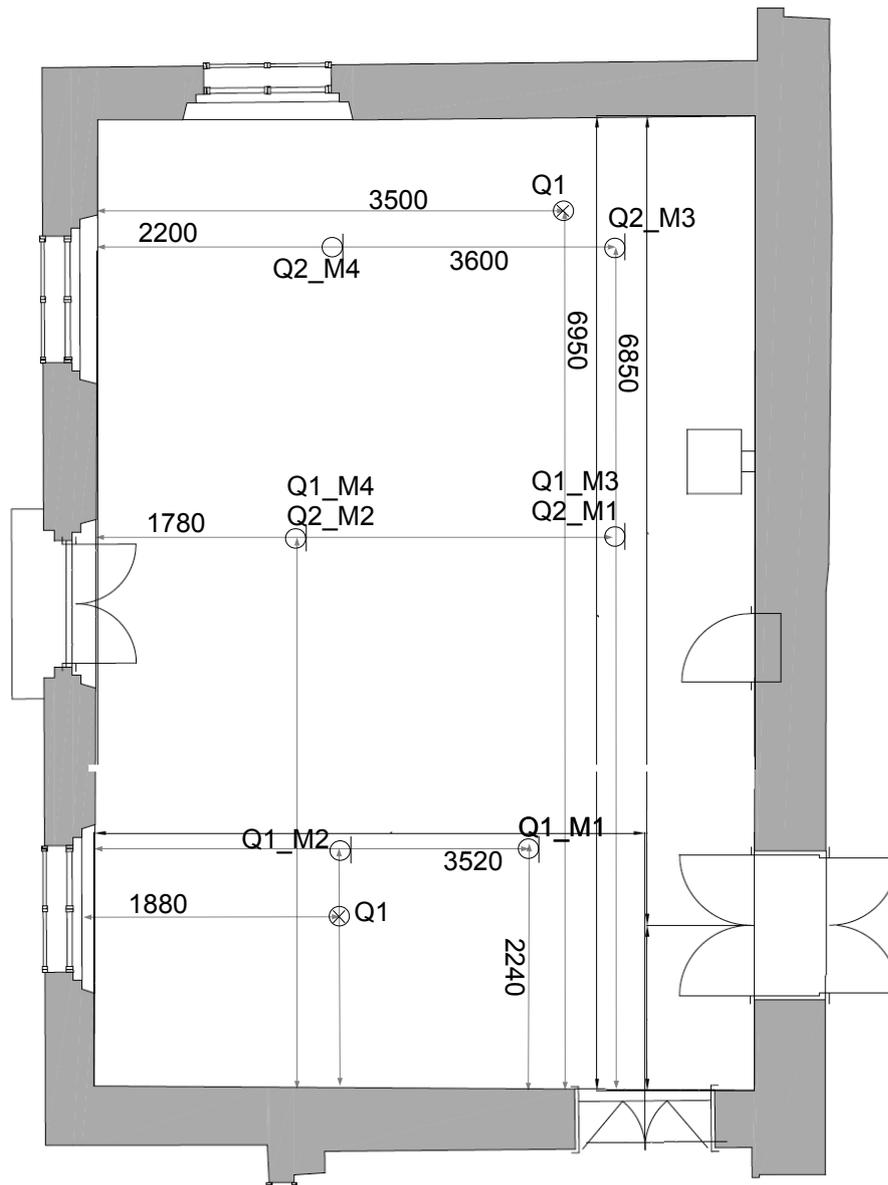


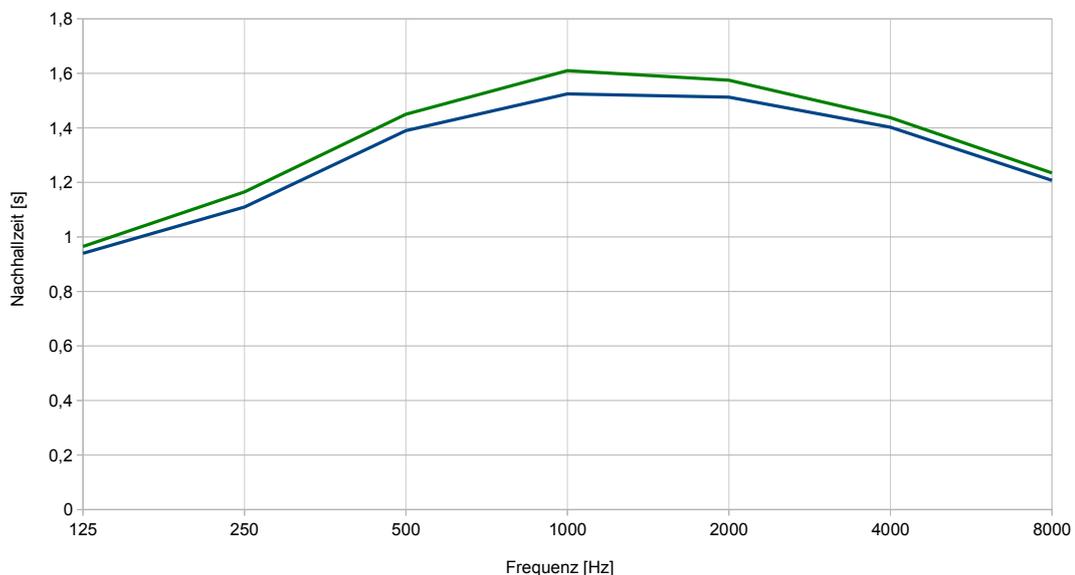
Abbildung 5.3: Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen

### 5.3 Messergebnisse

Die Abbildung 5.4 zeigt die gemessene Nachhallzeit im Raum.

Man erkennt, dass die Unterschiede zwischen den beiden Quellpositionen gering sind, sich somit die Schallenergie relativ gleichmäßig im Raum verteilt und man eine Mittelung über beide durchführen kann.

Zudem ist eine Überhöhung im mittleren Frequenzbereich zu erkennen auf Nachhallzeiten bis fast  $1,6s$  und da dies genau im sprachrelevanten Bereich ist, kann man hier eine Ursache für die schlechte Sprachverständlichkeit des Raumes sehen.



**Abbildung 5.4:** Gemessene Nachhallzeit im Besprechungszimmer  
(blau: Q1 | rot: Q2)

Die Werte des STI und RASTI bewegen sich um 0,5 herum und sind teilweise sogar niedriger, also auch bei der Verständlichkeit werden Verbesserungen nötig sein.

Das gleiche gilt für den Deutlichkeitsgrad, der vor allem im wichtigen mittleren Frequenzbereich teilweise auf bis zu 33% absinkt.

Insgesamt wird deutlich, dass der Raum keine guten akustischen Eigenschaften besitzt und eine Verbesserung nötig ist, vor allem da es sich um ein Besprechungszimmer handelt und somit eine gute Sprachverständlichkeit essentiell ist.

## 5.4 Erstellung des Simulationsmodells

Der Raum ist relativ gleichmäßig aufgebaut und ergibt daher keine größeren Probleme bei der Konstruktion. Da der Tisch im Raum belassen wurde, ist er in das Modell integriert ebenso der Kamin und das Holzregal an der Wand. Die anderen kleinen Möbelstücke sind von ihrer akustischen Wirkung her vernachlässigbar und sind deshalb nicht modelliert worden. Auf Abbildung 5.5 ist der modellierte Raum zu sehen.



**Abbildung 5.5:** 3D-Modell des Besprechungszimmers

Tabelle 5.1 zeigt die verwendeten Absorptionsgrade der einzelnen Materialien. Die Werte stammen aus verschiedenen Tabellen (siehe Anhang) mit vergleichbaren Materialien und wurden leicht verändert, damit die erhaltenen Werte in CATT-Acoustic möglichst den gemessenen Werten entsprechen.

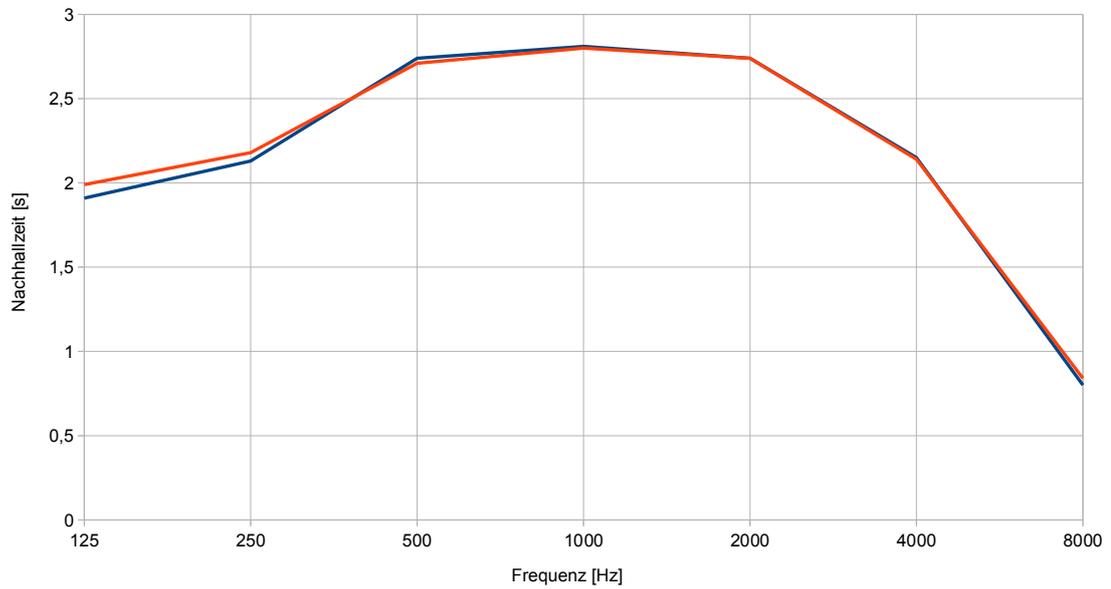
Da bezüglich der berechneten und simulierten Nachhallzeiten gleiches wie bei der Simulation des Konferenzsaales gilt, wurde auch für diese Simulation der Scattering-Faktor zu höheren Frequenzen hin leicht erhöht [HB08].

**Tabelle 5.1:** Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen

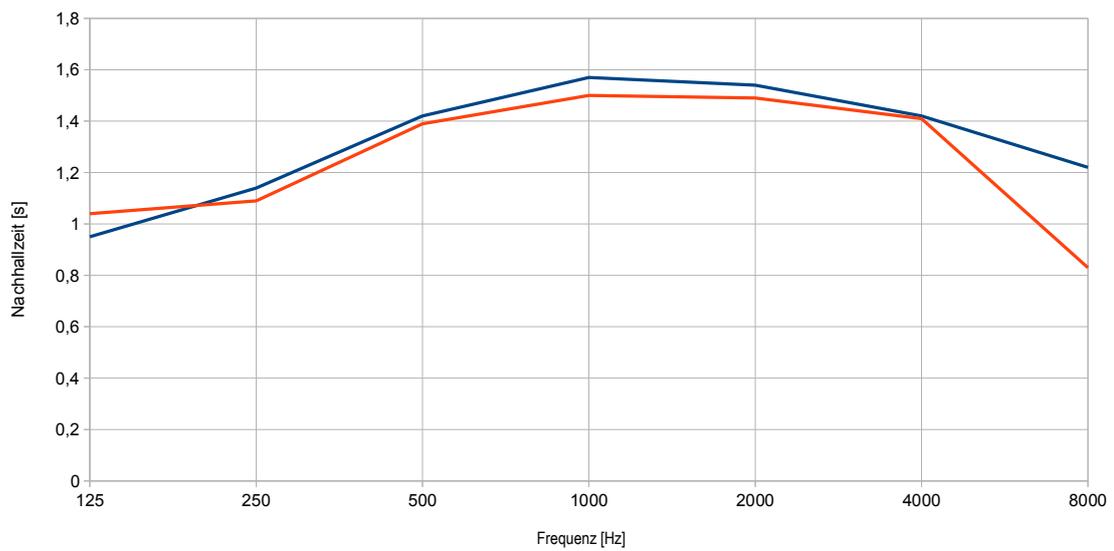
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Stein</b>	2	3,5	5	1	1	5
<b>Putz</b>	11	11	11	8,5	8,5	6
<b>Holz 1</b>	26	18	4	5	5	6
<b>Holz 2</b>	26	18	4	3	3	6
<b>Tür</b>	10	10	8	8	6	7
<b>Glas</b>	12	10	6	6	3	2
<b>Boden</b>	7	9	8	9,5	8,5	6
<b>Heizung</b>	20	24	18	17	9	2

## 5.5 Simulationsergebnisse

Die Quell- und Mikrofonpositionen der Simulation befinden sich an den Positionen an denen sie bei der Messung standen um eine möglichst gleiche Situation zu schaffen. Man sieht auf Abbildung 5.6, dass die Simulationsergebnisse für beide Quellen quasi identisch sind. Auf Abbildung 5.7 ist zu sehen, dass mit den gewählten Absorptionsgraden eine sehr gute Annäherung im tiefen und mittleren Frequenzbereich erzielt wurde, erst ab Frequenzen von 8 KHz weichen die Werte voneinander ab. Dies können wir jedoch bei der Optimierung vernachlässigen.



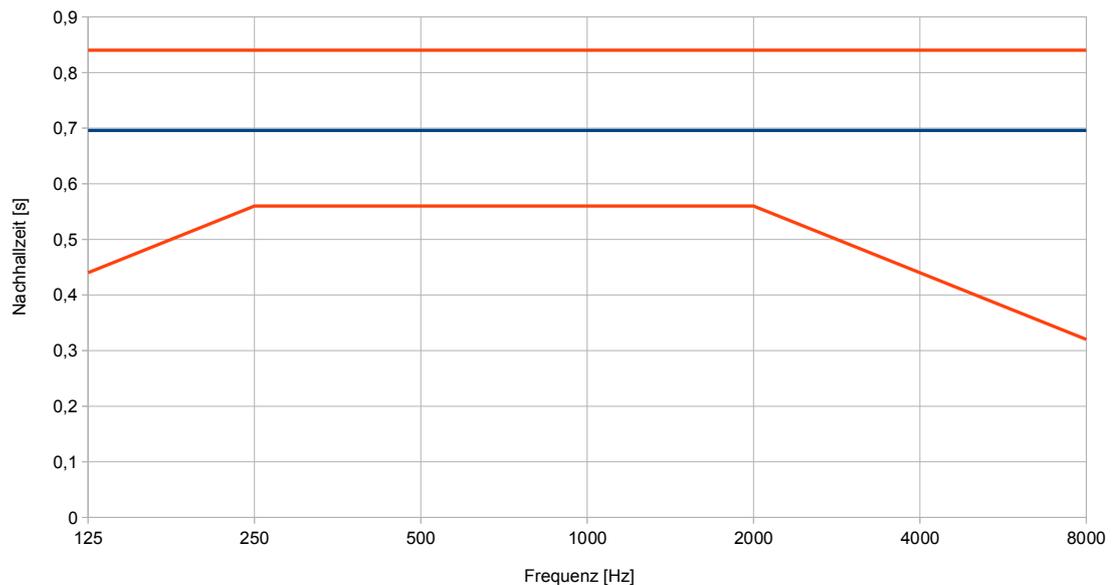
**Abbildung 5.6:** Simulierte Nachhallzeit [s] beider Quellpositionen (blau: Q1 | rot: Q2)



**Abbildung 5.7:** Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich (blau: Gemessen | rot: Simuliert)

## 5.6 Optimierungen

Für das Besprechungszimmer ergibt sich aus Gleichung 4.1 eine optimale Nachhallzeit von  $0,69\text{s}$  (s. Abbildung 5.8).

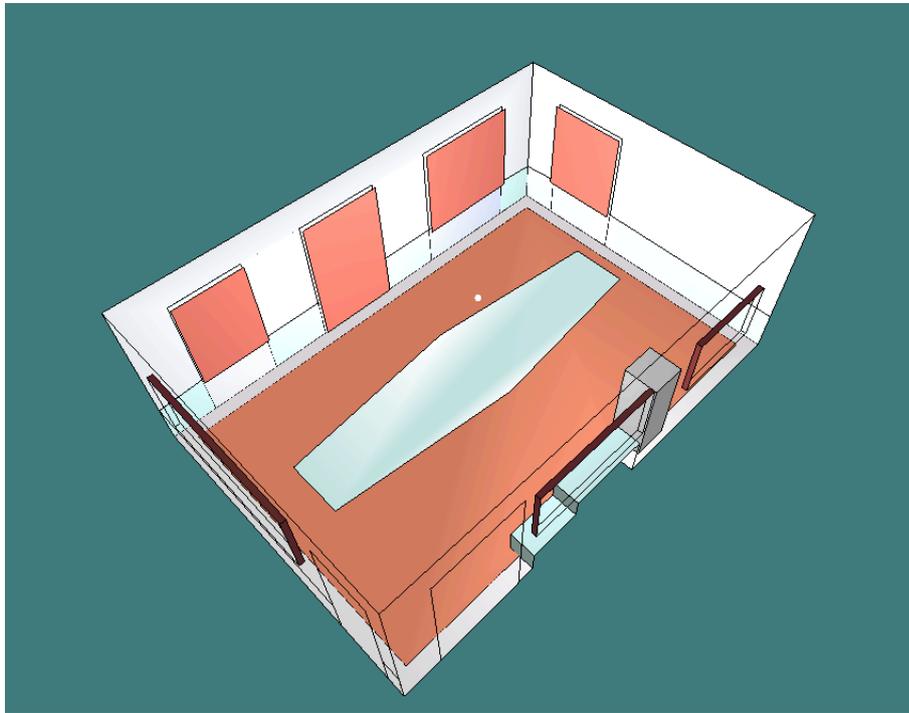


**Abbildung 5.8:** Optimale Nachhallzeit (**blau**) mit Toleranzgrenzen (**rot**)

Um diese Nachhallzeit zu erreichen und um die Deutlichkeit zu verbessern, wurden nun drei verschiedene Maßnahmen simuliert und miteinander kombiniert.

Die Absorbermaterialien wurden auf Grund ihrer Eigenschaften wie Absorptionsgrad und Brandschutzklasse, sowie nach ihrem optischen Erscheinen ausgewählt. Alle Datenblätter und Bilder sind im Anhang zu finden.

Zunächst drei akustische Bilder mit den Maßen  $3,4\text{m} \times 1,4\text{m}$ ,  $2,5\text{m} \times 1,2\text{m}$  und  $1,76\text{m} \times 1,2\text{m}$ . Außerdem ein akustischer Vorhang, Modell STREAMER der Firma *Douglas Textiles*, der neben akustischen Eigenschaften auch lichtdurchlässig ist. Außerdem ein Teppich  $5,6\text{m} \times 8,58\text{m}$ , modelliert mit den Absorptionswerten für einen 5mm dicken Teppich mit Unterlage. Die einzelnen Absorptionsgrade kann man Tabelle 5.2 entnehmen. Die Abbildungen 5.9 und 5.10 zeigen das CATT-Modell mit integrierten Maßnahmen.



**Abbildung 5.9:** 3D-Modell mit Optimierungen



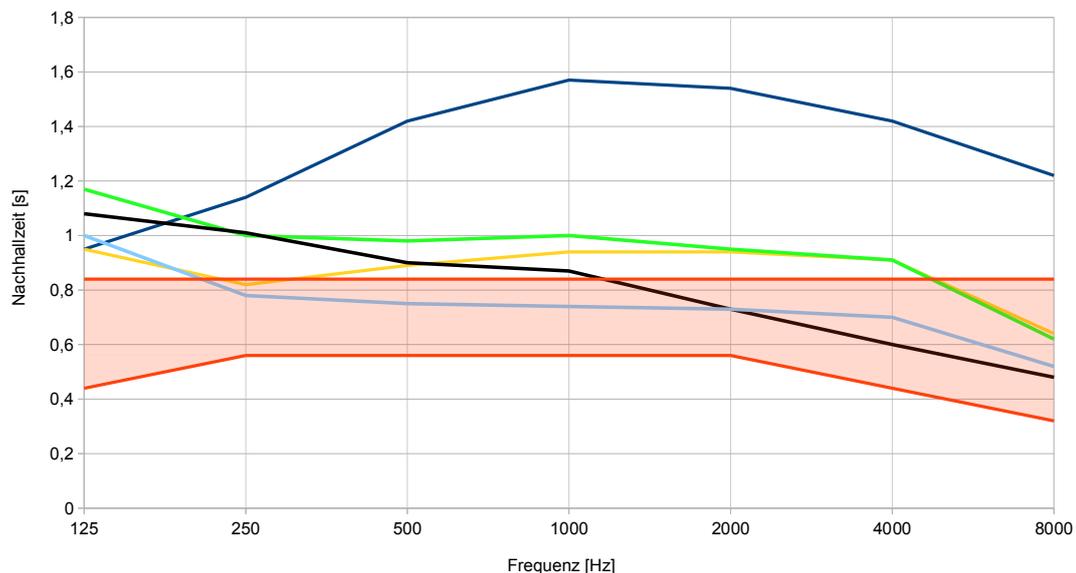
**Abbildung 5.10:** 3D-Modell mit Optimierungen

**Tabelle 5.2:** Absorptionsgrade der Absorber [%]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Akustikbild</b>	32	75	99	95	96	93
<b>Teppich</b>	7	21	57	68	81	72
<b>Streamer</b>	6	32	70	75	78	81

Die nächsten Abbildungen zeigen die Simulationsergebnisse mit den einzelnen Maßnahmen, sowie das Ergebnis der Kombination aus akustischen Bildern und den lichtdurchlässigen Vorhängen vom Modell STREAMER. Man sieht die deutlichen Verbesserungen vor allem im mittleren Frequenzbereich. Es ist gar nicht nötig alle Maßnahmen zu kombinieren, da die Nachhallzeiten auch mit einzelnen Absorbern im mittleren Frequenzbereich schon in das Toleranzbandes hinein rutscht. Ein gutes Ergebnis liefert die Kombination von akustischen Bildern mit akustischen Vorhängen, ab 250 Hz ist man mit unter 0,8s bei einem guten Wert, nahe dem errechneten Optimalwert.

Auch die Sprachverständlichkeit (STI) steigt auf einen guten bis sehr guten Wert von 0,75.



**Abbildung 5.11:** Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen  
**blau:** Messung | **gelb:** Bilder | **grün:** Vorhang  
**STREAMER** | **schwarz:** Teppich | **türkis:** Bilder +  
 Vorhang **STREAMER** || **rot:** Toleranzgrenzen der  
 optimalen Nachhallzeit

## 5.7 Kosten

Die Firma *raumAKUSTIKS* in Frankfurt hat für Akustikbilder, mit beliebiger Motivwahl, folgende Preise angeboten:

- 3400 x 1400 x 50mm                      1.368,80 EUR
- 2500 x 1200 x 50mm                      934,10 EUR
- 1800 x 1200 x 50mm                      714,80 EUR

Für die vier akustischen, lichtdurchlässigen Vorhänge der Firma *Douglas Textiles* muss mit etwa 1.200 EUR gerechnet werden.

Die Absorptionsgrade des Teppichs entsprechen einem 5mm dicken Teppich mit 5mm Filzunterlage. Deshalb kann beinahe jeder Teppich verwendet werden und die Kosten sind von der Wahl des Teppichs abhängig.

In Tabelle 5.3 sind die abgeschätzten Kosten für die Variante ohne Teppich, dass heißt nur mit den lichtdurchlässigen Vorhängen vor den Fenstern und der Balkontüre und drei akustischen Bildern.

**Tabelle 5.3:** Kostenrechnung für das Besprechungszimmer

	Firma	Größe	Anzahl	Kosten
<b>Vorhang STREAMER</b>	Douglas Textiles		4	1.200 EUR
<b>Akustische Bilder</b>	raumAKUSTIKS		3	3.020 EUR
<b>Montage</b>				ca. 450 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				<b>4.670 EUR</b>

## 6 Foyer mit Empfang

### 6.1 Die Räumlichkeiten

Der Eingangsbereich mit Empfang hat eine rechteckige Grundform durchbrochen von einem Bogen, der den Raum in zwei Teile teilt. Der Boden ist steinern und die Wände sind verputzt. Die Eingangstür ist eine große Holztür mit Glasfenstern, vom westlich gelegenen Raum ist der Eingangsbereich getrennt durch eine dünne Wand aus Glas und Holz mit Tür, die im Normalfall offen steht. Gegenüber dieser Wand ist eine weitere Tür aus Holz und Glas. Im hinteren Teil des Raumes geht eine Holztür in westliche Richtung und eine Glastür, die ebenfalls die meiste Zeit offen steht, in Richtung Osten. Der Empfangsbereich ist aus Holz gebaut und besteht neben einem Tresen aus Tischen und einem Regal, das an der Wand hängt. In südlicher Richtung gibt es eine Art Balkontür die nach draußen führt. Des Weiteren ist zu bemerken, dass die Decke kuppelförmig gebaut ist.

Akustisch problematisch ist im Foyer, dass sobald sich Personen im Eingangsbereich unterhalten, es für die Angestellten im Empfang sehr laut wird und beispielsweise telefonieren fast nicht mehr möglich ist.

### 6.2 Durchführung der Messung

Die Messung erfolgte mit drei Quellpositionen mit jeweils zwei Mikrofonpositionen. Das Hauptaugenmerk war bei der Messung auf den Empfangsbereich gerichtet, wie man Abbildung.. entnehmen kann, da dies der Arbeitsplatz ist, den es zu verbessern gilt. Dabei sind wir von drei Situationen ausgegangen, Schallquelle im vorderen Bereich, Schallquelle vor dem Empfangstresen und Schallquelle hinter dem Empfangstresen. Die Mikrofonpositionen jeweils vor und hinter dem Empfangstresen auf Höhe einer sitzenden, bzw. vor dem Tresen auf Höhe einer stehenden Person. Abbildung 6.3 zeigt einen Messaufbau. Der Messplan mit allen Mikrofon- und Quellpositionen ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Die Tür zum westlich angrenzenden Raum, sowie die nach Osten gelegene Glastür zum Flur hin, blieben geöffnet, da dies dem Normalzustand entspricht.

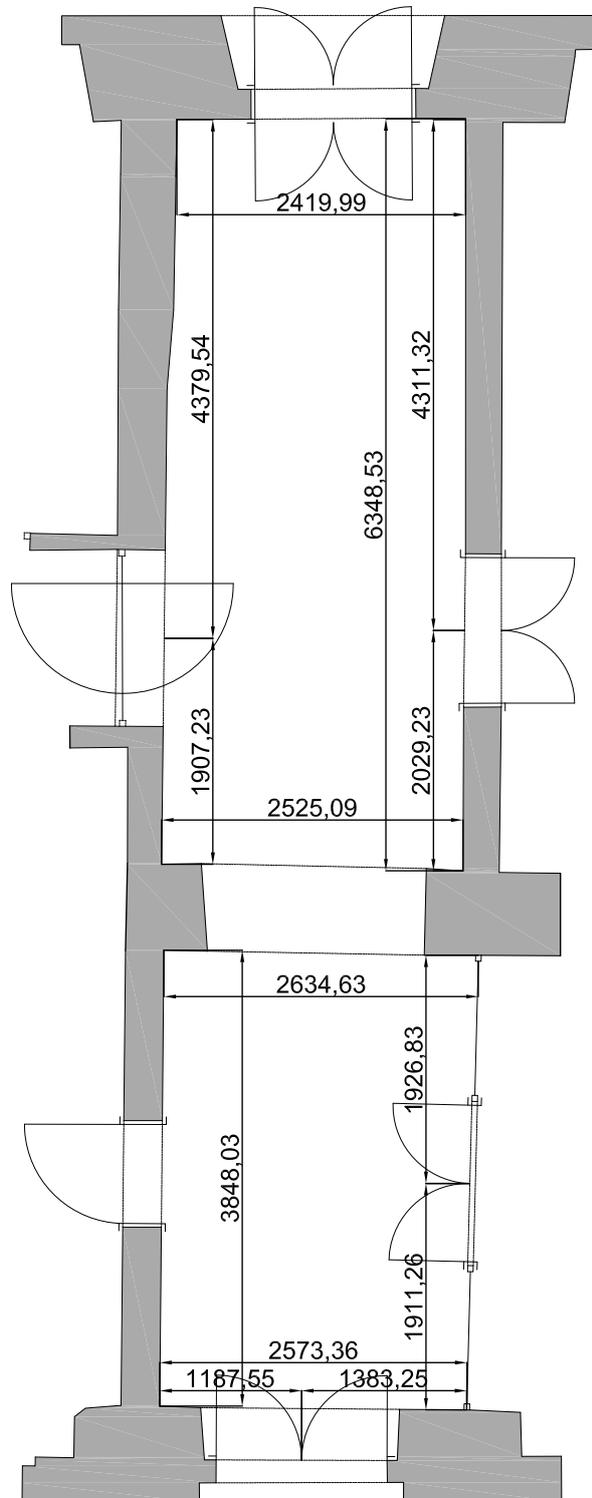
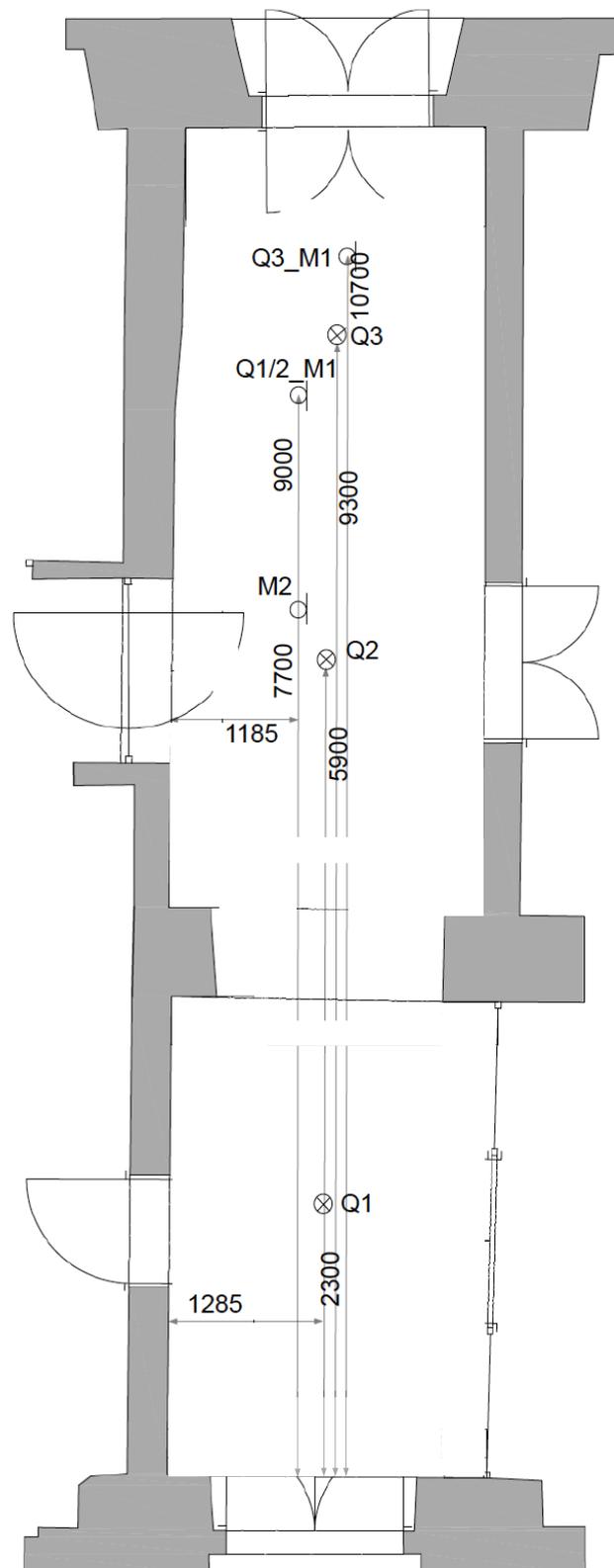


Abbildung 6.1: Grundriss vom Foyer und Empfang



**Abbildung 6.2:** Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen



**Abbildung 6.3:** Messaufbau im Empfangsbereich

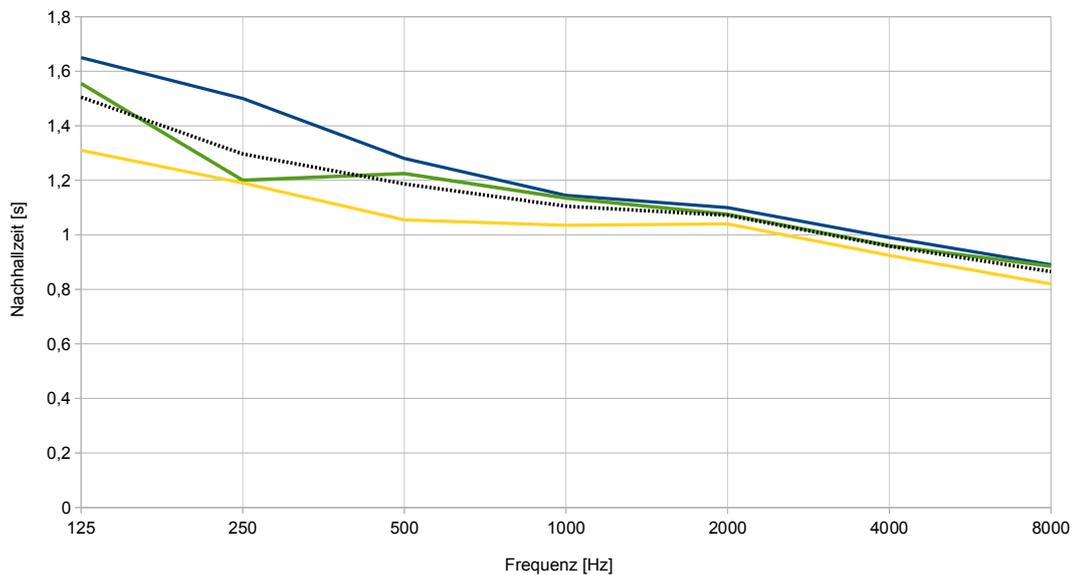
### 6.3 Messergebnisse

Abbildung 6.4 zeigt die gemessenen Nachhallzeiten, man sieht, dass diese über den gesamten Frequenzbereich relativ hoch sind, vor allem im tiefen und mittleren Bereich deutlich zu hoch.

Die Werte für den Deutlichkeitsgrad variieren stark, sind aber weniger schlecht als vermutet. Das gleiche gilt auch für die STI- bzw. RASTI-Werte, die eine passable Verständlichkeit bescheinigen. Allerdings muss man sich die Situation im Eingangsbereich bewusst machen, das Problem ist keine zu geringe Verständlichkeit, sondern zu viele Störgeräusche, daher sollte das Augenmerk eher auf die sehr langen Nachhallzeiten im tiefen und mittleren Frequenzbereich gerichtet werden.

### 6.4 Erstellung des Simulationsmodells

Die Konstruktion des Eingangsbereichs erwies sich als relativ kompliziert, da es neben der Modellierung einiger Bögen (Türen, Fenster etc.) auch die Kuppeldecke nachzubilden galt. Gelöst wurde diese Problematik durch eine Approximation der Rundungen durch Punkte, ähnlich wie in Abbildung 4.12 zu sehen. Die genauen Daten der einzelnen Punkte wurden mit Hilfe der trigonometrischen Beziehungen errechnet.



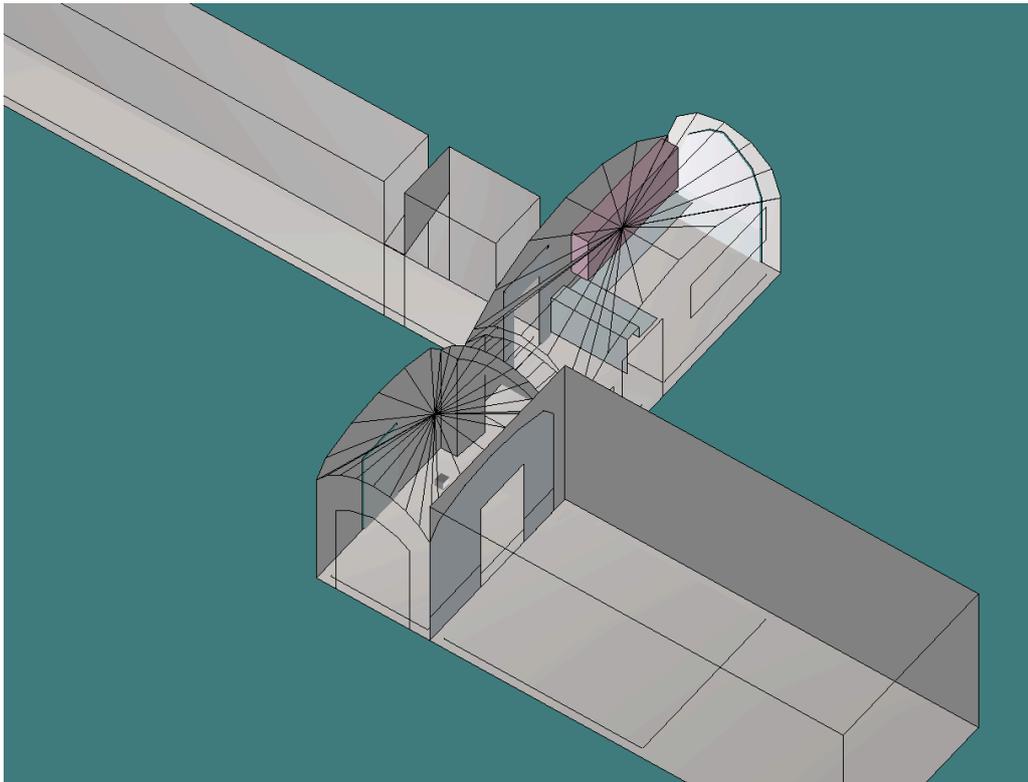
**Abbildung 6.4:** Gemessene Nachhallzeit aller Quellen und im Mittel |  
(blau: Q1 | rot: Q2 | gelb: Q3 | gestrichelt: Mittel)

Um eine möglichst reale Modellsituation zu erhalten, wurden neben dem eigentlichen Eingangsbereich, auch noch der westlich angrenzende Raum und der östlich angrenzende Flur, mit modelliert. Die Türen sind im Modell geöffnet, wie es auch bei der Messung der Fall war.

Tabelle 6.1 zeigt die verwendeten Absorptionsgrade, die auch hier leicht verändert wurden, um eine möglichst gute Modellsituation zu erhalten.

**Tabelle 6.1:** Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Stein</b>	2	3,5	5	6	7	7
<b>Putz</b>	9,5	10	11	12	12	11
<b>Holz</b>	15	14	10	9	8	7
<b>Tür</b>	10	10	8	8	6	7
<b>Glas</b>	12	10	6	6	3	2
<b>Türglas</b>	4	5	5	5	3	2
<b>Schrank</b>	10	10	30	30	20	20

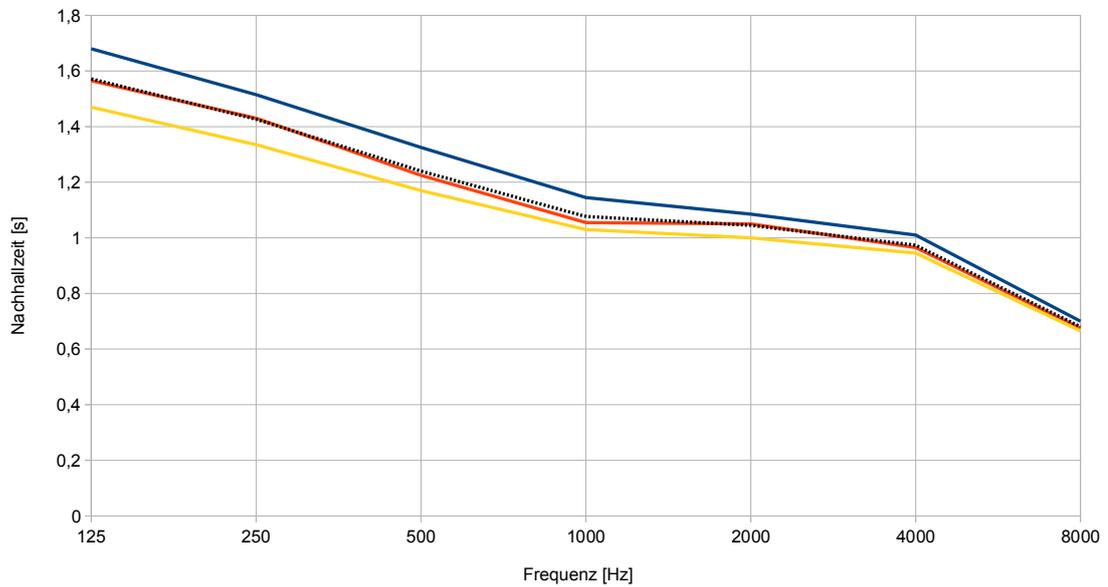


**Abbildung 6.5:** 3D-Modell des Foyers mit angrenzenden Räumen

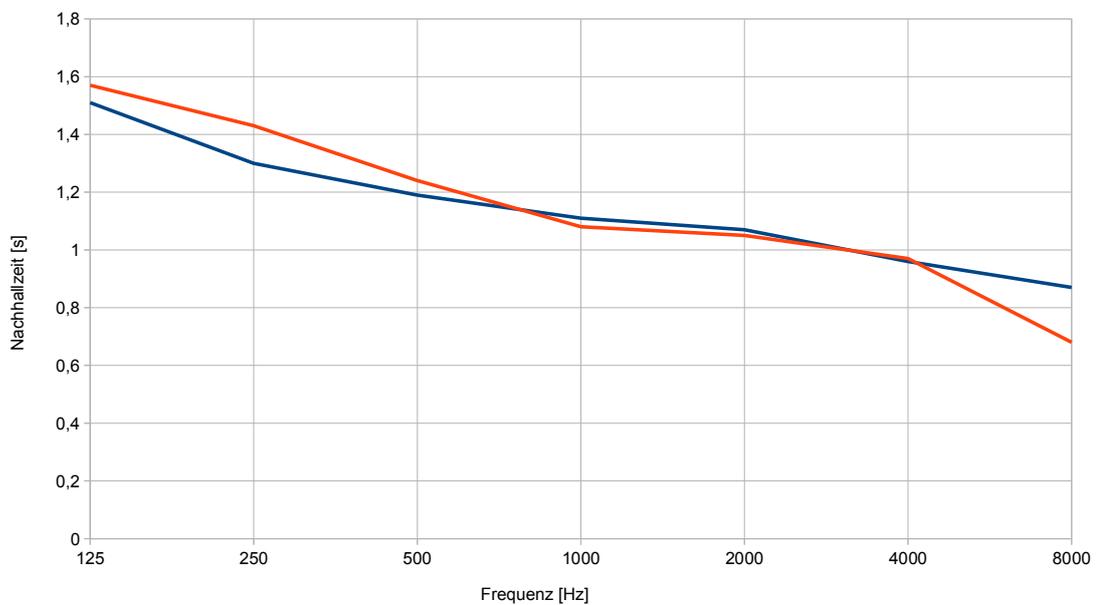
## 6.5 Simulationsergebnisse

In Abbildung 6.6 sind die Simulationsergebnisse der drei Quellpositionen einzeln und gemittelt zu sehen. Man sieht nur relativ kleine Unterschiede im tiefen Frequenzbereich ( $\pm 0,1s$ ).

Abbildung 6.7 zeigt die gemittelten simulierten Werte im Vergleich mit den gemittelten gemessenen Werten. Man sieht, dass eine sehr gute Näherung gegeben ist und mit der Simulation der Optimierungsvorschläge fortgefahren werden kann.



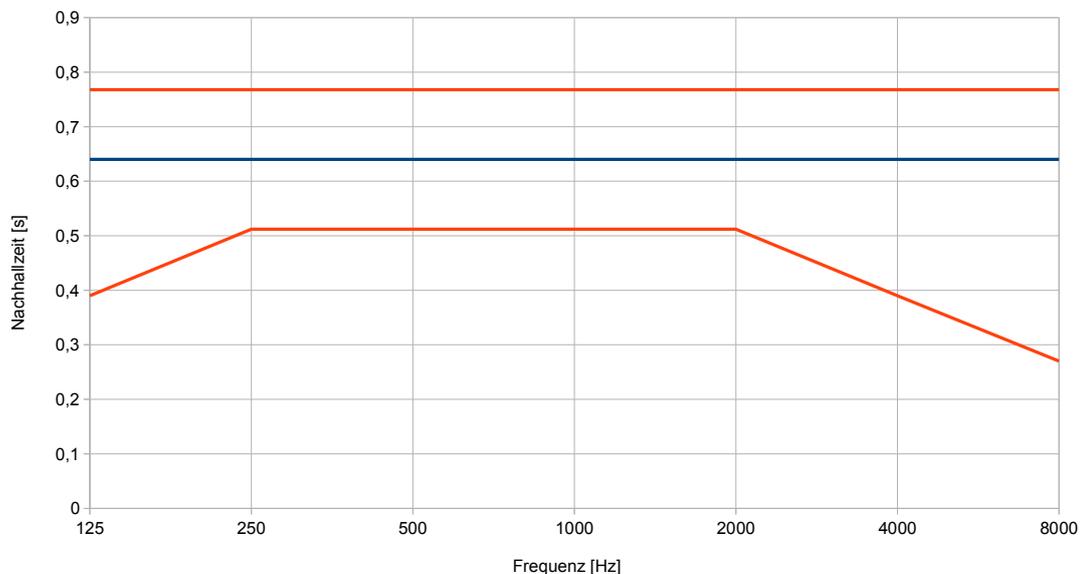
**Abbildung 6.6:** Simulierte Nachhallzeiten  
(blau: Q1 | rot: Q2 | gelb: Q3 | gestrichelt: Mittel)



**Abbildung 6.7:** Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich  
(blau: Gemessen | rot: Simuliert)

## 6.6 Optimierungen

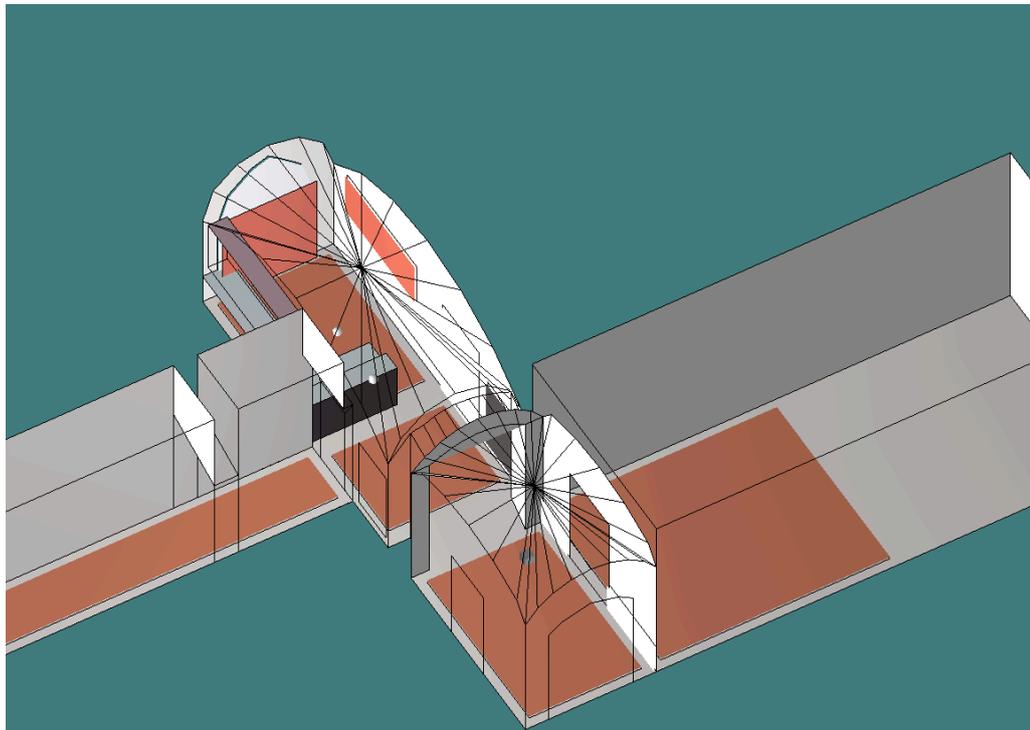
Für den Eingangsbereich ergibt sich mit 4.1 eine optimale Nachhallzeit von 0,64s. In Abbildung 6.8 sieht man den Verlauf mit Toleranzbereich für den Empfang.



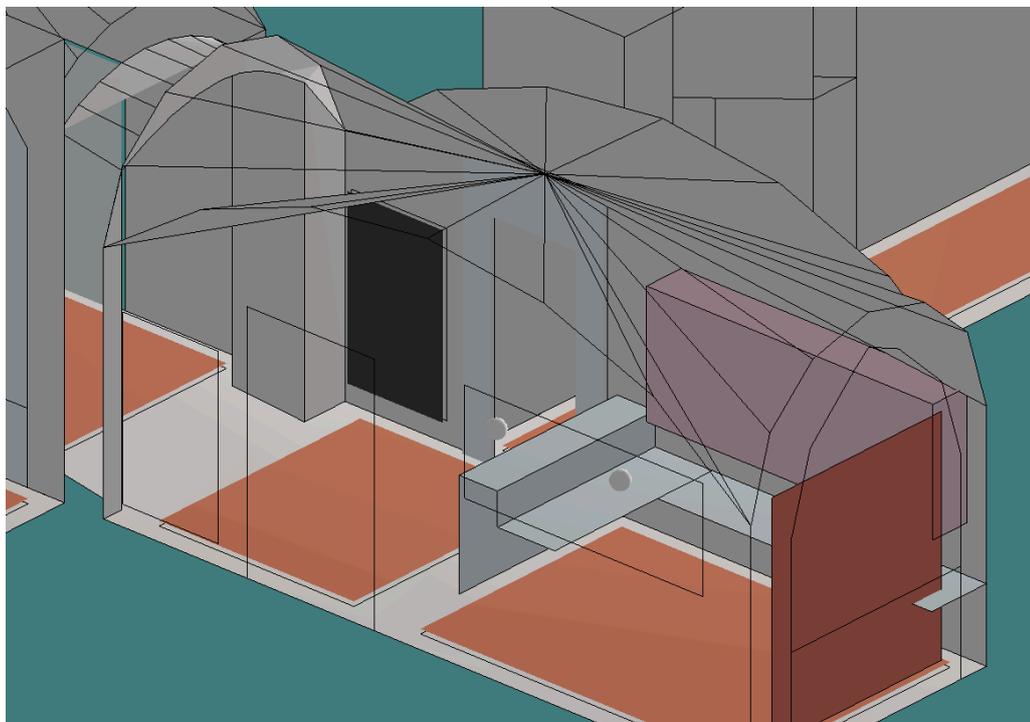
**Abbildung 6.8:** Optimale Nachhallzeit (blau) mit Toleranzgrenzen (rot)

Für den Eingangsbereich wurden vier verschiedene Optimierungsmaßnahmen simuliert. Das Anbringen eines akustischen Vorhanges an die schon vorhanden Vorhangstange, eine akustische Bild an die westliche Wand im Empfangsbereich, das Auslegen eines Teppichs im Eingangsbereich, dem Flur und dem westlich angrenzenden Raum, und die Montage von Breitband-Kompakt-Absorbern an der Vorderseite des Empfang-Tresens und an den noch freien Wandstücken gegenüber des Tresens. Zu erkennen auf den Abbildungen 6.9 und 6.10. Die braune Fläche stellt den Teppich dar, die rötlich-braunen Flächen das akustische Bild bzw. den akustischen Vorhang und die grau-schwarzen Flächen symbolisieren den BKA-Absorber.

In Tabelle 6.2 sind die Absorptionsgrade der für die Optimierungen verwendeten Absorber eingetragen.



**Abbildung 6.9:** 3D-Modell mit Optimierungen



**Abbildung 6.10:** 3D-Modell mit Optimierungen

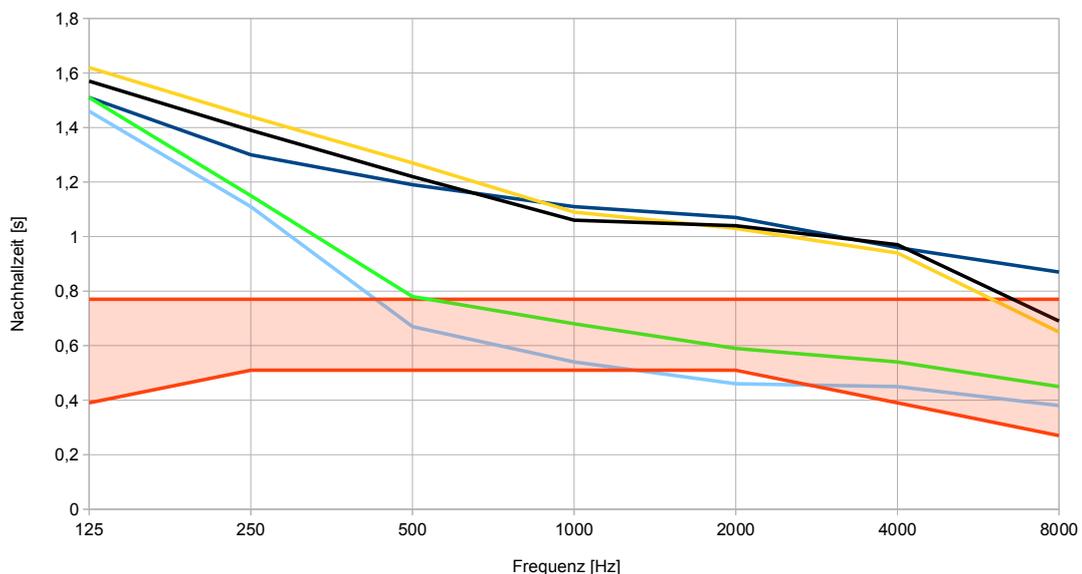
Tabelle 6.2: Absorptionsgrade der Absorber [%]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Akustikbild</b>	16	56	82	88	93	92
<b>BKA</b>	98	98	99	99	99	99
<b>Teppich</b>	7	21	57	68	81	72
<b>Streamer</b>	6	32	70	75	78	81

Die Ergebnisse der Optimierungen sind in Abbildung 6.11 zu sehen.

Das Anbringen der akustischen Bilder und des Vorhanges haben nur kaum Auswirkung auf die Nachhallzeit, vor allem fast gar keine im tiefen Frequenzbereich. Der Breitbandkompaktabsorber schafft eine geringe Verbesserung bis etwa 1 kHz. Einen deutlichen Effekt hat der Teppich, der im Bereich ab 500 Hz die Nachhallzeit um etwa 0,4s verkürzt, bei 250 Hz um 0,2s und bei 125 Hz immer noch um 0,1s.

Bringt man alle Materialien ein, sind die Werte im Bereich bis 500 Hz zwar noch besser, allerdings sind die Nachhallzeiten ab 1 kHz unter 0,6s und daher unterhalb des Toleranzbandes.



**Abbildung 6.11:** Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen  
**blau:** Messung | **gelb:** Bild | **schwarz:** BKA | **grün:** Teppich | **türkis:** Bild + Vorhang + BKA + Teppich ||  
**rot:** Toleranzgrenzen der optimalen Nachhallzeit

Auch hier verbessert sich der Wert für die Sprachverständlichkeit (STI) auf 0,68.

Insgesamt würde sich, laut Simulation, eine Optimierung vorschlagen, die BKA-Absorber und einen Teppich kombiniert, sowie ein akustisches Bild und den lichtdurchlässigen Vorhang zusätzlich. Damit wäre die Dämpfung des Nachhalls im tiefen Frequenzbereich maximal und im mittleren Bereich wäre die Nachhallzeit im Toleranzband. Was weiterhin beim Einbringen eines Teppiches als positiv zu bewerten ist, ist dass Trittschall gar nicht erst entsteht in einem Maße wie dies bei Steinboden der Fall wäre und somit schon weniger Lärm produziert wird.

## 6.7 Kosten

Die Preise für einen Breitband-Kompakt-Absorber, z.B. von der Firma *Renz-Systeme* belaufen sich auf (Stoffbespannung und Druck sind in Tabelle 6.3 mit aufgelistet, sind aber relativ teuer):

- 1m x 1,70m                      ca. 390 EUR
- 1m x 1,93m                      ca. 420 EUR

Ein Teppich in den Größen: 2,34m x 2,44m , 2,34m x 3,44m , 2,34m x 3,71m und 4,8m x 4,1m variiert im Preis, je nach Modell.

Ein Akustikbild der Firma *raumAKUSTIKS* mit einer Größe von 2,5m x 1m würde etwa 900 EUR kosten.

Für den Vorhang Modell STREAMER der hier benötigten Größe verlangt die Firma *Douglas Textiles* etwa 360 EUR.

**Tabelle 6.3:** Kostenrechnung für den Eingangsbereich

	Firma	Größe	Anzahl	Kosten
<b>Vorhang STREAMER</b>	Douglas Textiles		1	360 EUR
<b>BKA</b>	Renz-Systeme		3	1.200 EUR
<b>Stoffbespannung</b>	Renz-Systeme		3	ca. 700 EUR
<b>Druck</b>	Renz-Systeme		3	ca. 800 EUR
<b>Akustisches Bild</b>	raumAKUSTIKS	2,5m x 1m	1	ca. 900 EUR
<b>Teppich mit Unterlage</b>		ca. 42m <sup>2</sup>		ca. 1.500 EUR
<b>Montage</b>				ca. 650 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				ca. <b>6.110 EUR</b>

## 7 Sozialraum

### 7.1 Die Räumlichkeiten

Der Raum befindet sich im Erdgeschoß und ist von 2 Seiten aus betretbar. Der Sozialraum hat ein Fenster, ansonsten verputzte Wände und eine Gewölbedecke. Diese entstand allerdings nur durch Auskleidung von I-Trägern und besitzt also keinen besonderen Denkmalwert. Weiters wurden 2 gegenüberliegende Wände dunkelrot gestrichen. Der Raum ist als Cafeteria gedacht und entsprechend eingerichtet: Eine Sitzzecke mit dazugehörigen Tischen, eine weitere Sitzbank mit Tischen und zwei Stehtische befinden sich zur Zeit im Raum. Allerdings wirkt der Raum sehr nüchtern und kühl und wird derzeit nicht wie erwartet benützt. Der erste akustische Eindruck war ein für eine Gaststätte ungenügender, der Raum ist deutlich zu laut: Sobald jemand spricht, wird er im ganzen Raum als laut wahrgenommen. So kann eigentlich immer nur ein Gespräch stattfinden, was für den Verwendungszweck völlig ungenügend ist.



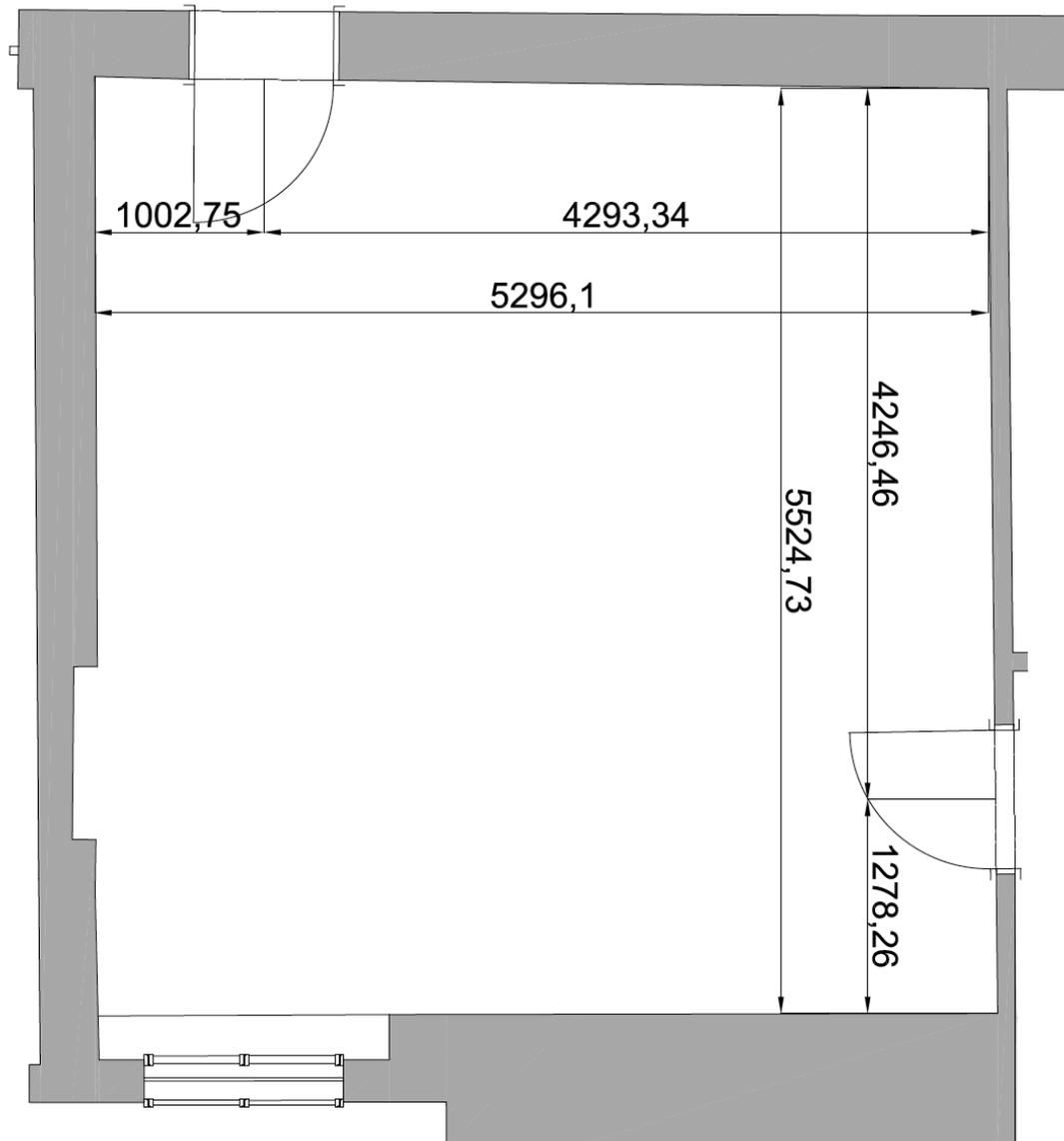
**Abbildung 7.1:** Hintere Türe zum Flur



**Abbildung 7.2:** Blick zur Küche



**Abbildung 7.3:** Stehtische im Sozialraum



**Abbildung 7.4:** Grundriss vom Sozialraum

## 7.2 Durchführung der Messung

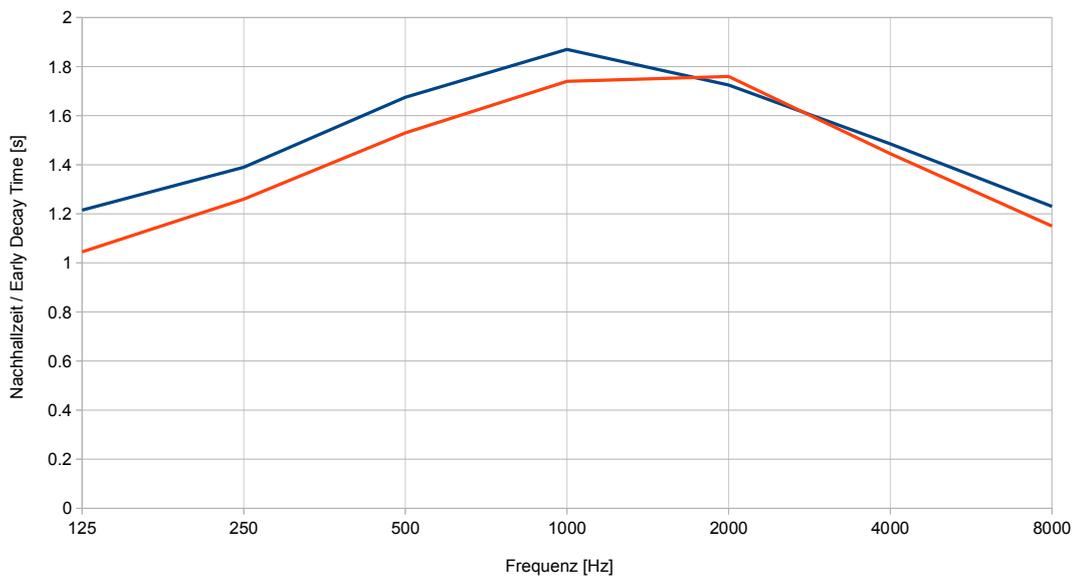
Es wurden für eine Position der Schallquelle je zwei Mikrofonpositionen gemessen. Dabei wurde für die Mikrofone im Sitzbereich eine Höhe von 1,2m und im Stehbereich eine Höhe von 1,7m gewählt. Die Höhe der Quelle blieb unverändert bei 1,35m. Für die Messung blieb Mobiliar wie die kleinen Tische im Raum, die Sitzbänke natürlich auch. Abbildung 7.5 zeigt den Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen.



**Abbildung 7.5:** Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen

### 7.3 Messergebnisse

Die Werte für die Nachhallzeiten wurden in der Tabellenkalkulation gemittelt, weiters wurde auch die Early Decay Time (EDT<sup>5</sup>) dargestellt. Im sprachrelevanten Frequenzbereich werden Nachhallzeiten von fast 2s erreicht. Abbildung 7.6 zeigt die beiden Messergebnisse.



**Abbildung 7.6:** Messergebnisse im Sozialraum  
(blau: **Nachhallzeit** | rot: **Early Decay Time**)

Von WinMLS wurden neben den Nachhallzeiten auch STI, RASTI, ALCons und Deutlichkeitsgrad berechnet:

Für den Deutlichkeitsgrad ergibt sich ein mittlerer Wert von 53% (Ab 50% gilt gute Sprachverständlichkeit).

Für den STI wird ein Wert von 52% angegeben (Es gilt: ab 60% Gut, ab 75% Ausgezeichnet).

Für RASTI wurde ein mittlerer Wert von 48% errechnet (hier gilt: unter 50% schlechte -, über 80% sehr gute Sprachverständlichkeit).

Weiters wurde ein ALCons von 10,3% berechnet (unter 7% gute, unter 20% befriedi-

<sup>5</sup> Frühe Nachhallzeit

gende Sprachverständlichkeit).

Es zeigen sich insgesamt dürftige Werte, denn gerade für einen Kommunikationsort wären bessere Werte wünschenswert.

## 7.4 Erstellung des Simulationsmodells

Es wurde ein Modell in CATT-Acoustic erstellt, das dann auf die Messwerte abgestimmt werden kann (siehe Abbildungen 7.7 und 7.8).

Ausgehend von Absorptionswerten aus Tabellen wurden die Werte nach und nach angepasst, bis das Simulationsmodell nahe genug an den Werten der Messung war. Dabei wurde hauptsächlich die Werte für den Putz geändert, da er als größte Fläche auch den größten Einfluss auf die Nachhallzeit hat. Tabelle 7.1 zeigt die bei der Simulation verwendeten Absorptionsgrade.

**Tabelle 7.1:** Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Parkett</b>	15	10	8	4	5	10
<b>Putz</b>	3,5	2,5	1,5	1	1,5	1
<b>Holz</b>	11	11	11	11	11	11
<b>Holztür</b>	14	10	6	8	10	12
<b>Fenster</b>	28	20	10	6	2	1
<b>Glastür</b>	4	4	3	3	2	2
<b>Leder</b>	44	54	60	62	58	50

## 7.5 Simulationsergebnisse

Es wurde eine Messung simuliert, wo Mikrofone und Quelle an den selben Positionen wie bei der tatsächlichen Messung stehen. So konnte mit den angepassten Werten für Absorption der verwendeten Materialien eine sehr gute Übereinstimmung gefunden werden.

Somit kann das Computermodell als gültig angesehen werden und daran Optimierungen versucht werden.

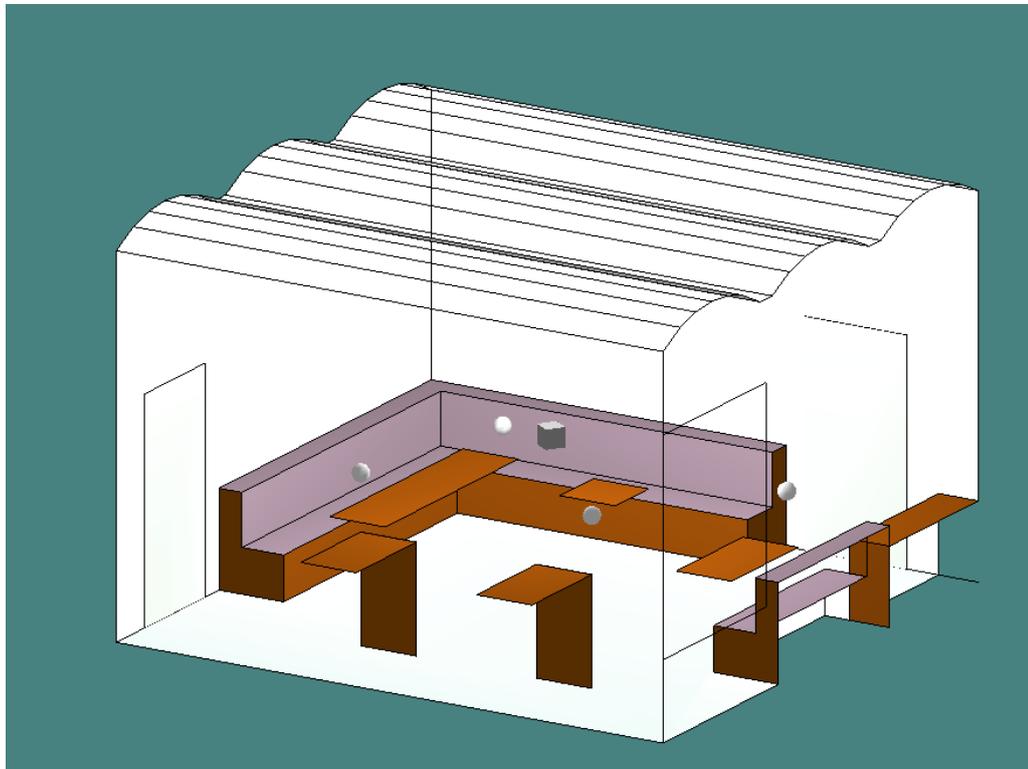


Abbildung 7.7: 3D-Modell vom Sozialraum

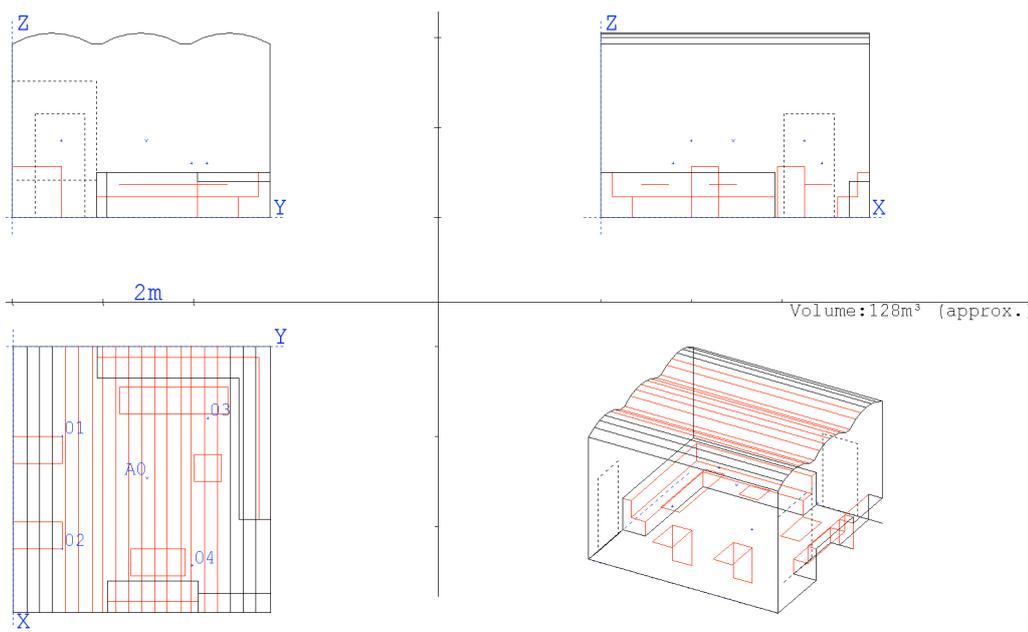
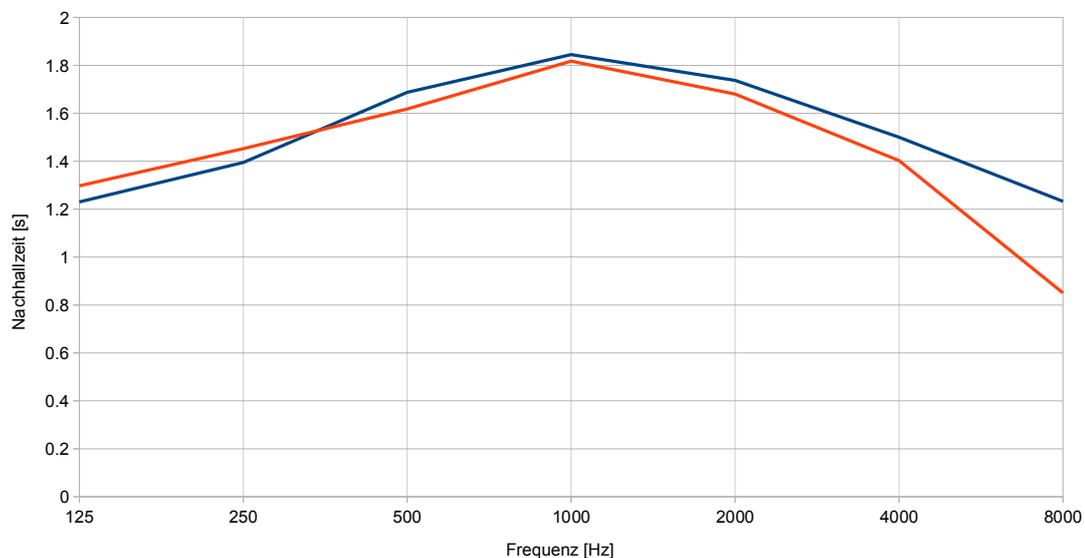


Abbildung 7.8: Grund- und Aufrisse



**Abbildung 7.9:** Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich  
(blau: **Messung** | rot: **Simulation**)

## 7.6 Optimierungen

Da im Sozialraum ähnliche akustische Szenarios wie in Gaststätten und Unterrichtsräumen auftreten muss man die härteste Forderung erfüllen: Die optimale Nachhallzeit für den Verwendungszweck Unterricht berechnet sich nach folgender Formel [Fuc03]:

$$T_{opt} = (0,32 \cdot \log \frac{V}{m^3} - 0,14) \quad [s] \quad (7.1)$$

Das Volumen beträgt  $134m^3$ , daraus ergibt sich eine optimale Nachhallzeit von  $0,51s$ . Das Toleranzband für die Nachhallzeit ist in Abbildung 7.10 zu sehen.

Um diese Forderungen zu erfüllen wurden nun mehrere Möglichkeiten durchgerechnet, wobei nur eine Variante hier ausgeführt wird:

In dieser Variante wird als Hauptabsorber die Decke um 20cm abgehängt und mit dem Lochplattenabsorber R8D2 der Firma *Trikustik* ausgestattet. Die Decke ist vom Rand jeweils 50cm entfernt, die Beleuchtungskörper können dabei weiter verwendet werden.

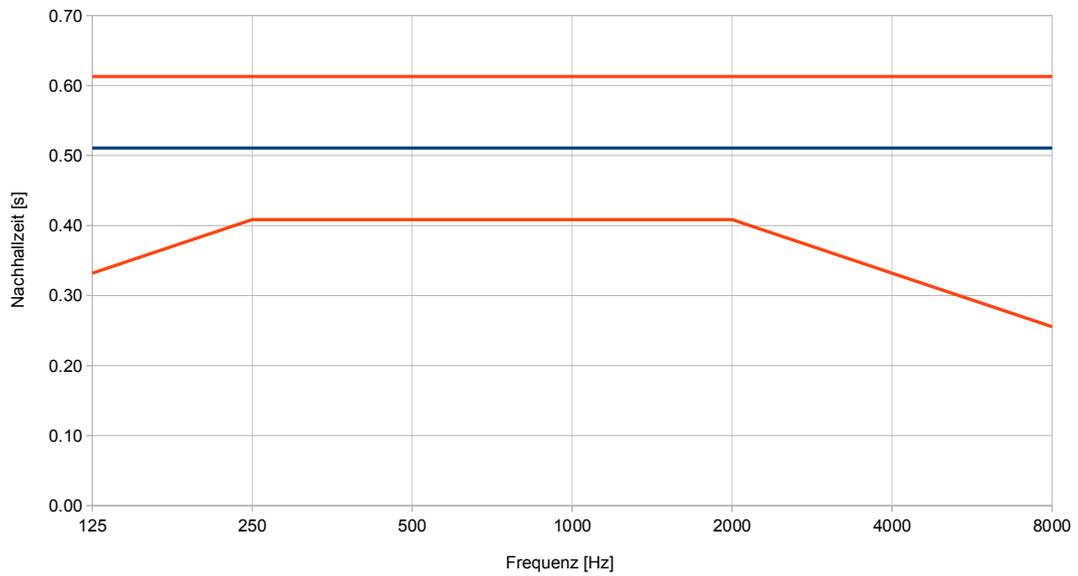


Abbildung 7.10: Optimale Nachhallzeit (blau) mit Toleranzgrenzen (rot)

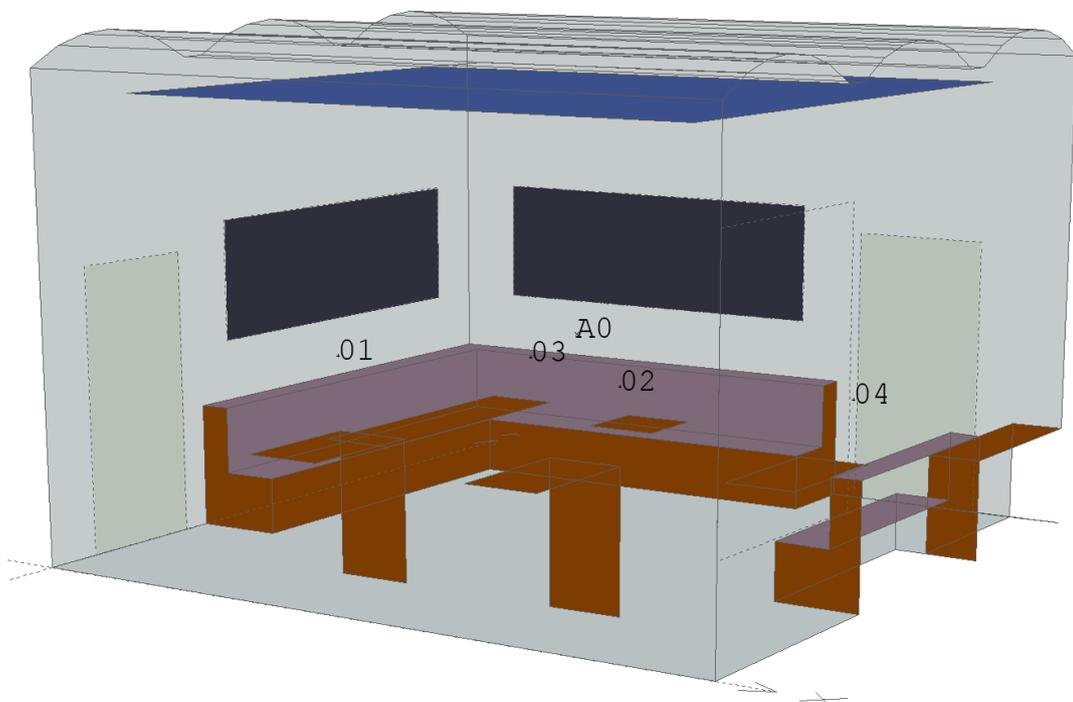


Abbildung 7.11: 3D-Modell der Optimierung

Zusätzlich werden zwei BKA mit je 3m Länge in 2,5m obere Höhe angebracht. Diese werden und mit schlichtem Stoff bespannt oder auch als Bild ausgeführt.

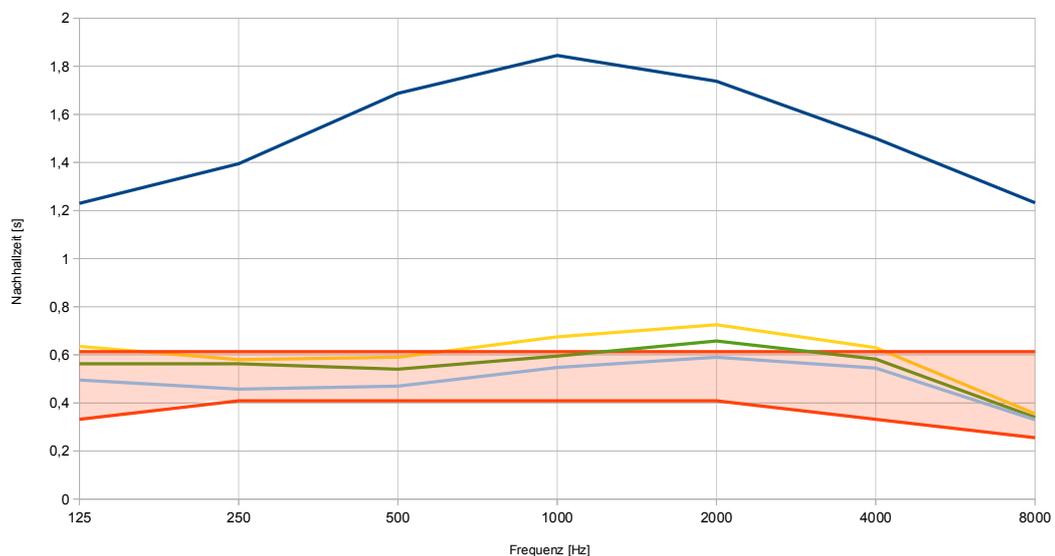
Die Absorptionsgrade der für die Optimierung verwendeten Absorber sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

**Tabelle 7.2:** Absorptionsgrade der Absorber [%]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>R8D2</b>	95	90	85	70	50	35
<b>BKA</b>	99	99	99	99	99	88

Des weiteren wird ein Deutlichkeitsgrad von 80% ein RASTI von 75%, sowie ein STI von 0,75 erreicht, was eine sehr beachtliche Verbesserung darstellt.

Im folgenden Diagramm sind Ausgangszustand, gewünschte Werte und die gewählte Variante noch einmal gegenüber gestellt.



**Abbildung 7.12:** Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen  
**blau:** Messung | **gelb:** Lochplattendecke | **grün:** Lochplattendecke + 1 BKA | **türkis:** Lochplattendecke + 2 BKA || **rot:** Toleranzgrenzen der optimalen Nachhallzeit

## 7.7 Kosten

Wie man Abbildung 7.12 entnehmen kann ist die Variante mit einer abgehängten Lochplattendecke und zwei Breitband-Kompaktabsorbern der Größe 1m x 3m völlig ausreichend um die Nachhallzeit und die Sprachverständlichkeit zu guten bis sehr guten Werten hin zu optimieren.

In Tabelle 7.3 sind die Kosten für eine solche Optimierung aufgelistet.

**Tabelle 7.3:** Kostenrechnung für den Sozialraum

	<b>Firma</b>	<b>Größe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Kosten</b>
<b>BKA</b>	Renz-Systeme	3m x 1m	2	1.240 EUR
<b>Textilbespannung</b>	Renz-Systeme	3m x 1m	2	580 EUR
<b>Druck</b>	Renz-Systeme	3m x 1m	2	700 EUR
<b>Lochplattendecke</b>	Trikustik	ca. 19m <sup>2</sup>		ca. 1.400 EUR
<b>Montage</b>				ca. 650 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				ca. <b>4.570 EUR</b>

Hier wäre zu überlegen, ob der Preis einer Stoffbespannung mit Druck den optischen Vorteil rechtfertigt, da Stoff und Druck fast genau gleich viel kosten, wie die Absorber selbst.

## 8 Meeting Point

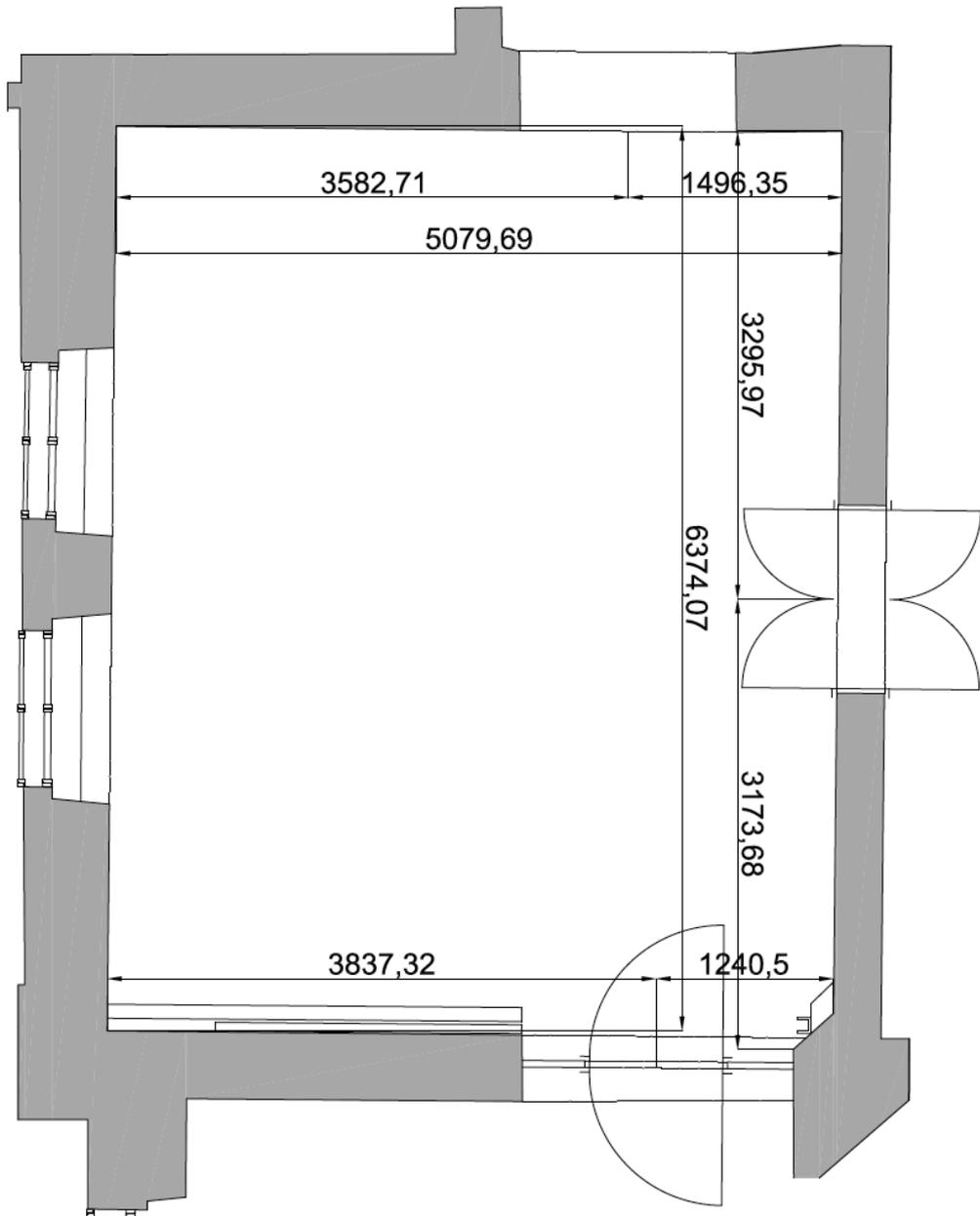
### 8.1 Die Räumlichkeiten

Der Raum befindet sich im ersten Stockwerk und ist ein Durchgangsbereich zwischen den Büros und einer Kaffeeküche. Nicht durch eine Tür abgeschlossen erstreckt sich nach hinten ein langer Gang. In Richtung Vorraum bzw. Kaffeeküche ist eine Glaswand mit Glasstüre, die für gewöhnlich offen bleibt. Durch den Vorraum gelangt man ins Stiegenhaus zum Erdgeschoß und Eingang. Der Meeting Point hat zwei große Kastenfenster, zum Zeitpunkt der Messung nicht mit einem Vorhang verdeckt, verputzte Wände und Decke und Parkettboden. Zur Einrichtung gehören weiters einige Kästen, zwei Zeitschriftenablagen, zwei Stehtische mit dazu passenden hohen Hockern, sowie zwei kleinere Tische mit dazu passenden Lehnstühlen.



**Abbildung 8.1:** Meeting Point

Da der Hauptraum mit dem Vorraum und dem Gang gekoppelt ist und diese somit die Akustik des Meeting Points enorm beeinflussen, müssen sie im Simulationsmodell auch mit betrachtet werden.



**Abbildung 8.2:** Grundriss vom Meeting Point

## 8.2 Durchführung der Messung

Es wurde für beide Positionen der Schallquelle je mit zwei Mikrofonpositionen gemessen. Dabei wurde für die Mikrofone im Sitzbereich eine Höhe von 1,2m und im Stehbereich eine Höhe von 1,7m gewählt. Die Höhe der Quelle blieb unverändert bei 1,35m. Für die Messung wurde Mobiliar wie Hocker, Lehnstuhl und kleine Tische entfernt, um in der Simulation weniger Komplikationen zu haben (s. Messplan Abb. 8.3).

## 8.3 Messergebnisse

Die Werte für die Nachhallzeiten wurden pro Quellenposition in der Tabellenkalkulation gemittelt, weiters wurde auch die Early Decay Time (EDT) dargestellt. Diese ist auffallend kleiner als die Nachhallzeit ( $T_{30}$ ). Das lässt sich durch die offenen Türen und die gekoppelten Räume erklären, von wo der Schall erst später wieder zurückgeworfen wird. Ansonsten liegen die  $T_{30}$  Kurven sehr nahe beieinander. Im sprachrelevanten Frequenzbereich werden Nachhallzeiten von fast 2s erreicht (siehe Abbildung 8.4).

Von WinMLS wurden neben den Nachhallzeiten auch STI, RASTI, ALCons und Deutlichkeitsgrad berechnet:

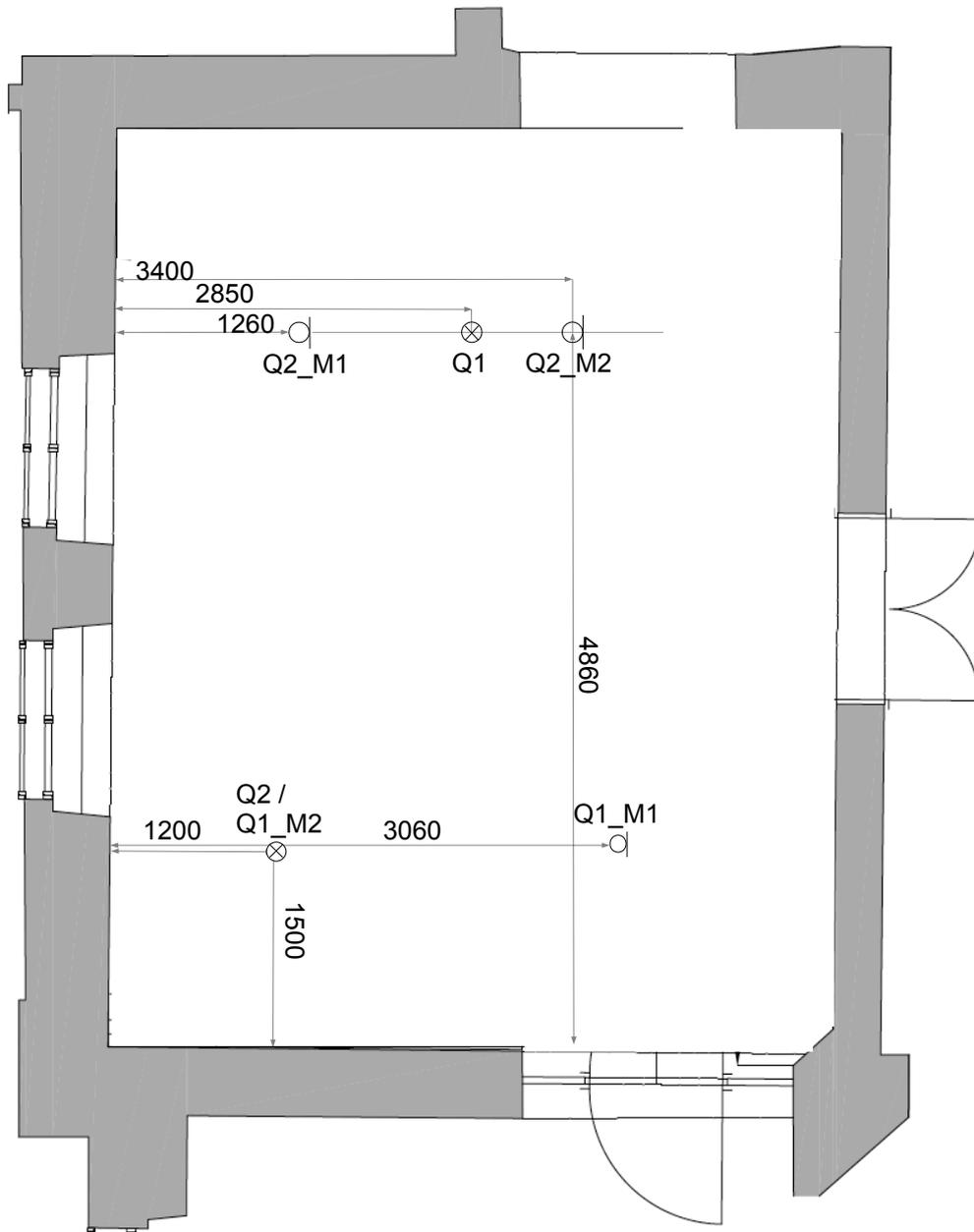
Für den Deutlichkeitsgrad ergibt sich ein mittlerer Wert von 45% (Ab 50% gilt gute Sprachverständlichkeit).

Für den STI wird ein Wert von 53% angegeben (Es gilt: ab 60% Gut, ab 75% Ausgezeichnet).

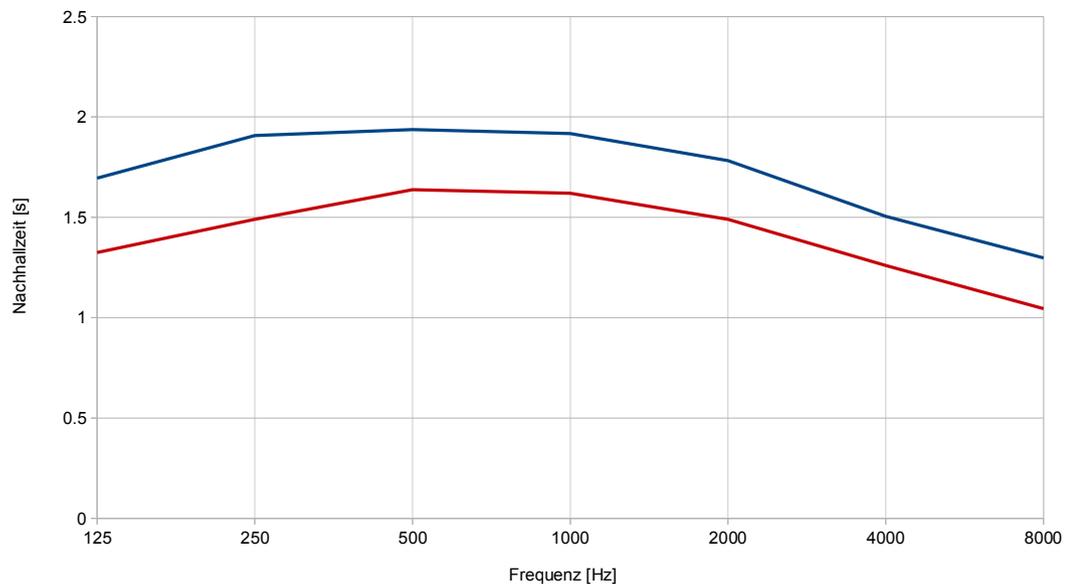
Für RASTI wurde ein mittlerer Wert von 50% errechnet (hier gilt: unter 50% schlechte und über 80% sehr gute Sprachverständlichkeit).

Weiters wurde ein ALCons von 9,8% berechnet (unter 7% gute, unter 20% befriedigende Sprachverständlichkeit).

Es zeigen sich insgesamt dürftige Werte, gerade für einen Kommunikationsort wären bessere Werte wünschenswert.



**Abbildung 8.3:** Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen



**Abbildung 8.4:** Messergebnis der Nachhallzeit (**blau**) und der Early Decay Time (**rot**) gemittelt über alle Mikrofon- und Quellpositionen

## 8.4 Erstellung des Simulationsmodells

Es wurde ein Modell in CATT-Acoustic erstellt, das dann auf die Messwerte abgestimmt werden kann. Im Modell wurden der angeschlossene Gang und der Vorraum annähernd nachgebildet, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Akustik des Meeting Point haben.

Ausgehend von Absorptionwerten aus Tabellen (siehe Anhang) wurden die Werte nach und nach angepasst, bis das Simulationsmodell nahe genug an den Werten der Messung war. Dabei wurde hauptsächlich die Werte für den Putz geändert, da er als größte Fläche auch den größten Einfluss auf die Nachhallzeit hat.

Die Absorptionsgrade für die Simulation des Raumes stehen in Tabelle 8.1.

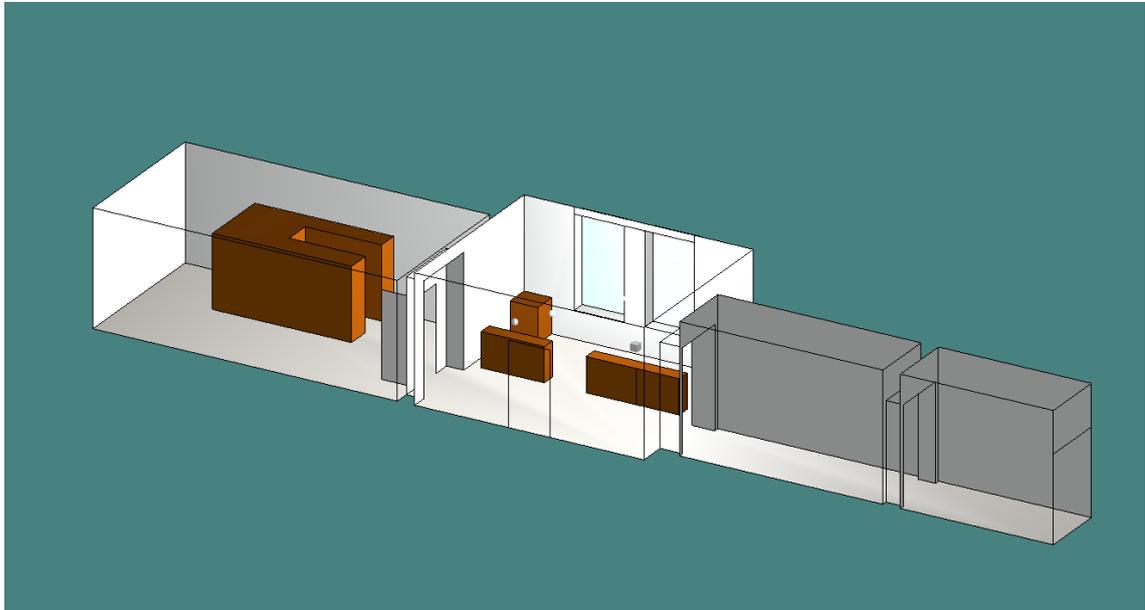


Abbildung 8.5: Simulationsmodell des Meeting Points

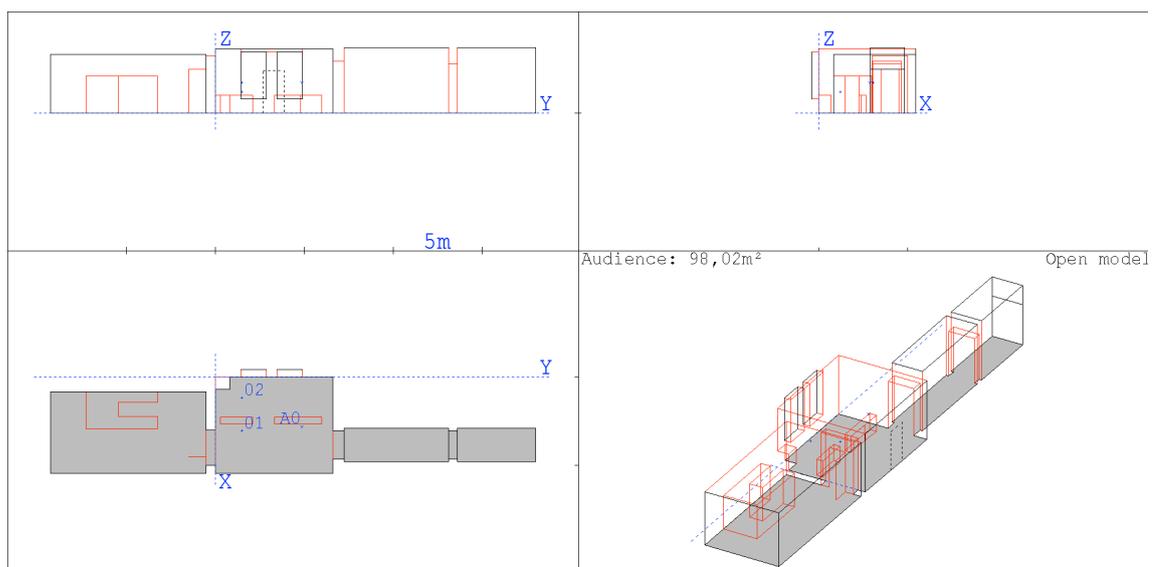


Abbildung 8.6: Auf- und Grundrisse des Meeting Points

**Tabelle 8.1:** Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Parkett</b>	2	3	4	5	5	10
<b>Putz</b>	6,5	6	5,5	5,5	5,5	5
<b>Holz</b>	12	4	6	3	7	1
<b>Holztür</b>	14	10	6	8	10	10
<b>Fenster</b>	28	20	10	6	2	1
<b>Glas</b>	4	3	3	3	2	2

## 8.5 Simulationsergebnisse

Es wurde eine Messung simuliert, bei der die Mikrofone und Quellen an den selben Positionen wie bei der tatsächlichen Messung stehen. So konnte mit den angepassten Werten für Absorption der verwendeten Materialien eine sehr gute Übereinstimmung gefunden werden.

Somit kann das Computermodell als gültig angesehen werden und daran Optimierungen versucht werden.

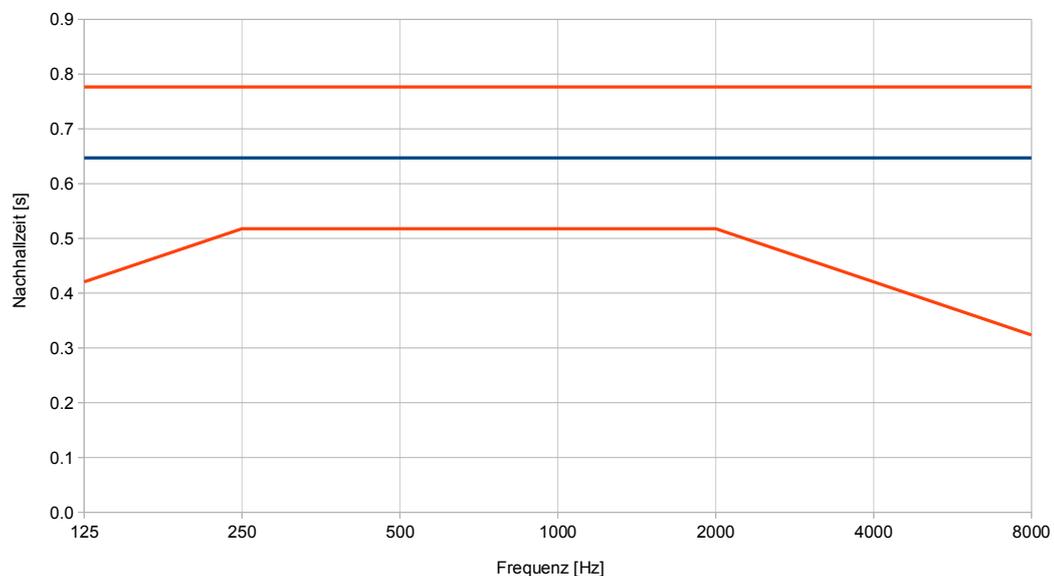
## 8.6 Optimierungen

Da im Meeting Point ähnliche akustische Szenarios wie in Gaststätten und Unterrichtsräumen auftreten muss man die härteste Forderung erfüllen: Die optimale Nachhallzeit für den Verwendungszweck Unterricht berechnet sich nach folgender Formel [Fuc03]:

$$T_{opt} = (0,32 \cdot \log \frac{V}{m^3} - 0,14) \quad [s] \quad (8.1)$$

Das Volumen wird um das der angeschlossenen Räume auf 357m<sup>3</sup> vergrößert, daraus ergibt sich eine optimale Nachhallzeit von 0,65s. Das Toleranzband für die Nachhallzeit ist in Abbildung 8.7 zu sehen:

Um diese Forderungen zu erfüllen wurden nun mehrere Möglichkeiten durchgerechnet. Der Vorraum und der Gang muss auch bedämpft werden, da sonst der unnatürliche Fall



**Abbildung 8.7:** Toleranzband der optimalen Nachhallzeit im Meeting Point

eintritt, dass wir eine kurze EDT und eine längere RT30 haben. EDT und T30 liegen in den folgenden Berechnungen nahe beieinander.

### 8.6.1 Variante 1: BKA und BASO100

In dieser Variante werden als Hauptabsorber im Meeting Point drei Breitband-Kompakt-Absorber der Firma *RENZ-Systeme* verwendet. Zusätzlich wird der Gang mit einem BKA und der Vorraum mit zwei kleineren BKA bedämpft. Diese können einfach aufgehängt werden und mit schlichtem Stoff bespannt oder auch als Bild in Erscheinung treten.

Im Gang wird ein BKA von 2,7m zwischen den beiden Türen aufgehängt. Im Hauptraum sind zwei BKA mit je 2m Länge rechts und links der Doppelflügeltüre und einer mit 2,7m Länge an die Wand zum Vorraum vorgesehen. Im Vorraum sind zwei BKA mit 1,5m Länge rechts und links der Bürotüre angebracht. Alle BKA werden in einer Höhe von 1,5m aufgehängt.

Als weitere Maßnahme kann an die Decken von Hauptraum, Vorraum und Gang ein oder mehrere Streifen des Breitband-Absorbermaterials *Basotect* der Firma *BASF Ludwigshafen* der Stärke 100mm geklebt werden. Diese Klebung ist rückstandsfrei zu entfernen. *Basotect* wird in 1m breiten Bahnen nach den folgenden Bildern angebracht.

Mit diesen Materialien wird schon eine gute Nachhallzeit erreicht (siehe Abbildung 8.8).

Des Weiteren wird ein Deutlichkeitsgrad von 82,7%, ein RASTI von 73% und einen STI von 0,71 erreicht, was eine sehr beachtliche Verbesserung darstellt.

### 8.6.2 Variante 2: BKA und abgehängte Lochplattendecke

In dieser Variante werden nahezu die selben BKA-Anordnungen wie in Variante 1 verwendet, nur dass hier der BKA im Hauptraum an der Wand zum Vorraum weggelassen werden kann. Zusätzlich wird nun die Decke um 20cm abgehängt und mit dem Lochplattenabsorber R8D2 der Firma *Trikustik* ausgestattet. Die Decke ist vom Rand jeweils 30cm entfernt, im Hauptraum sind zwei 1,7m breite Streifen und ein Mittelteil aus 12mm Gipsplatte angebracht, der zusätzlich eine bassabsorbierende Wirkung hat. Im Gang kann der hintere Deckenteil unbehandelt bleiben.

Der Deutlichkeitsgrad liegt bei 74%, der RASTI kann auf 71% angehoben werden und der STI steigt auch auf 0,71.

In Tabelle 8.2 sind alle Absorptionsgrade der für die Optimierung verwendeten Simulationen aufgelistet.

**Tabelle 8.2:** Absorptionsgrade der Absorber [%]

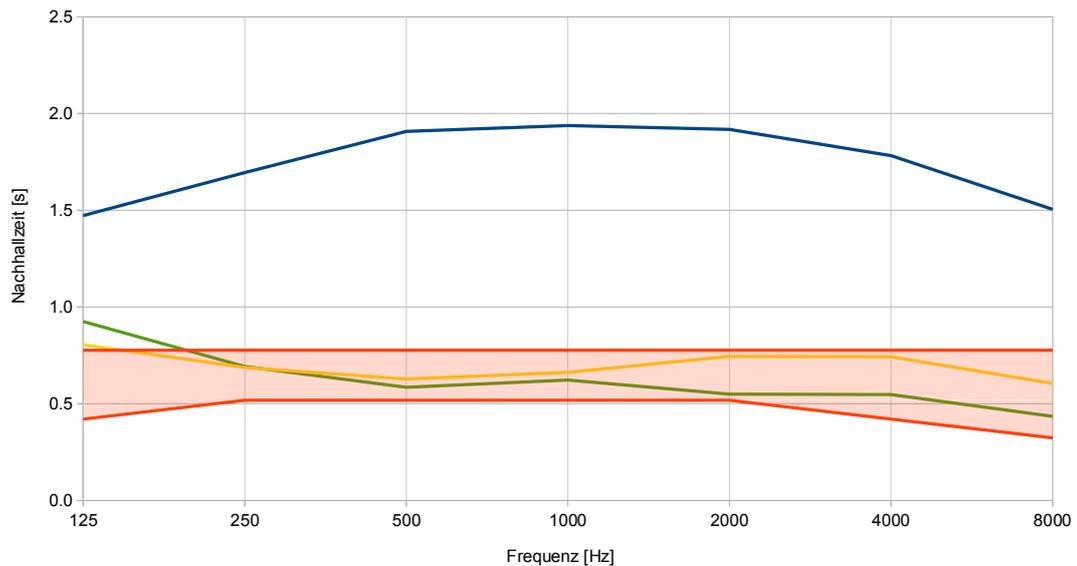
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>R8D2</b>	95	90	85	70	50	35
<b>BKA</b>	99	99	99	99	99	88
<b>BASO 100</b>	48	99	99	99	99	99

Im folgenden Diagramm 8.8 sind Ausgangszustand, gewünschte Werte und die beiden Varianten noch einmal gegenüber gestellt und in den Abbildungen 8.9 und 8.10 sieht man das optimierte Simulationsmodell.

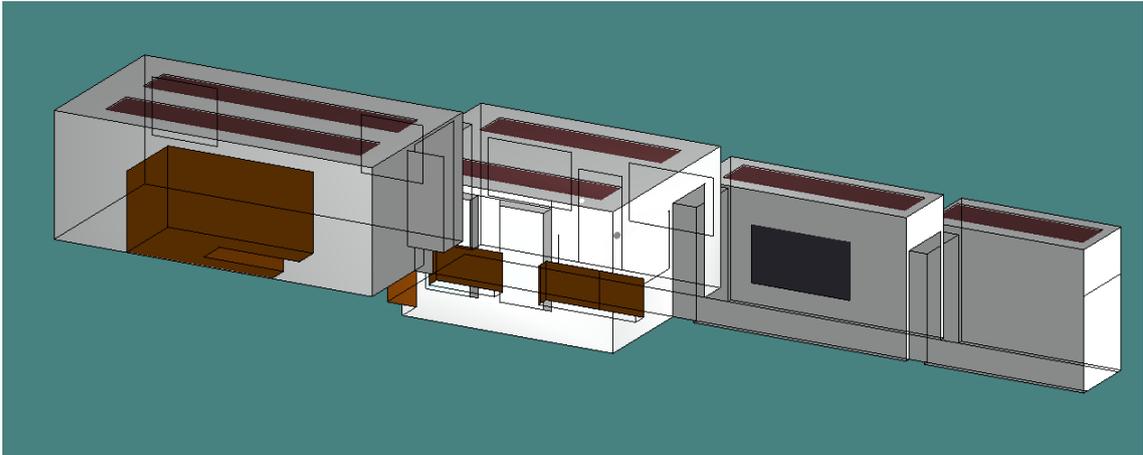
Man kann gut erkennen, dass beide Optimierungsvarianten gute Ergebnisse liefern und die Nachhallzeit fast über den gesamten Frequenzbereich in das Toleranzband verschoben wird.

Dadurch, dass die Kosten der beiden Varianten auch fast ident sind (siehe Kapitel 8.7),

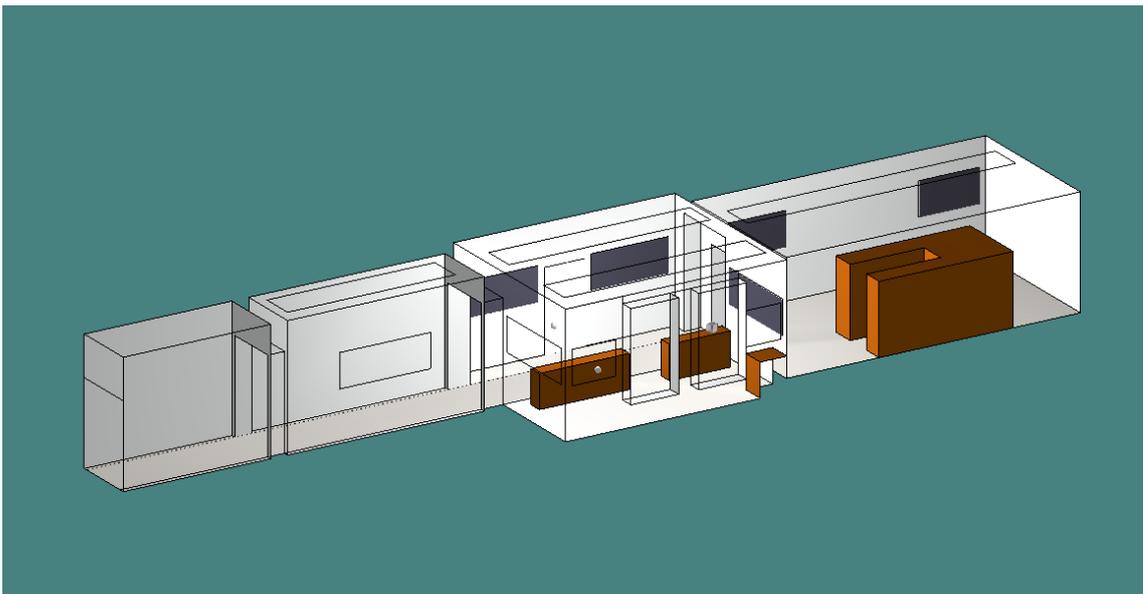
ist es eher eine Frage der Optik, welche Variante man bevorzugt und die Variante mit der Lochplattendecke ist meiner Ansicht nach die optisch ansprechendere Lösung.



**Abbildung 8.8:** Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen  
**blau:** Messung | **gelb:** BKA + Lochplattendecke | **grün:** BKA + Basotect || **rot:** Toleranzgrenzen der optimalen Nachhallzeit



**Abbildung 8.9:** 3D-Modell der Optimierungen



**Abbildung 8.10:** 3D-Modell der Optimierungen

## 8.7 Kosten

Die Kostenschätzungen für die beiden Optimierungsvarianten im Meeting Point sind in den Tabellen 8.3 und 8.4 aufgelistet.

**Tabelle 8.3:** Optimierungsvariante 1 im Meeting Point

	<b>Firma</b>	<b>Größe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Kosten</b>
<b>BKA</b>	Renz-Systeme		6	ca. 2.636 EUR
<b>Stoffbespannung</b>	Renz-Systeme		6	ca. 1.507 EUR
<b>Druck</b>	Renz-Systeme		6	ca. 1.688 EUR
<b>Basotect</b>	BASF	ca. 35m <sup>2</sup>		ca. 2.500 EUR
<b>Montage</b>				ca. 750 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				ca. <b>9.081 EUR</b>

**Tabelle 8.4:** Optimierungsvariante 2 im Meeting Point

	<b>Firma</b>	<b>Größe</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Kosten</b>
<b>BKA</b>	Renz-Systeme		5	ca. 2.077 EUR
<b>Stoffbespannung</b>	Renz-Systeme		5	ca. 1.222 EUR
<b>Druck</b>	Renz-Systeme		5	ca. 1.386 EUR
<b>Lochplattendecke</b>	Trikustik	ca. 35m <sup>2</sup>		ca. 3.300 EUR
<b>Montage</b>				ca. 1.300 EUR
<b>Gesamtkosten</b>				ca. <b>9.285 EUR</b>

Auch hier ist die Überlegung, ob der Preis einer Stoffbespannung mit Druck den optischen Vorteil rechtfertigt angebracht, da Stoff und Druck im Verhältnis zu den Absorbern relativ teuer sind.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Notwendigkeit einer akustischen Optimierung der fünf Räume im Palais Herberstein wurden Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet. Dabei wurde besonders Rücksicht auf den Denkmalschutz des Gebäudes genommen und architektonisch unauffällige und schlichte Varianten gewählt. Durch den Einsatz von innovativen Raumakustikelementen konnten in der Simulation gute bzw. sehr gute Werte für die Sprachverständlichkeit erreicht werden.

Der Konferenzsaal, der in seiner derzeitigen Form enorme akustische Probleme bereitet, kann mit den vorgeschlagenen Veränderungen eine gute Sprachverständlichkeit erhalten. Für einen repräsentativen Saal wäre es angebracht auch eine zur Verwendung passende, funktionierende Akustik zu haben.

Ähnliches gilt auch für das Besprechungszimmer. Auch wenn hier die Ausgangslage zumindest noch angemessen ist, sollten gerade Besprechungen reibungslos funktionieren. Ohne großen baulichen Aufwand kann in diesem Raum eine sehr gute Raumakustik verwirklicht werden.

Der Empfang stellt eine akustisch besonders schwierige Situation dar: Trotz weniger Flächen für Absorptionsmaterial und im schlechtesten Fall permanent offenen Türen konnte hier ein gutes Ergebnis simuliert werden. Da eine mögliche Umgestaltung des Empfanges auch aus anderen Gesichtspunkten nötig wird, ist eine finale akustische Planung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll.

Der Sozialraum konnte mit architektonisch schlichten Veränderungen auf sehr gute akustische Werte gebracht werden, was für einen Kommunikationsort wie diesen mit Sicherheit nötig ist.

Und im Meeting Point kann durch die Betrachtung der angeschlossenen Räume insgesamt eine ruhigere Atmosphäre erreicht werden. Die Gesprächssituation im Aufenthaltsbereich sollte deutlich angenehmer werden und weniger Störung in den nahen Büros verursachen. Auch hier sind die architektonischen Veränderungen schlicht und reversibel.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Palais Herberstein . . . . .	2
3.1	Messaufbau . . . . .	4
3.2	Messequipment . . . . .	5
3.3	Nachhallzeit und Early Decay Time [Wei08] . . . . .	9
3.4	Helmholtz-Resonator-Prinzip [DH98] . . . . .	14
3.5	Plattenabsorber [DH98] . . . . .	15
3.6	REAPOR <sup>®</sup> Glasschaum . . . . .	17
3.7	VPR als akustische Bilder (Firma Renz-Systeme) . . . . .	18
3.8	MPA der Firma <i>KAEFER Construction GmbH</i> . . . . .	19
4.1	Konferenzsaal . . . . .	20
4.2	Konferenzsaal ausgeräumt (Messzustand) . . . . .	21
4.3	Grundriss vom Konferenzsaal (korrigiert) . . . . .	22
4.4	Die Quelle steht vorne auf Höhe der Leinwand . . . . .	23
4.5	Die Quelle steht etwa in der Mitte des Raumes . . . . .	24
4.6	Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen . . . . .	25
4.7	Nachhallzeit T30 (Oktavbänder) gemittelt . . . . .	26
4.8	Nachhallzeit T30 (Terzbänder) gemittelt . . . . .	27
4.9	Messwerte für STI (Q1/Q2) $0 \dots STI \dots 1$ . . . . .	28
4.10	Messwerte für RASTI (Q1/Q2) [%] . . . . .	28
4.11	Messwerte für den Deutlichkeitsgrad (Q1/Q2) [%] . . . . .	29
4.12	Approximation der Rundung . . . . .	30
4.13	3D-Modell des Konferenzraumes . . . . .	30
4.14	3D-Modell mit Mikrofonpositionen . . . . .	31
4.15	Auf- und Grundrisse . . . . .	31
4.16	Simulierte Nachhallzeit . . . . .	33
4.17	Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich . . . . .	34

4.18	Simulationswerte für STI (Q1/Q2) $0 \dots STI \dots 1$ . . . . .	34
4.19	Simulationswerte für RASTI (Q1/Q2) [%] . . . . .	35
4.20	Simulationswerte für den Deutlichkeitsgrad (Q1/Q2) [%] . . . . .	35
4.21	Optimale Nachhallzeit mit Toleranzgrenzen . . . . .	36
4.22	Modell vom Konferenzraum mit Optimierungen . . . . .	37
4.23	Modell vom Konferenzraum mit Optimierungen . . . . .	38
4.24	Modell vom Konferenzraum mit Optimierungen . . . . .	38
4.25	Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen . . . . .	40
4.26	Vergleich des STI aller simulierten Optimierungen . . . . .	40
5.1	Messaufbau im Besprechungszimmer . . . . .	43
5.2	Grundriss vom Besprechungszimmer . . . . .	45
5.3	Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen . . . . .	46
5.4	Gemessene Nachhallzeit im Besprechungszimmer . . . . .	47
5.5	3D-Modell des Besprechungszimmers . . . . .	48
5.6	Simulierte Nachhallzeit beider Quellpositionen . . . . .	50
5.7	Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich . . . . .	50
5.8	Optimale Nachhallzeit mit Toleranzgrenzen . . . . .	51
5.9	3D-Modell mit Optimierungen . . . . .	52
5.10	3D-Modell mit Optimierungen . . . . .	52
5.11	Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen . . . . .	53
6.1	Grundriss vom Foyer und Empfang . . . . .	56
6.2	Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen . . . . .	57
6.3	Messaufbau im Empfangsbereich . . . . .	58
6.4	Gemessene Nachhallzeit aller Quellen und im Mittel . . . . .	59
6.5	3D-Modell des Foyers mit angrenzenden Räumen . . . . .	60
6.6	Simulierte Nachhallzeiten . . . . .	61
6.7	Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich . . . . .	61
6.8	Optimale Nachhallzeit mit Toleranzgrenzen . . . . .	62

6.9	3D-Modell mit Optimierungen . . . . .	63
6.10	3D-Modell mit Optimierungen . . . . .	63
6.11	Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen . . . . .	64
7.1	Hinterere Türe zum Flur . . . . .	66
7.2	Blick zur Küche . . . . .	67
7.3	Stehtische im Sozialraum . . . . .	67
7.4	Grundriss vom Sozialraum . . . . .	68
7.5	Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen . . . . .	69
7.6	Messergebnisse im Sozialraum . . . . .	70
7.7	3D-Modell vom Sozialraum . . . . .	72
7.8	Grund- und Aufrisse . . . . .	72
7.9	Simulierte und gemessene Nachhallzeit im Vergleich . . . . .	73
7.10	Optimale Nachhallzeit mit Toleranzgrenzen . . . . .	74
7.11	3D-Modell der Optimierung . . . . .	74
7.12	Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen . . . . .	75
8.1	Meeting Point . . . . .	77
8.2	Grundriss vom Meeting Point . . . . .	78
8.3	Messplan mit Mikrofon- und Quellpositionen . . . . .	80
8.4	Messergebnisse von Nachhallzeit und Early Decay Time . . . . .	81
8.5	Simulationsmodell des Meeting Points . . . . .	82
8.6	Auf- und Grundrisse des Meeting Points . . . . .	82
8.7	Toleranzband der optimalen Nachhallzeit im Meeting Point . . . . .	84
8.8	Vergleich der Nachhallzeit der simulierten Optimierungen . . . . .	86
8.9	3D-Modell der Optimierungen . . . . .	87
8.10	3D-Modell der Optimierungen . . . . .	87

## Tabellenverzeichnis

4.1	Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen . . . . .	32
4.2	Absorptionsgrade der Absorber [%] . . . . .	39
4.3	Kostenrechnung Variante 1 . . . . .	42
4.4	Kostenrechnung Variante 2 . . . . .	42
5.1	Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen . . . . .	49
5.2	Absorptionsgrade der Absorber [%] . . . . .	53
5.3	Kostenrechnung für das Besprechungszimmer . . . . .	54
6.1	Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen . . . . .	59
6.2	Absorptionsgrade der Absorber [%] . . . . .	64
6.3	Kostenrechnung für den Eingangsbereich . . . . .	65
7.1	Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen . . . . .	71
7.2	Absorptionsgrade der Absorber [%] . . . . .	75
7.3	Kostenrechnung für den Sozialraum . . . . .	76
8.1	Absorptionsgrade [%] der akustisch relevanten Oberflächen . . . . .	83
8.2	Absorptionsgrade der Absorber [%] . . . . .	85
8.3	Optimierungsvariante 1 im Meeting Point . . . . .	88
8.4	Optimierungsvariante 2 im Meeting Point . . . . .	88

**Anhang**

**Datenblätter**

## Kostenvoranschläge

## Referenzen

- [BEK93] G. Babuke, D. Eckholdt, and J. Kang, "Akustische eigenschaften alternativer poroeser absorber," 1993.
- [Bun11] Bundesdenkmalamt, "Denkmalschutz," 2011. [Online]. Available: <http://www.bda.at>
- [DH98] J. Dr. Hunecke, "Modelle von absorbern," 1998. [Online]. Available: <http://www.hunecke.de/de/wissen/index.html>
- [DSZ00] H. Drotleff, W. Scherer, and X. Zha, "Innovative raumakustik für denkmalgeschützte räume," 2000.
- [FBZ04] H. Fuchs, G. Babuke, and X. Zha, "Breitband-schallabsorber für reflexionsarme auskleidungen," 2004.
- [Fuc03] H. Fuchs, "Neufassung von din 18041- ein weckruf für gute raumakustik," *Bauphysik*, 2003.
- [FXB04] H. Fuchs, Z. Xueqin, and G. Babuke, *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative Akustik-Prüfstände*. Springer, 2004.
- [HB08] F. Huber and T. Bednar, "The influence of the scattering coefficient on the reverberation time," *Journal of the Acoustical Society of America*, p. 3355, 2008.
- [Rei03] B. A. Reismann, *Geschichte der Stadt Graz: Stadtlexikon*. Eigenverlag der Stadt Graz, 2003, no. Bd. 4.
- [WDS02] R. Wack, H. Drotleff, and H. Schmid, "Absorbermodell für einen gesinterten glasschaum," 2002.
- [Wei08] S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*. Springer, 2008.
- [Wes08] W. Weselak, *Akustische Messtechnik 1 VO*. TU Graz, 2008.
- [WF04] R. Wack and H. Fuchs, "Mikroperforierte akustik-segel in versammlungsräumen," 2004.
- [WG07] W. Weselak and G. Graber, *Raumakustik VO*. TU Graz, 2007.
- [ZZK94] X. Zha, H. Zhou, and J. Kang, "Mikro-perforierter platten-absorber (mpa)," 1994.