

Akustische Sanierung der Aula der technischen Universität Graz

Projektarbeit

durchgeführt von

Blasius Buchegger

Institut für Hochbau
der Technischen Universität Graz

Betreuer: Dipl.-Ing. Heinz Ferk

Graz, im Jänner 2014



Zusammenfassung

Eine akustische Sanierung denkmalgeschützter Räume kann aufgrund der begrenzten Möglichkeiten baulicher Veränderungen eine große Herausforderung darstellen. Untersuchungen mittels computergestützten Simulationen können hierbei sehr hilfreich sein, um zuverlässige Vorhersagen der Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen zu erhalten.

In dieser Arbeit wird die Planung der akustischen Sanierung der denkmalgeschützten Aula der Technischen Universität Graz vorgestellt. Planungsziel ist die Optimierung der Hörsamkeit und Sprachverständlichkeit bei Präsentationen und Vorträgen.

Nach einer detaillierten Aufnahme der Geometrie und der Materialdaten des Raums wird ein Computersimulationsmodell mittels der Software „CATT-Acoustic“ erstellt. Das Auditorium wird in ein feines Raster unterteilt, und die raumakustischen Gütemaße mittels „MLS“ („Maximum Length Sequence“) – Messtechnik extrahiert. In einer weiteren Messreihe werden die STI-Werte („Speech Transmission Index“) ermittelt, welche Aufschluss über die Sprachverständlichkeit geben. Mit den gewonnenen Messdaten wird das Simulationsmodell möglichst genau an die Realität angepasst und kalibriert. In der Verbindung mit entsprechenden Planungsberechnungen werden Maßnahmen erarbeitet, welche den zuvor genannten Anforderungen gerecht werden, wobei möglichst wenig in die Bausubstanz eingegriffen wird. Der komplette Planungsprozess orientiert sich an aktuellen internationalen und nationalen Normen.

Die Untersuchungen zeigen, dass aufgrund der stark begrenzten Möglichkeiten baulicher Veränderungen die normativen Vorgaben mit rein raumakustischen Maßnahmen nicht erreicht werden können. Somit wird auch die elektroakustische Ausstattung des Raumes neu konzipiert. Es gilt nützliche Schallenergie für das Auditorium bereitzustellen, wobei gleichzeitig die Anregung des diffusen Schallfeldes möglichst unterdrückt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass im Falle einer Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen befriedigende akustische Bedingungen in diesem historischen Raum geschaffen werden können.

Abstract

A significant acoustically improvement of historical auditoriums and halls can be a huge challenge due to limited possibilities of structural changes. In this case, computer based simulation investigations can be extremely helpful to get a reliable prediction of the effect of foreseen improvements. In this thesis, the design process and results of the acoustically upgrade of the historical auditorium of the University of Technology in Graz (Austria) is presented. Design goal is to optimize the speech intelligibility for presentations and lectures.

First the fundamentals, the detailed geometry and material data of the room have to be determined. After that, a computer-based simulation model using the software "CATT - Acoustic" of the current situation is created. The auditorium space is subdivided under application of a fine grid, and the quality of the room-acoustic is measured by "MLS" – measuring technique. In a further series of measurements, the "STI" values are determined, which can give a seat-related information on speech intelligibility.

On the basis of the obtained data, the simulation model can be calibrated and adapted to the reality as closely as possible to create reliable results. In conjunction with appropriate planning calculations there are measures developed, which are interfered as little as possible in the historical structural substance. The complete acoustic design process is based on current valid and relevant international and national standards.

The investigation shows, that with regard to the very limited possibilities of structural changes the targets can not be achieved only by room-acoustic measures. So also the existing electro-acoustic equipment has to be redesigned. The results show, that in case of application of the proposed measures very satisfying acoustic conditions can be provided in this historical room. The main focus should be set to generate enough sound energy for the auditorium, while suppressing the excitation of the diffuse sound field.

Danksagung

Folgenden Personen, die mich bei der Erstellung meiner Projektarbeit unterstützt haben, möchte ich meinen Dank aussprechen:

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Dipl.- Ing. Heinz Ferk für die äußerst hilfsbereite, umfangreiche und zeitlich sehr flexible Unterstützung bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Gerhard Graber für die Bereitstellung der PC's und die in der Arbeit notwendige Simulationssoftware, wie auch für diverse organisatorischen Tätigkeiten rund um die Arbeit.

Weiters gilt mein Dank Herrn Dipl.- Ing. Markus Mosing, welcher durch seine tatkräftige Unterstützung in diversen messtechnischen Fragen maßgeblich am Erfolg dieser Arbeit beteiligt war.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei der Firma „Ing. Wolfgang Fellner GesmbH“, welche durch die Bereitstellung von diversem Messequipment die in dieser Arbeit angeführten, umfangreichen Analysen ermöglichten.

Ein spezieller Dank gilt den Herrn Clemens Halder und Jan Kasim, welche in zahlreichen Fachdiskussionen und abschließenden Begutachtungen dieser Arbeit eine große Hilfe waren.

Weiters gilt mein Dank den Angehörigen der „Gebäude und Technik“ der technischen Universität Graz für den Zugang zu den Räumlichkeiten und die Weitergabe von sehr hilfreichen Informationen und Erfahrungswerten.

Inhaltsverzeichnis

I	Einführung	1
1	Einleitung	2
1.1	Aufgabenstellung / Projektziele	2
1.2	Die Aula der technischen Universität Graz	4
1.2.1	Vorhandene raumakustische Maßnahmen	5
1.3	Theoretische Grundlagen	7
1.3.1	Raumakustische Gütemaße	7
1.3.1.1	Nachhallzeit	7
1.3.1.2	Energiekriterien	9
1.3.2	Sprachübertragungsindex	10
II	Analyse der bestehenden Situation	12
2	Akustische Messungen	13
2.1	Ermittlung der raumakustischen Gütemaße	13
2.1.1	Vorgehensweise	13
2.1.2	Messpunkte	14
2.1.3	Messaufbau	15
2.1.4	Verwendete Messgeräte	16
2.2	Ermittlung des Sprachübertragungsindex	17
2.2.1	Vorgehensweise	17
2.2.2	Messpunkte	17
2.2.3	Messaufbau	18
2.2.4	Verwendete Messgeräte	18

2.3	Weitere Messungen	19
2.3.1	Messungen von Schallimmissionen / Messungen des Störschallpegels	19
2.3.2	Messung der Laufzeitverzögerung der Beschallungsanlage	20
2.3.3	Aufnahme der exakten Raumgeometrie und Umgebungseinflüsse	21
2.3.4	Darstellung der entsprechenden Messaufbauten	21
2.4	Messergebnisse	22
2.4.1	Raumakustische Gütemaße	22
2.4.1.1	Nachhallzeit	22
2.4.1.2	Deutlichkeitsmaß	24
2.4.1.3	Schwerpunktzeit	25
2.4.1.4	Zusammenfassung	26
2.4.2	Sprachübertragungsindex	26
2.4.3	Störgeräusche	27
2.4.3.1	Verkehrslärm	27
2.4.3.2	Beamer	31
2.4.4	Störende Reflexionen	32
2.4.5	Raumresonanzen	32
2.4.6	Die aktuelle Beschallungsanlage	33
2.4.6.1	Laufzeitverzögerung	33
2.4.6.2	Richtwirkung der Lautsprecher	33
3	Raumakustische Simulationen	36
3.1	CATT-Acoustic: Analyse von raum- und elektroakustischen Aspekten	36
3.1.1	Aufbau des Simulationsmodells	36
3.1.2	Kalibrierung	39
3.1.3	Validierung	40
3.1.4	Weiterführende Analysen	41
3.1.4.1	Nachhallzeit im besetzten Zustand	41
3.1.4.2	Störende Reflexionen	42
3.2	COMSOL Multiphysics: Analyse der Raumeigenresonanzen	43
3.2.1	Analyse der Eigenresonanzen des Raums	44

III	Akustische Optimierung	46
4	Optimierungsmaßnahmen	47
4.1	Vorgehensweise	47
4.2	Problemstellungen	48
4.3	Extremvarianten	49
4.3.1	Explizit bau- und raumakustische Maßnahmen	49
4.3.2	Explizit elektroakustische Maßnahmen	50
4.3.3	Schlussfolgerungen	51
5	Optimierung der Elektroakustik	53
5.1	Vorgehensweise	53
5.2	Lokalisation der Schallquelle	53
5.3	Gleichmäßige Beschallung des Auditoriums	54
5.4	Implementierung und Ergebnisse der Simulation	55
6	Bau- und Raumakustische Optimierung	57
6.1	Vorgehensweise	57
6.2	Ausgangssituation	58
6.3	Optimierungsmaßnahmen	59
6.3.1	Maßnahme 1: Verwendung einer gepolsterten Bestuhlung	59
6.3.1.1	Beschreibung der Maßnahme	59
6.3.1.2	Anforderungen an das Produkt	60
6.3.1.3	Ergebnisse der Simulation	60
6.3.2	Maßnahme 2: Verwendung von Akustikvorhängen	61
6.3.2.1	Beschreibung der Maßnahme	61
6.3.2.2	Anforderungen an das Produkt	61
6.3.2.3	Ergebnisse der Simulation	62
6.3.3	Maßnahme 3: Zusätzlicher Breitband-Absorber	63
6.3.3.1	Beschreibung der Maßnahme	63
6.3.3.2	Anforderungen an das Produkt	63
6.3.3.3	Ergebnisse der Simulation	64
6.3.4	Maßnahme 4: Verminderung des Störgeräuschpegels	65
6.3.4.1	Beschreibung der Maßnahme	65

6.3.4.2	Anforderungen an das Produkt	66
6.3.4.3	Ergebnisse der Simulation	66
6.3.5	Maßnahme 5: Mikroperforierter Stellabsorber	67
6.3.5.1	Beschreibung der Maßnahme	67
6.3.5.2	Anforderungen an das Produkt	67
6.3.5.3	Ergebnisse der Simulation	67
6.3.6	Maßnahme 6: Mikroperforierte Folie im Deckenbereich	68
6.3.6.1	Beschreibung der Maßnahme	68
6.3.6.2	Anforderungen an das Produkt	70
6.3.6.3	Ergebnisse der Simulation	70
6.3.7	Nicht weiter verfolgte Optimierungsmaßnahmen	71
7	Zusammenfassung und Ausblick	73
7.1	Zusammenfassung	73
7.2	Ausblick	73
IV	Anhang / Literaturverzeichnis	76
A	Verwendete Messpunkte	77
B	Berechnungen zu den Kapiteln	79
C	Absorptions- und Streugrade der Begrenzungsflächen	80
D	Zusammenfassung bau- und raumakustischer Maßnahmen	82
	Literaturverzeichnis	84

Teil I

Einführung

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Aufgabenstellung / Projektziele

Bei Darbietungen wie Reden, Verleihungen oder Präsentationen hängt der Erfolg der Veranstaltung stark von der Sprachverständlichkeit ab. Besonders in älteren Räumen dominieren Materialien wie Marmor, Parkett oder glatter Putz die Raumbegrenzungsflächen. Eine Fülle an Ornamenten und Verzierungen schmücken den gesamten Raum und tragen zu einem ehrwürdigen Ambiente bei. Folgedessen befindet sich nur sehr wenig Absorptionsfläche im Raum, was in akustischer Hinsicht ein großes Problem darstellt. Die Folge ist eine - in Bezug auf die Verwendungsart des Raumes - sehr lange Nachhallzeit. Zumeist erschwert ein bestehender Denkmalschutz die bauliche Einbringung von zusätzlichen akustischen Absorptionsflächen.

Die Aula der technischen Universität Graz stellt hierbei ein passendes Beispiel dar. Im akustischen Planungsprozess gilt das Augenmerk besonders der Schonung der Bausubstanz und einer möglichst einfachen Umsetzung. Weiters wird auf haustechnische Interessen wie z.B. Reinigungs- oder Wartungsmöglichkeiten Rücksicht genommen. Hierbei lässt besonders die prächtige Deckenkonstruktion beinahe keine Verbesserungsmaßnahmen zu.

Als Maß zur Beschreibung der Sprachverständlichkeit wird der sogenannte „Sprachübertragungsindex“ (engl.: „Speech Transmission Index“ / „STI“) herangezogen, welcher der Bewertung der Raumsituation und der Wirksamkeit der Verbesserungsmaßnahmen dient. Als primäres Planungsziel soll auf einer Definitionsskala von 0 – 1[-] mindestens 0,6[-] erreicht werden.

In einer vorangegangenen Diplomarbeit aus dem Jahre 1989 wurde diese Thematik bereits aufgefasst. Hierbei wurde die Problemstellung sehr umfangreich und detailliert mit allen zu dieser Zeit verfügbaren wissenschaftlichen Mitteln behandelt, und diese Arbeit war besonders im Vorfeld der Planung der Messreihen und Analyse sehr nützlich. Wie sich im Zuge der Recherchen und in Besprechungen mit dem verantwortlichen, technischen Personal herausstellte, wurden aber damals leider nicht alle empfohlenen Maßnahmen korrekt umgesetzt, wodurch die entsprechende Zielsetzung nicht erreicht wurde. Weiters wurden im Laufe der Jahre mehrfach Veränderungen am Raum in Bezug auf die Einrichtung und besonders auch in Bezug auf die Elektroakustik vorgenommen, wodurch sich die akustische Situation verschlechterte.

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit die Thematik neu bearbeitet und diskutiert. Neben einer Vielzahl akustischer Messungen kommen auch umfassende, simulationsbasierte Untersuchungen zur Verwendung, welche ein tiefgreifendes Verständnis der akustischen Gegebenheiten des Raumes ermöglichen. Infolge dieser Kenntnisse gelang es, gezielt Maßnahmen zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit zu ergreifen.

Faktoren, welche die Sprachverständlichkeit sehr stark negativ beeinflussen sind primär:

- Unzureichender Schallpegel
- Eine zu hohe Nachhallzeit
- Ein zu hoher Störgeräuschpegel
- Störende Reflexionen und Raumresonanzen

Somit galt es diese Einflüsse zu unterdrücken, wobei der Eingriff in die Bausubstanz möglichst gering sein sollte.

Um die Ausgangssituation der Planung exakt zu erfassen, wurden mehrere akustische Messreihen durchgeführt. In weiterer Folge dienten die erhaltenen Messwerte, das Simulationsmodell möglichst exakt an die Realität anzupassen und zu validieren.

1.2 Die Aula der technischen Universität Graz

Die altehrwürdige Aula der technischen Universität Graz stellt einen faszinierenden Veranstaltungsort für akademische Feiern und Vorträge dar. In Anwesenheit von Kaiser Franz Joseph I. wurde das Gebäude in der Rechbauerstrasse 12 am 12. Dezember 1888 eröffnet [1].

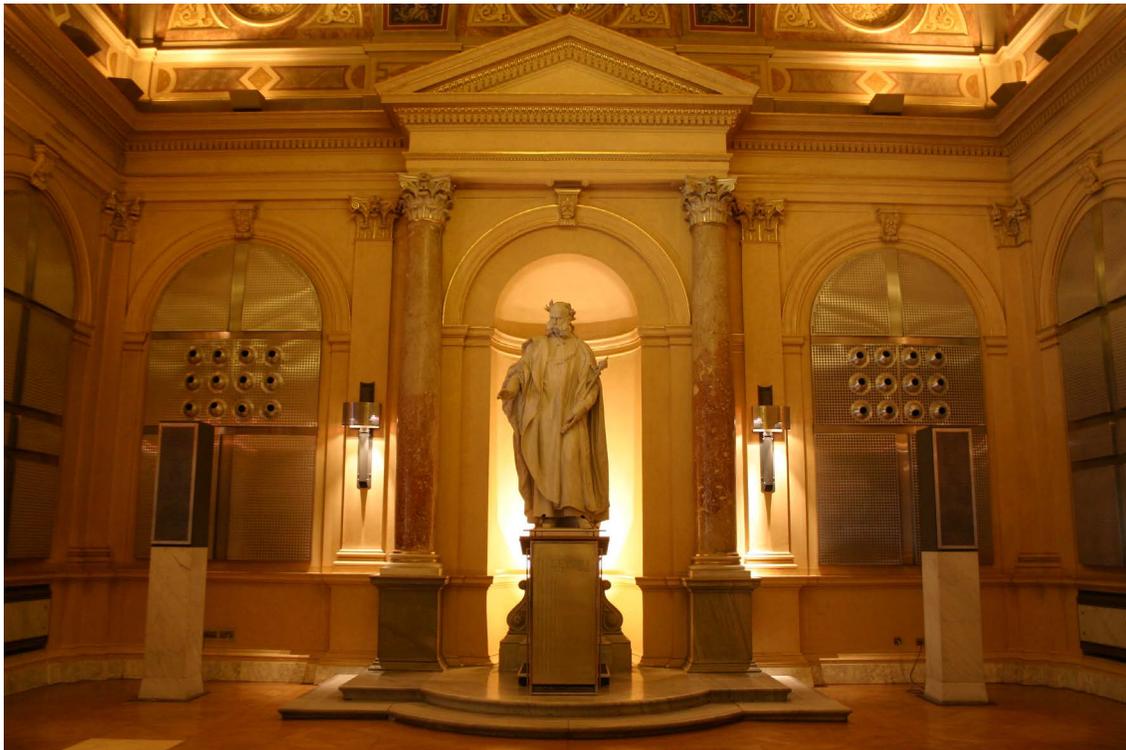


Abbildung 1.1: Die Aula der technischen Universität Graz

Insbesondere die prunkvolle Deckenkonstruktion mit einer Fülle an Ornamenten und Verzierungen erzeugen ein beeindruckendes Ambiente.

Diese historischen und architektonischen Umstände führten dazu, dass der Raum, bzw. das gesamte Gebäude in den Schutz des Bundesdenkmalamtes aufgenommen wurde.



Abbildung 1.2: Spezielle Deckenkonstruktion

1.2.1 Vorhandene raumakustische Maßnahmen

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde im Jahr 1989 ein raum- und elektroakustisches Konzept im Zuge einer Diplomarbeit entwickelt. Hierbei wurden schallabsorbierende Paneele konstruiert, mit denen die Raumakustik ausreichend verbessert werden sollte. Diese sollten aus 8[cm] dicken Mineralfaserplatten bestehen, welche auf der Vorderseite mit Leinen bespannt sind. Mit einem Rahmen aus Holz sollten die Paneele in der zuvor etwa 15[cm] ausgebrochenen Mauer eingepasst werden [18, S. 59].

Die bauliche Umsetzung erfolgte jedoch stark abweichend: Die geplante, konstante Dicke der Absorber mit 8[cm] gewährleistet oberhalb von rund 500[Hz] eine Absorption von mindestens $\alpha \geq 0,8[-]$. Umgesetzt wurden nach außen leicht schräg gestellte Mineralfaserplatten mit einer Dicke von 5,4[cm] bis 10,4[cm], welche mit 1,1[mm] dicken Aluminiumblechverkleidungen versehen sind. Zwar ist letzteres aufgrund der hohen Lochdichte mit Lochdurchmessern von 24[mm] im interessierenden Frequenzbereich ausreichend akustisch transparent (rund 20[%] Lochanteil, siehe auch [10, S.75, S.77]),

die Schrägstellung lässt jedoch vermuten, dass bei der Umsetzung lediglich 5[cm] dicke Mineralfaserplatten verwendet wurden.

Weiters wurde der geplante Mauerwerkseinbruch nicht durchgeführt, stattdessen wurden die Absorber direkt an die Wand montiert. Im Kern der damaligen Konzeption der Absorber war eine Erhöhung der Wirksamkeit im mittelfrequenten Bereich, indem diese in einem bestimmten Wandabstand¹ angebracht werden. Dieser Effekt blieb jedoch unberücksichtigt.

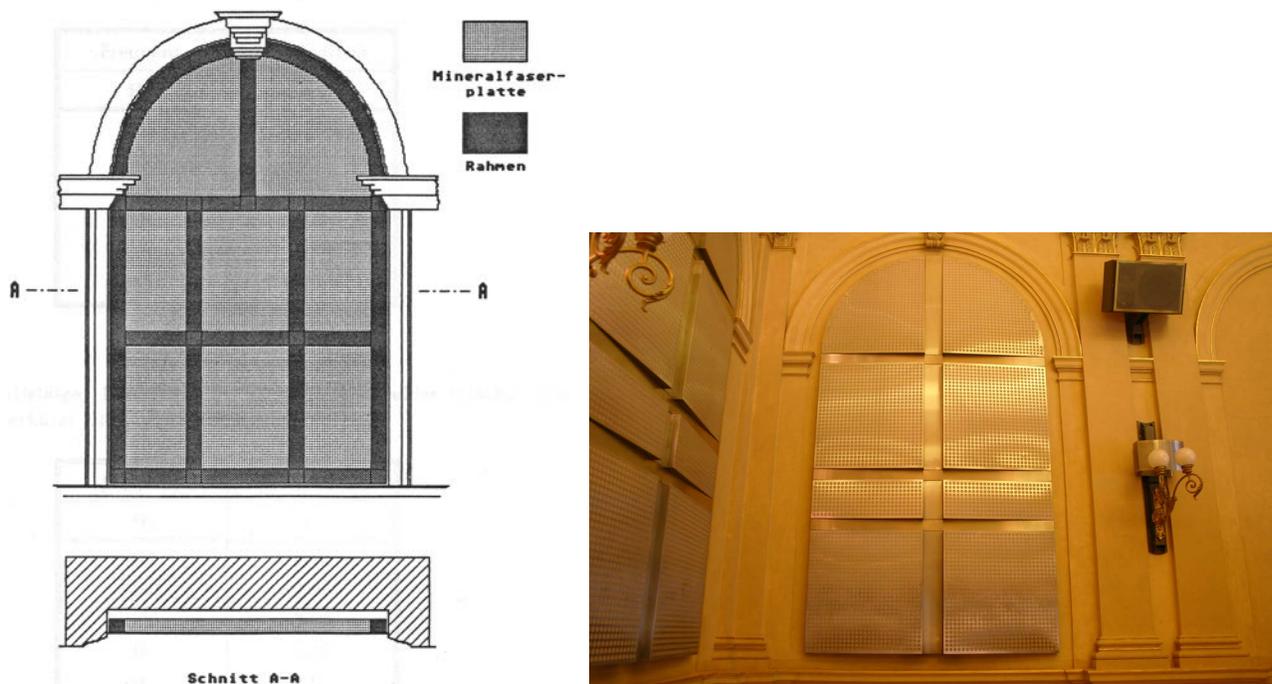


Abbildung 1.3: Akustische Absorber: Skizze der Planung (links) und umgesetzte Variante (rechts)

Diese Analyse lässt somit folgende Schlussfolgerung zu:

Durch die abweichende Umsetzung der Absorber sind diese nur zum Teil derart wirksam wie ursprünglich vorgesehen. Eine Demontage und Kontrolle der Einbauten war nicht möglich, der Aufbau lässt jedoch die Vermutung zu, dass eine anständige Wirksamkeit der Absorber ($\alpha \geq 0,8[-]$) erst ab einer Frequenz von rund 800[Hz] einsetzt, welche zu tiefen Frequenzen abnimmt.

Diese Tatsachen würde nun die Idee zulassen, die vorhandenen Absorber zu sanieren, um die Wirk-

¹Platzierung des Absorbers im Maximum der Schallschelle bei einem Wandabstand von $d = \frac{\lambda}{4}[m]$, siehe auch [10, S.74]

samkeit im tieffrequenten Bereich zu erhöhen. In der vorangegangenen Arbeit würden sich im Falle einer maximalen Absorptionswirkung folgende (berechnete) Nachhallzeiten ergeben: [18, S.60]

Frequenz [Hz]	Nachhallzeit [s]
125	3,54
250	2,59
500	2,04
1000	1,84
2000	1,25
4000	0,98

Tabelle 1.1: Berechnete Nachhallzeiten bei Verwendung von Absorbern maximaler Wirkung

Aufgrund des geringen Flächenanteils von rund $84[m^2]$ im Vergleich zur Gesamtraumoberfläche von rund $1015[m^2]$ (berechnete Werte aus Simulationen in „CATT-Acoustic“) ist es jedoch effektiver, anstatt die Wirksamkeit der vorhandenen, (tieffrequent) mittelmäßig wirksamen Absorptionsfläche zu erhöhen, zusätzliche Absorptionsfläche zu schaffen. Diese Annahme wird in den nun folgenden Kapiteln verdeutlicht.

1.3 Theoretische Grundlagen

1.3.1 Raumakustische Gütemaße

1.3.1.1 Nachhallzeit

Die wohl auffälligste akustische Eigenschaft stellt die Halligkeit eines Raums dar. Sie ist charakterisiert durch die Dauer des Nachhalls, also der Abklingzeit eines Schallereignisses nach Beendigung der Schallabstrahlung. Hierauf basierend wurde von *Sabine* vor etwa sieben Jahrzehnten das Kriterium „Nachhallzeit“ definiert, was somit das älteste und bekannteste raumakustische Gütemaß darstellt. Über lange Zeit war eine optimale Nachhallzeit die einzige Zielgröße raumakustischer Planung. [10, S.135]

Definiton Nach [10, S.136] gilt die Definition:

Die Nachhallzeit T ist diejenige Zeit, in der nach Beenden der Schallabstrahlung in einem Raum der Schalldruck auf ein Tausendstel seines Ausgangswertes, d.h. der Schalldruckpegel um 60[dB] gesunken ist. Nach *Sabine* gilt für die Nachhallzeit:

$$T = 55,3 \frac{V}{Ac_0} = 0,163 \frac{V}{A} \quad [\text{s}] \quad (1.1)$$

Dabei ist:

- V das Raumvolumen [m^3]
- c_0 die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft [m/s]
- A die äquivalente Schallabsorptionsfläche [m^2]

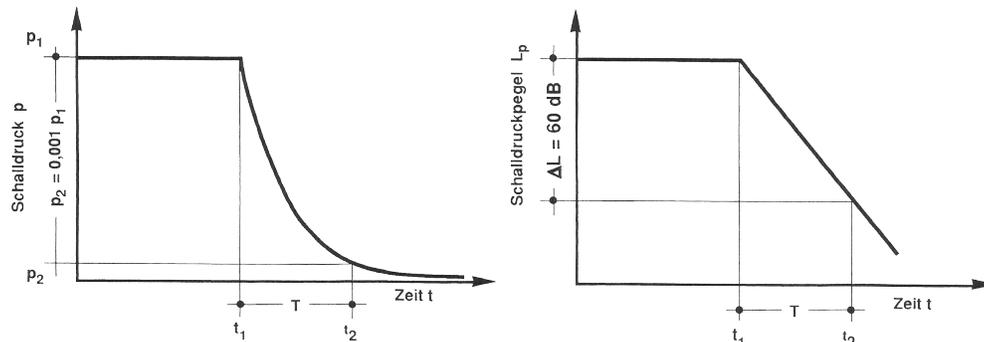


Abbildung 1.4: Nachhallvorgang für Schalldruck p und Schalldruckpegel L_p [10, S.137]

Für Sprache liegt die optimale mittlere Nachhallzeit im Allgemeinen niedriger (Näherungswert: 1[s]) als für Musik (Näherungswert sinfonische Musik: 2[s]) [10, S.137].

Die Tatsache, dass die Nachhallzeit überall im Raum gleich ist, jedoch Auditorien teils unterschiedlich bewertete Platzbereiche aufweisen, lässt darauf schließen, dass es noch weitere raumakustische Gütemaße geben muss. Diese werden im nächsten Kapitel vorgestellt [10, S.137].

1.3.1.2 Energiekriterien

Die Raumimpulsantwort an einem Hörerort charakterisiert in diesem Punkt das Schallfeld. Daraus lässt sich ein schematisierter zeitlicher Verlauf der eintreffenden Schallenergien in einem Reflektogramm ableiten, welches in nachfolgender Abbildung 1.5 dargestellt wird. Ein wesentliches Merkmal für die Qualität eines Zuhörerplatzes ist neben den statistisch verteilten späten Reflexionen (Nachhallzeit) das Verhältnis der Energien von Direktschall W_D , Anfangsreflexionen W_I (I für Initial) und Nachhall W_R (R für Reverberation) zur Gesamtenergie W_{ges} . [10, S.149]

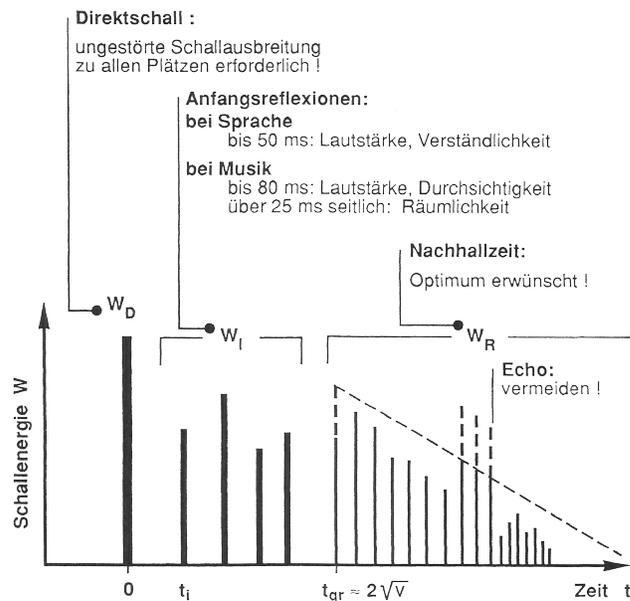


Bild 4.59 Schematisierte Raumimpulsantwort

t_i Zeit zwischen Direktschall und erster Reflexion (Initial Time) in ms

t_{gr} Grenzzeit für den Übergang von Anfangsreflexionen zu diffusen Reflexionen (Nachhall) in ms

V Volumen in m^3

Abbildung 1.5: Schematisierte Raumimpulsantwort [10, S.149]

Zur Beurteilung dieser Energiekriterien beschränkt man sich zumeist auf den mittleren Frequenzbereich (Oktave mit der Mittenfrequenz 1000[Hz]).

Deutlichkeitsmaß C_{50} : Für die Silbenverständlichkeit ist besonders die bis etwa 50[ms] nach dem Direktschall am Hörerort eintreffende Schallenergie maßgeblich. Ein hierbei geeignetes, objektives Kriterium stellt das Deutlichkeitsmaß C_{50} dar, welches folgendermaßen definiert ist: [10, S.150]

$$C_{50} = 10 \log \frac{W_{0...50ms}}{W_{50ms...∞}} \quad [dB] \quad (1.2)$$

Dabei ist:

$W_{0...50ms}$ die bis 50[ms] eintreffende Schallenergie
 $W_{50ms...∞}$ die nach 50[ms] eintreffende Schallenergie

Je größer dieser Parameter ist, desto besser ist die Verständlichkeit. Sehr gute Silbenverständlichkeit von mehr als 70[%] werden mit Werten von $C_{50} > 0[dB]$ erreicht. [10, S.150]

Schwerpunktzeit T_s : Das Deutlichkeitsmaß setzt in Bezug auf die eintreffende Schallenergie eine scharfe Zeitgrenze mit 50[ms]. Die Schwerpunktzeit entspricht hierbei der tatsächlichen Schallwirkung besser, da sie keine derartige Grenze enthält. Sie ist definiert als der Flächenschwerpunkt des über die Zeit integrierten Quadrats des Schalldrucks und ist somit ein Maß für die zeitliche Lage hoher Leistungen [10, S.150] [12, S.98]:

$$T_s = \frac{1}{W_{ges}} \int_0^{\infty} t \cdot W(t) dt \quad [s] \quad (1.3)$$

Optimale Werte für Sprache liegen hierbei bei $T_s < 80[ms]$.

1.3.2 Sprachübertragungsindex

Der Sprachübertragungsindex *STI* (Speech Transmission Index) stellt eine Messmethode dar, welche speziell für die Sprachübertragung entwickelt wurde. Dabei wird ein der Sprache sehr ähnliches Messsignal verwendet. Ein Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, neben der natürlichen Akustik des Raums auch elektroakustische Komponenten für die Verstärkung der Sprachsignale einzubeziehen.

Grundsätzlich ergeben sich zwei verständlichkeitsmindernde Faktoren bei der Ausbreitung von deutlich gesprochener Sprache in einem Raum. Einerseits wird sie durch das Hintergrundgeräusch, das sich der Sprache überlagert, andererseits durch das diffuse Schallfeld negativ beeinflusst. Werden

diese Faktoren einem mit 100[%] modulierten Sprachspektrum einer Schallquelle hinzugefügt, vermindert sich der resultierende Modulationsgrad. Diese Abnahme des Modulationsgrads wird in weiterer Folge speziell gemittelt, gewichtet und zum *STI* zusammengefasst. Für Details hierzu wird auf [12] bzw. [8] verwiesen.

In der nachfolgenden Tabelle werden kurz die Kategorisierungen der Sprachverständlichkeit für den Norm-*STI* zusammengefasst. Hierbei gilt jedoch zu beachten, dass für hörbeeinträchtigte Personen oder nicht-muttersprachliche Hörer im Allgemeinen deutlich höhere Werte erforderlich sind. Details hierzu sind [8] zu entnehmen.

<i>STI</i> -Qualifikationsbereich	Norm- <i>STI</i>
schlecht bis schwach	0 – 0,3
schwach bis angemessen	0,3 – 0,45
angemessen bis gut	0,45 – 0,6
gut bis ausgezeichnet	0,6 – 0,75

Tabelle 1.2: Kategorisierung des Norm-Sprachübertragungsindex [8, S.56]

Teil II

Analyse der bestehenden Situation

Kapitel 2

Akustische Messungen

2.1 Ermittlung der raumakustischen Gütemaße

2.1.1 Vorgehensweise

Zur Ermittlung der raumakustischen Gütemaße wurden akustische Messungen nach ÖNORM EN ISO 3382-1 [7] an allen oben angeführten Sende- und Empfangspositionen durchgeführt, wobei teils auch die bestehende Bestuhlung miteinbezogen wurde. Insgesamt wurden 94 Messungen aller Qualitätskriterien durchgeführt.

Im Allgemeinen wurden die akustischen Messungen auf den in EN ISO 3382-1 [7] geforderte Mindestfrequenzbereich von $100[Hz]$ bis $5000[Hz]$ begrenzt. Diese Vorgehensweise hat folgende Gründe:

1. Da die gesamte zur Verfügung stehende Messzeit sehr begrenzt war, musste ein detaillierter Messplan verfasst werden. Ein Initial-Ziel war unter anderem der Vergleich von vier verschiedenen Aufführungssituationen, weiters sollte das Auditorium mit einer hohen Ortsauflösung zum Zweck der Vergleichbarkeit mit Simulationsdaten erfasst werden. Eine Verdoppelung der Bandbreite des zur Messung verwendeten MLS-Signals¹ beispielsweise für Messungen bis $10[kHz]$ hätte in etwa eine Verdopplung der notwendigen Messzeit zur Folge gehabt, was die geplante Anzahl von Messpunkten und Mess-Situationen nicht ermöglicht hätte.

¹„Maximum Length Sequence“, siehe auch [20, S.102]

2. Das Ziel der Arbeit war die Optimierung der Akustik in Bezug auf Sprachverständlichkeit. Laut [9, Band 1, S.63] fallen Komponenten unter $80[Hz]$ (männliche Sprache) bei üblichem Abstand des Zuhörers von einem Sprecher unter die Hörschwelle, sodass diese beispielsweise bei einer Audioaufnahme weggefiltert werden können. Weiters enthalten die für die Sprache wichtigen Konsonanten Komponenten bis lediglich etwa $5[kHz]$. Im höherfrequenten Bereich wären lediglich noch beispielsweise Zischlaute wie „s“, oder „sch“ vorzufinden.
3. Eine Begrenzung der Bandbreite verringert die Datenmenge und somit auch den Aufwand für die Datenverarbeitung.
4. Als Optimierungswerkzeug wird die Simulationsumgebung CATT-Acoustic verwendet. In dieser beginnt der analysierbare Frequenzbereich bei $125[Hz]$ und endet (in den Grundeinstellungen) bei $4000[Hz]$. Eine Erweiterung der oberen Grenze bis $16000[Hz]$ wäre zwar grundsätzlich möglich, da jedoch üblicherweise Absorptionsgrade von Baumaterialien in Literatur und in Datenblättern der Hersteller lediglich bis $4000[Hz]$ angegeben sind, müssten hier Schätzwerte verwendet werden.

2.1.2 Messpunkte

Das Auditorium wurde an 18 Messpositionen exakt erfasst. Um die Vergleichbarkeit mit einer vorangegangenen Arbeit aus dem Jahre 1989 zu wahren, wurden die damaligen 7 Mikrofonpositionen (siehe Anhang A MP: 06,08,10,11,12,14,16) der akustischen Messungen übernommen und um zusätzliche 10 Positionen in den Randbereichen des Auditoriums erweitert, wodurch sich eine unregelmäßige Verteilung der Positionen ergab. Als Sendepositionen wurden 4 prädestinierte Sprecherpositionen gewählt. S1 stellt hierbei einen Vortrag am Rednerpult dar, S2 einen Frontalvortrag mit Präsentationsmöglichkeiten an einer Leinwand, S3 eine übliche Position für Musikdarbietungen und S4 eine alternative Rednerposition. Auf eine explizite Untersuchung des Raumes mit dem Verwendungszweck „Musik“ wurde jedoch aufgrund der Seltenheit dieser Art der Darbietung verzichtet.

Im Allgemeinen stellt der Sendepunkt „S1“ den relevantesten Punkt dar, da diese Position am öftesten für Präsentationen und Reden gewählt wird. Somit wird in dieser Arbeit vorwiegend auf Messungen mit diesem Punkt als Sendeposition eingegangen. Hierbei gilt zu erwähnen, dass das Rednerpult zu jedem Zeitpunkt in den Messungen berücksichtigt wurde. Dies geschah aus der Überlegung, dass dessen Auflagefläche mit den Abmessungen von $75[cm]$ und $55[cm]$ für Frequenzen ab ca. $620[Hz]$ reflektierend wirkt (Verhältnis Abmessungen/Wellenlänge). Folgedessen verursacht dies eine Abschattungswirkung in der Mitte der ersten Reihe des Auditoriums oberhalb dieser Frequenz. Durch

diese Vorgehensweise wird dieser Effekt beispielsweise in Messungen des Deutlichkeitsmaßes und des Sprachübertragungsindex berücksichtigt.

Nachfolgende Grafik zeigt die entsprechende Verteilung der Positionen im Raum:

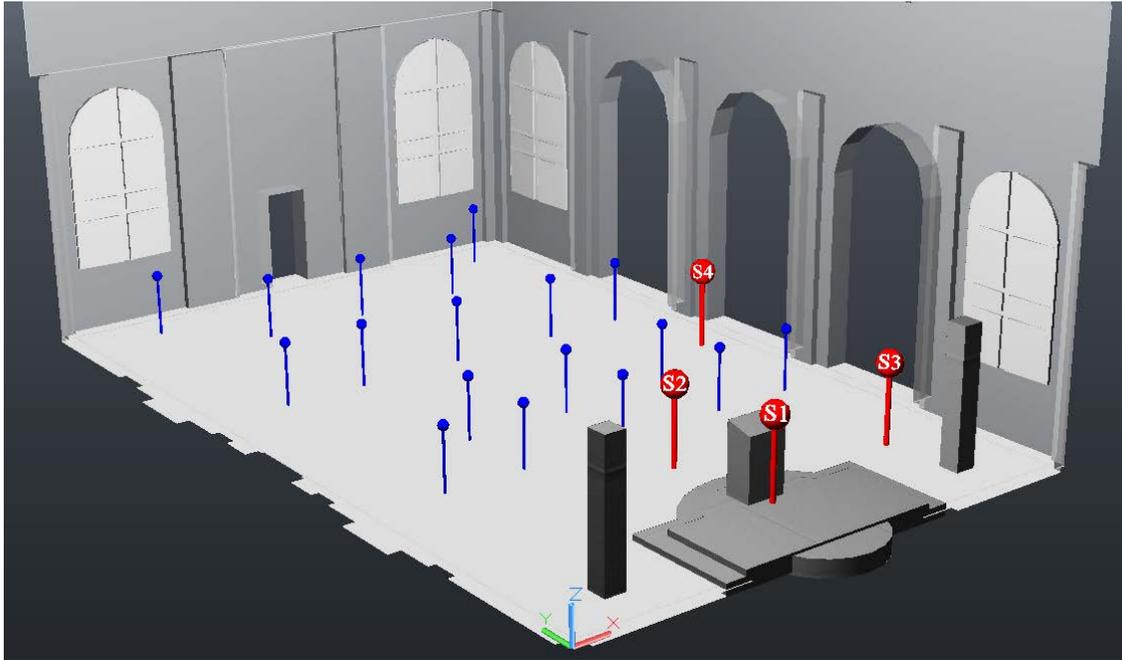


Abbildung 2.1: Gewählte Sende- (rot) und Empfangspunkte (blau)

Die exakten Positionen und die in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen der Sende- und Empfangspunkte sind im Anhang angeführt.

2.1.3 Messaufbau

Zur Unterdrückung tieffrequenter Störungen durch Körperschall wurden die Mikrofonstative auf Elastomer-Pads gelagert, um diese vom Untergrund zu entkoppeln. Die Membranhöhe der Mikrofone entsprach exakt den normativen Anforderungen einer Höhe von $1,2[m]$, was der Ohrhöhe eines durchschnittlich großen, sitzenden Zuhörers entspricht. Das akustische Zentrum des Dodekaeders befand sich in der geforderten Höhe von $1,5[m]$.

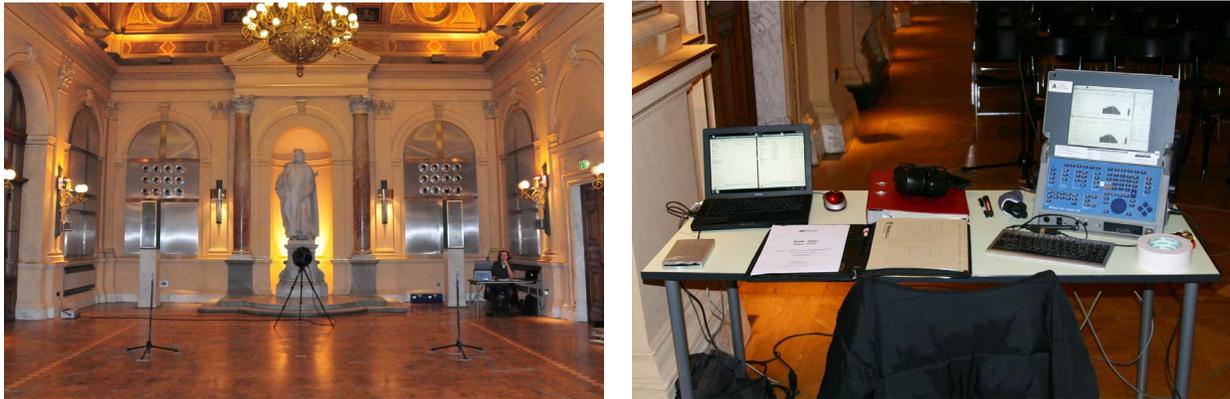


Abbildung 2.2: Ermittlung der raumakustischen Gütemaße: Messumgebung (links) und Messplatz (rechts)

2.1.4 Verwendete Messgeräte

Zur Verwendung kam ein 2-Kanal Echtzeitanalysator mit der Bezeichnung „nor840“ der Firma Norsonic. Ebenfalls von diesem Hersteller wurden Messmikrofone mit Kapseln des Typs „1220“ und Verstärkern „Type 1201/29406“, ein Dodekaeder mit der Bezeichnung „270H“ und ein entsprechender Leistungsverstärker des Typs „Power Amplifier 260“ verwendet. Die nachfolgende Grafik zeigt die soeben genannten Geräte von links nach rechts:



Abbildung 2.3: Messung raumakustischer Gütemaße: Verwendete Messgeräte

2.2 Ermittlung des Sprachübertragungsindex

2.2.1 Vorgehensweise

Zur Ermittlung des Sprachübertragungsindex (STI) wurden akustische Messungen nach ÖVE/ÖNORM EN 60268-16 [8] durchgeführt. Die Beschallungsanlage wurde miteinbezogen, um durch Vergleiche von Messungen mit und ohne elektroakustischer Verstärkung deren Auswirkungen auf die Sprachverständlichkeit abzuleiten. Rund 90 Messungen geben hierbei Aufschluss über die aktuelle Situation. Es wurde vorwiegend in den Abendstunden gegen 22 Uhr gemessen, da um diese Zeit die auftretenden Störgeräusche niedriger sind als untertags.



Abbildung 2.4: Kalibrierung des Messaufbaus

2.2.2 Messpunkte

Für diese Messung wurden alle unter Kapitel 2.1.2 angeführten Sende- und Empfangspositionen verwendet. Als Messhöhe wurde die Ohrhöhe einer durchschnittlich großen, sitzenden Person von $1,2[m]$ gewählt.

2.2.3 Messaufbau

Das Messgerät wurde stabil auf einem Stativ gelagert und in Richtung der Schallquelle ausgerichtet. Die nachfolgende Grafik zeigt eine derartige Messsituation:



Abbildung 2.5: Messung des Sprachübertragungsindex: Messaufbau

2.2.4 Verwendete Messgeräte

Für diese Messung wurde ein Schallanalysator der Firma „Norsonic“ mit der Bezeichnung „nor140“ verwendet, welcher bereits ein vollständiges Softwarepaket mit einer normgerechten Auswertung des Sprachübertragungsindex implementiert hatte. Das Anregungssignal befand sich auf einer mitgelieferten CD, und wurde über einen Rechner mit einer hochqualitativen externen Soundkarte der Firma „MOTU“ mit der Bezeichnung „UltraLite mk3“ abgespielt.

Nach [8] ist ein Lautsprecher mit speziellen Eigenschaften gefordert, welche zusammengefasst sind:

1. Lautsprecher mit einem Chassis, Konusdurchmesser kleiner als $100[mm]$
2. In einem Bereich von $125[Hz]$ bis $8[kHz]$ muss der Terz-Frequenzgang der Prüfsignalquelle innerhalb von $\pm 1[dB]$ (Freifeld-Messung) liegen.

Da kein Messlautsprecher mit diesen Eigenschaften zur Zeit der Messung verfügbar war (bsp. „Talk-Box“ der Firma „NTI“), wurde ein kommerziell erhältlicher Lautsprecher des Herstellers „Genelec“ mit der Bezeichnung „6010A“ verwendet, welcher nach umfangreichen Recherchen diesen Eigenschaften sehr nahe kommt. Der Frequenzgang des Lautsprechers ist laut Datenblatt ausreichend linear, lediglich ein geringer Einbruch bei $1[kHz]$ musste um $2[dB]$ in der Abspielsoftware (MAGIX „Sample 11“) mit einem linearphasigen Filter korrigiert werden.



Abbildung 2.6: STI: Verwendete Messgeräte

2.3 Weitere Messungen

2.3.1 Messungen von Schallimmissionen / Messungen des Störschallpegels

Besonders zu Zeiten mit erhöhtem Verkehrsaufkommen wurden starke Störgeräuschpegel im Raum festgestellt, welche in weiterer Folge aufgrund des hohen Grundgeräusches die Sprachverständlichkeit deutlich verschlechtern. Aus diesem Grund wurden Messungen der Schallimmissionen in Anlehnung an die nationale ÖNORM S 5004 [6] messtechnisch erfasst. Als Zeitpunkt der Messungen wurde die Mittagszeit um 12 Uhr während erhöhtem Verkehrsaufkommen gewählt. Diese Situation entspricht in etwa jener um rund 17 Uhr, zu der sehr oft Vorträge und Reden veranstaltet werden. Weiters konnten zu dieser Zeit Störgeräusche aus dem Stiegenhaus durch Gehgeräusche erfasst werden.

Für die Messung wurden die drei Messpunkte „MP05“, „MP11“ und „MP17“ mit einer Messhöhe von $1,2[m]$ gewählt, wobei die Abstände zu der jeweils nächst angrenzenden Wand auf $2[m]$ erhöht

wurde². Aufgrund dieser Abstandserhöhung werden die entsprechenden Punkte im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit einem „ ’ ” gekennzeichnet, beispielsweise „ MP05’ ”. Laut Norm soll die Dauer der Messung alle relevanten akustischen Ereignisse erfassen, wobei ein besonders lautes Ereignis (z.B. ein vorbeifahrendes Fahrzeug) den ermittelten energieäquivalenten Dauerschallpegel um nicht mehr als $0,1[dB_A]$ verändern soll. Dies war bei einer Messzeit von $10[min]$ gegeben. Fenster und Balkon-Fenstertüren blieben während der Messungen geschlossen.

Während eines Frontalvortrags wurde im Vorfeld der Messungen der im Raum verwendete Beamer als sehr störend empfunden. Diese zusätzliche Störgeräuschquelle wurde ebenfalls an den zuvor genannten Punkten messtechnisch erfasst.

2.3.2 Messung der Laufzeitverzögerung der Beschallungsanlage

Wie bereits eingangs erwähnt, wurden in den vergangenen Jahren mehrmals Veränderungen am elektroakustischen System durchgeführt. Der zuständige Tontechniker vermutete, dass im Zuge dessen die Laufzeitverzögerung der Beschallungsanlage entfernt wurde. Eine Überprüfung dieser Annahme direkt an den Geräten war jedoch nicht möglich, da die Verzögerung auf einer internen DSP geschah. Eine hardwareseitige Steuerung war hierbei nicht vorgesehen.

Aus diesem Grund wurde eine informative Messung der Laufzeitverzögerung aller vier Delay-Lines durchgeführt. Über die Sequenzer-Software „Samplitude 11” wurde ein Impuls in das System eingespielt, welcher an den jeweiligen Lautsprechern über Messmikrofone im Abstand von rund $5[cm]$ detektiert wurde. Hierbei wurde die gesamte elektroakustische Kette inklusive der Funkverbindung zwischen Rednerpult und Technik-Insel berücksichtigt. Interne Verzögerungen des Einspielsystems beispielsweise aufgrund der DA-AD Wandlung der Signale wurden im Vorfeld durch eine zeitliche Kalibrierung berücksichtigt. Dabei wurden die verwendeten Ein- und Ausgänge der Soundkarte hardwareseitig mit einem Patch-Kabel kurzgeschlossen, eine entsprechende Messung durchgeführt und die nachfolgenden Messungen im Postprocessing dementsprechend zeitlich angepasst.

Um Messfehler auszuschließen, wurde die Messung an jeder Delay-Line drei Mal durchgeführt.

²Normvorgabe, wenn maßgebliche Frequenzanteile unter $100[Hz]$ erwartet werden, siehe auch [6, S.8]

2.3.3 Aufnahme der exakten Raumgeometrie und Umgebungseinflüsse

Neben akustischen Messungen stehen verschiedenste Analysen an rechnerbasierten Simulationsmodellen im Zentrum dieser Arbeit. Um die hierbei gezwungenermaßen auftretenden Modellierungsfehler in Grenzen zu halten, wurde die Raumgeometrie und die verwendeten Anrege- und Messpositionen exakt mit einem Laser-Distanzmesser der Firma „Disto“ erfasst.

In raumakustischen Untersuchungen spielen Lufttemperatur und -feuchtigkeit eine sehr bedeutende Rolle, da sie die Absorption im hochfrequenten Bereich besonders in großen Räumen aufgrund von Dissipation entscheidend beeinflussen. Aus diesem Grund werden besonders für Vergleiche von Daten aus Messung und Simulation diese Parameter in den Computermodellen berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurden Lufttemperatur und -feuchtigkeit während der Messungen ständig mit einem entsprechenden Gerät der Bezeichnung „Testo 610“ erfasst.

2.3.4 Darstellung der entsprechenden Messaufbauten



Abbildung 2.7: Messaufbau: Messung des Störgeräuschpegels (links), Messung der Laufzeitverzögerung (Mitte) und Bestimmung der exakten Messpositionen / Geometrie (rechts)

2.4 Messergebnisse

2.4.1 Raumakustische Gütemaße

2.4.1.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit wurde für den unbesetzten Raum mit Bestuhlung ermittelt.

Für die Mittelung wurden die Daten aus Kombinationen von S2, S3 und S4 mit MP06 bis MP08, MP10 bis MP12, und MP14 bis MP16 herangezogen. Die Sendeposition S1 wurde nicht verwendet, da sie zu nahe an einer Begrenzungsfläche (Rednerpult) positioniert war, und dies nach EN ISO 3382-1 ein Ausschlusskriterium darstellt. Das gleiche galt für die Randpositionen der Empfangspunkte, da hierbei die Mindestabstände zwischen Messpunkten unterschritten worden wären.

Die nachfolgende Grafik zeigt den arithmetischen Mittelwert der hinzugezogenen Kurven: Alle verwendeten Messkurven werden im Hintergrund gezeigt, um die Streuung der Parameter zu verdeutlichen.

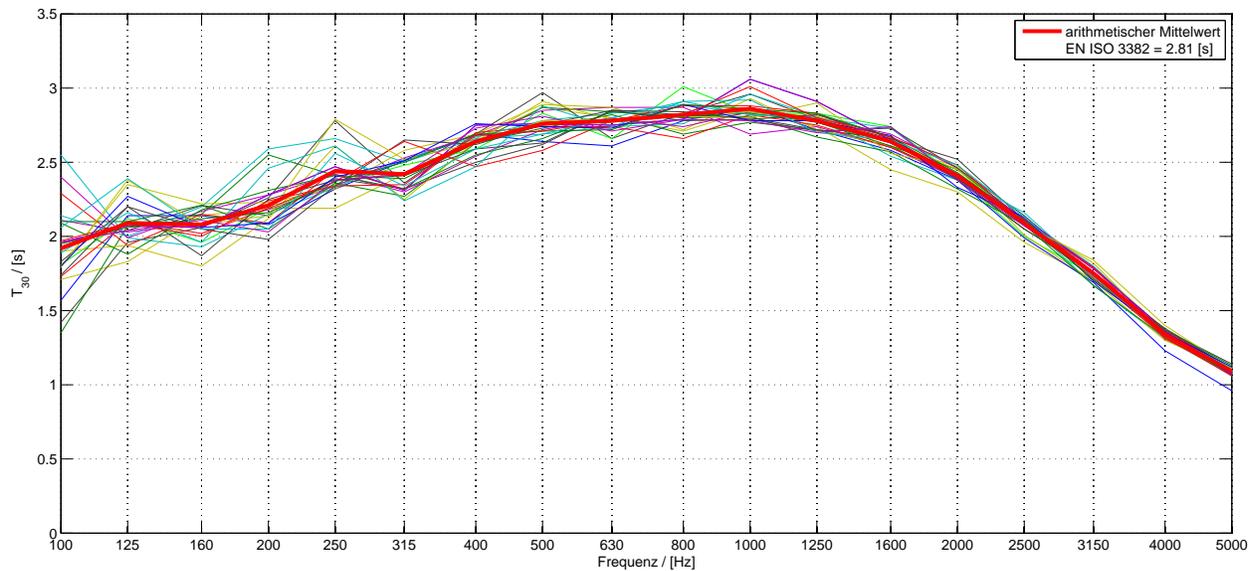


Abbildung 2.8: Ermittelte Nachhallzeitkurven, arithmetischer Mittelwert und Bewertung nach ÖNORM EN ISO 3382

Der nach ÖNORM EN ISO 3382-1 bewertete Wert (arithmetische Mittelung der Werte bei $500[\text{Hz}]$ und $1000[\text{Hz}]$) beträgt hierbei $2,81[\text{s}]$. Nach [10, S. 136] weicht dieser deutlich vom Optimalwert mit ca. $1[\text{s}]$ bei dem Verwendungszweck „Sprache“ ab. Nach ÖNORM B 8115-3 [5] ergibt sich bei den gegebenen Raumbedingungen exakt eine Soll-Nachhallzeit von $1,06[\text{s}]$ bei Verwendungszweck „Sprache“, mit einer oberen Toleranzgrenze von einem Verhältnis zwischen T_{ist} zu T_{soll} mit $1,2[-]$. Die viel zu hohe Nachhallzeit ist besonders auf die Höhe des Raumes zurückzuführen. Eine Berechnung der Volumenkenzahl nach DIN 18041 [12, S.149] ergibt beispielsweise bei den gegebenen geometrischen Abmessungen und einer üblichen Anzahl an Sitzplätzen einen Wert von rund $11[\text{m}^3/\text{Platz}]$, was deutlich über den geforderten, maximal $6[\text{m}^3/\text{Platz}]$ liegt.

Weiters gilt zu erwähnen, dass sich die aktuelle Bestuhlung nur im sehr geringen Maße positiv auf die Nachhallzeit auswirkt. Dies zeigt ein Vergleich der arithmetischen Mittelwerte an zuvor genannten Kombinationen mit und ohne Bestuhlung:

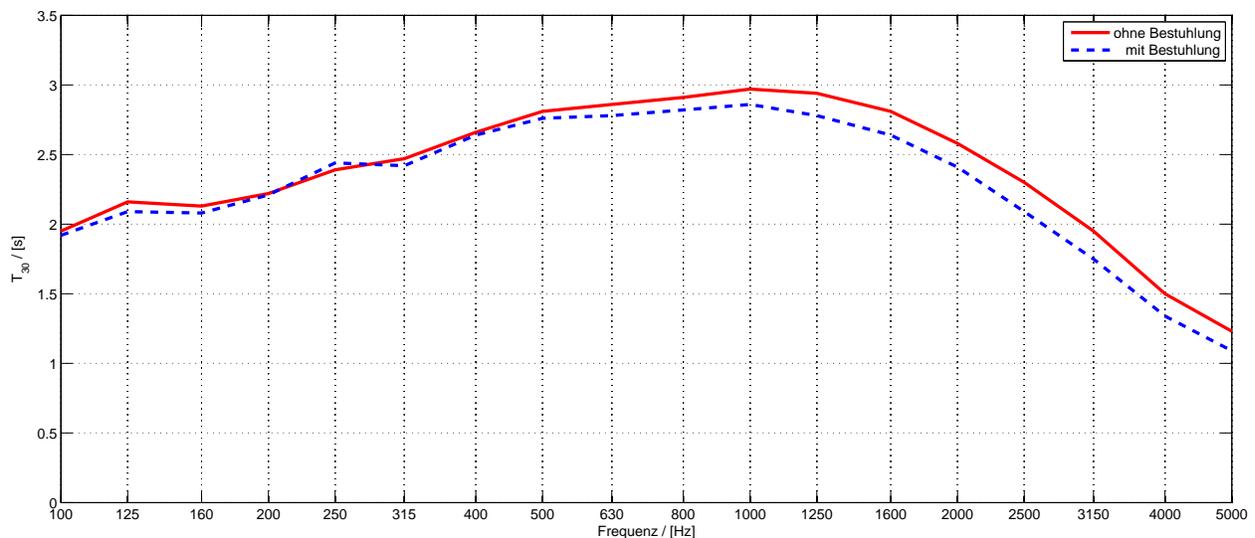


Abbildung 2.9: Vergleich der ermittelten Nachhallzeiten mit und ohne Bestuhlung

Während den Messungen herrschte im Raum eine Lufttemperatur von $22,5[^\circ\text{C}]$ bei einer Luftfeuchtigkeit von $22,1[\%]$.

2.4.1.2 Deutlichkeitsmaß

Für die Analyse des Deutlichkeitsmaßes wurden die Datensätze aus den selben Kombinationen von Sende- und Empfangspunkten wie zuvor bei der Nachhallzeit verwendet.

Die nachfolgende Grafik zeigt den logarithmischen Mittelwert³ und die hinzugezogenen Kurven. Hierbei gilt zu beachten, dass der Mittelwert bei 125[Hz] im unteren Wertebereich der zusätzlichen Kurven liegt. Dies könnte gegebenenfalls darauf zurückzuführen zu sein, dass sich der Sendepunkt S3 der zusätzlichen Kurven in einem Wellenknoten einer Raumresonanz befindet, wodurch diese nur sehr geringfügig angeregt wird und sich folgedessen das Deutlichkeitsmaß verbessert.

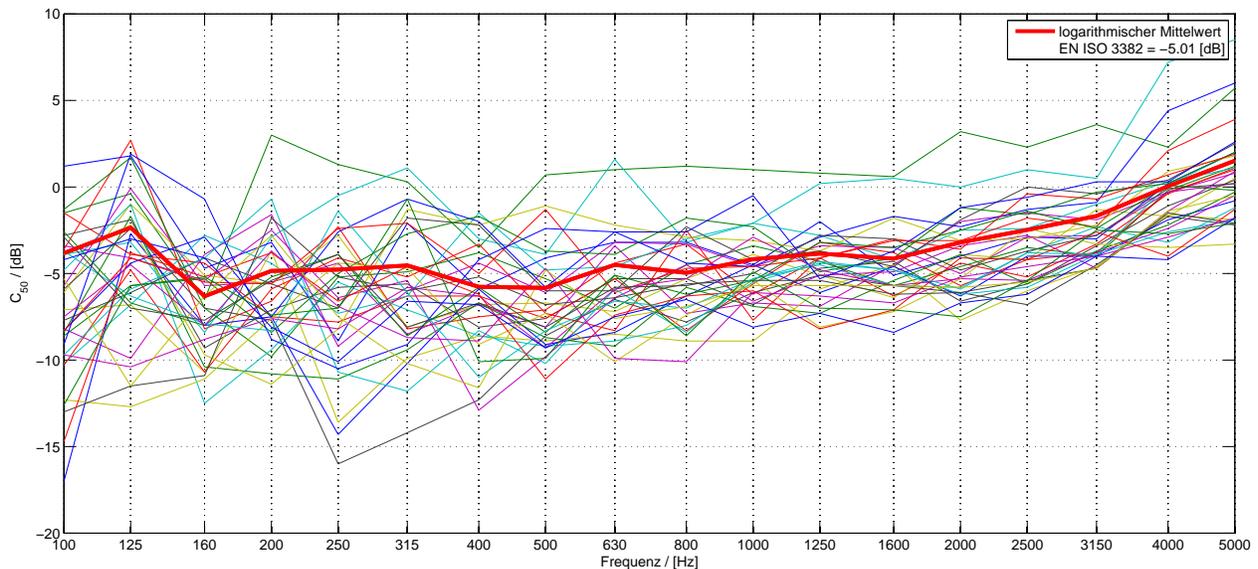


Abbildung 2.10: Ermittelte Deutlichkeitsmaße, logarithmischer Mittelwert und Bewertung nach ÖNNORM EN ISO 3382-1

Messpunkte nahe der Quelle ergeben im Allgemeinen höhere Werte als weit entfernte Messpunkte, was mit den entsprechenden physikalischen Überlegungen übereinstimmt.

Der nach ÖNNORM EN ISO 3382-1 bewertete Wert (arithmetische Mittelung der Werte bei 500[Hz] und 1000[Hz]) beträgt hierbei $-5,01[dB]$. Eine logarithmische Mittelung dieser Werte würde einen

$${}^3 L_m = 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right]$$

Wert von $-4,93[dB]$ ergeben. Nach [10, S.136] liegt das Optimum für eine gute Sprachverständlichkeit bei einem Wert von $> 0[dB]$. Wie erwartet weicht dieser Messwert deutlich vom Optimalwert ab.

2.4.1.3 Schwerpunktzeit

Für die Analyse der Schwerpunktzeit wurden die Datensätze aus den selben Kombinationen von Sende- und Empfangspunkten wie zuvor bei der Nachhallzeit und des Deutlichkeitsmaßes verwendet.

Die nachfolgende Grafik zeigt die hinzugezogenen Kurven und den arithmetischen Mittelwert: Auch hier sollen die hinterlegten Kurven die hohe Schwankungsbreite dieses Parameters verdeutlichen.

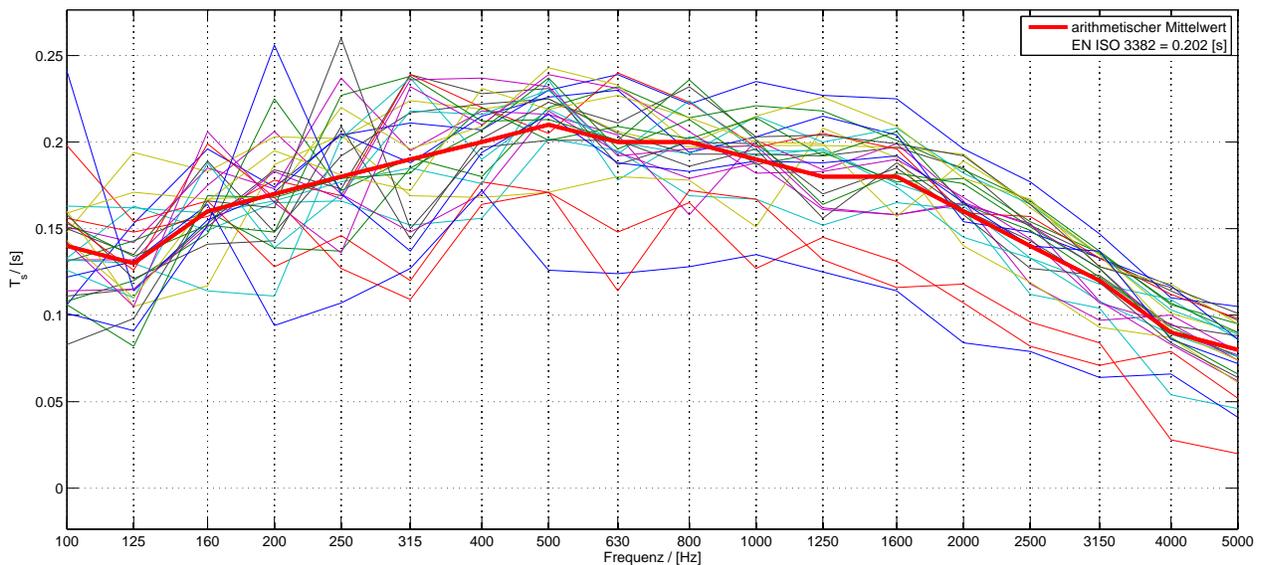


Abbildung 2.11: Ermittelte Schwerpunktzeiten, arithmetischer Mittelwert und Bewertung nach ÖNORM EN ISO 3382-1

Die Schwerpunktzeit wurde ebenfalls nach ÖNORM EN ISO 3382 bewertet. Dieser übersteigt mit einem Wert von $197[ms]$ mehr als den doppelten nach [10, S.136] geforderte Sollwert von $< 80[ms]$.

2.4.1.4 Zusammenfassung

Die Analyse der Messdaten aus den raumakustischen Gütemaßen ergab, dass - wie erwartet - alle Kriterien stark von den geforderten Werten abweichen. Messpunkte nahe der Quelle lieferten etwas bessere Werte, hierbei gilt besonders die Kombination von Sendepunkt S4 auf Empfangspunkt MP08 hervorzuheben. Negativ trat besonders die Kombination aus S3 und MP14 hervor.

2.4.2 Sprachübertragungsindex

Ein Hauptkriterium für eine objektive Beurteilung des Sprachübertragungsindex ist eine ausreichende Schallenergie in den gemessenen Messpunkten. Aus diesem Grund wird für die Auswertung der Datensatz aus Sendeposition S1 und allen Empfangspositionen herangezogen, wobei die Beschallungsanlage mit einbezogen wird. Diese wird mit den Voreinstellungen betrieben, die auch für den entsprechenden Aufführungszweck vorgesehen sind.

Nachfolgende Grafik zeigt die entsprechenden Werte bezüglich der gewählten Messpunkte:

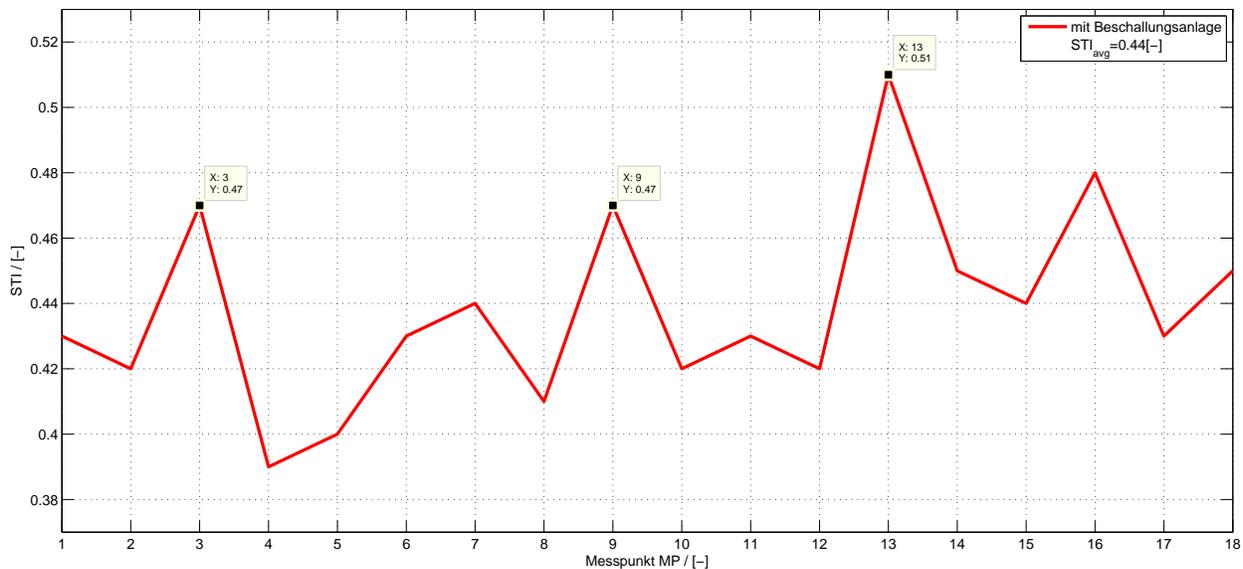


Abbildung 2.12: Sprachübertragungsindex: Messdaten und arithmetischer Mittelwert des Sendepunktes S1

Als Zielgröße für den STI ist ein Wert von $0,6[-]$ gefordert. Wie bereits eingangs unter Kapi-

tel 1.3.2 erwähnt, wird die Sprachverständlichkeit vorwiegend durch übermäßig lange Nachhallzeit, Störgeräusche und störende Reflexionen negativ beeinflusst. Mit einem arithmetischen Mittelwert von 0,44[–] ist der *STI* somit eindeutig zu niedrig.

2.4.3 Störgeräusche

2.4.3.1 Verkehrslärm

In diesem Abschnitt werden nun die Messergebnisse der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Messungen vorgestellt.

Zur Bestimmung eines Einzahlwertes aus den drei gemessenen Werten des $L_{A,eq}$ wird eine energetische (logarithmische) Mittelung anhand folgender Beziehung durchgeführt: [16, S.62]

$$\overline{L_{A,eq}} = 10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum 10^{L_{A,eq,i}/10} \right\} \quad (2.1)$$

Dabei ist:

- n die Anzahl der Einzelpegel
- $L_{A,eq,i}$ die einzelnen energieäquivalenten Dauerschallpegel (A-bewertet)

Hierbei ergibt sich ein energetischer Mittelwert über die Messpositionen von 33,3[dB].

Die nachfolgende Grafik zeigt die messtechnisch ermittelten und die berechneten Werte: Hierbei sind sehr prägnante Spitzen zu erkennen, welche während der Messungen eindeutigen Schallereignissen zugeordnet werden konnten.

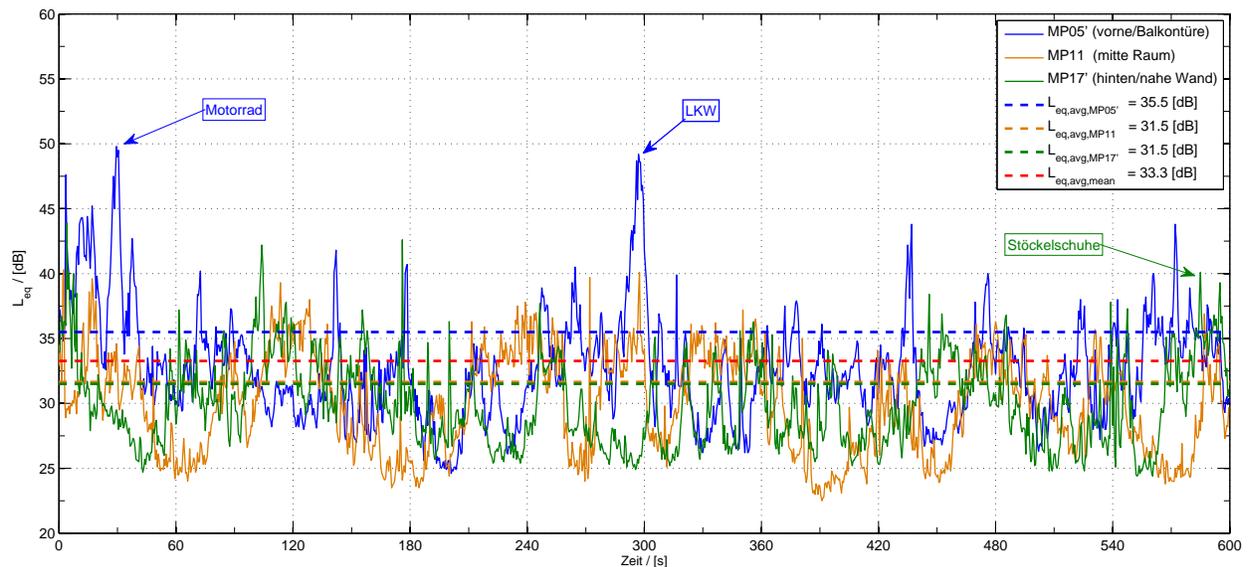


Abbildung 2.13: Energieäquivalenter Dauerschallpegel der drei Messpositionen

Die Werte für den $L_{A,eq}$ sind sehr gut nachzuvollziehen: Interpretiert man die Balkontüre als eigenständige Schallquelle, befinden sich die beiden Mikrofone Mitte des Raums und nahe der gegenüberliegenden Wand im Nachhallfeld. Da sich im Diffusfeld eine gleichmäßige Energieverteilung einstellt, ergibt sich der selbe Wert für den $L_{A,eq}$. Das Mikrofon nahe der Balkontüre erfasst aufgrund des geringeren Abstandes zusätzlich Komponenten des Direktschallfeldes, während die Messung zu einer stark befahrenen Zeit durchgeführt wurde. Dadurch ergibt sich ein um 4 [dB] höherer $L_{A,eq}$.

Die starken Überhöhungen aufgrund des Verkehrslärms sind auf den Aufbau der Balkon-Fenstertüren zurückzuführen. Die Kombination aus zwei Glasscheiben und einer dazwischenliegenden Luftschicht bilden ein Masse-Feder-Massesystem, bei dessen Resonanzfrequenz die Schalldämmwirkung deutlich einbricht. Eine entsprechende Berechnung ist im Anhang zu finden. Diese Frequenz liegt in dem hier vorliegenden Fall bei etwa 71 [Hz] für den Fensterteil und 40 [Hz] für den Holzteil, letzteres wird jedoch aufgrund des geringen Flächenanteils nicht weiter berücksichtigt. Es gilt zu erwähnen, dass es sich hierbei um informative Berechnungen handelt, um einen entsprechenden Wirkungsbereich dieses Effektes zu erfassen.

Die nachfolgende Grafik zeigt die Spektren der entsprechenden Schallereignisse und die berechnete Resonanzfrequenz des Glasteils der Balkon-Fenstertüren: Hierbei sind sehr schön die Pegelüberhöhungen besonders während der Vorbeifahrt des Motorrads im Bereich der Resonanzfrequenz zu er-

kennen. Die Pegelüberhöhung bei der Messung des LKW's im Bereich von 160[Hz] ist gegebenenfalls dem Hauptfrequenzspektrum des abgestrahlten Lärms zuzuordnen (Motorengeräusch / drehzahlabhängig), es kann aber auch die Messposition in Bezug auf Raumresonanzen eine Rolle spielen (vgl. Kapitel 3.2).

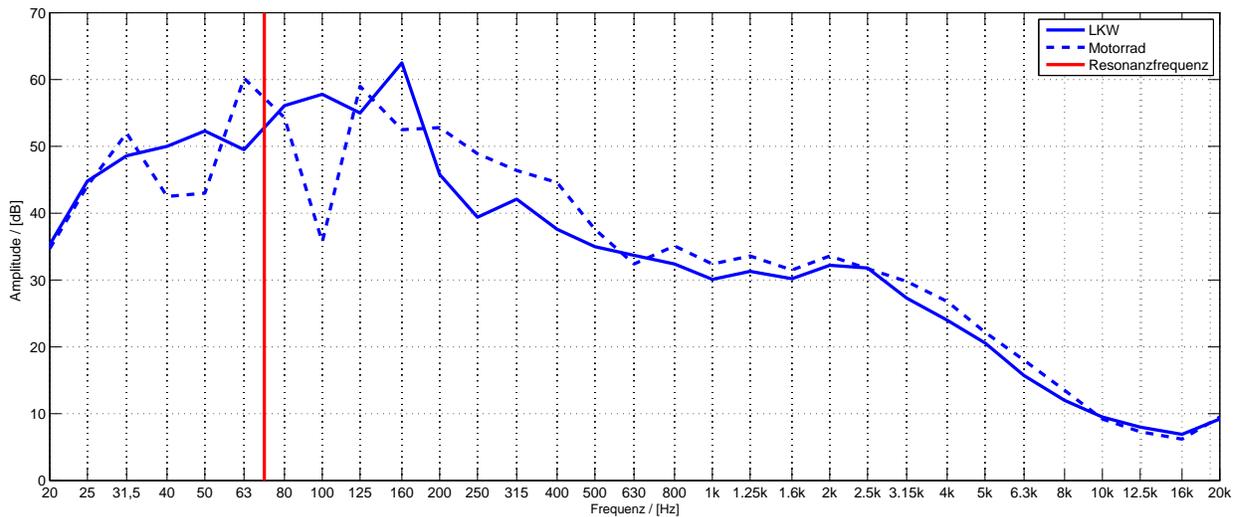


Abbildung 2.14: Spektren der Störgeräusche

Zusätzlich stellen Undichtigkeiten im Bereich der Funktionsfugen ein Problem dar, welche vorwiegend von den veralterten Dichtungen hervorgerufen werden.

Weiters dringt Störschall aus dem Gangbereich in den Raum ein, was auf Undichtigkeiten im Bereich der Eingangstüren zurückzuführen ist. Dabei wurden prägnante Gehgeräusche als Stör-Schallquelle identifiziert, hierbei stellt das Schuhwerk (Stöckelschuhe) im Allgemeinen ein sehr impulshaftes Störsignal dar. Aufgrund der Zeitbewertung „fast“ des Messgerätes geht diese Quelle nicht derart stark in die Messungen ein wie beispielsweise Verkehrsgeräusche, sind aber deutlich als störend bemerkbar. Für derart impulshaltige Geräusche ist üblicherweise ein Zuschlag von 3[dB] vorgesehen [15, S.12], vorausgesetzt das Geräusch erfüllt die notwendigen Kriterien. Dies wurde jedoch nicht weiters untersucht (zusätzliche Messung mit der Zeitbewertung „Impuls“ notwendig, siehe auch [6, S.15]).



Abbildung 2.15: Störgeräusche durch Verkehrslärm: Einbrüche der Schalldämmung im Bereich der Funktionsfugen der Balkon-Fenstertüren (rot)

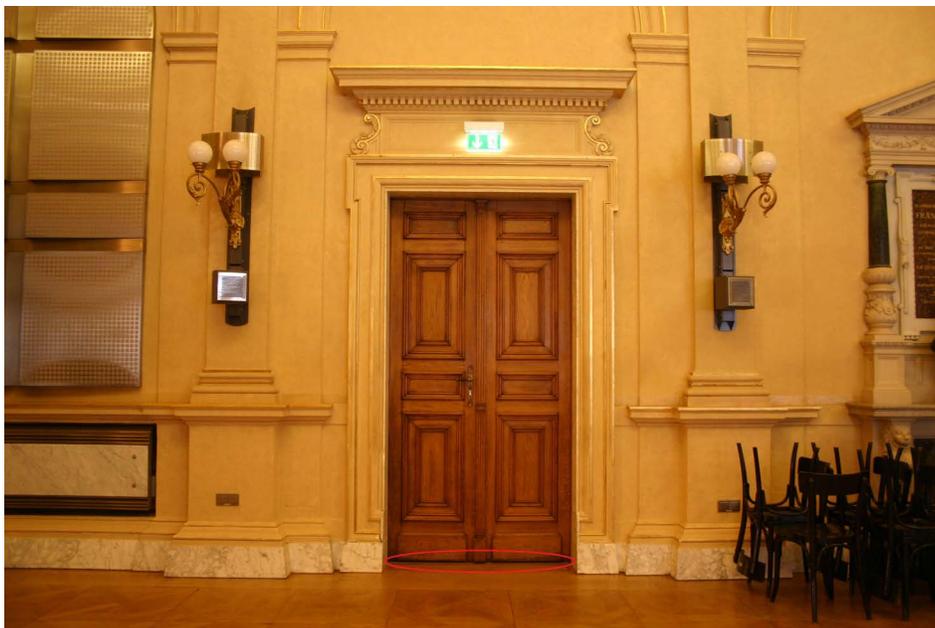


Abbildung 2.16: Störgeräusche aus dem Gangbereich aufgrund von Undichtigkeiten bei den Eingangstüren (rot)

2.4.3.2 Beamer

Neben den Auswirkungen des Verkehrslärms wurde auch ein Beamer in Bezug auf seinem Anteil am Störgeräuschpegel untersucht.

Auffallend hierbei war, dass die Position bei MP11 mit einem relativen Abstand von etwa $4,12[m]$ einen etwas höheren Pegel lieferte als die Position bei MP17 mit einem Abstand von etwa $3,7[m]$, obwohl sich beide Punkte anscheinend im Diffusschallfeld befanden. Dieser Umstand ist auf eine stark gerichtete Schallabstrahlung des Beamers in Richtung MP11 im Frequenzbereich um $800[Hz]$ zurückzuführen, welche in diesem Bereich den Hallradius stark erhöht und folgedessen Direktschall-Komponenten in die Messung mit eingehen. Grund hierfür sind allem Anschein nach die Strömungsöffnungen des Kühl-Lüfters, welche sich jeweils an der Vorderseite und der Rückseite des Geräts befinden. Da der Frequenzbereich um $1[kHz]$ in der A-Bewertung des $L_{A,eq}$ einen sehr großen Einfluss hat, ergibt sich ein höherer Gesamtpegel, trotz des größeren Abstandes. Weiters gilt es zu erwähnen, dass diesem Frequenzbereich vergleichsweise wenig im Raum bestehendes, energieabsorbierendes Material zuzuordnen ist, was in der übermäßig langen Nachhallzeit deutlich erkennbar ist. (vgl. Abbildung 2.8).

Während den Messungen herrschte im Raum eine Lufttemperatur von $21,8[^\circ C]$ bei einer Luftfeuchtigkeit von $21[\%]$.

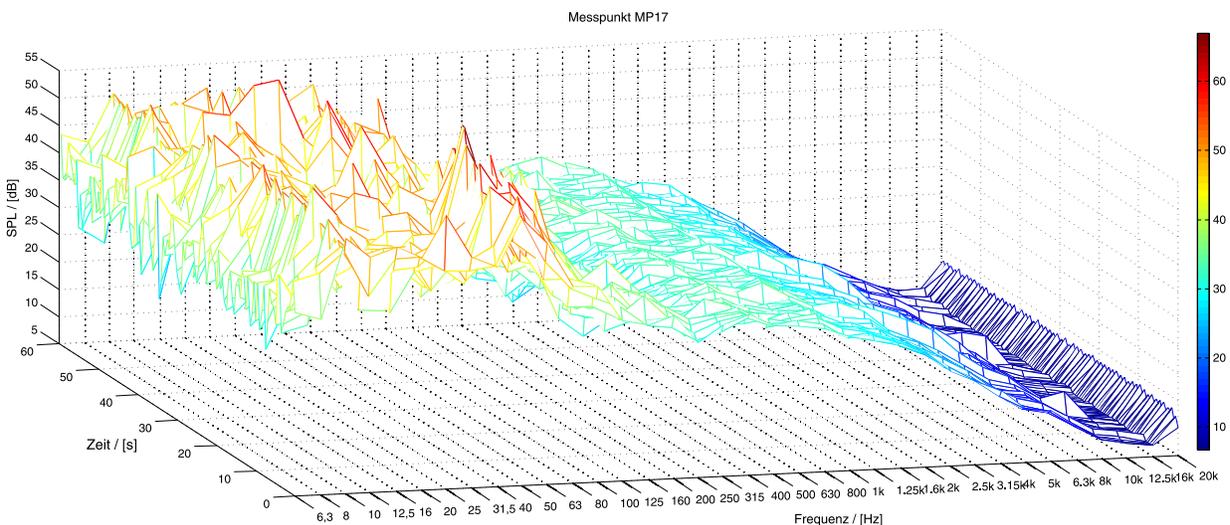


Abbildung 2.17: Spektraldarstellung der Störgeräusche aus Verkehrslärm und Beamer: MP17

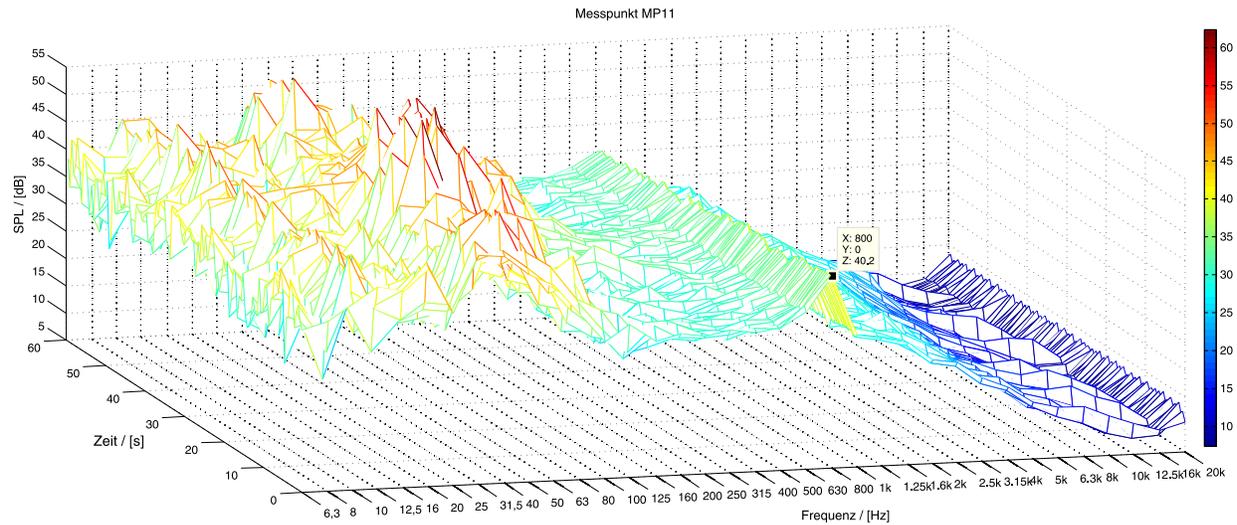


Abbildung 2.18: Spektraldarstellung der Störgeräusche aus Verkehrslärm und Beamer: MP 11

2.4.4 Störende Reflexionen

Besonders Reflexionen erster Ordnung über die schallhart ausgeführte Decke und Rückwand werden aufgrund der langen Schallwege als sehr störend empfunden. Dieser Aspekt wurde bereits in einer ersten Besichtigung der Lokalität vor den eigentlichen Messreihen durch einfache (informative) Messungen bemerkt. Eine entsprechende Analyse und Vergleiche mit experimentell ermittelten Daten ist im nachfolgenden Kapitel 3.1.4.2 angeführt.

2.4.5 Raumresonanzen

Bereits während der Messungen wurden ausgeprägte Raumresonanzen bemerkt. Dies machte sich in einem (ortsabhängigen) Einbruch des Deutlichkeitsmaßes besonders im Frequenzbereich bei 160[Hz] stark bemerkbar, was auch in der Schwerpunktzeit bei der selben Terzmittenfrequenz durch Überhöhungen des Wertes erkennbar ist (siehe Abbildungen 2.11 und 2.10). Für eine Bestätigung dieser Hypothese und eine entsprechende Analyse wird nachfolgend in Kapitel 3.2 ein passendes Simulationsmodell herangezogen.

2.4.6 Die aktuelle Beschallungsanlage

2.4.6.1 Laufzeitverzögerung

Um festzustellen, ob die vier Reihen von Lautsprecher-Paaren mit einer Zeitverzögerung versehen sind, wurde eine informative Messung durchgeführt. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass eine Verzögerung implementiert ist, diese jedoch für alle Lautsprecher „global“ rund $13[m\text{s}]$ beträgt⁴. Folgedessen stellt sich im Raum eine falsche Lokalisation der Schallquelle ein, da das „Gesetz der ersten Wellenfront“ besonders an den Randplätzen nahe der Lautsprecher nicht eingehalten werden kann.

2.4.6.2 Richtwirkung der Lautsprecher

In diesem Raum werden einfache Lautsprecher in einem geschlossenen Gehäuse mit einem Membrandurchmesser von rund $10[cm]$ zur Sprachbeschallung verwendet. Diese sind an den Wänden links und rechts des Auditoriums in einer Höhe von $1,92[m]$ (im akustischen Mittelpunkt) angebracht und horizontal in entsprechenden Winkeln ausgerichtet.

Bauartbedingt ergibt sich hierbei im tief- und mittelfrequenten Bereich eine annähernd kugelförmige akustische Abstrahlung. Ab einer bestimmten Grenzfrequenz setzt eine Bündelung der Schallenergie in die Achse normal zur Lautsprechermembran ein, wodurch eine seitliche Abstrahlung und Abstrahlung nach oben hin vermindert wird. Diese Grenzfrequenz errechnet sich folgendermaßen:

[13, S.97]

$$f_g = \frac{c\sqrt{2}}{2\pi r_M} \quad (2.2)$$

Dabei ist:

f_g	die Grenzfrequenz $[Hz]$
c	die Schallgeschwindigkeit $[m/s]$
r_M	der Membranradius $[m]$

⁴Aufgrund der Kalibrierung / Zeitkompensation des Messequipments kann ein Messfehler ausgeschlossen werden

Im hier vorliegenden Fall ergibt die Grenzfrequenz ($c = 343[m/s]$) einen Wert von $1544[Hz]$. Somit wirkt der Lautsprecher bis zu dieser Frequenz annähernd als Kugelstrahler, was zur Folge hat, dass nur ein Teil der Schallenergie in das Auditorium abgestrahlt wird. Der restliche Teil wird nach oben in den Deckenbereich abgestrahlt, wodurch das diffuse Nachhallfeld stark angeregt wird, was wiederum eine Verschlechterung des *STI* zur Folge hat.

Dieser Umstand wurde in einem Vergleich von Messungen des *STI* mit und ohne Beschallungsanlage an Sendeposition S1 bestätigt, was in der nachfolgenden Grafik kurz dargestellt wird: Klar ersichtlich ist hierbei die erhöhte Verständlichkeit in der Mittelachse des Raumes, also der Achse des Messlautsprechers (Sprecher), was auf dessen Bündelung zurückzuführen ist (MP03, MP07, MP09, MP15). Obwohl der Schalldruck im allgemeinen ansteigt, verschlechtert sich in diesen Punkten der *STI*, was auf die zuvor genannte, zusätzliche Anregung des Nachhallfeldes zurückzuführen ist. Eine Verbesserung stellt sich lediglich in den Randbereichen sehr nahe an den Lautsprechern ein (MP09, MP13), hierbei gilt jedoch wiederum die bereits zuvor festgestellte, fehlerhafte Lokalisation zu beachten. Der arithmetische Mittelwert des Sprachübertragungsindex für Messungen an allen Positionen ohne Beschallungsanlage beträgt $0,43[-]$, für Messungen mit Beschallungsanlage $0,44[-]$.

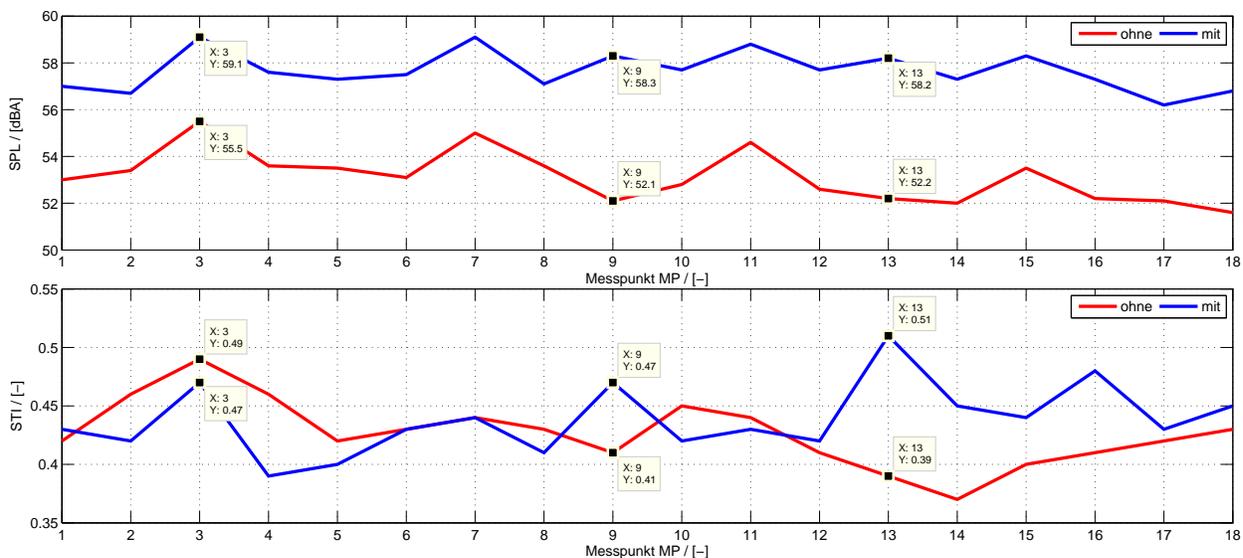


Abbildung 2.19: Vergleich von Schalldruck (oben) und *STI* (unten) bei Messungen mit und ohne Beschallungsanlage an Sendeposition S1

Diese Tatsachen lassen nun folgende Schlussfolgerungen für die Konzeption einer neuen Beschal-

lungsanlage zu: Grundsätzlich ist eine elektroakustische Verstärkung eines Sprechers in dem Raum notwendig, da ansonsten zuwenig Schallenergie in das Auditorium gelangt. Neben einer ausgeprägten Richtwirkung der Lautsprecher ergibt sich die Forderung nach einer passenden Laufzeitverzögerung, um einen natürlichen Höreindruck zu vermitteln.

Kapitel 3

Raumakustische Simulationen

3.1 CATT-Acoustic: Analyse von raum- und elektroakustischen Aspekten

Zur Analyse der aktuellen Raum- und Elektroakustik wurde ein rechnerbasiertes Simulationsmodell in der Software „CATT-Acoustic“, Version 9 erstellt. Für nähere Details zu der Software wird auf [2] bzw. diverse Manuals und Anwendungsbeispiele auf der Hersteller-Website verwiesen.

3.1.1 Aufbau des Simulationsmodells

Um die reele Situation möglichst gut zu erfassen, wurde ein exaktes Simulationsmodell des Raums konstruiert. Die Streugrade stellen sehr wichtige, häufig unterschätzte Parameter dar, welche neben den Absorptionsgraden zu definieren sind¹. Da jedoch für die entsprechenden Oberflächen keine passenden Werte zur Verfügung standen, wurde eine alternative Vorgehensweise gewählt: Es wurden alle Flächen geometrisch modelliert, deren Abmessungen sich im Bereich der Wellenlänge um $2[kHz]$ befinden (rund $17[cm]$), um bis zu dieser Frequenz die korrekten Reflexionswinkel zu erhalten. Auch Einrichtungsgegenstände wie Lautsprechertürme oder das Rednerpodest wurden weitgehend realitätsgetreu nachgebildet. Besonders bei der Modellierung der Decke und diversen Bögen wurde auf die Stärken der CAD-Software „AutoCAD“ der Firma Autodesk zurückgegriffen. Als Basis stan-

¹Auf diese Vorgehensweise wird deutlich vom Hersteller verwiesen

den die exakten Daten der Ausmessungen mittels Laser-Distanzmessgerät (siehe Kapitel 2.3.3) zur Verfügung. Somit entstand ein Simulationsmodell aus insgesamt 826 Eckpunkten und 913 planaren Flächen (Ausgangsmodell). Abschließend wurde ein vollständiges Debugging² durchgeführt.

Die Simulation wurde in einem Master-Geofile und mehreren Subfiles für Geometrie, Schallquellen und Empfänger unterteilt. Ersteres diente neben der Zusammenführung und Variation der geometrischen Struktur auch der Steuerung von Absorptions- und Streuwerten der Oberflächen und Parametern der elektroakustischen Anlage. Auf eine Anführung des dadurch entstandenen Quellcodes beispielsweise im Anhang wird aufgrund der enorme Länge verzichtet.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen kurz die so entstandene Dateistruktur:

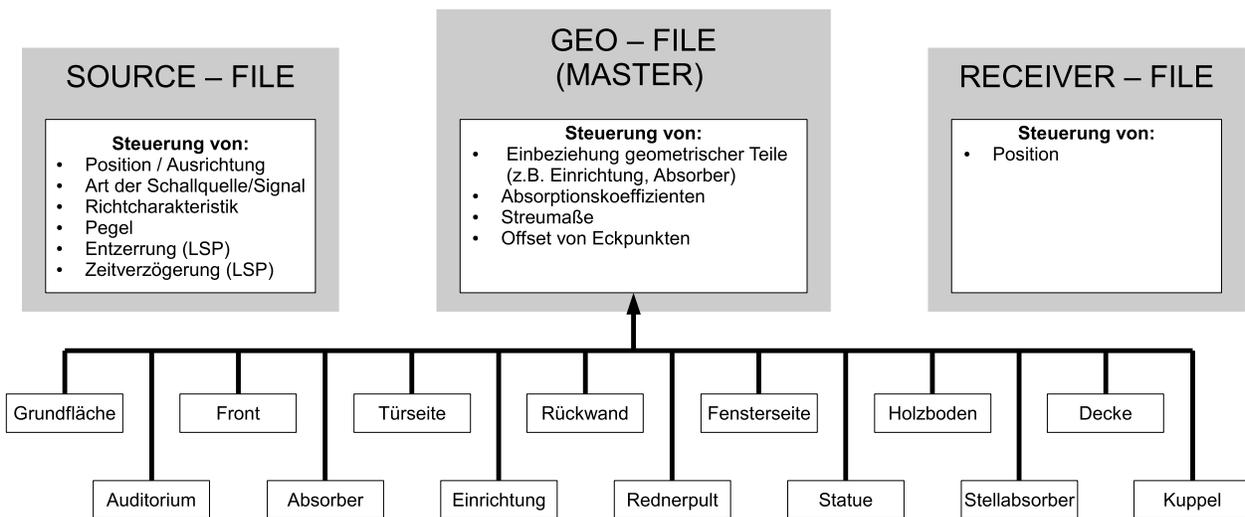


Abbildung 3.1: Blockschaltbild der Dateistruktur

Das Auditorium wurde in Quadrate mit einer Seitenlänge von $0,5[m]$ unterteilt, was in etwa der Sitzfläche eines Stuhls entspricht. Dadurch wurde eine Betrachtung der akustischen Gegebenheiten an einzelnen Sitzplätzen ermöglicht.

Weiters wurde besonders bei Vergleichen von Daten aus Messungen und Simulation die zu Zeiten der Messungen im Raum herrschende Lufttemperatur und -feuchtigkeit implementiert, da diese Parameter aufgrund von Dissipation maßgeblich die Absorption im hochfrequenten Bereich beeinflussen.

²keine doppelten ID's, Flächen, Punkte, offene Flächen, Überschneidungen von Flächen, etc.

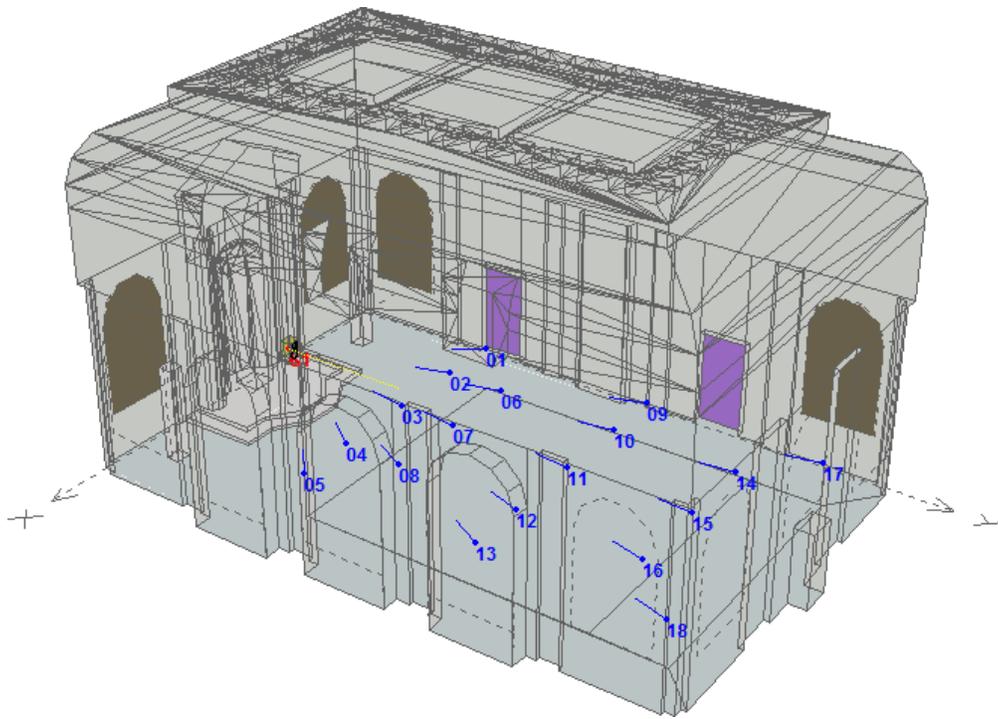


Abbildung 3.2: Das Simulationsmodell in „CATT-Acoustic“: 3D Modell



Abbildung 3.3: Das Simulationsmodell in „CATT-Acoustic“: Innenansicht

3.1.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Modells geschah in mehreren Schritten. Die in den Messreihen ermittelten Werte wurden hierbei als Referenz herangezogen. Wie bereits erwähnt, wurden mögliche Umgebungseinflüsse wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit oder Störgeräuschpegel implementiert, ebenso wie alle verwendeten Send- und Empfangspositionen. Zuerst wurden gemessene und simulierte Nachhallzeiten angepasst. Die Absorptionswerte der Oberflächen wurden aus einschlägigen Normen und Literatur entnommen. Diese wurden entsprechend den Raumbedingungen adaptiert, wobei auch auf z.B. transmittierte Schallenergie über Fenster oder Türen Rücksicht genommen wurde (z.B. Einbruch der Schalldämmung aufgrund des Masse-Feder Systems der Balkon-Fenstertüren, siehe auch Kapitel 2.4.3.1). Abschließend wurde eine Feinkalibrierung durchgeführt, indem die fehlende Absorptionsfläche in iterativen Schritten auf die größte, im Raum befindliche Oberfläche (Mauerwerk) (gleich)verteilt und dadurch die Nachhallzeiten von Simulation und Messung Schritt für Schritt angeglichen wurden.

Die nachfolgende Grafik zeigt einen Vergleich der resultierenden Nachhallzeiten von experimentellen Messungen und der kalibrierten Simulationsumgebung:

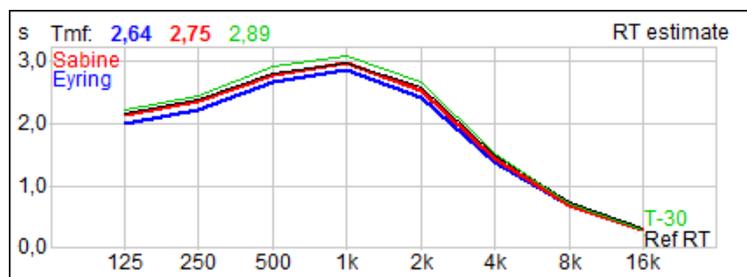


Abbildung 3.4: Kalibrierung des Simulationsmodells: Nachhallzeiten aus experimentellen Messungen (**schwarz**), Simulation-Ray Tracing (**grün**) und Simulation-Berechnungen nach Sabine (**rot**) und Eyring (**blau**)

Als Streugrade wurden Empfehlungen des Softwareherstellers aus der entsprechenden Dokumentation verwendet. Da diese auch einen geringen Einfluss auf die resultierende Nachhallzeit und die raumakustischen Gütemaße haben, wurden sie im Zuge einer Validierung überprüft. Dieser Vorgang ist im nun folgenden Unterkapitel dargestellt.

3.1.3 Validierung

Abschließend wurde eine umfangreiche Validierung des Simulationsmodells durchgeführt. Dabei wurden die Messwerte der Schwerpunktzeit einbezogen, um die implementierten Streugrade zu überprüfen. Es wurden Werte ab einer Frequenz von $1[kHz]$ verwendet, da sich im Raum bis inklusive $500[Hz]$ teils starke Raumresonanzen ausbilden, wodurch eine Vergleichbarkeit von Messwerten und den Werten aus der Simulation nicht gegeben ist³.

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Vergleich der resultierenden Werte und die entsprechende absolute und prozentuale Abweichung der Werte von Messung und Simulation (aus Analysemethode „Predict SxR“ - basierend auf der Impulsantwort h):

Frequenz [Hz]	T_s - Messung [ms]	T_s - Simulation [ms]	Abweichung [ms]	Abweichung [%]
1000	191,4	189,6	-1,8	-3,62
2000	162,9	165,5	2,6	4,36
4000	93,3	105,7	12,4	11,52

Tabelle 3.1: Validierung des Simulationsmodells: Vergleiche von der Schwerpunktzeit bei Messung und Simulation

Weiters wurde das Modell über den Sprachübertragungsindex validiert. Dabei wurden die Daten aus Messungen ohne Beschallungsanlage herangezogen. Vereinzelt ergab sich an bestimmten Positionen eine geringe Abweichung im Bereich von $\pm 0,02[-]$, der arithmetische Mittelwert über das Auditorium entspricht jedoch exakt den Messungen:

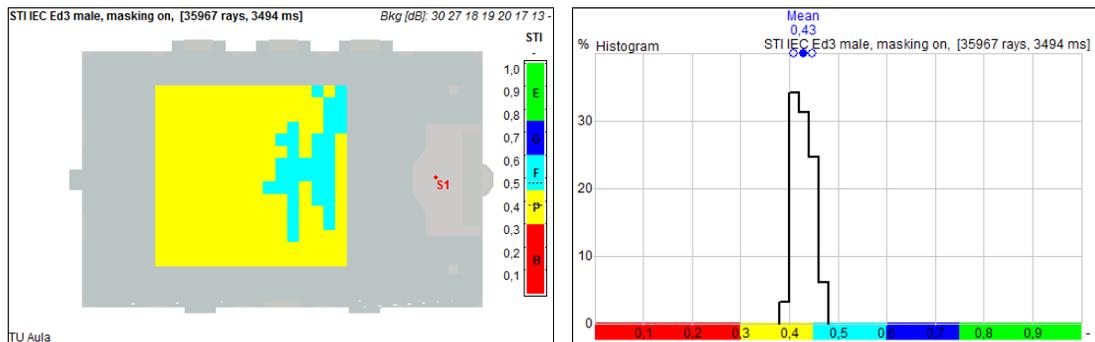


Abbildung 3.5: Validierung des Simulationsmodells: Simulierte Werte des Sprachübertragungsindex

³Physikalische Effekte auf Basis der wellentheoretischen Raumakustik (Raummoden) werden in CATT-Acoustic nicht berücksichtigt

3.1.4 Weiterführende Analysen

3.1.4.1 Nachhallzeit im besetzten Zustand

In Kapitel 2.4.1.1 wurde bereits die Nachhallzeit für den unbesetzten Zustand mit Bestuhlung messtechnisch ermittelt. Messungen im besetzten Zustand waren nicht möglich. Um für diesen Fall einen Überblick über die zu erwartenden raumakustischen Gütemaße zu ermöglichen, wird ein dementsprechendes Auditorium in der Simulation implementiert.

Neben den Absorptionsgraden wurde auch die zu erwartende, erhöhte Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit berücksichtigt. Die entsprechenden Daten dieser Randbedingungen sind im Anhang angeführt.

Die nachfolgende Grafik zeigt die resultierende Nachhallzeit im besetzten Zustand mit der aktuellen Holzbestuhlung:

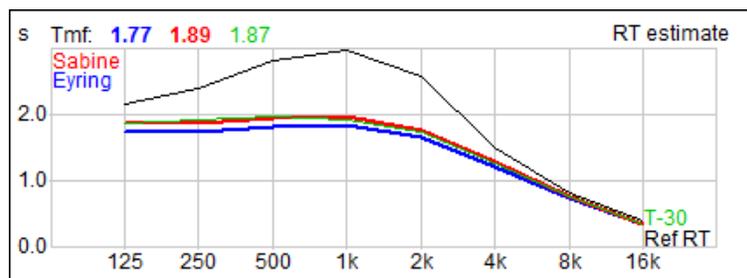


Abbildung 3.6: Nachhallzeit im besetzten Zustand mit aktueller Holzbestuhlung

Die Simulation zeigt, dass auch im besetzten Zustand die Nachhallzeit mit einem Wert von $1,87[s]$ ⁴ deutlich über dem nach ÖNORM B 8115-3 geforderten Optimalwert von $1,06[s]$ bei Verwendungszweck „Sprache“ liegt. Dieser Umstand ist auf die unzureichende äquivalente Absorptionsflächen im Raum zurückzuführen. Mit $10,31[m]$ liegt die Deckenkonstruktion sehr hoch, wodurch sich ein sehr hohes Raumvolumen ergibt (siehe auch Kapitel 2.4.1.1).

⁴Raytracing - arithmetischer Mittelwert der Werte bei $500[Hz]$, $1[kHz]$, $2[kHz]$

3.1.4.2 Störende Reflexionen

Wie schon zuvor in Kapitel 2.4.4 erwähnt, wurden bereits im Vorfeld störende, erste Reflexionen aufgrund der langen Schallwege in dem Raum vermutet. Zur Untersuchung dieses Aspektes wurde das Simulationsmodell herangezogen.

Nachfolgende Grafik zeigt die Ergebnisse: Im oberen Bereich der Grafiken wird der Schallweg von der Quelle (hier „S1“ bzw. „S2“ bezeichnet) dargestellt. Der untere Bereich der Grafiken zeigt die zeitliche Verzögerung der ersten Reflexionen (hier in grün) gegenüber des Direktschalls (hier in rot). Betrachtet wird die Situation bei einer Frequenz von $1[kHz]$.

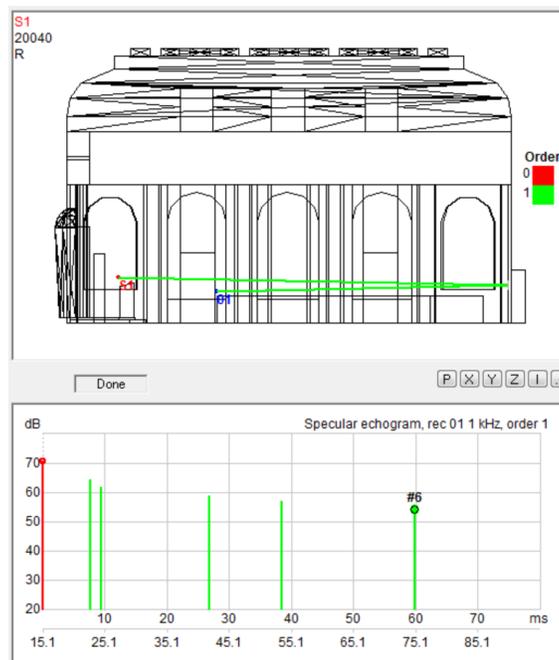


Abbildung 3.7: Stark störende erste Reflexionen aus dem Bereich der Rückwand

In manchen Veranstaltungssituationen wird in der Mitte des Raumes ein Gang gestaltet, welcher eine freie Ausbreitung der Schallwelle ermöglicht. Hierbei stellen Reflexionen erster Ordnung besonders für den vorderen Bereich des Auditoriums ein Problem dar, da diese mit rund $67[ms]$ Verzögerung deutlich über der Marke⁵ von $50[ms]$ liegen. Dadurch entstehen deutliche Echoerscheinungen, welche folgedessen eine starke Verschlechterung der Sprachverständlichkeit bewirken.

⁵Im Allgemeinen werden Reflexionen über diesem Wert als eigenständiges Schallereignis wahrgenommen (Echo)

Der selbe Effekt stellt sich im Bereich der Decke ein, was besonders bei einem Frontalvortrag bzw. bei einer Präsentation (Sendeposition S2) zu Problemen führt:

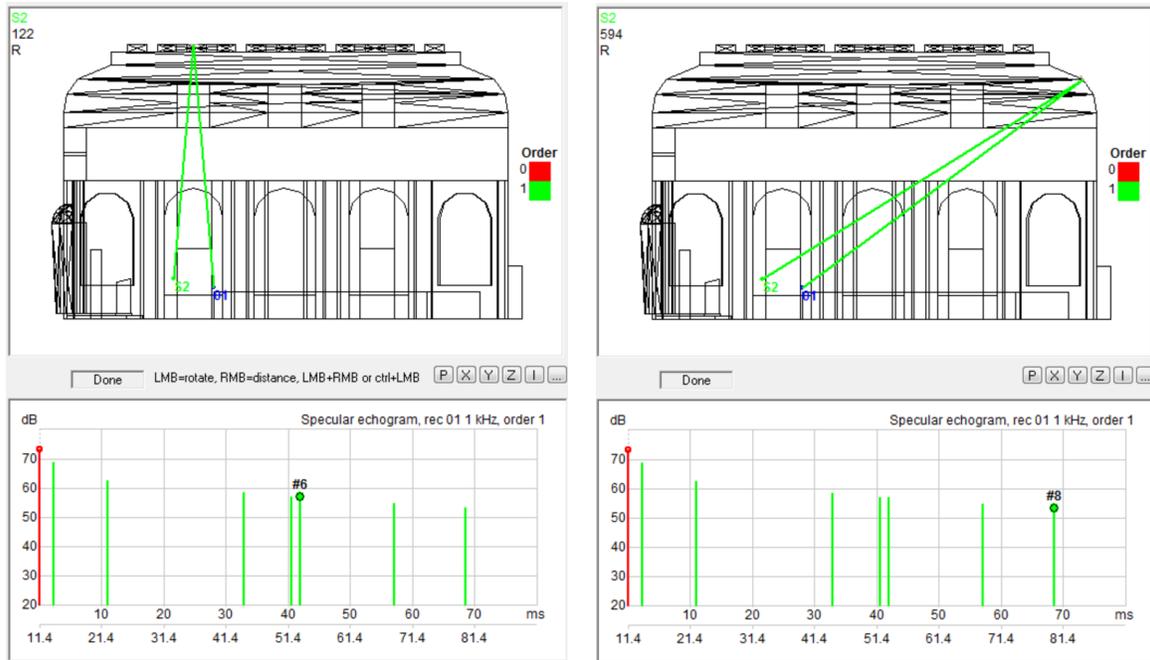


Abbildung 3.8: Stark störende erste Reflexionen aus dem Deckenbereich

Durch diese Analyse wird die Schlussfolgerung gezogen, dass störende Reflexionen entweder durch Diffusoren gestreut oder durch passende Absorptionsflächen in den entsprechenden Bereichen im Pegel abgeschwächt werden müssen.

3.2 COMSOL Multiphysics: Analyse der Raumeigenresonanzen

Um eine Eigenresonanzanalyse des Raumes durchführen zu können, wurde ein rechnerbasiertes Modell in der Finite-Elemente-Simulationssoftware „COMSOL Multiphysics“ implementiert. Das nun folgende Kapitel beschreibt kurz eine entsprechende Analyse, die exakte Implementierung wird hierbei jedoch nicht erörtert. Für den interessierten Leser wird auf die sehr umfangreich und detaillierte, öffentlich zugängliche Arbeit [19] verwiesen, in der unter anderem eine ähnliche Implementierung beschrieben ist.

3.2.1 Analyse der Eigenresonanzen des Raums

Bereits in Kapitel 2.4.1 wurde im Zuge der akustischen Messungen vermutet, dass sich im Raum starke Resonanzerscheinungen ausbilden, welche die Messergebnisse beeinflussen. Um diese Hypothese zu untermauern, werden Eigenfrequenzanalysen an einem FEM-Simulationsmodell durchgeführt. Dabei wird die Bestuhlung nicht berücksichtigt, da diese bei den betrachteten Resonanzfrequenzen keine gravierenden Auswirkungen haben sollte. In diesem Bereich liegen die Wellenlängen des Schalls mit rund $2,744[m]$ bei $125[Hz]$ und $2,144[m]$ bei $160[Hz]$ ($c_0 = 343[m/s]$) deutlich über den größten Abmessungen eines Einzelstuhls, wodurch eine vollständige Beugung der Welle um die Stühle zu erwarten ist.

Raumresonanzen sind in Messkurven zumeist an einer Überhöhung der Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich zu erkennen. Abbildung 2.8 verdeutlicht dies in Form von prägnanten Spitzen beispielsweise bei $125[Hz]$ in mehreren Messkurven. Weiters ist ein starker Einbruch im Deutlichkeitsmaß in Abbildung 2.10 bei $160[Hz]$ zu erwähnen. Merkliche Spitzen der Schwerpunktzeit im Bereich von $200[Hz]$ und $250[Hz]$ können ebenfalls auf Resonanzerscheinungen zurückzuführen sein.

Unterhalb einer bestimmten Frequenz ist mit voneinander isolierten und mit dem Gehör wahrnehmbaren Raumresonanzen zu rechnen. Über folgenden empirischen Zusammenhang ist diese Grenzfrequenz berechenbar [20, S.66]:

$$f_g \approx \frac{2000}{\sqrt[3]{V}} \quad (3.1)$$

Dabei ist:

V das Raumvolumen [m^3]

Hierbei ergibt sich ein Wert von rund $169[Hz]$. Somit können besonders Überhöhungen und Einbrüche in den Messkurven bei den Terzmittenfrequenzen von $125[Hz]$ und $160[Hz]$ Resonanzerscheinungen zugeordnet werden.

Nachfolgende Grafiken zeigen nun entsprechende Resonanzerscheinungen bei den zuvor genannten Frequenzen: Die farbige Fläche stellt den absoluten Schalldruck an der Ohrhöhe eines durchschnittlichen, sitzenden Zuhörers von $1,2[m]$ dar. Die Umrisse der 18 Kugeln im Raum verdeutlichen die

exakten Messpositionen, wie sie bereits in Kapitel 2.1.2 erörtert wurden. Tiefe **Rot**-Töne kennzeichnen Wellenmaxima, tiefe **Blau**-Töne bedeuten Wellenminima.

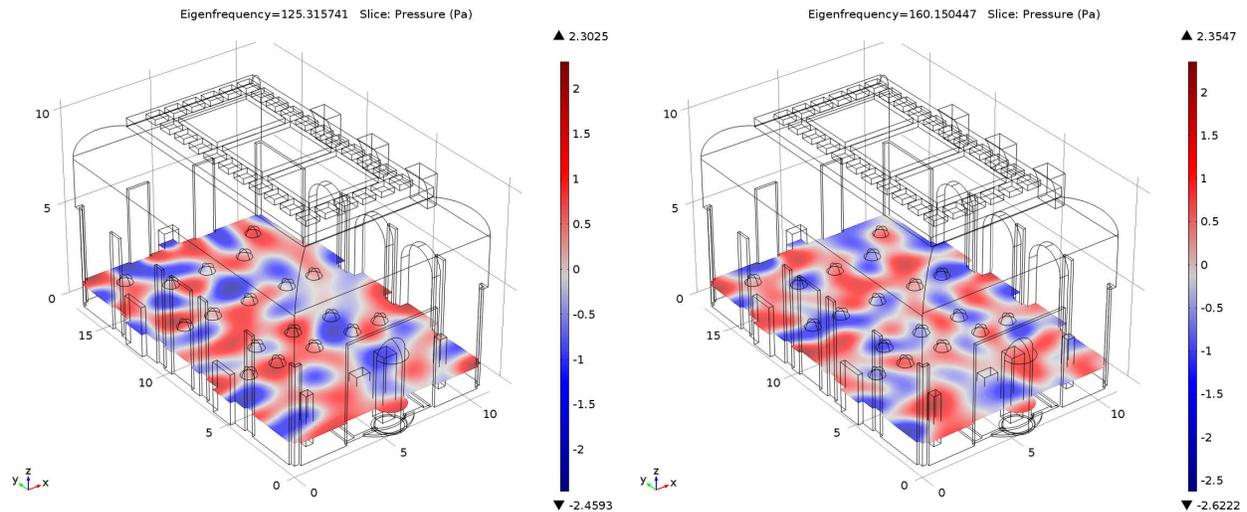


Abbildung 3.9: Raumresonanzen bei rund $125[Hz]$ und $160[Hz]$

Besonders Resonanzen hoher Güte haben zur Folge, dass durch die ortsabhängige Speicherung der Schallenergie an den entsprechenden Punkten der Schalldruckpegel nur sehr langsam abnimmt.

Ein solcher Umstand kann nur durch Schrägstellen von Begrenzungsflächen oder durch Erhöhung der äquivalenten Absorptionsfläche in diesen Frequenzbereichen verhindert bzw. abgeschwächt werden. Ersteres ist baulich nicht umsetzbar. Eine Erhöhung der äquivalenten Absorptionsfläche würde gleichzeitig die Modenkopplung erhöhen⁶, was in weiterer Folge die Ausbildung eines diffusen Schallfeldes begünstigt.

Weiterführende Zusammenhänge zwischen den Resonanzerscheinungen und gemessenen raumakustischen Gütemaßen beispielsweise durch tieferegehende Vergleiche von Messungen mit numerischen Lösungen werden in dieser Arbeit nicht durchgeführt, da diese den Rahmen sprengen würden. Ein Einfluss dieses Effektes auf die mangelhafte Sprachverständlichkeit kann jedoch eindeutig angenommen werden.

⁶Verminderung der Güte, Erhöhung der modalen Bandbreite; siehe auch [20, S.67]

Teil III

Akustische Optimierung

Kapitel 4

Optimierungsmaßnahmen

4.1 Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine möglichst gute und gleichmäßige Sprachverständlichkeit im gesamten Auditorium zu erreichen. Um Veränderungsmaßnahmen objektiv auf deren Wirksamkeit untersuchen und evaluieren zu können, wird vorrangig der Sprachübertragungsindex herangezogen und die Werte miteinander verglichen. Die dunkelblauen Flächen in den Grafiken kennzeichnen Hörplätze, die über den erforderlichen Mindestwert von $0,6[-]$ liegen. Weiters wird teils die Verteilung der Schallenergie bei den Terzbandmittenfrequenzen von $125[Hz]$ bis $1[kHz]$ betrachtet, wie auch die veränderte bzw. verminderte Nachhallzeit durch Einbringen verschiedenster Absorptionsflächen.

Grundvoraussetzung für eine korrekte Auswertung des *STI* stellt ein ausreichender Schallpegel an den entsprechenden Plätzen dar. Aus diesem Grund wird zuerst die Elektroakustik neu konzipiert, um nachfolgend bauakustische Aspekte und Veränderungen evaluieren zu können.

Die Umsetzbarkeit besonders in Bezug auf bauliche Veränderungen stellt aufgrund des bestehenden Denkmalschutzes ein wesentliches Kriterium bei der Wahl der Maßnahmen dar. Dieser Aspekt wurde zu jedem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses berücksichtigt. Daher ergibt sich eine Reihung dieser Maßnahmen nach Umsetzbarkeit, beginnend mit der einfachsten.

Teilweise werden im Zuge der Optimierung bestehende Oberflächen durch neue ersetzt bzw. verdeckt. Dabei wurde die in Kapitel 3.1.1 beschriebene geringe Erhöhung der Absorptionwirkung

des Mauerwerkes zu Kalibrierungszwecken in den Absorptionswerten der Optimierungsmaßnahmen berücksichtigt.

Für einen direkten, grafischen Vergleich der Simulationsergebnisse sind diese nochmals kompakt im Anhang angeführt.

4.2 Problemstellungen

Im Zuge der akustischen Messungen wurden mehrere Effekte nachgewiesen, welche die Sprachverständlichkeit teils stark negativ beeinflussen, diese werden nun nochmals kurz zusammengefasst:

- Schallpegel: Im Auditorium soll ein gleichmäßiger und ausreichender Schallpegel erzeugt werden.
- Nachhallzeit: Die Nachhallzeit soll verkürzt werden, was einen größeren Hallradius und eine bessere Modenkopplung ermöglicht.
- Störgeräuschpegel: Störquellen sollen aus dem Raum entfernt werden, bzw. deren Einfluss minimiert werden.
- Störende Reflexionen: Späte erste Reflexionen sollen gestreut oder abgeschwächt (absorbiert) werden.

Werden diese Aspekte berücksichtigt und erfolgreich umgesetzt, sollte das Projektziel einer guten Sprachverständlichkeit erreicht werden.

4.3 Extremvarianten

Bereits im Vorfeld der Planungen stellte sich die Frage, ob es nicht ausreichen würde, lediglich raumakustische Maßnahmen zu setzen oder nur die Beschallungsanlage neu zu konzipieren. Es war aber klar, dass diese beiden Aspekte Hand in Hand gehen und nur zusammen zum gewünschten Ziel führen.

Um dies zu verdeutlichen, werden in diesem Unterkapitel nun entsprechende Varianten vorgestellt, welche rein raumakustische oder elektroakustische Maßnahmen beinhalten. Zu besserer Darstellung wird hierbei bereits auf die entwickelten Maßnahmen aus den folgenden Kapiteln 5 und 6 vorgegriffen.

4.3.1 Explizit bau- und raumakustische Maßnahmen

Zuerst werden explizit bau- und raumakustische Maßnahmen untersucht. Die nachfolgende Grafiken zeigen die resultierenden Simulationsergebnisse: Dabei werden eine passend gestaltete Akustik, die Verwendung der derzeitigen Beschallungsanlage und eine Optimierung der derzeitigen Beschallungsanlage der Ausgangssituation gegenübergestellt. Die entsprechenden Kombinationen sind den Bildunterschriften zu entnehmen:

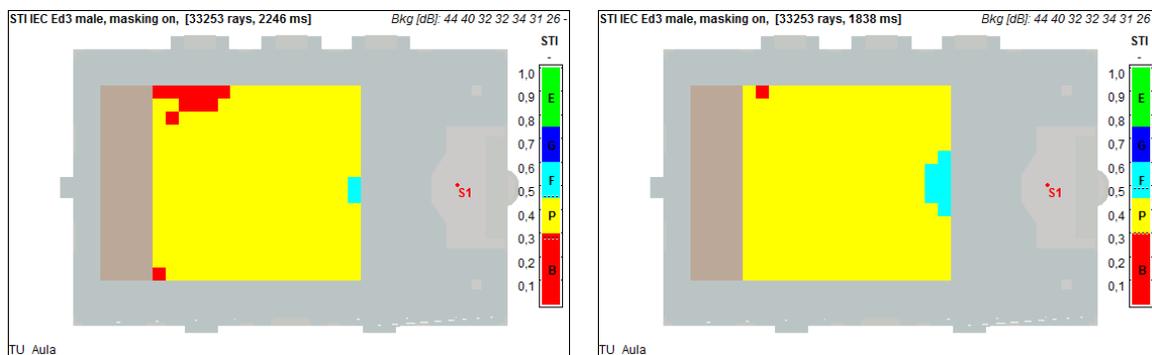


Abbildung 4.1: Ausgangssituation (links): mittlerer $STI = 0,35[-]$; alle akustischen Maßnahmen (rechts): mittlerer $STI = 0,35[-]$

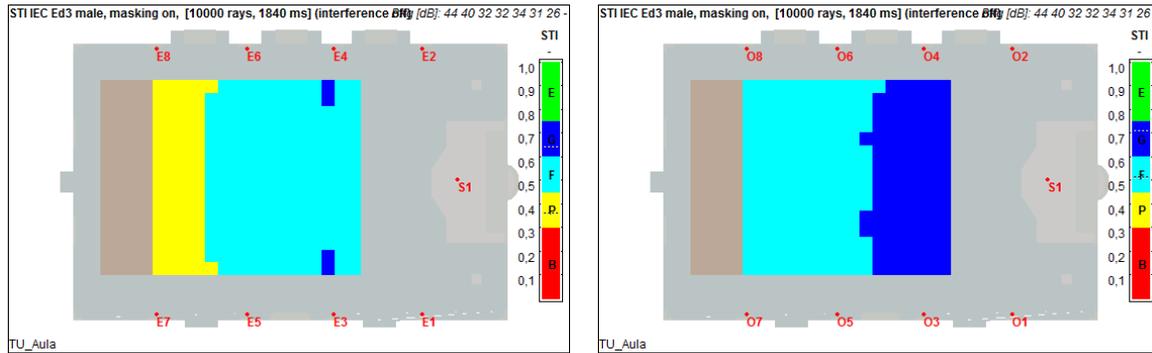


Abbildung 4.2: Alle akustischen Maßnahmen mit derzeitiger Beschallungsanlage (links): mittlerer $STI = 0,49[-]$; alle akustischen Maßnahmen mit optimierter Beschallungsanlage (rechts): mittlerer $STI = 0,59[-]$

Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass grundsätzlich eine Beschallungsanlage notwendig ist (Abbildung 4.1). Die Verwendung der derzeitigen Beschallungsanlage mit den aktuellen Einstellungen in Kombination mit allen in dieser Arbeit vorgestellten bau- und raumakustischen Maßnahmen führt ebenfalls zu einem unbefriedigenden Ergebnis (Abbildung 4.2, links). Eine Optimierung der Anlage in Bezug auf Pegelverhältnisse, Laufzeitverzögerung und Frequenzgänge der Lautsprecher ermöglicht lediglich in den vorderen Bereichen eine ausreichende Sprachverständlichkeit (Abbildung 4.2, rechts).

4.3.2 Explizit elektroakustische Maßnahmen

Nun werden explizit elektroakustische Maßnahmen für diverse Vergleiche herangezogen. Die nachfolgenden Grafiken zeigen die resultierenden Simulationsergebnisse: Die entsprechenden Kombinationen sind den Bildunterschriften zu entnehmen. Der erste Vergleich in Abbildung 4.3 zeigt die derzeitige Situation und Wirkung der Beschallungsanlage. Wird diese lediglich bezüglich relevanter Parameter optimiert, können nur vereinzelt Hörplätze mit ausreichender Sprachverständlichkeit gewonnen werden (Abbildung 4.4, links). Eine neue Beschallungsanlage hebt zwar die Sprachverständlichkeit im gesamten Auditorium geringfügig, das Projektziel wird dennoch nicht erreicht (Abbildung 4.4, rechts).

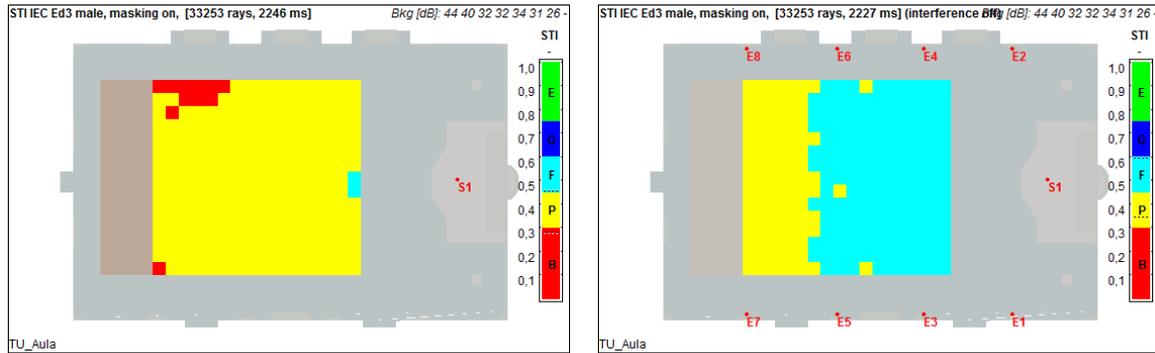


Abbildung 4.3: Ausgangssituation (links): mittlerer $STI = 0,35[-]$; ohne akustischen Maßnahmen mit aktueller Beschallungsanlage (rechts): mittlerer $STI = 0,45[-]$

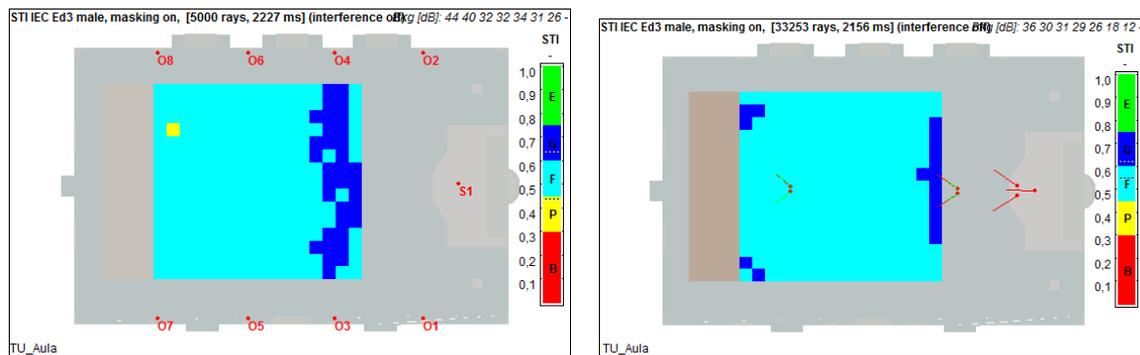


Abbildung 4.4: Ohne akustische Maßnahmen mit optimierter, aktueller Beschallungsanlage (links): mittlerer $STI = 0,53[-]$; ohne akustische Maßnahmen mit neuer Beschallungsanlage (rechts): mittlerer $STI = 0,58[-]$

4.3.3 Schlussfolgerungen

Infolge dieser Analyse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Aufgrund der mangelhaften Richtwirkung der aktuellen Lautsprecher erfolgt eine ständige Abstrahlung in den Deckenbereich, in dem sich keine absorbierend wirkende Fläche befindet und das diffuse Schallfeld ständig angeregt wird. Somit ist für eine Maximierung der Sprachverständlichkeit eine neue Beschallungsanlage notwendig.

Eine Optimierung der derzeitigen Beschallungsanlage in Bezug auf Pegelverhältnisse, Ausrichtung, Zeitverzögerung und Entzerrung der Lautsprecher führt zwar teils zu einer Verbesserung der Situa-

tion, das Ziel eines mittleren STI von $0,6[-]$ wird dennoch nicht erreicht.

Durch eine neue Beschallungsanlage kann zwar die Schallenergie gleichmäßig über das Auditorium verteilt werden, sollten jedoch parallel keine baulichen Maßnahmen gesetzt werden, verbessert sich die Sprachverständlichkeit aufgrund der zu langen Nachhallzeit nur im geringen Maße.

Fazit: Nur eine Kombination aus bau- und raumakustischen Maßnahmen mit einer Erneuerung der elektroakustischen Anlage führt zum gewünschten Ergebnis.

Kapitel 5

Optimierung der Elektroakustik

5.1 Vorgehensweise

Eine Grundvoraussetzung für die Sprachverständlichkeit stellt ein ausreichender Schallpegel im Auditorium dar. Im vorherigen Kapitel wurden bereits Extremvarianten der Optimierung gezeigt. Dabei wurde festgestellt, dass eine elektroakustische Anlage definitiv notwendig ist. Die derzeitige Anlage auch im Falle einer Optimierung ist hierfür nicht ausreichend.

Nach [9, Band 1, S.236] beträgt der am Hörerort benötigte Schalldruckpegel bei Sprachübertragung in Auditorien mit ruhigem Publikum $70[dB_{SPL}]$ bis $75[dB_{SPL}]$, in großen öffentlichen Sälen mit hohem Störpegel $85[dB_{SPL}]$ bis $90[dB_{SPL}]$. Nach dieser Definition stellt der Raum im hier vorliegenden Fall eher eine Mischung dieser Situationen dar, aus diese Grund wird in dem Terzmittenfrequenzband des Grundtonbereich der Stimme von Männern - also bei $125[Hz]$ - ein Pegel von rund $80[dB_{SPL}]$ bis $85[dB_{SPL}]$ anvisiert.

5.2 Lokalisation der Schallquelle

Die korrekte Lokalisation der Schallquelle stellt einen maßgeblichen Faktor für ein angenehmes Hörerlebnis dar. Nach dem sogenannten „Gesetz der ersten Wellenfront“ bestimmt der zuerst eintreffende Schall den Richtungseindruck, unabhängig davon, aus welcher Richtung der nachfolgende

Schall kommt. Dabei darf der Pegel des nachfolgenden Schalls bei Laufzeitdifferenzen zwischen $5[ms]$ und $30[ms]$ für Sprache sogar bis $10[dB]$ über dem des Primärschalls liegen [9, S.121].

Nach [9, S.65] beträgt der Sprachschallpegel in $60[cm]$ vor dem Mund üblicherweise $60[dB_{SPL}]$ bzw. $66[dB_{SPL}]$ bei stärkeren Sprechern. Vergleicht man diese Werte mit der Forderung nach $80[dB_{SPL}]$ bis $85[dB_{SPL}]$ am Hörerort, berücksichtigt man das Gesetz der ersten Wellenfront und die gezwungenermaßen auftretende Schallpegelabnahme mit der Entfernung zur Schallquelle ist klar ersichtlich, dass, egal wie die Lautsprecher im Raum verteilt sind, eine korrekte Lokalisation nicht ermöglicht werden kann.

Somit stellt sich die Forderung nach Erhöhung des Schallpegels aus der Richtung der Quelle. Hierfür besteht die Möglichkeit, Lautsprecherzeilen in das Rednerpult einzuarbeiten. Dadurch wird eine korrekte Lokalisation ermöglicht und weiters eine Unabhängigkeit des Pegels der Beschallungsanlage von der Sprachquelle erreicht. Gleichzeitig wird der vordere Bereich des Auditoriums mit ausreichend Schallenergie versorgt. Für die Beschallung des gesamten Auditoriums reicht diese Maßnahme jedoch nicht aus, denn um einen entsprechenden Pegel in den hinteren Reihen zu erhalten, müsste der Pegel in der ersten Reihe unerträglich hoch werden.

5.3 Gleichmäßige Beschallung des Auditoriums

Wie bereits eingangs dieses Kapitels erwähnt, ist das vorrangige Ziel der Planung der Beschallungsanlage, das Auditorium gleichmäßig mit Schallenergie zu versorgen, wobei das Diffusfeld möglichst wenig angeregt werden soll.

Hierfür wurden verschiedenste Varianten erarbeitet und evaluiert. Dabei zeigte sich, dass eine Positionierung von neuen Lautsprechern an den alten Befestigungspunkten mit passender Zeitverzögerung gemäß des Gesetzes der ersten Wellenfront zwar grundsätzlich eine geringe Verbesserung bewirkt, dabei jedoch diagonal durch den Raum aufgrund der Verzögerung und der langen Schallwege teils störende Schallenergie erzeugen.

Nachfolgende Grafiken verdeutlichen diesen Aspekt: Die roten Linien stellen die Schallwege dar, die grünen Linien die Ausrichtungen der Schallquellen. Der Lautsprecher in der hintersten Reihe stützt die Quelle mit einer passenden Laufzeitverzögerung (links). Aufgrund des späten Eintreffens wirkt die aus diesem Lautsprecher erzeugte Schallenergie jedoch störend für die erste Reihe, hier beispielsweise bei der Messposition MP01 (rechts).

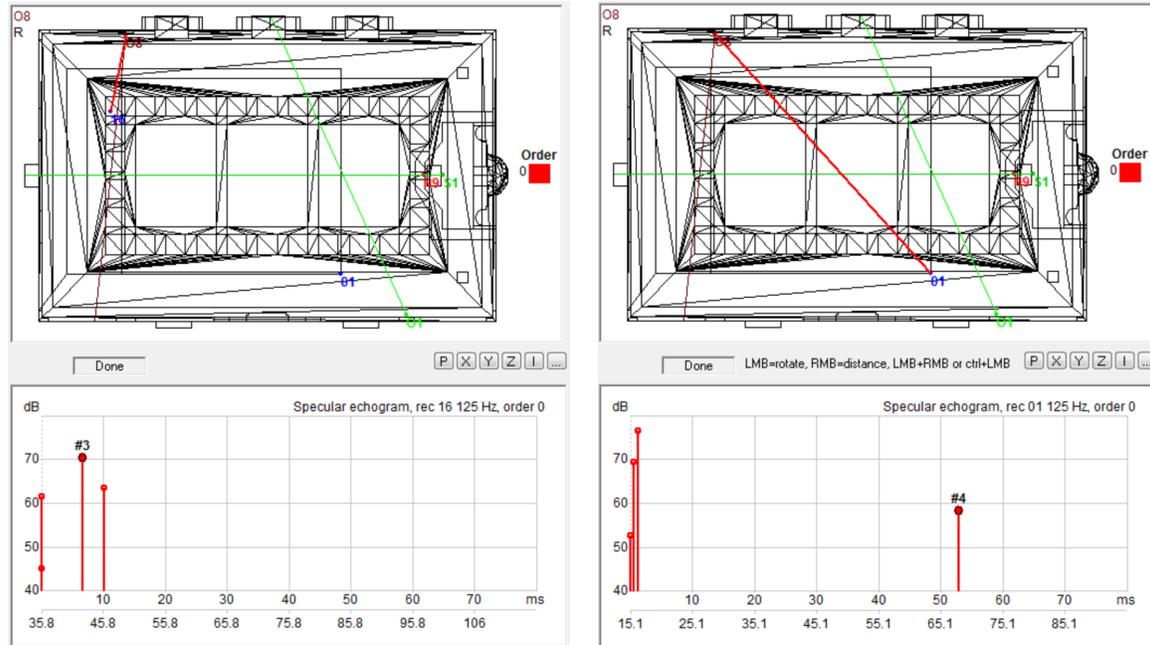


Abbildung 5.1: Störende Schallenergie aufgrund zeitlicher Verzögerungen quer durch den Raum

Aus diesem Grund wurde eine alternative Positionierung der Lautsprecher gewählt:

Im ersten und dritten Viertel der (Längs-) Mittelachse des Raums befinden sich in rund $6,3[m]$ Höhe je ein Luster. In diese werden Lautsprecherzeilen eingearbeitet, um das Auditorium optimal mit Schallenergie zu versorgen. Die Ausrichtung der Lautsprecher nach unten und eine hohe rückseitige Dämpfung infolge einer starken Richtwirkung ermöglichen eine sehr geringe Anregung des diffusen Schallfeldes. Da sich alle Lautsprecher in der Mittelachse befinden, werden die einzelnen Schallwege möglichst kurz gehalten, wodurch die zusätzliche Schallenergie sehr früh nach dem Direktschall beim Zuhörer eintrifft. Eine entsprechende Zeitverzögerung der Lautsprecher und eine passende Entzerrung runden das System ab.

5.4 Implementierung und Ergebnisse der Simulation

Die zuvor genannten Aspekte wurden in einem passenden Simulationsmodell implementiert. Zur Verwendung kamen Tonsäulen in 100[V]-Technik der Firma „ITEC“ mit der Bezeichnung „Neodym-line 8“. Sehr vorteilhaft bei dieser Wahl der Lautsprecher für eine Simulation in „CATT-Acoustic“

war, dass die notwendigen Simulationsdaten auf der Webseite des Herstellers zur Verfügung standen.

Nachfolgende Grafiken zeigen die resultierende Schallpegelverteilung: Die roten Punkte stellen die Positionen der Lautsprecher bzw. des Sprechers und die roten Linien die horizontale Ausrichtung dar (grüne Linien entsprechen der vertikalen Ausrichtung, ist hierbei jedoch nicht darstellbar). Im Terzmittenfrequenzband von $125[Hz]$ wird der zuvor erwähnte Wertebereich von $80[dB_{SPL}]$ bis $85[dB_{SPL}]$ über das gesamte Auditorium annähernd gleichmäßig erreicht.

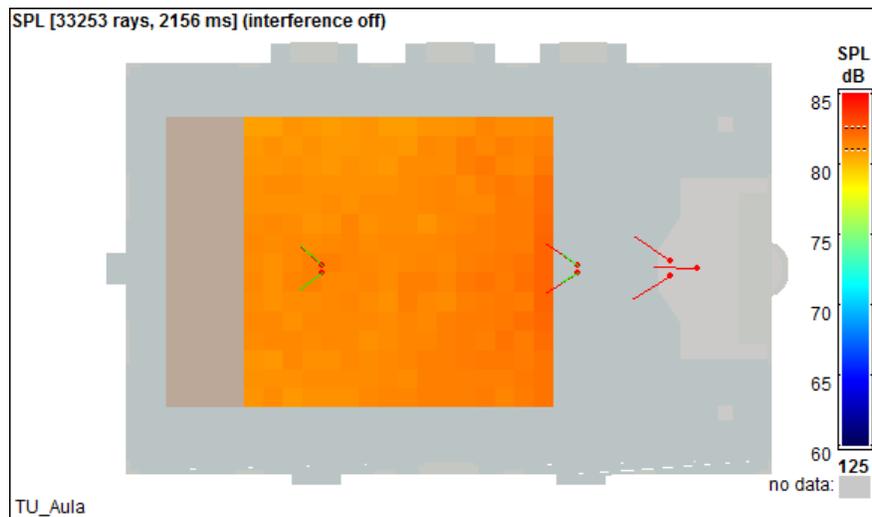


Abbildung 5.2: Schallpegelverteilung bei verschiedenen Terzbandmittenfrequenzen

Die nachfolgenden Tabellen zeigen einerseits die Werte der gewählten Parameter dieses elektroakustischen Konzepts, andererseits eine (globale) Entzerrung der gesamten Anlage:

Bereich:	Sendepiegel [dB_{SPL}]	Zeitverzögerung [ms]	Ausrichtung
Rednerpult	75,5	3	MP02, MP04
Luster vorne	78,5	5	MP09, MP13
Luster hinten	75,5	19	MP14, MP16

Tabelle 5.1: Elektroakustisches Konzept: Sendepiegel, Zeitverzögerungen und Ausrichtung der Lautsprecher

Frequenz [Hz]	125	<26	500	1k	2k	4k
Pegel [dB_{SPL}]	0	-6	-2	0	1	1

Tabelle 5.2: Entzerrung der elektroakustischen Anlage

Kapitel 6

Bau- und Raumakustische Optimierung

6.1 Vorgehensweise

Im nachfolgenden Kapitel werden einige Maßnahmen und Veränderungen des Raumes vorgestellt, welche die Sprachverständlichkeit bei diversen Veranstaltungen deutlich verbessern. Jede dieser Maßnahme wird anhand relevanter Aspekte untersucht, konkret betrifft dies die Verkürzung der Nachhallzeit, Verminderung des Störgeräuschpegels und Verminderung störender Reflexionen.

Die Optimierung der Nachhallzeit stellt in diesem Raum die größte Herausforderung dar, da bauliche Eingriffe besonders im Deckenbereich wenig bis gar nicht möglich sind. Bei der Planung von akustischen Maßnahmen wurde daher zu jedem Zeitpunkt deren Umsetzbarkeit geprüft und evaluiert. Im nachfolgenden Kapitel werden nun jene Möglichkeiten vorgestellt, welche die erfolgversprechendsten Ergebnisse bei denkbarer Umsetzung liefern. Diese sind nach Durchführbarkeit gereiht, beginnend mit der einfachsten Maßnahme.

Bei diesen Vergleichen werden auch die Nachhallzeiten bei den entsprechenden Maßnahmen ermittelt. Dabei wird als Referenz (schwarze Kurve) immer die durch die zuvor beschriebenen Maßnahme resultierende Nachhallzeitkurve herangezogen (Berechnung nach *Sabine*), also bei der Analyse der Maßnahme zwei gilt als Referenz die Maßnahme eins. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die relative Verkürzung der Nachhallzeit durch Einbringen von Absorptionsfläche in den Raum immer von der bereits im Raum vorhandenen Absorptionsfläche abhängt. Würden beispielsweise die Maßnahmen eins und zwei jeweils auf die Ausgangssituation eines sehr halligen Raumes bezogen und die

Ergebnisse addiert, käme ein zu gutes, der Wirklichkeit nicht entsprechendes Ergebnis heraus.

Um dies zu verdeutlichen, wird eine beispielhafte Berechnung durchgeführt. Die Nachhallzeit ergibt sich nach *Sabine* zu: [10, S.136]

$$T = 0,163 \frac{V}{A} \quad (6.1)$$

Dabei ist:

T	die Nachhallzeit [s]
V	das Raumvolumen [m^3]
A	die äquivalente Absorptionsfläche [m^2]

Würde somit in einem Raum mit $1000[m^3]$ Volumen und einer bereits vorhandenen äquivalenten Absorptionsfläche von $10[m^2]$ zusätzlich $1[m^2]$ eingebracht, verändert sich die Nachhallzeit von $16,3[s]$ auf rund $14,8[s]$, was einer Verkürzung von rund $1,5[s]$ entspricht. Befindet sich in selben Raum jedoch zuvor bereits $100[m^2]$, verändert sich die Nachhallzeit von $1,63[s]$ auf rund $1,61[s]$, was zu einer viel geringeren Verkürzung von rund $0,02[s]$ führt.

6.2 Ausgangssituation

Als Ausgangssituation wird der bestehende Raum zusammen mit der in Kapitel 5 neu konzipierten Beschallungsanlage gewählt, um eine Vergleichbarkeit von *STI*-Werten zu ermöglichen. Die resultierende Pegelverteilung wurde bereits in Kapitel 5.3 dargestellt.

Die erste der nachfolgenden Grafiken zeigt die resultierende Nachhallzeit: Hierbei wurde bereits ein Besetzungszustand von $80[\%]$ angenommen.

Weiters wird der resultierende Sprachübertragungsindex dargestellt: In dem angeführten Histogramm sind die entsprechende Verteilung und der Mittelwert über das Auditorium ersichtlich.

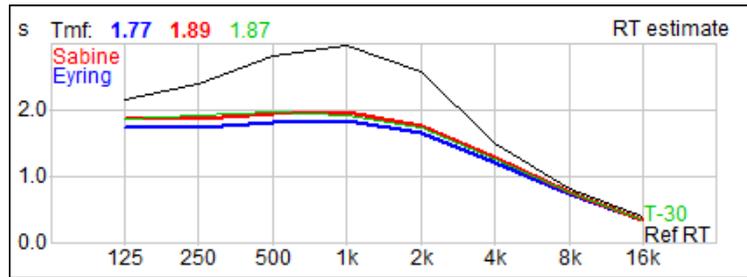


Abbildung 6.1: Ausgangssituation: resultierende Nachhallzeit (Referenz: leerer Raum ohne Bestuhlung/Publikum)

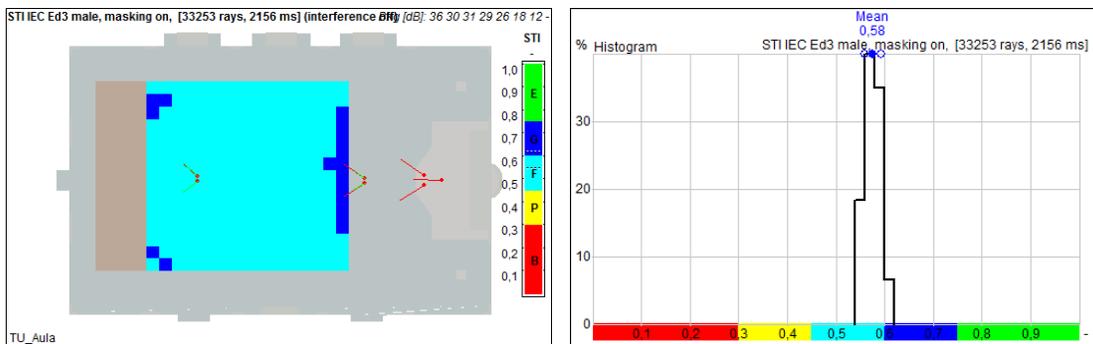


Abbildung 6.2: Ausgangssituation: resultierender Sprachübertragungsindex

Es ist klar ersichtlich, dass der erforderliche Wert von $0,6[-]$ geringfügig nur in der vorderen Reihe erreicht wird, was darauf schließen lässt, dass bauliche Maßnahmen notwendig sind.

6.3 Optimierungsmaßnahmen

6.3.1 Maßnahme 1: Verwendung einer gepolsterten Bestuhlung

6.3.1.1 Beschreibung der Maßnahme

Wie bereits in Kapitel 2.4.1.1 beschrieben, trägt die aktuelle Bestuhlung nur sehr gering zu einer Verkürzung der Nachhallzeit bei. Aufgrund der Fläche des Auditoriums besteht hierbei das größte Verbesserungspotential, indem diese durch eine geeignete Polsterbestuhlung ersetzt wird.

Eine derartige Erneuerung der Bestuhlung erzeugt eine Verbesserung in besetztem Zustand und sorgt auch in unbesetzten Bereichen für nützliche Absorptionsflächen. Somit kann auch bei kleineren Veranstaltungen mit geringem Besetzungsgrad eine entsprechende Akustik sichergestellt werden.

6.3.1.2 Anforderungen an das Produkt

Grundsätzlich sollte die Bestuhlung möglichst über den gesamten interessierenden Frequenzbereich hohe Absorptionswerte aufweisen. Spezielle Akustik-Stühle sind dabei auch im mittel- bis teils tief-frequenten Bereich wirksam.

Weiters müssen die Stühle einfach zu reinigen und für Lagerungszwecke gut stapelbar sein, da hierfür nur begrenzt Platz zur Verfügung steht¹.

6.3.1.3 Ergebnisse der Simulation

Nachfolgende Grafik zeigt die resultierende Nachhallzeit: Es stellt sich eine Verbesserung über den gesamten interessierenden Frequenzbereich ein.

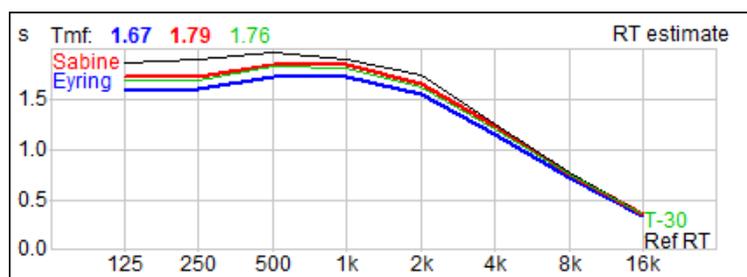


Abbildung 6.3: Maßnahme 1 - gepolsterte Bestuhlung: resultierende Nachhallzeit (Referenz: Ausgangssituation)

Weiters zeigt nachfolgende Grafik den Sprachübertragungsindex: Es entstehen zusätzliche Plätze mit Werten über 0,6[–] besonders im vorderen und hinteren Bereich des Auditoriums.

¹Bei gewissen Ereignissen wie Tanzveranstaltungen wird die Bestuhlung komplett aus dem Raum entfernt.

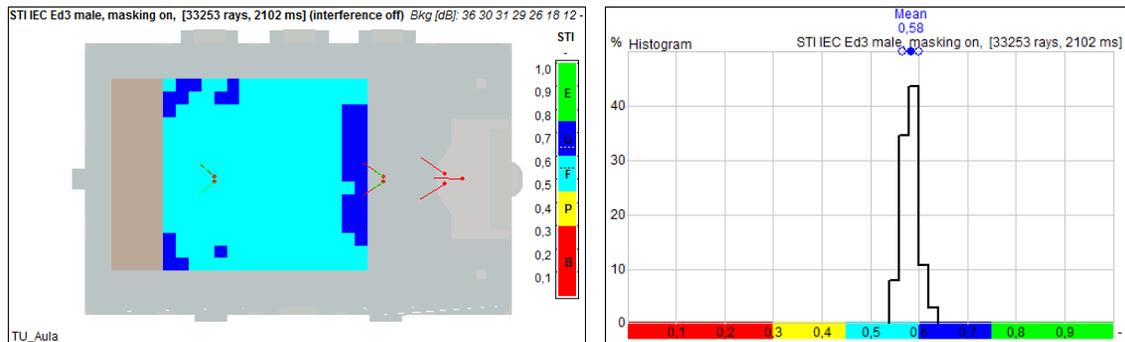


Abbildung 6.4: Maßnahme 1 - gepolsterte Bestuhlung; resultierender Spachübertragungsindex

6.3.2 Maßnahme 2: Verwendung von Akustikvorhängen

6.3.2.1 Beschreibung der Maßnahme

Akustikvorhänge in möglichst faltiger Ausführung im Bereich der Fenster und Balkon-Fenstertüren stellen ebenfalls eine einfache Möglichkeit dar, die äquivalente Absorptionsfläche im Raum zu erhöhen (siehe auch Abbildung 2.15). Die kleinen Fenster im Deckenbereich können hierbei komplett überdeckt werden. Bei Balkon-Fenstertüren bedecken derartige (geöffnete) Vorhänge üblicherweise rund 1/3 der Fensterfläche. In akustisch schwierigen Situationen wie geringen Besetzungszuständen ergibt sich jedoch die Möglichkeit durch Zuziehen eine größere Absorptionsfläche zu erhalten.

Neben einer Verminderung der Nachhallzeit bewirkt diese Maßnahme auch eine leichte Bedämpfung von Störgeräuschen durch Verkehrslärm.

Bei einer geschickten Wahl des Materials bzw. der Farbe kann natürlich auch das ehrwürdige Ambiente des Raums betont werden.

6.3.2.2 Anforderungen an das Produkt

Grundsätzlich sollten spezielle Akustikvorhänge verwendet werden, welche aus einem schweren Material bestehen. Sie sollten möglichst faltig aufgehängt sein, um die Absorptionswirkung zu erhöhen. Es sollte beachtet werden, dass die Vorhänge einfach zuziehbar sein sollen, was eine Erhöhung der wirksamen Absorptionsfläche ermöglicht. Auch in so einem Fall sollten die Vorhänge faltig hängen.

6.3.2.3 Ergebnisse der Simulation

Um das Potential dieser Maßnahme aufzuzeigen, wird eine Simulation mit einer vollflächigen Bedeckung der Balkon-Fenstertüren durchgeführt.

Die nachfolgende Grafik zeigt die resultierende Nachhallzeit: Besonders im Bereich oberhalb von $1[kHz]$ stellt sich eine deutliche Verbesserung ein. Die ist darauf zurückzuführen, dass die Vorhänge akustisch ansonsten nicht wirksame Flächen verdecken, wodurch neue äquivalente Absorptionsflächen erzeugt werden.

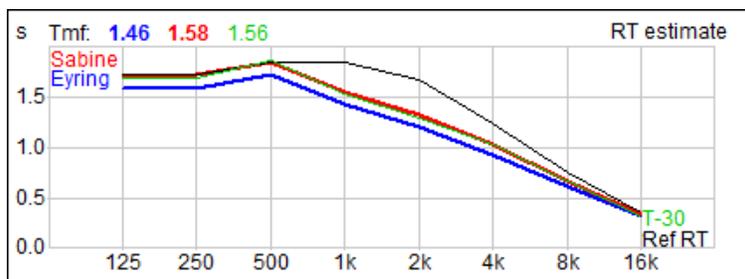


Abbildung 6.5: Maßnahme 2 - Akustikvorhänge: resultierende Nachhallzeit (Referenz: Maßnahme 1)

Eine derart verkürzte Nachhallzeit wirkt sich folgedessen sehr gut auf den Sprachübertragungsindex aus, was in nachfolgender Grafik verdeutlicht wird: Abgesehen vom Zentrum des Auditoriums wird in den restlichen Bereichen ein guter Wert erreicht.

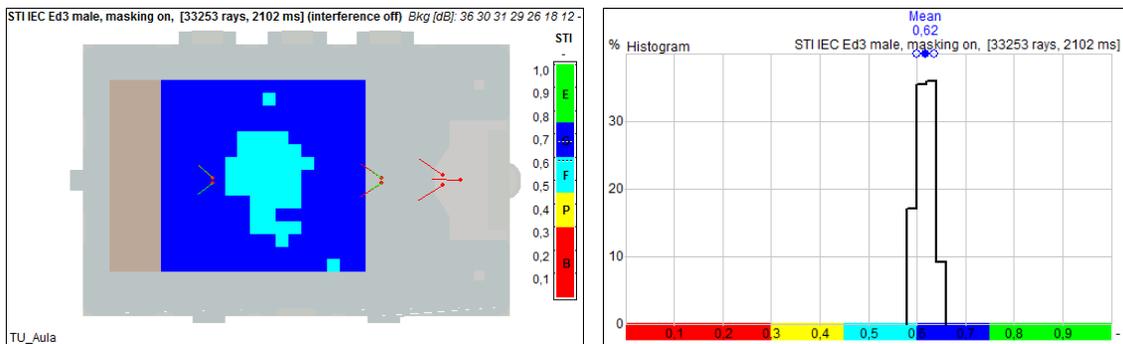


Abbildung 6.6: Maßnahme 2 - Akustikvorhänge: resultierender Sprachübertragungsindex

6.3.3 Maßnahme 3: Zusätzlicher Breitband-Absorber

6.3.3.1 Beschreibung der Maßnahme

An der Rückwand befindet sich oberhalb einer Durchgangstür eine relativ große freie Fläche. In diesem Bereich wäre die Montage eines zusätzlichen Breitband-Absorbers denkbar:

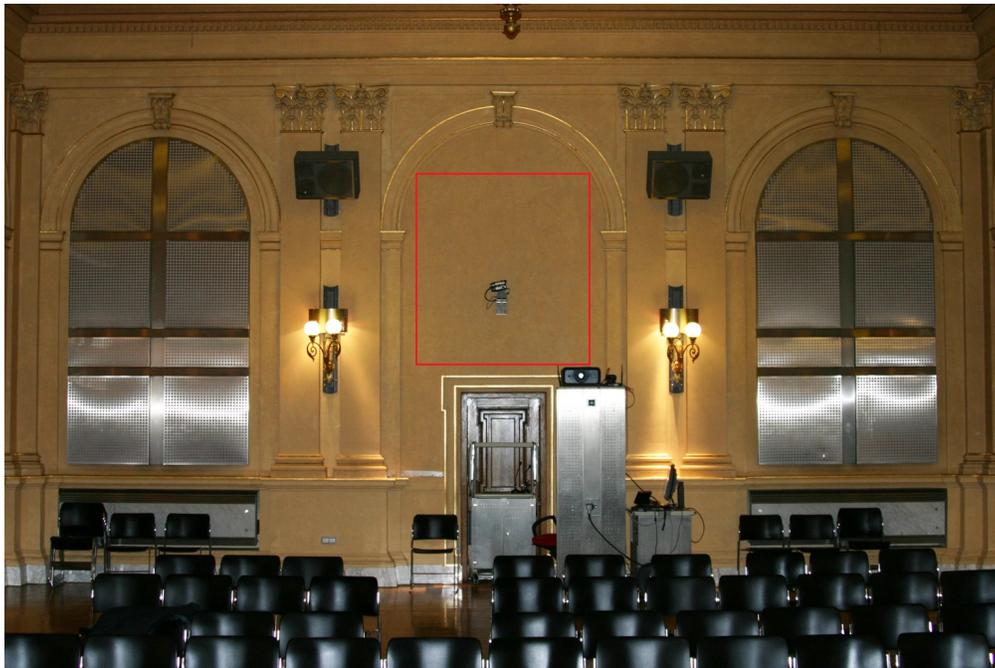


Abbildung 6.7: Freie Mauerfläche im Bereich der Rückwand (rot)

Neben einer Bedämpfung von diffuser Schallenergie werden störende Reflexionen 2. Ordnung über Decke und diesem Bereich der Rückwand abgeschwächt.

6.3.3.2 Anforderungen an das Produkt

Der Absorber sollte ähnlich wie die bereits bestehenden Absorber möglichst viel der Fläche bedecken. Der Absorptionsgrad sollte im gesamten interessierenden Frequenzbereich mindestens $0,6[-]$ betragen. Der Aufbau sollte nicht allzu massiv bzw. schwer ausfallen, um eine einfache Montage an möglichst wenig Ankerpunkten zu ermöglichen (Denkmalschutz).

6.3.3.3 Ergebnisse der Simulation

Die nachfolgende Grafik zeigt die resultierende Nachhallzeit: Aufgrund des geringen Flächenanteils im Vergleich zur Gesamtoberfläche bzw. der bereits sich im Raum bereits befindenden äquivalenten Absorptionsfläche ist hierbei nur eine geringe Verminderung bemerkbar.

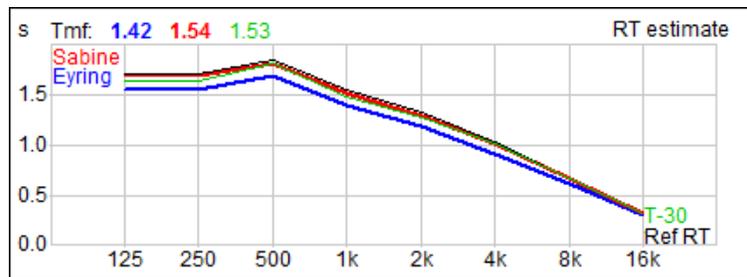


Abbildung 6.8: Maßnahme 3 - Rückwandabsorber: resultierende Nachhallzeit (Referenz: Maßnahme 2)

Bei der Simulation des Sprachübertragungsindex ist jedoch deutlich eine Verbesserung erkennbar, besonders im Bereich der Randplätze nahe der Fenster- und Türseite. Somit werden zusätzliche Sitzplätze mit einem Wert von $> 0,6[-]$ geschaffen.

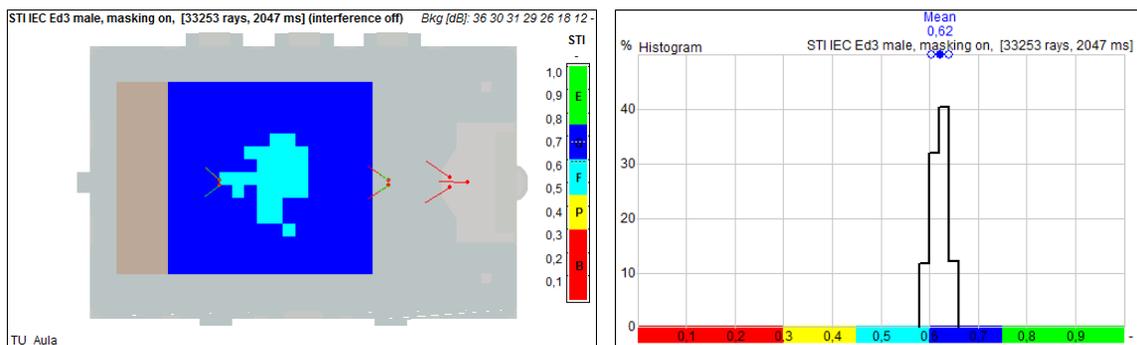


Abbildung 6.9: Maßnahme 3 - Rückwandabsorber: resultierender Sprachübertragungsindex

6.3.4 Maßnahme 4: Verminderung des Störgeräuschpegels

6.3.4.1 Beschreibung der Maßnahme

Eine Optimierung der Schalldämmung der Balkon–Fenstertüren vermindert den in den Raum immitierten Verkehrslärm. Da eine komplette Erneuerung dieser Bauteile sicherlich nicht möglich ist (Denkmalschutz), ist alternativ eine Auswechslung der veralteten Dichtungen² und ein Umbau denkbar, indem Absorbermaterial im Kastenfenster–Zwischenraum³ eingebracht wird. Bedämpfend wirken auch die zuvor erwähnten Akustikvorhänge auf den Verkehrslärm.

Weiters wurden während diverser Veranstaltungen Gehgeräusche von Personen und folgedessen auch „Knarzen“ des Parketts bemerkt. Dieser Aspekt wurde zwar nicht messtechnisch ermittelt, hatte jedoch subjektiv eindeutig eine störende Wirkung. Diese können mittels Teppichflächen in den Gangbereichen des Auditoriums und in Bereichen für Frontalvorträge vermindert werden, was auch zusätzliche Absorptionsfläche im hochfrequenten Bereich bewirkt. Eine vollflächige Verwendung über den gesamten Boden ist aus haustechnischen Gründen (Reinigung) hierbei jedoch nicht möglich.

Eine Teppichfläche vor dem Raum zur Vermeidung von Gehgeräuschen aus dem Gangbereich wäre zwar theoretisch wünschenswert, in praktischer Hinsicht würde dies jedoch besonders in den Wintermonaten andauernd hohe Reinigungskosten verursachen. Abgesehen davon wäre abzuklären, inwieweit dies mit den derzeitigen Brandschutzvorschriften in Einklang gebracht werden könnte, da dieser Bereich allgemein einen Fluchtweg darstellt. Eine einfacher umzusetzende Alternative würden zusätzliche Dichtungen an den massiven Eingangstüren, wie auch eine Abdichtung der Öffnungen nahe des Bodens darstellen (siehe Abbildung 2.16).

Filzunterlagen unter den Stuhlbeinen sorgen weiters für eine Minimierung von Publikumsgeräuschen durch die Dämpfung von Stuhlbewegungen.

Eine starke Erhöhung des Störgeräuschpegels konnte einem im Raum verwendeten Beamer zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2.4.3). Eine Erneuerung des Gerätes kommt somit der Sprachverständlichkeit sicherlich zu Gute.

²zusätzlich zur akustischen Wirksamkeit wäre hierbei auch eine Verminderung der (thermischen) Wärmeverluste und folgedessen eine Einsparung von Heizkosten zu erwarten

³Unauffällige Flächen zwischen den Verglasungen

6.3.4.2 Anforderungen an das Produkt

Dichtungen in Bereichen der Fenster und Türen sollten alle Öffnungen umlaufend schließen und in Bezug auf die Größe passend ausgeführt werden, damit diese beim Schließen der Bauteile nicht gequetscht werden (Verkürzung der Lebensdauer des Produkts).

Teppichflächen sollten eine möglichst gute akustische Wirksamkeit aufweisen, entsprechende Nachweise (Prüfberichte) wären empfehlenswert.

Ein neuer Beamer sollte dauerhaft - also auch bei längerem Betrieb - eine möglichst geringe Schallleistung emittieren. Eine passend ausgeführte Kapselung⁴ könnte eine Minimierung der abgegebenen Schallenergie unterstützen.

6.3.4.3 Ergebnisse der Simulation

Diese Maßnahmen haben keine direkte Auswirkung auf die Nachhallzeit, folgedessen wird auf deren Darstellung verzichtet.

Die Auswirkungen derartiger Maßnahmen werden erst bei der Simulation des Sprachübertragungsindex ersichtlich: Hierbei wurden die (frequenzabhängigen) Grundgeräuschpegel entsprechend den Messungen des *STI* am Abend mit wenig Verkehrslärm und ohne zugeschalteten Beamer verwendet. Im Histogramm ist klar ersichtlich, dass sich eine Verschiebung mehrerer Sitzplätze in die nächst höheren Werte ergibt.

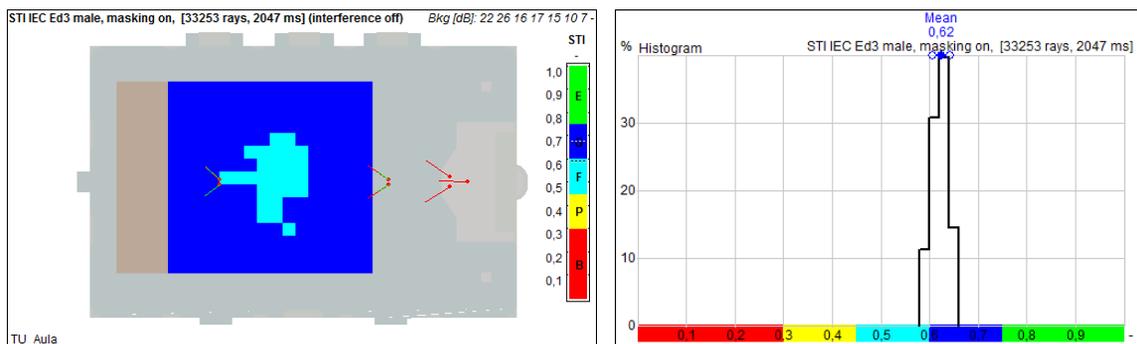


Abbildung 6.10: Maßnahme 4 - Verminderung des Störgeräuschpegels: resultierender Sprachübertragungsindex

⁴Entsprechende Vorkehrungen für die Gerätekühlung/Wärme-Abtransport sollten vorgesehen werden

Im Zuge der Messungen des Störgeräusches des Beamers wurde weiters eine sehr tonale Komponente entdeckt (vgl. Abbildung 2.18), welche aus dem relativ stationären Spektrum des Störgeräusches stark hervortritt. Dieser Aspekt kann unter Umständen sehr störend wirken, was durch eine subjektiven Bewertung während einer Veranstaltung bestätigt werden konnte. Nach [15] würde hierbei ein Zuschlag zum $L_{eq,A}$ von $3[dB_A]$ erfolgen. Weiters stellt der STI ein sehr objektives Maß dar, welches Komponenten bei rund $800[Hz]$ nicht berücksichtigt.

Folgedessen ist durch eine Auswechslung des derzeitigen Gerätes insgesamt eine größere Verbesserung zu erwarten als die Simulationsergebnisse ergeben.

6.3.5 Maßnahme 5: Mikroperforierter Stellabsorber

6.3.5.1 Beschreibung der Maßnahme

Da im unteren Bereich der Rückwand keine Montagemöglichkeiten vorhanden sind, wäre in einem definierten Wandabstand ein transparenter, mikroperforierter Stellabsorber aus Acrylglas verwendbar (Aufstellung direkt vor der Technik-Insel, siehe auch Abbildung 6.7).

Durch die zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche wird die Nachhallzeit verringert. Störende Reflexionen über die Rückwand werden direkt bedämpft, durch Schrägstellung Richtung äußere Bereiche des Auditoriums (V-Form) wird der reflektierte Anteil der Schallenergie in diese Bereiche des Auditoriums geleitet und es werden aufgrund der geringeren Schallwege nützliche Reflexionen erzeugt.

6.3.5.2 Anforderungen an das Produkt

Der Stellabsorber sollte eine möglichst hohe Absorption über das interessierende Spektrum, besonders aber bei der Terzmittenfrequenz von $500[Hz]$ aufweisen. Die Aufstellung sollte stabil ausgeführt sein, weiters sollte das Acrylglas bruchsicher sein.

6.3.5.3 Ergebnisse der Simulation

Die nachfolgende Grafik zeigt die resultierende Nachhallzeit: Der Absorber ermöglicht gezielt, die Überhöhung im Bereich von $500[Hz]$ abzuschwächen.

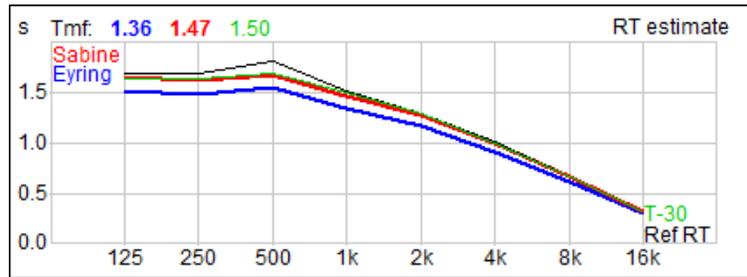


Abbildung 6.11: Maßnahme 5 - Stellabsorber: resultierende Nachhallzeit (Referenz: Maßnahme 3)

In Bezug auf den Sprachübertragungsindex wirkt sich diese Maßnahme besonders im vorderen Bereich, an den Randplätzen und im hinteren Bereich positiv aus. Lediglich im Zentrum des Auditoriums ergeben sich noch unzureichende Werte.

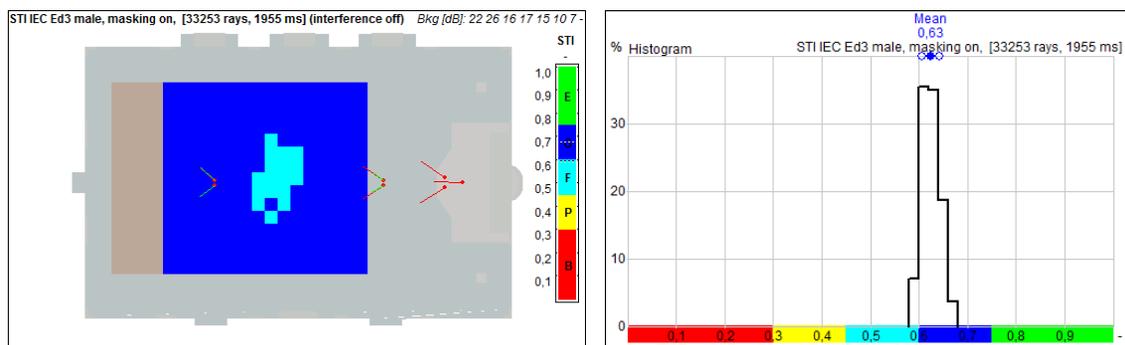


Abbildung 6.12: Maßnahme 5 - Stellabsorber: resultierender Sprachübertragungsindex

6.3.6 Maßnahme 6: Mikroperforierte Folie im Deckenbereich

6.3.6.1 Beschreibung der Maßnahme

Eine relativ unkonventionelle Möglichkeit des Einbringens zusätzlicher Absorptionsfläche ergibt sich im Bereich der strukturierten Decke. Hier sind Vertiefungen mit rund $0,3[m]$ vorhanden, welche mit einer Fläche von $120[m^2]$ rund $2/3$ der gesamten Fläche ausmachen. In die Konstruktion werden einlagige mikroperforierte Folienabsorber in einem definierten Abstand (zur Decke) eingearbeitet. Neben der zusätzlichen äquivalenten Absorptionsfläche werden auch störende Deckenreflexionen besonders im vorderen Bereich des Auditoriums bedämpft. Die einfache Montage mittels Zugfedern stellt einen sehr geringen Eingriff in die Bausubstanz dar, diese ermöglichen auch eine einfache

Demontage zu Reinigungszwecken.

Bei dieser Maßnahme gilt jedoch zu beachten, dass eine derartige Folie im Allgemeinen reflektierend wirkt. Um diesen optischen (Stör-)Effekt zu verhindern, ist eine Hinterleuchtung, beispielsweise mit LED-Lampen notwendig, wodurch die Transparenz garantiert wird. Bei geschickter Ausführung kann dies eine interessante Gestaltungsmöglichkeit bieten, wodurch die Deckenkonstruktion nochmals hervorgehoben wird. Weiters erhöhen Lampen in diese Bereich allgemein die Helligkeit des Raums.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen kurz die vorgeschlagene Folie mitsamt den Montagemöglichkeiten mittels Zugfedern:

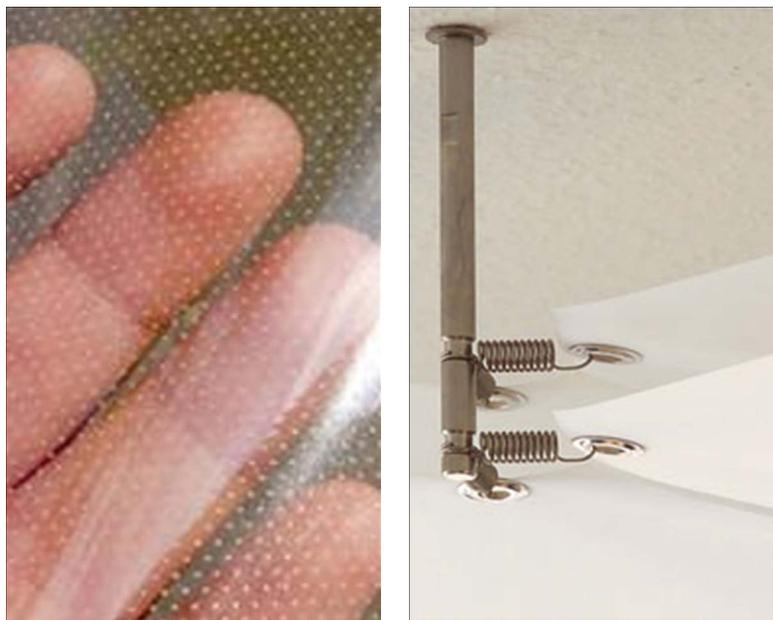


Abbildung 6.13: Mikroporforierte Folie der Firma „Kaefer“ [3]

Nachfolgende Grafik zeigt die Deckenkonstruktion: Die Einarbeitung der Folien in die drei großen Flächen ermöglicht eine enorm große, zusätzlich Absorptionsfläche. Für diesen Zweck wären zwar die kleineren Vertiefungen am Rand ebenfalls verwendbar, der Aufwand für Montage und die nachfolgende Notwendigkeit der gelegentlichen Reinigung steht jedoch nicht im Verhältnis zur akustischen Verbesserung.



Abbildung 6.14: Vertiefungen im Deckenbereich

6.3.6.2 Anforderungen an das Produkt

Die Folie sollte möglichst im tief- und mittelfrequenten Bereich wirksam sein. Die Ausführung der Montage-Zugfedern sollte eine einfache Demontage zu Reinigungszwecken ermöglichen. LED-Lampen, welche die Transparenz gewährleisten, sollten eine hohe Helligkeit aufweisen. Weiters sollte beachtet werden, dass die verwendeten Materialien den geltenden Brandschutzbestimmungen entsprechen.

6.3.6.3 Ergebnisse der Simulation

Die nachfolgende Grafik zeigt die resultierende Nachhallzeit: Obwohl sich in dem Raum bereits viel an äquivalenter Absorptionsfläche befindet, wird die Nachhallzeit deutlich verringert. Ab einer Frequenz von $2[kHz]$ werden die Vorgaben nach ÖNORM B8115-3 (inklusive Toleranzgrenzen) erreicht.

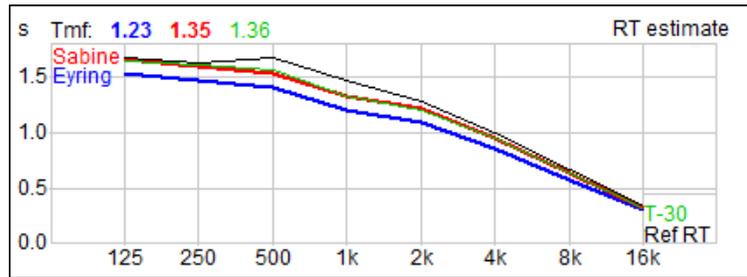


Abbildung 6.15: Maßnahme 6 - Mikroperforierte Folie: resultierende Nachhallzeit (Referenz: Maßnahme 5)

Diese Maßnahme wirkt sich sehr positiv auf den Sprachübertragungsindex besonders im Zentrum des Auditoriums aus: Es wird eine gute Sprachverständlichkeit im gesamten untersuchten Bereich ermöglicht.

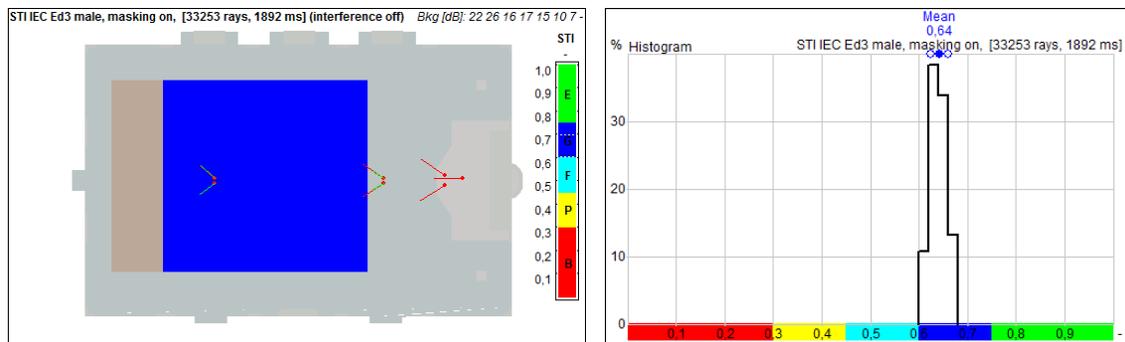


Abbildung 6.16: Maßnahme 6 - Mikroperforierte Folie: resultierender Sprachübertragungsindex

6.3.7 Nicht weiter verfolgte Optimierungsmaßnahmen

Im Zuge der Analyse und Erarbeitung möglicher Verbesserungsmaßnahmen wurde eine Vielzahl an Ideen gesammelt. Neben den vorgestellten Möglichkeiten wurden auch andere geprüft, beispielsweise:

- Reflektoren im Deckenbereich/Raumecken → Erzeugung zusätzlicher konstruktiver, erster Reflexionen,
- Absorptionsmaterial in nicht-sichtbaren Bereichen wie z.B. den rundumlaufenden Sims im Deckenbereich → zusätzliche Absorptionsfläche,

-
- Umbauten der aktuellen im Raum befindlichen Absorber → Optimierung/Anpassung an die Raumakustik,
 - Tiefton-Absorber (Plattenabsorber) im Bereich der Durchgangstüre an der Rückwand → zusätzliche Absorptionsfläche im tieffrequenten Bereich, oder
 - Mikroperforierte, bedruckte Leinwand (z.B. mit TU-Logo) an der Rückwand → zusätzliche Absorptionsfläche

Durch die Simulationsumgebung konnten solche Maßnahmen evaluiert werden. In weiterer Folge wurden diese aufgrund der mangelhaften Wirksamkeit, der nicht möglichen Umsetzbarkeit oder weil sie in Bezug auf die Innenarchitektur/Optik nicht in den Raum passten, verworfen. Dieser Aspekt unterstreicht nochmals die Nützlichkeit der Verwendung eines derartigen Simulationsmodells.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Bei der Planung von akustischen Sanierungsmaßnahmen im Bereich denkmalgeschützter Bauwerke sollte jederzeit die Durchführbarkeit und Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen geprüft werden. Hierbei stellen Computer-Simulationen ein ungemein wichtiges Hilfsmittel dar, da neben den üblichen raumakustischen Parametern auch erste Reflexionen verschiedenster Ordnung effektiv untersucht werden können. Eine erhebliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit kann bereits mit einfachen Mitteln wie dem Einbringen von textilen Oberflächen wie Vorhängen, Teppichen, einer gepolsterten Bestuhlung oder dem Entschärfen von Störgeräuschquellen erreicht werden. Die Einarbeitung von mikroperforierten Folien in Vertiefungen stellt in denkmalgeschützten Bereichen aufgrund der minimalen Eingriffe in die Bausubstanz eine gute Möglichkeit dar, zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche zu erzeugen. Ein befriedigendes Ergebnis lässt sich im Allgemeinen nur durch die Kombination von raumakustischen und elektroakustischen Maßnahmen erreichen.

7.2 Ausblick

Zur Zeit der Verfassung dieser Arbeit war nicht absehbar, welche dieser Maßnahmen umgesetzt werden. Nach Abschluss der akustischen Sanierung ist jedenfalls eine Wiederholung der akustischen Messreihen geplant, um die Effektivität und Genauigkeit der Planung evaluieren zu können.

Als Weiterführung des Projektes wird die Simulation von DSP Schallzeilen in CATT-Acoustic und ein Vergleich mit üblicher 100V Technik in Betracht gezogen. Durch die gezielte, starke Bündelung der Schallenergie sollte sich hierbei eine weitere Verbesserung der Sprachverständlichkeit einstellen. Hierbei bietet sich das MATLAB-basierte Programm „Digital Directivity Analysis“ der Firma „Duran Audio“ an, welches eine vollständige Simulationumgebung für alle von diesem Hersteller verfügbaren Lautsprechern darstellt. Hierbei ist es auch möglich, das geometrische Modell aus CATT-Acoustic zu importieren, die Lautsprecher zu positionieren und auszurichten und alle möglichen Einstellungsparameter der Elektroakustik zu modifizieren. Dabei wäre es denkbar, optimale Einstellungen für die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Ausführungsarten und -positionen zu ermitteln und diese im realen System zu implementieren. Eine hardware-seitige Steuerung der verschiedenen Konfigurationen würde eine einfache Anpassung der gesamten Elektroakustik an die jeweilige Veranstaltung ermöglichen.

Eine informative Simulation wurde diesbezüglich erstellt, um das Potential dieser Erweiterung zu verdeutlichen. Dabei zeigte sich, dass die Sprachverständlichkeit nochmals angehoben werden kann. Es können besonders in den vorderen Reihen Werte von über 0,8[–] (exzellente Sprachverständlichkeit) erreicht werden. Dies könnte beispielsweise gehörgeschädigten oder fremdsprachigen Personen zu Gute kommen, indem Plätze optimaler Sprachverständlichkeit dementsprechend ausgewiesen werden¹.

Die nachfolgende Grafiken zeigen die Auswirkungen der soeben erwähnten DSP-Schallzeilen: Je nach Ausrichtung der Tonsäulen kann die Schallenergie auf bestimmte Bereiche fokussiert werden. Die linke Grafik zeigt eine Kombination aus Lautsprechern eingebaut im Rednerpult und in den Lustern. In der rechten Grafik werden Lautsprecher anstatt in den Lustern am Rand des Auditoriums positioniert. Es gilt zu beachten, dass alle bau- und raumakustischen Maßnahmen in der Simulation berücksichtigt werden.

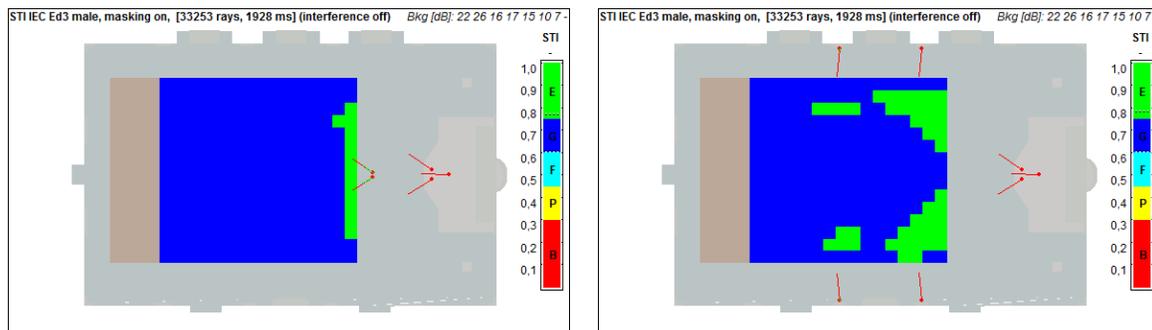


Abbildung 7.1: Informative Simulationen mit DSP-Schallzeilen

¹Diesbezüglich sind in [5, S.6] zusätzliche Hinweise angeführt, in Räumen mit Verwendungszweck „Sprache“ wird eine Verminderung der berechneten Soll-Nachhallzeit um weitere 20[%] empfohlen.

Auf den ersten Blick erscheint es möglich, durch die Verwendung von DSP-Schallzeilen die eine oder andere in dieser Arbeit vorgestellte bau- und raumakustische Maßnahme zu verwerfen. Dies wäre aber aufgrund eines weiteren Aspektes nicht ratsam: Zwar ist eine gute Sprachverständlichkeit bei Frontalvorträgen gegeben, die Sprachverständlichkeit bei anderen Nutzungsarten des Raumes beispielsweise bei Tanzveranstaltungen oder Besprechungen leidet jedoch immer noch unter der zu hohen Nachhallzeit.

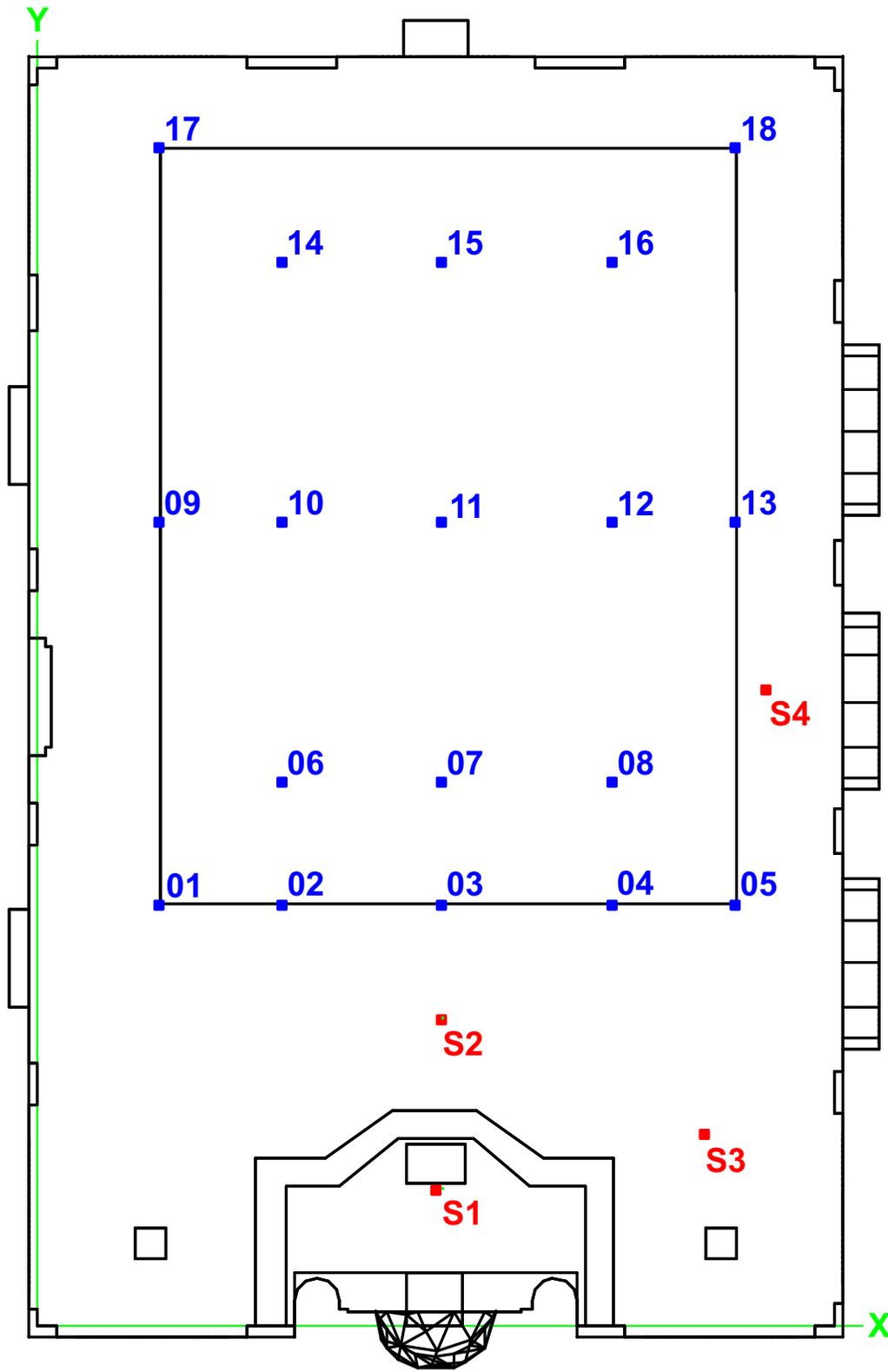
Teil IV

Anhang / Literaturverzeichnis

Anhang A

Verwendete Messpunkte

Position	x [m]	y [m]	Position	x [m]	y [m]
S1	5,3	1,8	MP 8	7,5	7,1
S2	5,2	4	MP 9	1,6	10,5
S3	8,7	2,5	MP 10	3,2	10,5
S4	9,5	8,3	MP 11	5,3	10,5
MP 1	1,6	5,5	MP 12	7,5	10,5
MP 2	3,2	5,5	MP 13	9,1	10,5
MP 3	5,3	5,5	MP 14	3,2	13,9
MP 4	7,5	5,5	MP 15	5,3	13,9
MP 5	9,1	5,5	MP 16	7,5	13,9
MP 6	3,2	7,1	MP 17	1,6	15,4
MP 7	5,3	7,1	MP 18	9,1	15,4



Anhang B

Berechnungen zu den Kapiteln

Berechnung der Resonanzfrequenz der Balkon-Fenstertüren (Glasteil)

Die Resonanzfrequenz eines Schwingsystems aus zwei Massen (Glasscheiben) und einer sie verbindenden Feder (Kopplung durch Luftpolster) ist über folgende Beziehung gegeben [10, S.270]:

$$f_0 = \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [Hz] \quad (\text{B.1})$$

Dabei ist:

s' die dynamische Steifigkeit der „Feder“ [MN/m^3]

m'_1, m'_2 die flächenbezogene Masse der Wandschalen in [kg/m^2]

Rohdichte / Glas [kg/m^3] [10, S.261]	2500
Dicke / Glas [m]	0,003
Flächenbezogenen Masse [kg/m^3]	7,5
Dyn. Elastizitätsmodul / Luft [MN/m^2] [15, S.53]	0,14
Scheibenabstand [m]	0,19
Dynamische Steifigkeit [MN/m^3]	0,737
Resonanzfrequenz [Hz]	71

Anhang C

Absorptions- und Streugrade der Begrenzungsflächen

Oberfläche	Absorptionsgrad [-]						Referenz
	125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1[kHz]	2[kHz]	4[kHz]	
Putz	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	[4]
Marmor	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	[10, S.100]
Parkett	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06	[4]
Fenster-Glas	0,60	0,30	0,10	0,04	0,03	0,02	berechnet ¹
Fenster-Holz	0,50	0,25	0,10	0,08	0,08	0,08	berechnet ²
Bestuhlung	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15	[10, S.99] ³
Holztüren	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	[4]
Absorber	0,60	0,70	0,60	0,80	0,83	0,85	[10, S.72] ⁴

Tabelle C.1: Absorptionsgrade der Begrenzungsflächen - Initialwerte

Oberfläche	Absorptionsgrad [-]						Referenz
	125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1[kHz]	2[kHz]	4[kHz]	
Putz	0,076	0,036	0,029	0,038	0,0485	0,09	iterative Schritte

Tabelle C.2: Absorptionsgrade der Begrenzungsflächen - Kalibrierung

¹Erhöhung im tieffrequenten Bereich durch Transmission

²Erhöhung im tieffrequenten Bereich durch Transmission

³Holzgestühl

⁴Kurve der Wirksamkeit nach ; geringe Erhöhung im tieffrequenten Bereich aufgrund Wirkung als Plattenschwinger

Oberfläche	Absorptionsgrad [-]						Referenz
	125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1[kHz]	2[kHz]	4[kHz]	
Bestuhlung	0,07	0,14	0,20	0,27	0,34	0,34	[4] ⁵
Auditorium	0,41	0,51	0,54	0,58	0,61	0,58	[10, S.99] ⁶
Fenster-Glas	0,70	0,50	0,60	0,70	0,95	0,99	[4] ⁷
Fenster-Holz	0,70	0,50	0,60	0,70	0,95	0,99	[4] ⁷
Rückwand-Absorber	0,60	0,70	0,60	0,80	0,83	0,85	berechnet ⁴
Stellabsorber	0,25	0,50	0,93	0,45	0,25	0,22	[11]
Mikroperforierte Folie	0,03	0,12	0,47	0,62	0,38	0,51	Herstellerangabe ⁸

Tabelle C.3: Absorptionsgrade der Begrenzungsflächen - Optimierungsmaßnahmen

Oberfläche	Streugrad [-]						Referenz
	125[Hz]	250[Hz]	500[Hz]	1[kHz]	2[kHz]	4[kHz]	
Bestuhlung, Auditorium	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	Empfehlung Software-Hersteller
alle anderen Oberflächen	0,11	0,16	0,30	0,45	0,60	0,80	berechnet ⁹

Tabelle C.4: Streugrade der Begrenzungsflächen - Initialwerte

⁵Postergestühl

⁶Publikum auf Postergestühl

⁷Erhöhung im tieffrequenten Bereich durch Transmission

⁸Hersteller: Kaefer; Folie: einlagig; Abstand zur Begrenzungsfläche: 100[mm]

⁹Ausgangswerte: Empfehlung Software-Hersteller; Schrittweise Anpassung an Messungen

Anhang D

Zusammenfassung bau- und raumakustischer Maßnahmen

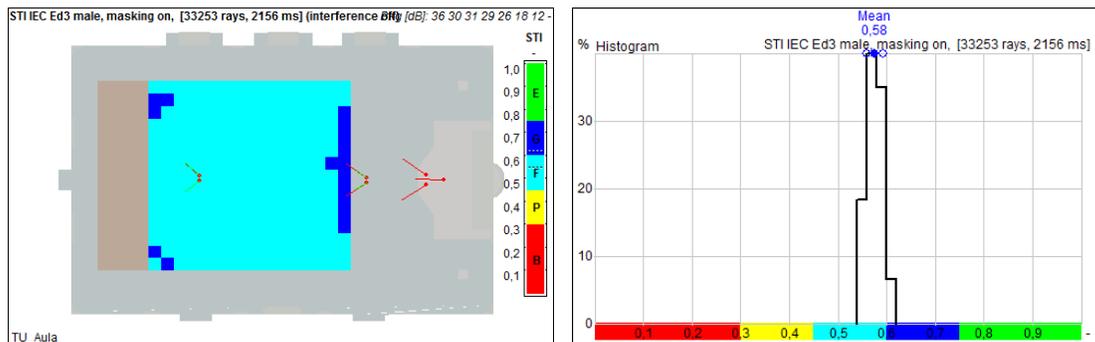


Abbildung D.1: Ausgangssituation: resultierender Sprachübertragungsindex

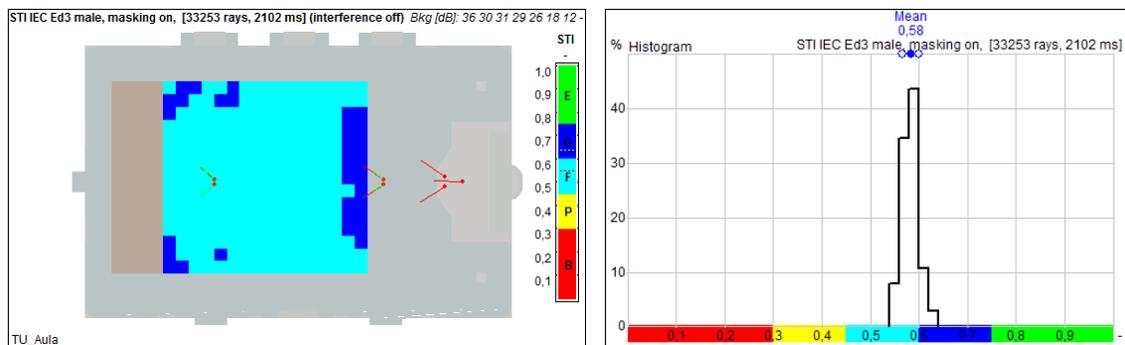


Abbildung D.2: Maßnahme 1 - gepolsterte Bestuhlung: resultierender Sprachübertragungsindex

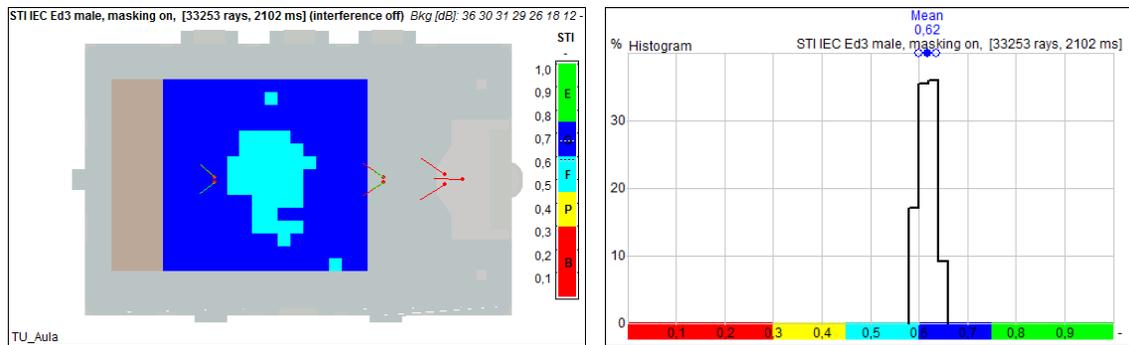


Abbildung D.3: Maßnahme 2 - Akustikvorhänge: resultierender Spachübertragungsindex

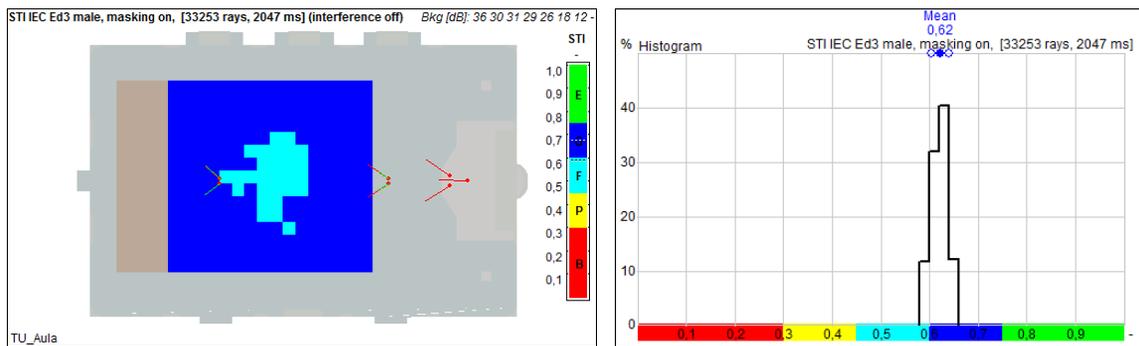


Abbildung D.4: Maßnahme 3 - Rückwandabsorber: resultierender Spachübertragungsindex

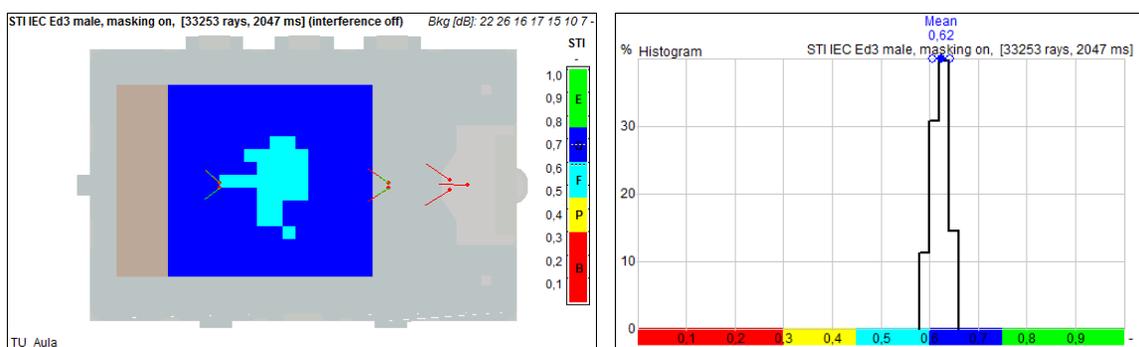


Abbildung D.5: Maßnahme 4 - Verminderung des Störgeräuschpegels: resultierender Spachübertragungsindex

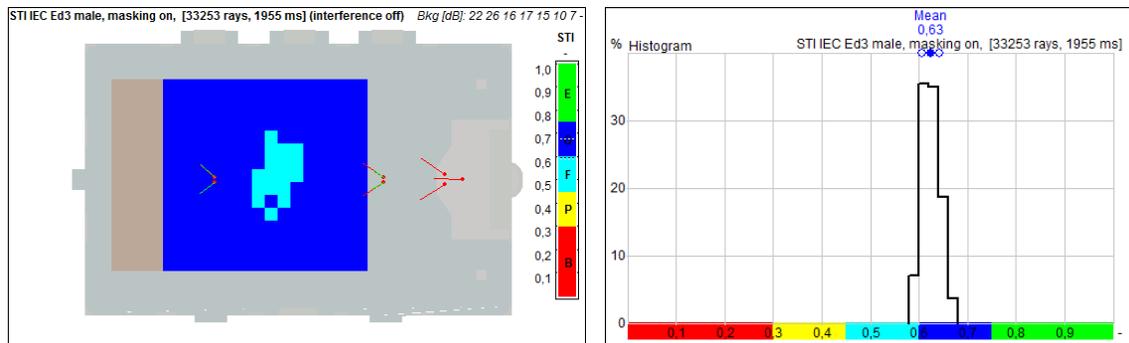


Abbildung D.6: Maßnahme 5 - Stellabsorber: resultierender Sprachübertragungsindex

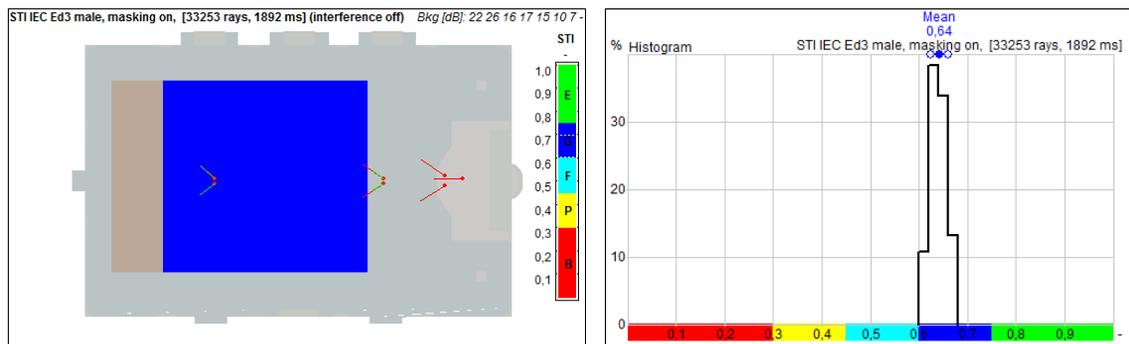


Abbildung D.7: Maßnahme 6 - Mikroperforierte Folie: resultierender Sprachübertragungsindex

Literaturverzeichnis

- [1] http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/News_Stories/Alte_Technik_125_Jahre
- [2] <http://www.catt.se>
- [3] <http://www.kaefer.com>
- [4] *ÖNORM EN 12354-6: Bauakustik - Berechnung der akustische Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften Teil 6: Schallabsorption in Räumen.* 2004
- [5] *ÖNORM B 8115-3: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau Teil 3: Raumakustik.* 2005
- [6] *ÖNORM S 5004: Messung von Schallimmissionen.* 2008
- [7] *ÖNORM EN ISO 3382-1: Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 1: Aufführungsplätze.* 2009
- [8] *ÖVE/ÖN EN 60268-16: Elektroakustische Geräte Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex.* 2012
- [9] DICKREITER, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik.* 6. Auflage. K.G. Saur Verlag KG, München, 1997
- [10] FASOLD, W. ; VERES, E.: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis.* HUSS-MEDIEN GmbH, 2003
- [11] FUCHS, H.V. ; ZHA, X.: Schallabsorber aus Acrylglas im Plenarsaal des Bundestages. In: *IBP-Mitteilung (Fraunhofer - Institut für Bauphysik)* 21 (1994), S. 258
- [12] GRABER, G. ; WESELAKE, W.: *Raumakustik - Skriptum zur gleichnamigen Lehrveranstaltung.* Technische Universität Graz, 2007

-
- [13] GRABER, G. ; WESELAK, W.: *Elektroakustik - Skriptum zur gleichnamigen Lehrveranstaltung*. Technische Universität Graz, 2008
 - [14] HOFFMANN, J.: *Taschenbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010
 - [15] KAUTSCH, P.: *Bauphysik 2 - Skriptum zur gleichnamigen Lehrveranstaltung*. Technische Universität Graz, 2012
 - [16] MÖSER, M.: *Messtechnik der Akustik*. Springer, 2010
 - [17] MÖSER, M. ; KROPP, W.: *Körperschall*. Springer, 2010
 - [18] OSWALD, K.: *Theorie der Raumakustik und Beschallungstechnik - Konzeption eines neuen Beschallungssystems für die Aula der technischen Universität Graz*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 1989
 - [19] PETRITSCH, H.: *FEM - Simulationen mit COMSOL Multiphysics im Anwendungsbereich der Technischen Akustik*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2011
 - [20] WESELAK, W.: *Akustische Messtechnik - Skriptum zur gleichnamigen Lehrveranstaltung*. Technische Universität Graz, 2013