
BACHELORARBEIT

RAUMAKUSTISCHE VERMESSUNG UND SANIERUNG VON HÖRSÄLEN

durchgeführt am
Signal Processing and Speech Communications Laboratory
Graz University of Technology, Austria

von
Lazar Radovanovic, Matr.Nr 01473097,
Djordje Perinovic, Matr.Nr 01431685,
Alexander Mülleder, Matr.Nr 01531717

Betreuerin:
Dipl.-Ing. Jamilla Balint

Graz, 25. März 2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

(Unterschrift)

(Unterschrift)

Abstract

Diese Bachelorarbeit ist als Fortsetzung der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ von Frischmann, Hofer und Schiller gedacht, um einen übersichtlichen Vergleich von Hörsälen an verschiedenen TU Campussen zu ermöglichen. Das Ziel ist, die Hörsäle sowie Seminarräume am Campus Alte Technik (Rechbauerstrasse 12 und Kronesgasse 5) akustisch zu vermessen und zu evaluieren. Außerdem sollte bei der Erstellung von akustischen Absorbern eine Zusammenarbeit mit den Architekturstudierenden erfolgen. Die von uns anhand des Schallabsorptionsgrades ausgewählten Materialien sollten von den Architekturstudenten optisch entworfen werden. Diese Absorber werden dann sowohl für die Sanierung der von uns vorgeschlagenen Hörsälen als auch für die „Interspeech 2019“ Konferenz verwendet werden. Die Sanierungsmaßnahmen werden in Form einer CATT-Acoustic Simulation von uns entwickelt.

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	7
1.1 Motivation	7
1.2 Aufgabenstellung.....	7
1.3 Vorgehensweise	7
2 Grundlagen und Theorie	8
2.1 Gütemaße	8
2.1.1 Nachhaltzeit	8
2.1.2 Deutlichkeitsgrad	9
2.1.3 Schwerpunktzeit	9
2.1.4 Artikulationsverlust.....	9
2.1.5 Sprachübertragungsindex.....	10
2.1.6 Bassverhältnis	10
2.1.7 Volumen Kennzahl	10
2.2 Normen.....	11
2.2.1 ÖNORM 3382-1 und ÖNORM 3382-2.....	11
2.2.2 ÖNORM B 8115-3	14
2.3 Einberechnung des Publikums	15
2.3.1 Berechnung der Nachhaltzeit.....	15
2.4 Frequenzbereich des Impedanzrohres.....	16
3 Messung und Auswertung	18
3.1 Messablauf	18
3.1.1 Beschreibung - Messablauf Impedanzrohr	18
3.1.2 Subjektive Evaluierung	18
3.1.3 Beschreibung - Objektive Messung	19
3.2 Auswertung der objektiven und subjektiven Ergebnisse	20
3.2.1 Erstellung von akustischen Datenblätter mittels MATLAB.....	21
3.2.2 Auswertung von akustischen Datenblätter.....	24
3.2.3 Auswertung von Impedanzrohrmessungen	28

4 Sanierung und Simulation	31
4.1 Berechnung der nötigen Absorptionsfläche	31
4.1.1 Berechnung fehlender äquivalenten Absorptionsfläche für LS XIV	31
4.1.2 Berechnung der einzubringenden Materialfläche	33
4.1.3 Berechnung der nötigen Absorberfläche für Fsi1	35
4.2 CATT-Simulation	37
4.2.1 Einstellungen der Simulation	37
4.2.2 Vorbereitung der Räume	44
4.2.3 Sanierung der Räume.....	48
5 Fazit	63
5.1 Diskussion	63
5.2 Erkenntnisse.....	67
5.3 Ausblick	69
A Messablaufplan, Prüfbericht und Checkliste	73
B Subjektive Fragebögen	81
C Datenblätter Absorber	85
D Datenblatt Fsi1	89
E Datenblätter Alte Technik und Kronesgasse	95

1 Einleitung

1.1 Motivation

Unser ursprüngliches Interesse für diese Arbeit wurde durch die Lehrveranstaltungen Raumakustik VO und Raumakustik LU geweckt, sowie durch unsere allgemeine Begeisterung des Themas Raumakustik. Da das Thema „Architectural Acoustics“ am Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation verfügbar war und uns von unserer Betreuerin DI Jamilla Balint vorgeschlagen wurde, haben wir uns dafür entschieden. Eine weitere Motivation war, dass dieses Thema viele Aspekte unseres Studiums aber auch unser zukünftiges Berufsleben zusammenfasst: Raumakustik, Akustische Messtechnik, Programmieren (MATLAB), Zusammenarbeit mit den ArchitektInnen, selbstständige Entwicklung von akustischen Lösungen. Ein entscheidender Punkt war auch, dass die Arbeit sowohl praktische, als auch theoretische Kenntnisse und Erfahrungen zum Thema Raumakustik mit sich bringt. Die Tatsache, dass unsere Arbeit als Vorlage für die Umsetzung der akustischen Maßnahmen in Hörsälen dienen sollte hat unsere Motivation noch weiter verstärkt.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung kann in drei große Bereiche unterteilt werden:

- Materialvermessung im Impedanzrohr und Auswahl von Absorbern (Zusammenarbeit mit ArchitektInnen)
- Akustische Vermessung der Hörsäle und Seminarräume, sowie eine Evaluation anhand der wichtigsten akustischen Parameter/Gütemaße
- Simulation von zwei Räumen sowie die Entwicklung eines Sanierungsvorschlags mithilfe der ausgewählten Absorber

1.3 Vorgehensweise

Um die Arbeit in einem bestimmten Zeitraum fertigen zu können, musste ein Arbeitsplan entwickelt werden. Da der Umfang der Arbeit zu Beginn noch offen war, wurden im Lauf dieser Arbeit ein paar Punkte hinzugefügt. Deshalb ist die unten gezeigte Reihenfolge chronologisch sortiert.

1. Vermessung der Absorbermaterialien
2. Akustische Vermessung der Hörsäle an der Alten Technik
3. Subjektive Evaluierung der Hörsäle an der Alten Technik
4. Erstellung der akustischen Datenblätter (objektive Evaluierung)
5. Vermessung der von Architekten entwickelten Prototypen für die Absorberpaneele (Großteil von Architekten durchgeführt)
6. Akustische Vermessung der Seminarräume in der Kronesgasse
7. Subjektive und objektive Evaluierung von Seminarräumen in der Kronesgasse, anschließende Erstellung der akustischen Datenblätter
8. Entwicklung von Sanierungsmaßnahmen für die zu sanierenden Räume
9. Erstellung von SketchUp und CATT-Modellen der zu sanierenden Räume

2 Grundlagen und Theorie

2.1 Gütemaße

Um einen Raum akustisch zu beschreiben, hat Wallace Clement Sabine 1898 den ersten objektiven Parameter entwickelt - die Nachhallzeit [1]. Seitdem gibt es dutzende Gütemaße die alle leicht unterschiedliche Faktoren eines Raumes beschreiben. Daher muss man sich entscheiden welche man verwendet will und welche nicht. Das Ziel ist natürlich, einen Raum so genau wie möglich zu beschreiben. Um unsere Bachelorarbeit zu der vorherigen kompatibel zu halten, haben wir uns für die gleichen Gütemaße entschieden, die in den unterstehenden Kapiteln kurz erläutert werden.

2.1.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit wurde durch die Dauer definiert, die ein Schallpegel benötigt um auf ein Tausendstel abzufallen, was einem Schallpegelabfall um -60dB entspricht [2]. Nach W. C. Sabine hängt sie vom Volumen, sowie von der Absorptionsfläche der im Raum vorhandenen Materialien und Gegenstände ab (siehe *Formel 2.1*) [1].

$$T_{60} = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \left[\frac{s}{m} \right], \quad (2.1)$$

wobei die Variablen folgenden Größen beschreiben:

T_{60} – Nachhallzeit;

c – Schallgeschwindigkeit bei 14°C;

V – Raumvolumen;

α – Absorptionsgrad;

S – Materialfläche;

A – Äquivalente Absorptionsfläche.

Da in der Praxis selten 60dB Signal-Rauschabstand (Signal to Noise Ratio) verfügbar sind, kann man auch Parameter wie T_{20} , T_{30} oder EDT verwenden. Diese beschreiben ebenso die Nachhallzeit, allerdings wird für deren Messung weniger SNR benötigt. Bei T_{20} und T_{30} misst man die Zeit des Abfalls von -5dB auf -25dB bzw. von -5dB auf -35dB. EDT (Early Decay Time) misst einen Abfall von 0dB auf -10dB. Diese Kurven werden dann auf 60dB Abfall extrapoliert. Da die ersten 10dB Schallpegelabfall für den subjektiven Eindruck am ausschlaggebendsten sind, stimmt EDT im Vergleich zu den anderen Nachhallzeiten am besten mit dem subjektiven Empfinden überein [2].

2.1.2 Deutlichkeitsgrad D_{50}

Deutlichkeitsgrad D_{50} wurde als Quotient vom Schallenergieanteil in den ersten 50ms und der ganzen Energie definiert (siehe *Formel 2.2*) [2]:

$$D_{50} = \frac{E_{50}}{E_{ges}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

Durch Vergleiche von subjektiven und objektiven Versuchen ist man zu dem Entschluss gekommen, dass die Reflexionen, die in den ersten 50ms passieren, entscheidend für die Sprachverständlichkeit sind. Je größer dieser Anteil ist, desto verständlicher wird die Sprache in einem Raum empfunden. Als Grenze der Verständlichkeit wurde 50% festgelegt [2].

2.1.3 Schwerpunktszeit t_s

Die Schwerpunktszeit ist das Produkt der Energiekomponenten und jeweiligen Verzögerungszeiten der eintretenden Schallreflexionen, dividiert durch die ganze Energie an einer Messposition (siehe *Formel 2.3*) [2].

$$t_s = \sum_0^i (t_i \cdot E_i) / E_{ges} \quad (2.3)$$

Die Schwerpunktszeit dient zur Bestimmung der Räumlichkeit. Je größer sie ist, desto räumlicher der Eindruck [2].

Nach Kürer ist die optimale t_s von der optimalen Nachhallzeit abhängig (siehe *Formel 2.4*) [3]:

$$t_{s,opt} = \frac{T_{20,opt}}{13.8} \quad (2.4)$$

Richtwerte für die Schwerpunktszeit wurden in mancher Literatur ohne Rücksicht auf das Volumen des Raumes beschrieben, nämlich zwischen 60 ms und 80 ms für Sprache [2]. Frischmann, Hofer und Schiller haben deshalb diese Richtwerte mit der Formel für die optimale t_s kombiniert und folgende Richtlinie festgelegt (siehe *Formel 2.5*) [4]:

$$\frac{6}{7} t_{s,opt} \leq t_s \leq \frac{8}{7} t_{s,opt} \quad (2.5)$$

2.1.4 Artikulationsverlust Al_{cons}

Dieser Wert beschreibt die Verständlichkeit der Konsonanten in einem Raum (siehe *Formel 2.6*) [2]. Je kleiner der Wert, desto besser sind sie verständlich.

$$Al = \frac{200 \cdot r_{LH}^2 \cdot T}{\gamma \cdot V} \quad (2.6)$$

wobei T die Nachhallzeit, V das Volumen des Raumes, r_{LH} der Hallradius und γ der Bündelungsgrad der Schallquelle ist. Hallradius beschreibt den Abstand von der Schallquelle, bei dem die Reflexionen und der Direktschall den gleichen Anteil besitzen. Er lässt sich folgendermaßen berechnen (siehe *Formel 2.7*):

$$r_{LH} = 0,057 \cdot \sqrt{\left(\frac{V}{T}\right)}, \quad (2.7)$$

Nach Möser ist zwischen folgenden Werten zu unterscheiden [2]:

$AL_{cons} \leq 3\%$... ideale Verständlichkeit

$AL_{cons} = 3\% - 8\%$... gute Verständlichkeit

$AL_{cons} = 8\% - 11\%$... angemessene Verständlichkeit

$AL_{cons} > 11\%$... schwache Verständlichkeit

$AL_{cons} > 20\%$... unbrauchbare Verständlichkeit

Da es sich aber in unserem Fall um die Hörsäle handelt, gilt hier $AL_{cons} < 15\%$ als Grenze [4].

2.1.5 Sprachübertragungsindex *STI*

STI ist ein objektives Verfahren zur Messung der Qualität der Sprachübertragung im Raum und wurde von Houtgast and Steeneken entwickelt [2][5]. Dieses Verfahren verwendet Testsignale um die Übertragung über den für Sprache relevante Frequenzbereich (Oktavbänder von 125Hz bis 8kHz) zu ermitteln [2]. Dabei wird die Verringerung der Modulation dieses Signals beobachtet [5]. In unserer Arbeit wird zur Gewinnung von *STI* eine MATLAB Funktion verwendet (siehe Kapitel 3.2.1 unter „Berechnung der raumakustischen Parameter“), die diesen Index aus der Impulsantwort berechnet. Näheres dazu findet man in „Sprachverständlichkeit in Vortragsräumen“ von M. Schwarz [5].

2.1.6 Bassverhältnis *BR*

Das Bassverhältnis errechnet sich aus dem Quotient der Nachhallzeiten bei 125Hz und 250Hz und den Nachhallzeiten bei 500Hz und 1000Hz (siehe Formel 2.8) [2]. Es beschreibt die Klangfarbe eines Raumes indem die Nachhallzeit von tiefen mit der von mittleren Frequenzen verglichen wird.

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (2.8)$$

Als Sollwerte für Musik wird $BR = 1 \dots 1,3$, für Sprache $BR = 0,9 \dots 1$ angegeben [2].

2.1.7 Volumenkenzahl *k*

Zur ersten Abschätzung der Raumgröße für eine bestimmte Anwendung verwendet man die Volumenkenzahl. Diese Zahl gibt an, wie viel Volumen pro Sitzplatz vorhanden sein wird (siehe Formel 2.9).

$$k = \frac{V}{N}, \quad (2.9)$$

wobei *k* die Volumenkenzahl und *N* die Platzkapazität im ZuhörerInnenbereich darstellt. Für Sprechtheater, Kongress- und Hörsäle, Vortragsräume und Räume für audiovisuelle Darbietungen ist eine Volumenkenzahl von 3-6 m³/Sitzplatz zu empfehlen [6].

2.2 Normen

In diesem Kapitel werden folgende Normen diskutiert: ÖNORM EN ISO 3382-1, ÖNORM EN ISO 3382-2, sowie ÖNORM B 8115-3. Die ersten beiden Normen beziehen sich auf die Bedingungen für eine raumakustische Messung, bestimmen geometrische Voraussetzungen für die Positionierung der Schallquelle und Mikrofone und legen die benötigte Anzahl von Messpositionen fest. Es werden weiter die wichtigsten aus der Impulsantwort gewonnenen Raumakustikparameter definiert. Die letzte Norm beschreibt die Anforderungen an die Nachhallzeit für bestimmte Anwendungen. Das Einhalten der Normen ist wichtig, um die Reproduzierbarkeit und Transparenz der Messungen zu gewährleisten.

2.2.1 ÖNORM EN ISO 3382-1 und ÖNORM EN ISO 3382-2: *Akustik – Messung von Parametern der Akustik*

ÖNORM EN ISO 3382-1 beschreibt die Vorgangsweise für akustische Messungen an Aufführungsplätzen, wobei sich die ÖNORM EN ISO 3382-2 mit der Messung der Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen beschäftigt. Da ein Hörsaal weder ein klassischer Aufführungsplatz, noch ein gewöhnlicher Raum ist, haben wir uns entschieden, beide Normen anzuschauen und für unsere Fälle die sinnvolleren Standards zu übernehmen.

Geometrische Anforderungen

Der minimale Abstand zwischen Quelle und Mikrofon muss 1,5m betragen. Dieser Abstand ist noch genauer mit der *Formel 2.10* gegeben [7]:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{cT}}, \quad (2.10)$$

wobei T die mittlere (und in der Praxis oft geschätzte) Nachhallzeit darstellt.

In unserer Arbeit haben wir uns nach der *Formel 2.10* gerichtet.

Die Höhe des akustischen Zentrums der Schallquelle sollte 1,5m sein [8].

Die Höhe der Mikrofone sollte 1,2m betragen, was der durchschnittlichen Höhe des Ohrs einer sitzenden Person entspricht [8].

Die Mikrofone müssen mindestens eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sein, was im üblichen Frequenzbereich etwa 2m beträgt (**halbe Wellenlänge der niedrigsten relevanten Frequenz**). Diese müssen mindestens 1m von der nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche entfernt sein (**viertel Wellenlänge der niedrigsten relevanten Frequenz**) [8].

Rechnet man die Wellenlänge in die Frequenz um, so ergibt sich 85Hz (siehe *Berechnung 2.11*).

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{4 \text{ m}} = 85 \text{ Hz}, \quad (2.11)$$

wobei λ die Wellenlänge der Frequenz f ist.

Allerdings sind in allen Diagrammen der akustischen Datenblätter die Ergebnisse ab 63Hz gegeben (siehe *Anhang E*), was einer Wellenlänge von 5,4m entspricht. Das heißt, dass der Mindestabstand von zwei Mikrofonen zueinander $\approx 2,7\text{m}$ und der Mindestabstand eines Mikrofons zur nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche $\approx 1,35\text{m}$ betragen sollte, was in kleineren Räumen eher unrealistisch ist. Ein gutes Beispiel dafür aus unserer Arbeit ist der Besprechungsraum KRGo24 in der Kronesgasse (siehe Datenblätter, *Anhang E*), in dem sogar die nötigen Abstände bei 85 Hz bei manchen Mikrofonaufstellungen unmöglich einzuhalten waren.

Die Gruppe Frischmann, Hofer und Schiller hat dafür eine Lösung in der Schröderfrequenz gefunden [4]. Die Schröderfrequenz gibt die Frequenz an, ab welcher die Raummodendichte so hoch ist, dass die einzelnen Moden nicht mehr wahrgenommen werden können und daher nicht mehr als störend empfunden werden (siehe *Formel 2.12*) [2].

$$f_{\text{Schröder}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.12)$$

Falls die normgerechten Mindestabstände nicht eingehalten werden können, werden die Messungen mit kleineren Abständen durchgeführt. Diese kleinere Abstände werden als $\frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge der $f_{\text{Schröder}}$ berechnet. Die Werte unterhalb der Schröder Frequenz sind als ungültig zu betrachten.

Anzahl der Messpositionen

Die ÖNORM EN ISO 3382-1 schreibt folgende Anzahl von Messpositionen vor (siehe *Tabelle 2.1*):

Anzahl an Sitzplätzen	Mindestanzahl an Mikrofonpositionen
500	6
600	8
1000	10

Tabelle 2.1: Anzahl der Mikrofonpositionen in der Abhängigkeit von der Anzahl an Sitzplätzen für Aufführungsräume [8]

Da es sich hier um akustische Messungen für Aufführungsräume handelt, ist es sinnvoll, dies mit den Anforderungen an Messpositionen für gewöhnliche Räume zu vergleichen.

Die ÖNORM EN ISO 3382-2 schreibt die folgenden Anzahl von Messpositionen vor (siehe *Tabelle 2.2*):

	kurz	Standard ^a	Präzision
Sender-Mikrofon-Kombinationen	2	6	12
Senderpositionen ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Mikrofonpositionen ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Anzahl der Abklingvorgänge an jeder Position (Verfahren des abgeschalteten Rauschens)	1	2	3
^a In den Fällen, in denen das Ergebnis für einen Korrekturausdruck für weitere Messungen im Standardverfahren verwendet wird, sind nur eine Senderposition und drei Mikrofonpositionen erforderlich. ^b Für das Verfahren des abgeschalteten Rauschens dürfen unkorrelierte Sender simultan angewendet werden. ^c Für das Verfahren des abgeschalteten Rauschens sowie in den Fällen, in denen das Ergebnis für einen Korrekturausdruck verwendet wird, darf anstelle mehrerer Mikrofonpositionen ein rotierender Mikrofongalgen eingesetzt werden.			

Tabelle 2.2: Zuordnung dem Kurz-, Standard-, und Präzisionsverfahren anhand der Anzahl an Sender- und Mikrofonpositionen, sowie anhand der Anzahl an Sender-Mikrofon-Kombinationen [7].

Die Kurz-, Standard- und Präzisionsverfahren wurden in dieser Norm wie folgt beschrieben:

Das **Kurzverfahren** ist für die Beurteilung des Umfangs der Raumabsorption zum Zwecke des Schallschutzes sowie für Messungen der Luftschall- und Trittschalldämmung im Kurzverfahren geeignet [7].

Das **Standardverfahren** ist für die Überprüfung der Eigenschaften von Gebäuden beim Vergleich mit den Spezifikationen der Nachhallzeit oder der Raumabsorption geeignet [7].

Das **Präzisionsverfahren** ist geeignet, wenn eine hohe Messgenauigkeit gefordert wird [7].

Im praktischen Teil unserer Arbeit haben wir am Campus „Alte Technik“ nicht mit der entsprechenden Norm gemessen. Es wurden hier zwei Mikrofon- und zwei Quellpositionen verwendet, wobei bei jeder Quellposition mit zwei verschiedenen Messmethoden gemessen wurde. Insgesamt waren das acht Impulsantworten pro Raum. Diese Messungen entsprechen nicht der ÖNORM EN ISO 3382-1, bei der sechs Mikrofonpositionen für Aufführungsräume bis 500 Sitzplätzen gefordert werden. Allerdings entsprechen diese Messungen den Ansprüchen der ÖNORM EN ISO 3382-2 für das Kurzverfahren. Obwohl acht Impulsantworten in jedem Hörsaal gemessen wurden (mit Sweep und MLS), hatten wir nur vier unabhängige Sender-Mikrofon-Kombinationen. Deswegen lassen sich unsere Messungen an diesem Campus nicht als Standardverfahren klassifizieren, weil dieses Verfahren sechs unabhängige Sender-Mikrofon-Kombinationen fordert.

Alle anderen Anforderungen des Standardverfahrens wurden durch unsere Messungen erfüllt. Daher lassen sich unsere Messungen als eine Kombination von Kurz- und Standardverfahren beschreiben.

Die Wiederholung der Messungen am Campus Alte Technik (sieben Hörsäle) war aus logistischen und zeitlichen Gründen nicht mehr möglich. Allerdings haben wir uns dazu entschieden, die folgenden Messungen in der Kronesgasse normgerecht durchzuführen. Hier wurden sechs Mikrofon- und zwei Quellpositionen verwendet, was der ÖNORM EN ISO 3382-1 entspricht. Außerdem kann es nach ÖNORM EN ISO 3382-2 als Präzisionsverfahren klassifiziert werden.

Schallquelle

„Die Senderpositionen sollten der Nutzung des Raumes entsprechend an den üblichen Positionen angeordnet werden“ [8]. Da es sich in unserem Fall um Hörsäle handelt, sind die üblichen Positionen des Sprechers an der Tafel und am Pult, wo wir infolgedessen auch unseren Sender positioniert haben.

Um den für die Messung benötigten Dynamikbereich zu gewährleisten, muss der Nutzsignalpegel mindestens 45dB über dem Störrauschsignalpegel liegen. Für pseudostatische Folgen (z.B. MLS-Verfahren) darf der Schalldruckpegel auch niedriger sein, weil eine Verbesserung des SNRs durch die synchrone Mittelung möglich ist [8].

Die Schallquelle soll möglichst ungerichtet abstrahlen. Die *Tabelle 2.3* zeigt die zulässigen Abweichungen von kugelförmiger Abstrahlung in dB.

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Höchstabweichung in dB	±1	±1	±1	±3	±5	±6

Tabelle 2.3: Höchstzulässige Abweichung der Schallquelle in Dezibel [8]

2.2.2 ÖNORM B 8115-3: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Raumakustik

ÖNORM B 8115-3 beschreibt die Anforderungen an die Nachhallzeit für verschiedene Anwendungen. Die für uns relevanten Raumanwendungen, die Sprache und Kommunikation, und deren optimale Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Volumen sind in *Abbildung 2.1* zu finden [9]. Die Kurven haben einen linearen Verlauf und wurden mit den *Formeln 2.13* und *2.14* als lineare Funktionen dargestellt. Dabei haben wir bei allen Hör- und Lehrsälen den Raumzweck auf Sprache begrenzt, wie es auch in der Norm empfohlen wurde [9]. Da ein Besprechungsraum laut Norm ein Kommunikationsraum ist, haben wir für den Besprechungsraum KRGo24 die Kriterien für Kommunikation übernommen [9].

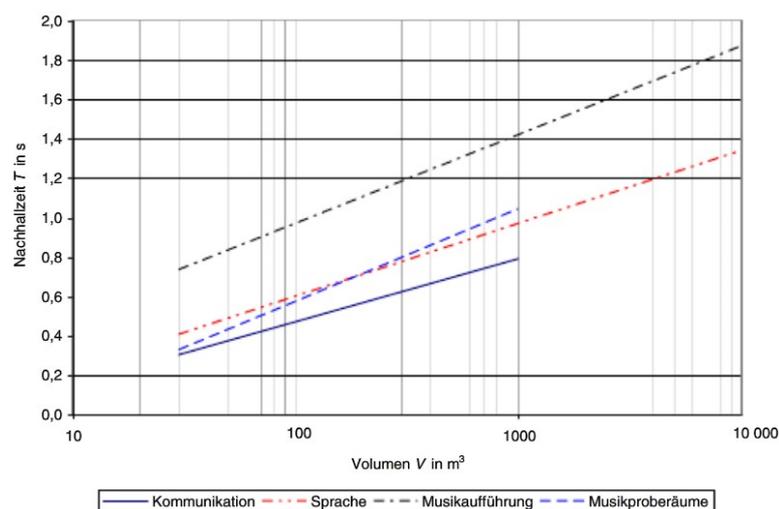


Abbildung 2.1: Optimale Nachhallzeiten von besetzten Räumen in Abhängigkeit vom Volumen für unterschiedliche Nutzungen [9]

Optimale Nachhallzeit für Sprache:

$$T = 0,37s \cdot \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,14s \quad (2.13)$$

Optimale Nachhallzeit für Kommunikation:

$$T = 0,32s \cdot \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,17s \quad (2.14)$$

Abbildung 2.2 zeigt das Toleranzband, in dem sich der Quotient der gemessenen Nachhallzeit T über alle Frequenzen und der berechneten, volumenabhängigen optimalen Nachhallzeit T_{soll} befinden soll. Damit wird die Frequenzabhängigkeit der optimalen Nachhallzeit mitberücksichtigt.

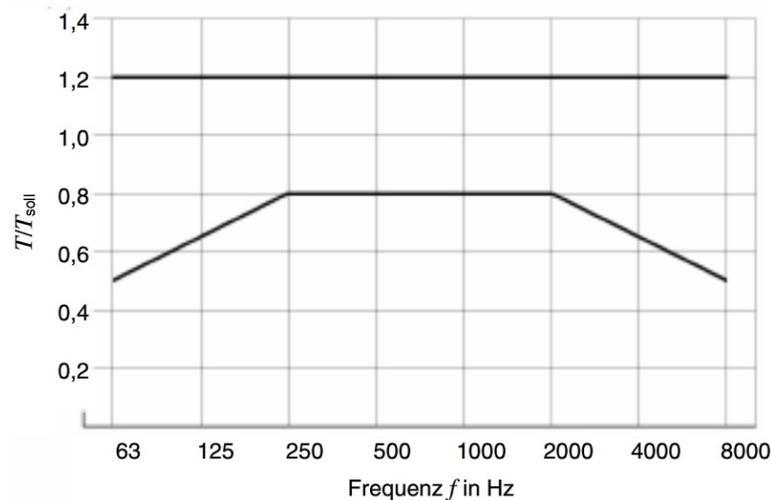


Abbildung 2.2: Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit der Frequenz für Sprache, Kommunikation und Musikproberäume [9]

Die Anforderungen für Sprache werden meist bei Hörsälen und Vortragsräumen verwendet, Kommunikation wird bei Klassenräumen und multimedialen Räumen in Schulen, Besprechungsräumen und Räume für audiovisuelle Darbietungen verwendet [9].

2.3 Einberechnung des Publikums

Alle Messungen der Hörsäle wurden in leerem Zustand durchgeführt, was bei Vorlesungen nicht der Realität entspricht. Daher ist die Akustik der Räume bei halbvollem beziehungsweise vollem Zustand von großem Interesse. Eine akustische Vermessung bei besetztem Zustand ist sehr aufwändig und kaum für mehrere Hörsäle in einer Bachelorarbeit realisierbar.

Aus diesem Grund wird der akustische Unterschied, der entsteht, rechnerisch ermittelt.

2.3.1 Berechnung der Nachhallzeit

Die unkomplizierteste Art der Einberechnung erfolgt durch die Nachhallzeitsberechnung nach Sabine.

Dabei wird für jede Frequenz die bereits im Raum vorhandene äquivalente Absorptionsfläche berechnet (2.15), dieser dann die der Personen hinzugefügt (2.16) und damit die Nachhallzeit bei besetztem Zustand bestimmt (2.17).

$$A_{leer} = 0,163 \cdot \frac{V}{T_{20,leer}} \quad (2.15)$$

$$A_{voll} = A_{leer} + k \cdot A_{pP}, \quad (2.16)$$

wobei k die Anzahl der Personen und A_{pP} die äquivalente Absorptionsfläche pro Person darstellt.

$$T_{voll} = 0,163 \cdot \frac{V}{A_{voll}} \quad (2.17)$$

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A_{pP} (m^2)$	0,10	0,16	0,36	0,57	0,67	0,73	-

Tabelle 2.4: Mittlere äquivalente Schallabsorptionsfläche A in m^2 pro Person in Abhängigkeit der Frequenz (Anhang A)

Analog zu 2.15, 2.16 und 2.17 erfolgt die Berechnung für den halbvollen Zustand, wobei k hier halbiert wird.

In *Abbildung 2.3* ist der Unterschied zwischen leerem, halbvollem und vollem Hörsaal in der Nachhallzeit sehr gut zu erkennen.

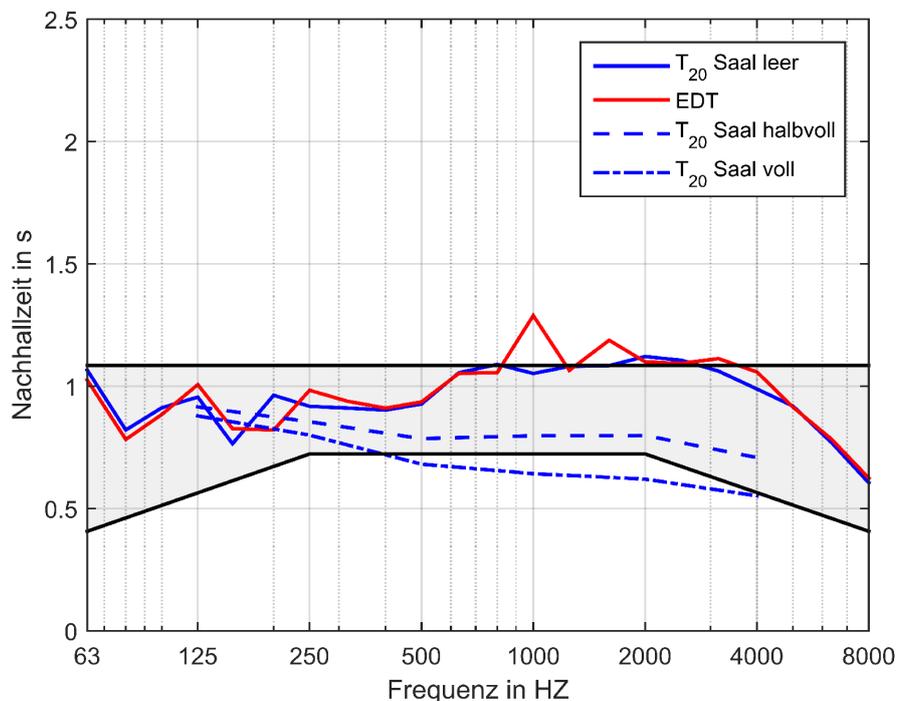


Abbildung 2.3: Vergleich der Nachhallzeit T_{20} des HS L zwischen leerem, halbvollem und vollem Zustand.

2.4 Frequenzbereich des Impedanzrohres

Der gültige Frequenzbereich der Messungen im Impedanzrohr wird durch dessen geometrischen Abmessungen bestimmt. Dabei sind zwei unterschiedliche Kriterien zu berücksichtigen: Der Impedanzrohrdurchmesser und die Abstände zwischen den Mikrofonpositionen im Impedanzrohr.

Wie in Norm ISO 10534-2 beschrieben, gilt folgende Bedingung als obere Grenzfrequenz $f_{o,max}$ des Impedanzrohres mit rundem Querschnitt [10]:

$$f_{o,max} < \frac{0,58 \cdot c}{d}, \quad (2.18)$$

wobei d der Durchmesser des Impedanzrohres ist und c die Schallgeschwindigkeit.

Die Bedingung der Mikrofonpositionen lautet folgendermaßen [11]:

$$f_u = \frac{0,1 \cdot c}{2 \cdot s}, \quad (2.19)$$

$$f_o = \frac{0,8 \cdot c}{2 \cdot s}, \quad (2.20)$$

Wobei s der Abstand zwischen zwei Mikrofonen ist.

Mit drei Mikrofonen (wie in dem von uns verwendeten Messsystem) ist es möglich, die Messung in weiter- und kurzer- Mikrofonstellung gleichzeitig durchzuführen. Damit wird das Frequenzbereich des Impedanzrohres erweitert.

$$d = 0,1m$$

$$s_{weit} = 0,29m$$

$$s_{kurz} = 0,055m$$

Mit diesen Abständen erhält man nach den *Formeln 2.18, 2.19 und 2.20* folgende Ergebnissen:

$$f_{o,max} < 1989 \text{ Hz}$$

$$f_{u,weit} = 59,1 \text{ Hz}$$

$$f_{o,weit} = 473,1 \text{ Hz}$$

$$f_{u,kurz} = 311,8 \text{ Hz}$$

$$f_{o,kurz} = 2495 \text{ Hz}$$

Der Frequenzbereich bei weitem Abstand ist daher 59,1 Hz bis 473,1 Hz und bei kurzem Abstand 311,8 Hz bis 2495 Hz. Kombiniert man diese Bereiche und berücksichtigt nun auch die obere Grenzfrequenz des Impedanzrohres, ergibt sich für die Messungen des Absorptionsgrades im Impedanzrohr folgende Frequenzbereich: **59,1Hz – 1989Hz**.

Da immer mit einer Messungenauigkeit zu rechnen ist, kann die obere Grenze als 2000 Hz angenommen werden [12].

Für uns sind die Materialeigenschaften ab 125 Hz relevant, da ab dieser Frequenz das Programm „CATT-Acoustic“ simulieren kann. Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Werte des Absorptionsgrades aus Impedanzrohrmessung sich auf den senkrechten Schalleinfall beziehen. Im Normalfall benötigt „CATT-Acoustic“ aber Werte für diffusen Schalleinfall. Daher ist in der Realität mit einer leichten Abweichung von den simulierten Ergebnissen zu rechnen. Damit ist der für uns relevante Bereich der Impedanzrohrmessergebnisse **125 Hz - 2000 Hz**.

3 Messung und Auswertung

Zuerst werden die Messmethoden, die in dieser Bachelorarbeit verwendet wurden, erklärt. Dabei handelt es sich um die Impedanzrohrmessung, sowie die subjektive und objektive Vermessung der Hörsäle. Das Ziel war, die subjektive Evaluierungen und die objektiven Messungen miteinander zu vergleichen, zusammenzufassen und einen passenden Hörsaal für die Modellerstellung und Sanierung zu finden. Danach werden diese Ergebnisse mit den Impedanzrohrmessergebnissen kombiniert, um ein Sanierungsvorschlag zu entwickeln.

Das von Frischmann, Hofer und Schiller entwickelte Muster für akustische Datenblätter wird demnach diskutiert. Dabei wird der von uns entwickelte MATLAB-Code zur Erstellung von Diagrammen und Tabellen für die Datenblätter beschrieben. Anhand eines akustischen Datenblattes wird erklärt, wie die Auswertung von subjektiven und objektiven Ergebnissen erfolgt. Diese Auswertung wird später als Vorlage für die Diskussion und das Fazit der Datenblätter verwendet.

Zum Schluss werden die Ergebnisse der Impedanzrohrmessung, sowie eine Rangliste der zehn besten Architektenproben vorgestellt.

3.1 Messablauf

3.1.1 Beschreibung - Messablauf Impedanzrohr

In Zusammenarbeit mit den ArchitektInnen und unserer Betreuerin musste zuerst entschieden werden, welches Material für die Sanierungen in Frage kommt. Um die genauen Absorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall unserer Materialien zu bestimmen, wurden diese in dem Impedanzrohr der TU Graz vermessen.

Dazu musste zuerst das Messsystem mit der dem Impedanzrohr beiliegenden Referenzprobe eingeepegelt und kalibriert werden. Anschließend wurden Proben der Materialien mit jeweils 0mm, 50mm und 100mm Abstand zur Rückwand im Impedanzrohr platziert und vermessen. Es wurde später darauf geachtet, dass das Material nicht zu fest im Rohr steckt, da sonst Resonanzerscheinungen auftreten können aber auch nicht zu frei beweglich ist, da sonst zu niedrige Absorptionsgrade die Folge der Messung sind.

Zum Schluss wurden von den Studienassistenten noch die einzelnen Proben der Absorberflächen, die von den ArchitektInnen bearbeitet wurden, vermessen.

3.1.2 Subjektive Evaluierung

Um einen statistisch aussagekräftigen subjektiven Eindruck zu bekommen, haben wir die subjektive Evaluierung in zwei Teile unterteilt: der erste Teil umfasst die Befragung des Publikums in jedem Hörsaal, der zweite Teil die subjektiven Eindrücke unserer Gruppe.

Die Befragung des Publikums hatte das Ziel, uns bei der Entscheidung, welcher Hörsaal zu sanieren ist, zu helfen. Dabei sind auch andere wichtige Erkenntnisse aufgetreten (wie z.B. das „Klicken“ im HS VIII), die später in den Diskussionen der akustischen Datenblätter erwähnt werden. Die Fragebogen, die von uns ausgefüllt wurden, hatten das Ziel, uns den Vergleich von subjektiven und objektiven Ergebnissen zu ermöglichen. Sie haben auch dazu gedient, eine subjektive Rangliste von den vermessenen Räumen zu erstellen.

Befragung des Publikums

In *Anhang B* befindet sich der Fragebogen, der an die Studenten an der Alten Technik verteilt wurde. Wir waren der Meinung, dass die verwendeten Fragen am meisten zu den Diskussionen in den akustischen Datenblättern beitragen können. Leider ist die Befragung von Studierenden/Angestellten in den drei Räumen in der Kronesgasse ausgefallen, da wir uns erst später entschieden haben, diese Räume in unserer Bachelorarbeit einzubeziehen und die Semesterferien schon begonnen haben.

Subjektive Evaluierung der Gruppe

Für diesen Teil der subjektiven Evaluierung wurde das Konzept von Frischmann, Hofer und Schiller komplett übernommen, damit die Ergebnisse der subjektiven und objektiven Ergebnisse mittels Netzdiagramm verglichen werden können. Als Schallquelle wurde ein „ESI nEar 05“ Studiomonitor verwendet, der über eine „Focusrite Scarlett 18i6“ Soundkarte mit dem PC verbunden war. Für die abgespielte Sprache wurde das Hörbuch „Charles Darwins - Das Feuerland, gesprochen von Thomas Dehler“ verwendet. Jede Evaluierung hat 10 Minuten gedauert, wobei wir ca. alle 3 Minuten unsere Sitzpositionen gewechselt haben, um eine Evaluierung am möglichst vielen Stellen im Raum zu erhalten. Die Ergebnisse an jeder Stelle wurden separat notiert und dann zum Schluss gemittelt.

Die „ÖNORM EN ISO 9921 *Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation*“ schreibt im Anhang B „Subjektive Prüfungen der Sprachverständlichkeit“ folgende Kriterium vor: Die Sprecher müssen eingeübt werden, bis sie einen stabilen Schallpegel des Gesprochenen von durchschnittlich 65dB (± 3 dB) in 1m Abstand von ihren Lippen erreichen. Deswegen haben wir den Lautsprecher auf 65dB in 1m Abstand eingepegelt [13].

Für die Auswertung wurde ein von Frischmann, Hofer und Schiller entwickeltes semantisches Differential verwendet (siehe *Anhang B*).

3.1.3 Beschreibung - Objektive Messung

Zur Ermittlung der objektiven Gütemaße eines Raumes (siehe Abschnitt **2.1**) benötigt man dessen Raumimpulsantwort. Diese bekommt man, indem der Raum mit einem omnidirektionalen Lautsprecher, in unserem Fall ein Dodekaeder, und mit Mikrofonen (in unserem Fall zwei) akustisch vermessen wird.

Über den Unterschied zwischen abgespieltem und aufgenommenem Signal lässt sich die Übertragungsfunktion des Systems ausrechnen, woraus sich dann die Gütemaße ableiten lassen.

Um einen schnellen und reibungslosen Messablauf zu garantieren wird stark empfohlen, sich nach einem strikten Messablauf zu halten, welcher in Anhang A zu finden ist. Um

Störgeräusche zu vermeiden, sollte ausschließlich an Wochenenden oder in den Ferien gemessen werden.

Signalfluss der Signale:

Über eine Soundkarte wird von dem Laptop über einen Verstärker ein Frequenz-Sweep an den Dodekaeder geschickt der dieses akustisch abspielt. Ein Mikrofon nimmt das Signal, das allerdings durch den Raum verändert wurde, wieder auf. Das Signalflussdiagramm ist in *Abbildung 3.1* zu sehen.

Es wurden immer zwei Mikrofone gleichzeitig verwendet.

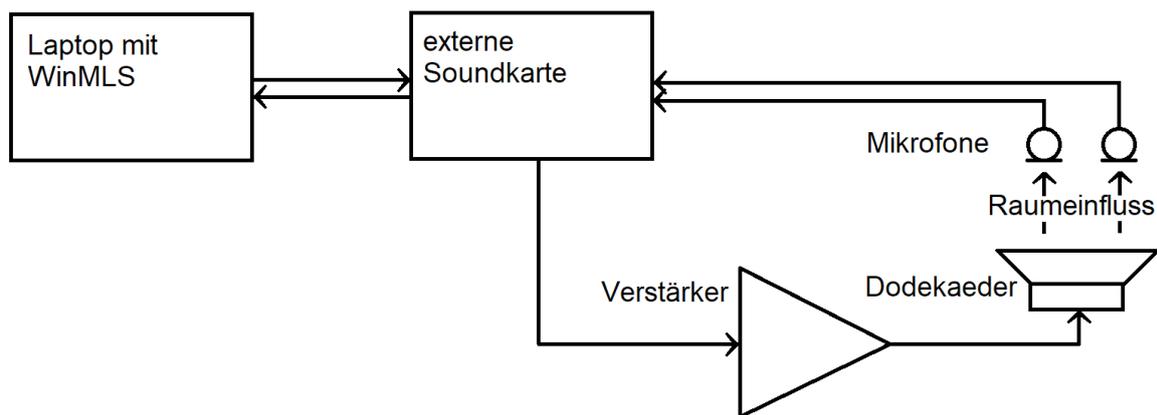


Abbildung 3.1: Signalfluss der Signale der objektiven Messung

Da diese Bachelorarbeit eine fortlaufende ist, wurde der Messablaufplan (siehe *Anhang A*) nach Absprache von der vorherigen Bachelorarbeit übernommen [4]. Der Ablauf wird im folgenden Absatz dennoch kurz beschrieben.

Messablauf:

Nachdem das ganze Equipment zu dem zu vermessenden Raum transportiert und aufgebaut worden ist, wurde überprüft ob alle Mikrofone kalibriert sind und das Raumvolumen und Hintergrundschallpegel bestimmt. Anschließend wurde eine erste Testmessung gestartet um mit dem Ergebnis die Mindestabstände der Mikrofonen und Lautsprecher bestimmen zu können (siehe *Formel 2.9*). Nach Ausfüllen des Prüfberichts (siehe *Anhang A*) kann die eigentliche Messung gestartet werden. Vor Verlassen des Raumes wurde noch eine zusätzliche Checkliste ausgefüllt, um kein Equipment zu vergessen.

3.2 Auswertung der objektiven und subjektiven Ergebnisse

Um den passenden Hörsaal für die Sanierung auszuwählen, ist eine richtige Interpretation der objektiven und subjektiven Ergebnisse essentiell. Anhand der Auswertungsmethoden, die in diesem Abschnitt beschrieben werden, wird eine Rangliste von Hörsälen erstellt.

Zuerst müssen die Ergebnisse richtig und in einer übersichtlichen Form dargestellt werden. Zu diesem Zweck wurde ein MATLAB Code entwickelt, der hier näher beschrieben wird.

Dem folgt eine Beschreibung von Plots und Diagramme, die sich in den akustischen Datenblättern befinden. Es wird am Beispiel eines Hörsaales gezeigt, wie man diese auswertet.

Zum Schluss werden die Ergebnisse der Messung im Impedanzrohr dargestellt und verglichen, um die beste Proben für unsere Zwecke aussuchen zu können.

3.2.1 Erstellung von akustischen Datenblättern mittels MATLAB

Alle Hörsaalmessungen wurden in WinMLS durchgeführt. Da WinMLS eine geringere Flexibilität im Sinne von Exportieren, Kombinieren und Bearbeitung von Plots und Tabellen bietet, liegt es nahe, einen MATLAB Code zu entwickeln, wo alle diese Möglichkeiten nach unserem Bedarf angepasst werden können. Dabei wurde die *ITA-Toolbox* der Universität Aachen verwendet, um die Impulsantworten einzulesen und aus denen die akustischen Gütemaße und Parameter (T_{20} , EDT , D_{50} , t_s , Al_{cons} , STI und BR) zu berechnen.

Eingabe von Raum- und Messparameter

Bevor man den Code ausführt, muss man folgende Informationen in MATLAB eingeben:

- Die Anzahl der Messungen bzw. Anzahl der Impulsantworten;
- Das Volumen des Raumes zur Berechnung der optimalen Nachhallzeit für die Normbereiche in Plots, sowie zur Einberechnung des Publikums;
- Anzahl von Sitzplätzen zur Einberechnung des Publikums;
- Mikrofon-Quell-Abstände zur Berechnung des Artikulationsverlustes. Es sollten zuerst alle Pultabstände und danach alle Tafelabstände eingegeben werden.
- Bündelungsgrad der Schallquelle zur Berechnung des Artikulationsverlustes.

Man soll im MATLAB den Dateipfad öffnen, in dem sich die Impulsantworten des jeweiligen Raumes befinden. Die Impulsantworten aller Räume wurden nach gleichem Muster benannt. Damit vermeidet man, dass bei jedem Hörsaal die Dateinamen neu eingegeben werden müssen.

Einlesen der Impulsantworten mittels ITA-Toolbox

Die Impulsantworten der einzelnen Messpositionen wurden zuerst aus WinMLS als wav-Dateien exportiert. Danach wurden sie mittels `ita_read()` und `ita_extract_dat()` in MATLAB eingelesen.

`ita_read(audioObj)` – Als Eingabeparameter werden die Dateinamen des Audioobjektes eingegeben. Am Ausgang gibt die Funktion die Daten vom Typ `itaAudio` aus. Diese werden dann in einer Impulsantwortmatrix $IR(M)$ gespeichert, wobei M die Anzahl der Impulsantworten darstellt. Diese Funktion wurde bei MLS-Messungen verwendet.

`ita_extract_dat(audioObj, nSamples)` – Als Eingabeparameter gibt man den Dateinamen des Audioobjektes an, sowie die Anzahl von Samples, auf die die Impulsantwort begrenzt werden sollte. Diese Begrenzung ist notwendig, da die aus

WinMLS exportierte Impulsantworten mittels Sweepverfahren mehr Samples wie die MLS-Impulsantworten hatten. Diese zusätzlichen Samples hatten keine Werte und wurden vom MATLAB als „NaN“ eingelesen. Für die weitere Bearbeitung war es hilfreich, die Sweep-Impulsantworten auf die gleiche Sampleanzahl als die MLS-Impulsantworten zu begrenzen. Hier wurde ebenso in die $IR(M)$ Matrix gespeichert.

```

Input: Impulsantworten einzelner Messpositionen

Output: Impulsantwortmatrix

for MLS-Messungen do

    Einlesen der Impulsantworten mit ita_read in
    Impulsantwortmatrix;

for Sweep-Messungen do

    Einlesen der Impulsantworten mit ita_read in
    Impulsantwortmatrix;

    Begrenzen der Anzahl von Samples der Impulsantwort
    mit ita_extract_data;

```

Algorithmus 3.1: Einlesen der Impulsantworten

Berechnung der raumakustischen Parameter

Aus der Impulsantwortmatrix wurden T_{20} , EDT , D_{50} und t_s mittels `ita_room_acoustics()` Funktion ermittelt (siehe *Algorithmus 3.2*). Zur Gewinnung vom Sprachübertragungsindex STI wurde eine separate Funktion aus der *ITA-Toolbox* verwendet:

```

Input: Daten aus der Impulsantwortmatrix

Output: Frequenzabhängige Werte von  $T_{20}$ ,  $EDT$ ,  $D_{50}$  und  $t_s$ ;

    Über alle Frequenzen gemittelte Ergebnisse für  $STI$ 

for alle Impulsantworten do

    Berechnung der jeweilige Gütemaße mit
    ita_room_acoustics;

    Berechnung der  $STI$  mit ita_speech_transmission_index;

```

Algorithmus 3.2: Berechnung von T_{20} , EDT , D_{50} , t_s und STI

Artikulationsverlust Al_{cons} und Bassverhältnis BR werden separat berechnet, da für diese Berechnungen die Werte für die Nachhallzeiten T_{20} bei jeder Sender-Mikrofon-Kombination bekannt sein müssen.

Da der Bündelungsgrad vom Dodekaeder in Oktavbänder und die T_{20} – Werte in Terzbänder gegeben sind, musste für die Berechnung des Artikulationsverlustes jeder

dritte Wert von T_{20} , ausgehend von 63Hz, in einem neuen Vektor gespeichert werden (Vektor der Oktavbänder):

```
Input: Nachhallzeiten  $T_{20}$ , Bündelungsgrad  $\gamma$ , Abstände  
zwischen Mikrofon und Quelle jeder Position, Volumen  
Output: Artikulationsverlust  $Al_{cons}$ , Bassverhältnis  $BR$   
for alle Messungen do  
    Speicherung der Nachhallzeit bei jeder dritten  
    Frequenz in einer neuen Variable für Oktavbänder;  
    Berechnung von  $Al_{cons}$  nach der Formel (2.6) mit  
    Nachhallzeiten aus der Variable für Oktavbänder;  
    Berechnung von  $BR$  nach der Formel (2.8);
```

Algorithmus 3.3: Berechnung von Al_{cons} und BR

Um eine gute Zusammenfassung der Ergebnisse zu ermöglichen, werden die Werte aller Gütemaße bis auf das Bassverhältnis und STI gemittelt. Dies wird separat für Al_{cons} durchgeführt, da es in Oktavbänder angegeben wurde. Eine Mittelung von BR und STI ist nicht notwendig, da sich bei jeder Messposition nur ein einzelner Wert ergibt (siehe Datenblätter im *Anhang E*).

```
Input: Gütemaße einzelner Messpositionen  
Output: Gemittelte Ergebnisse der Gütemaße  
Initialisiere Mittelungsvariablen mit zeros();  
for jedes Terzband do  
    for  $T_{20}$ ,  $EDT$ ,  $D_{50}$  und  $t_s$  aus allen Messungen do  
        Addieren der Werte in Mittelungsvariablen;  
for jedes Oktavband do  
    for  $Al_{cons}$  aus allen Messungen do  
        Addieren der Werten in  $Al_{cons}$ -Mittelungsvariable;  
Dividieren der Mittelungsvariablen durch die Anzahl von  
Messungen;
```

Algorithmus 3.4: Berechnung von Al_{cons} und BR

Wenn die Mittelung fertig ist, kann man aus der berechneten mittleren Nachhallzeit des Raumes in leerem Zustand das Verhalten des Raumes in halbvollem- und vollem Zustand abschätzen. Da die Absorptionsgrade des Publikums ebenso in Oktavbänder angegeben wurden, wird hier auch die Nachhallzeit in Oktavbändern verwendet.

```

Input: gemittelte Nachhallzeiten in Oktavbänder, Anzahl an
Sitzplätzen, Volumen

Output: Nachhallzeiten im halbvollen- und vollen Zustand

for alle Frequenzbänder

    Berechnung der Nachhallzeiten in halbvollem und vollem
    Zustand nach der Formel (2.14)
  
```

Algorithmus 3.5: Gewinnung der Nachhallzeiten im halbvollen- und vollem Zustand

3.2.2 Auswertung von akustischen Datenblättern

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Diagramme und Plots aus akustischen Datenblättern diskutiert. Es wird am Beispiel des Lehrsaales XIV gezeigt, wie diese zu interpretieren und auszuwerten sind. Die Latexvorlage für die Datenblätter wurde von Frischmann, Hofer und Schiller übernommen [4], um einen übersichtlichen Vergleich zwischen Hörsälen an verschiedenen TU-Campussen zu ermöglichen.

Netzdiagramm

Um auf einen Blick sowohl subjektive als auch objektive Parameter abschätzen zu können, haben Frischmann, Hofer und Schiller das Netzdiagramm entwickelt (siehe Abbildung 3.2) [4].

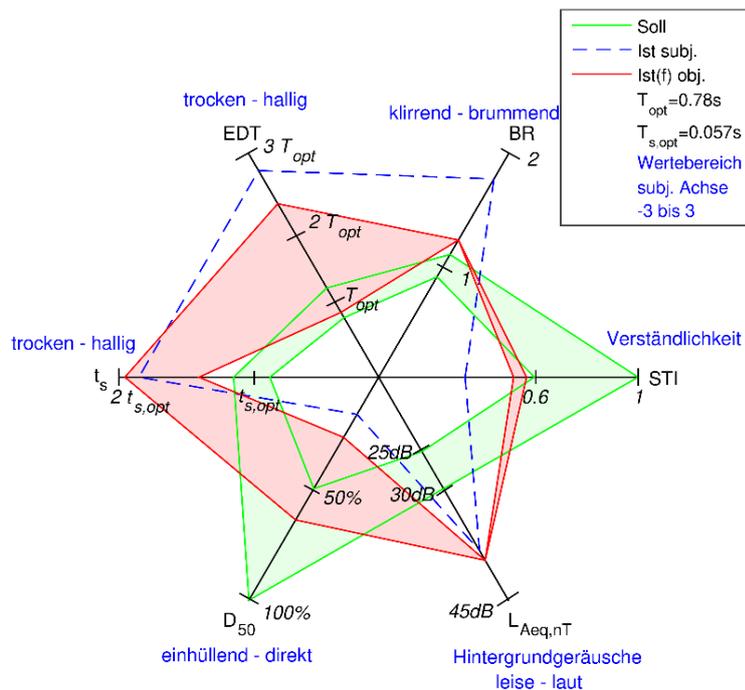


Abbildung 3.2: Netzdiagramm des Lehrsaales XIV. Grüner Bereich: ideale subjektive und objektive Werte; roter Bereich: gemessene objektive Werte; strichlierte, blaue Linie: reale subjektive Werte.

Anwendung als akustisch gut bezeichnet werden, wobei die Hintergrundgeräusche gesenkt werden sollten (Beamer, Lüftung, usw. sind häufige Ursachen).

Grundsätzlich wurde für die Erstellung der Netzdiagramme in MATLAB der Code der Bachelorarbeit von Frischmann, Hofer und Schiller verwendet. Folgende Sachen wurden noch ergänzt:

- Er wurde so korrigiert, dass der subjektive Wertebereich für einhüllend und direkt von -3 bis 3 geht, was auch dem subjektiven Evaluierungsbogen entspricht. Allgemein wurde ein anderer Skalierungsvorschlag entwickelt.
- Es wurde eine `create_text_boxes()` Funktion erstellt, die automatisch die Achsen im Netzdiagramm beschriftet.
- Es wurde eine `create_lines()` Funktion erstellt, die automatisch Ticks auf allen Achsen positioniert.
- Ein weiterer Vorschlag wäre, die Werte der objektiven Ergebnisse zu mitteln und im Netzdiagramm strichliert darzustellen. Das Netzdiagramm nimmt Maxima und Minima und färbt den Bereich dazwischen ein. Es gibt aber keine Auskunft darüber, ob sich die Mehrheit der Werte näher dem Minimum- oder dem Maximum befindet, was mit diesem Vorschlag realisiert werden kann.

Wir waren der Meinung, dass das Netzdiagramm für die Auswertung der akustischen Messungen ein äußerst hilfreiches Tool ist. Diese Änderungen und Vorschläge dienen dazu, das Konzept weiterzuentwickeln, um die Arbeit für zukünftige raumakustische Projekte zu erleichtern.

Nachhallzeitdiagramm

In der *Abbildung 3.4* kann man erkennen, dass die gemessene Nachhallzeit T_{20} und EDT für alle Frequenzen bis 5kHz weit oberhalb des Toleranzbereiches liegen. Bei vollem Zustand erreichen die Nachhallzeiten ab ca. 750Hz den Toleranzbereich und bei halbvollem Zustand liegt diese Grenze bei ca. 1,5kHz. Die Nachhallzeit der Grundfrequenzen von Sprache, 125Hz – 250Hz, ist im Vergleich zu den anderen Frequenzbändern, sehr hoch. Daher entsteht auch der subjektive Eindruck, dass der Raum sehr brummend klingt (siehe *Abbildung 3.2*). Bei EDT ist dieser Anstieg der Nachhallzeit im Tieftonbereich besonders stark zu erkennen. Da EDT von allen Nachhallzeitextrapolierungen am besten mit dem subjektiven Eindruck übereinstimmt, ist das ein weiterer Grund, weshalb dieser Lehrsaal als sehr brummend empfunden wurde.

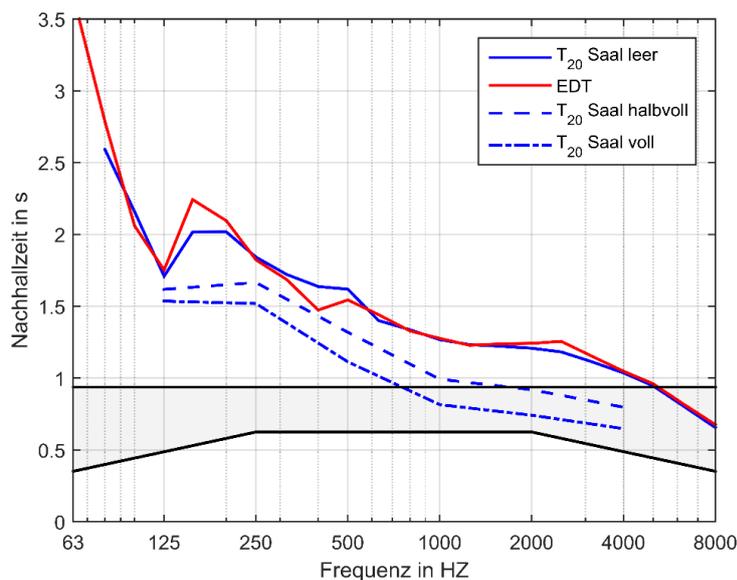


Abbildung 3.4: Nachhallzeitdiagramm des Lehrsaales LSXIV

Verständlichkeitsdiagramm

Wird die Kennlinie von D_{50} mit der von T_{20} im leeren Zustand verglichen, so ist zu erkennen, dass beide Kurven im gleichen Bereich außerhalb des Toleranzbandes liegen (siehe *Abbildungen 3.4* und *3.5*).

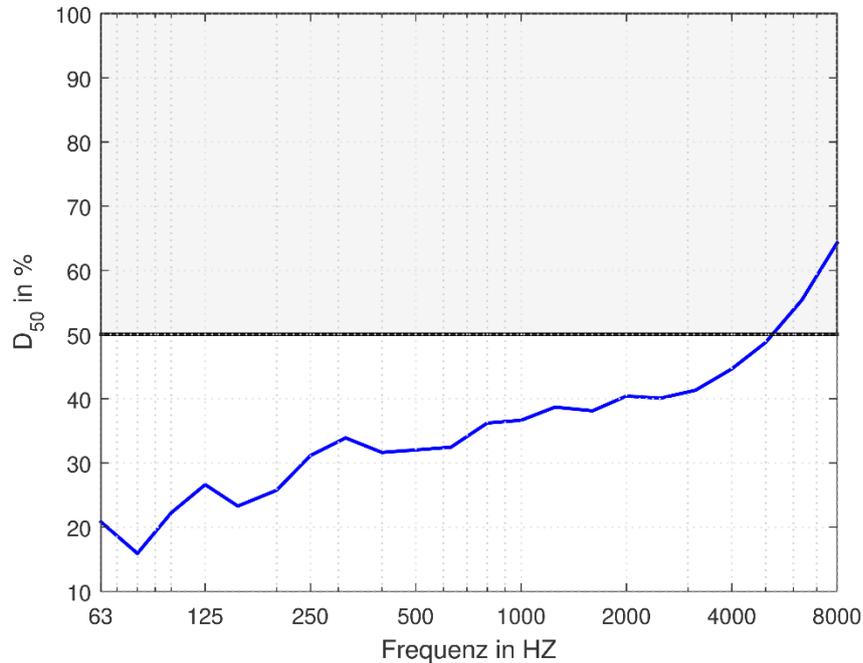


Abbildung 3.5: D_{50} – Diagramm für Lehrsaal XIV

Schwerpunktszeitdiagramm

In *Abbildung 3.6* ist zu erkennen, dass die Schwerpunktszeit überall sehr hoch über die Toleranzgrenzen ist. Daraus ist zu schließen, dass der Raum akustisch viel größer empfunden wird, als er tatsächlich ist (siehe Abschnitt **2.1.3**).

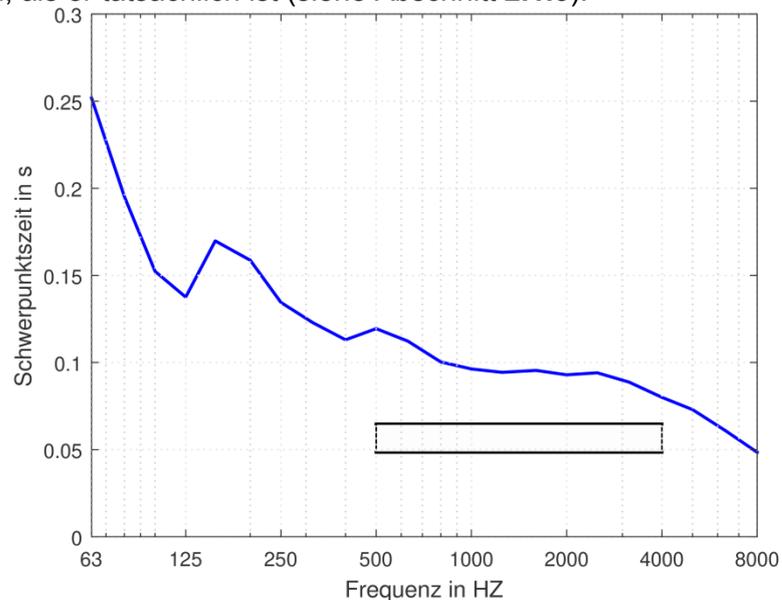


Abbildung 3.6: Diagramm der Schwerpunktszeit für LS XIV

Artikulationsverlustdiagramm

Wie es in *Abbildung 3.7* zu erkennen ist, sind die Konsonanten ab ca. 1000Hz besser verständlich bzw. deren Verlust ist geringer.

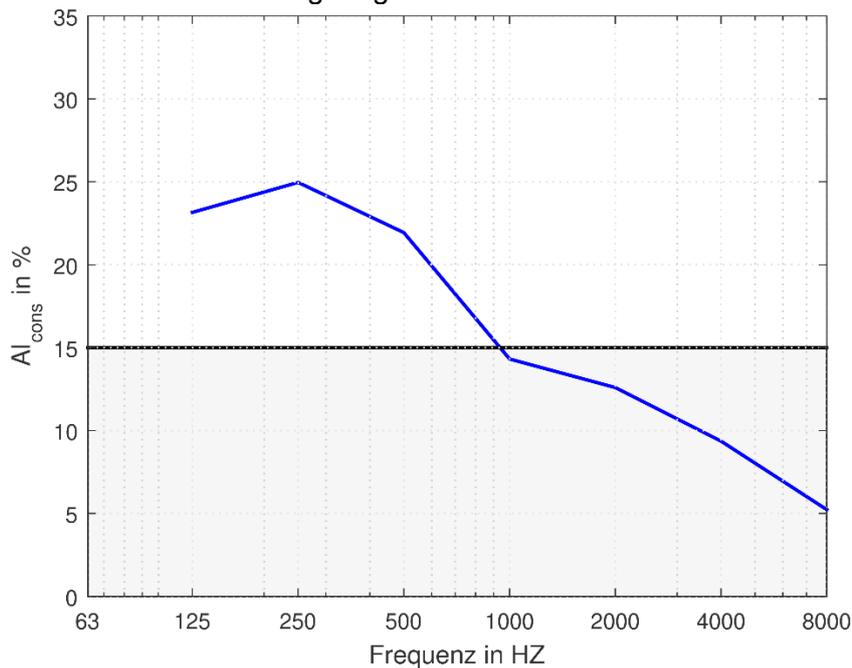


Abbildung 3.7: Diagramm des Artikulationsverlustes Al_{cons} im Lehrsaal XIV

Solches Verhalten ist auf die Luftabsorption der hohen Frequenzen zurückzuführen. Die Nachhallzeiten werden im hochfrequenten Bereich kürzer und die Verständlichkeit der Konsonanten wird daher verbessert.

3.2.3 Auswertung von Impedanzrohrmessungen

Insgesamt wurden vier verschiedene Materialien vermessen. Ein harter und ein weicher Schaumstoff, Melaminharzschaum mit einer bereits aufgeklebten Filzschicht und ein Hartfilz (siehe *Abbildung 3.8*). Alle Materialien außer dem weichen Schaumstoff waren 25mm dick. Dieser war 35mm dick. In *Tabelle 3.1* ist der Vergleich der Absorptionsgrade der verschiedenen Proben zu sehen. Der Abstand zur Rückwand x betrug 0mm. Die Proben wurden mit und ohne dünnen Filzschicht (siehe *Abbildung 3.8, Nummer 5*) vermessen.



Abbildung 3.8: Vermessende Materialien. 1 – Melaminharzschaum mit Filz; 2 – Hartfilz; 3 – Schaumstoff hart; 4 – Schaumstoff weich; 5 – Dünne Filzschicht

Wie aus der *Tabelle 3.1* zu erkennen ist, besitzt „Schaumstoff hart“ fast keine absorbierende Eigenschaften. Im Vergleich zu Melaminharzschaum und Hartfilz ist

„Schaumstoff weich“ bei 500Hz und 1000Hz etwas schlechter. Dafür hat dieser aber vergleichsweise gute Absorptionkoeffizient unterhalb 500Hz. Der Grund für dieses Verhalten im Tieftonbereich ist, dass „Schaumstoff weich“ die dickste Probe war. Sobald man den Abstand zur Rückwand erhöht, verliert diese Dicke an Bedeutung und die Absorptionsgrade werden schlechter im Vergleich zu anderen Materialien. Da insgesamt ein Luftpolster nötig ist, um die Dämpfung im Tieftonbereich zu gewährleisten und so andere Materialien bessere Absorptionsgrade besitzen, fällt dieses Material aus.

Frequenz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Schaumstoff weich	0,07	0,09	0,17	0,26	0,52	0,87
Schaumstoff hart	0,04	0,03	0,06	0,04	0,12	0,06
Melaminharzschaum mit Filz	0,02	0,06	0,17	0,27	0,69	0,97
Hartfilz	0,04	0,10	0,16	0,40	0,74	0,88
Hartfilz + Filz	0,05	0,10	0,23	0,44	0,72	0,80

Tabelle 3.1: Absorptionsgrade der Proben ohne Abstand zur Rückwand in Abhängigkeit der Frequenz

Es bleiben damit der Melaminharzschaum und der Hartfilz übrig. Um diese zwei Materialien in realen Anwendung vergleichen zu können, werden die bei einem Abstand von 50mm in der *Tabelle 3.2* dargestellt. Die bessere Absorptionseigenschaften des Melaminharzschaums bei 1000Hz und 2000Hz sind für uns nicht von einer entscheidenden Bedeutung, da die Absorption von diesen Frequenzen oft unproblematisch ist (Publikum, Luftabsorption, Vorhänge usw.). Viel wichtiger ist der Tieftonbereich (63Hz bis 250Hz), in dem der Hartfilz bessere Eigenschaften besitzt. Deswegen fiel die Wahl für weitere Arbeiten mit den ArchitektInnen auf den Hartfilz.

Material	Frequenz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Hartfilz	α bei $x=50\text{mm}$	0,07	0,29	0,52	0,70	0,67	0,71
Melamin	α bei $x=50\text{mm}$	0,04	0,14	0,49	0,87	0,93	0,74

Tabelle 3.2: Absorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall der Hartfilz- und Melaminharzschaumprobe bei einem Luftpolster von $x = 50\text{mm}$.

Weiters wurde die ausgewählte Hartfilzprobe mit einem Luftpolster von 100mm gemessen (siehe *Tabelle 3.3*).

Material	Frequenz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Hartfilz	α bei $x=100\text{mm}$	0,24	0,44	0,65	0,74	0,69	0,88

Tabelle 3.3: Absorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall der Hartfilzprobe bei einem Luftpolster von $x = 100\text{mm}$.

Nachdem den Architekturstudierenden kurz die Ansprüche einer akustischen Verwendung erklärt worden sind, fertigten sie über 100 Proben mit dem Hartfilz und zusätzlichen Filzschichten. Daraus sollen später Paneele erstellt werden.

Die Proben wurden anschließend von den Studienassistenten der ArchitektInnen vermessen. Die Ergebnisse wurden von uns zur Raumsanierung verwendet. Die Ergebnisse der zehn besten Proben sind in *Tabelle 3.4* und in *Abbildung 3.9* zu sehen.

Name \ Frequenz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Resch	0,21	0,53	0,81	0,71	0,65	0,83
Schreilechner	0,22	0,50	0,76	0,63	0,62	0,77
Acar	0,19	0,51	0,82	0,74	0,64	0,83
Feldbacher	0,17	0,53	0,79	0,78	0,72	0,93
Stirner	0,18	0,55	0,76	0,72	0,65	0,84
Radl	0,17	0,52	0,79	0,76	0,66	0,85
Schlichtinger	0,22	0,57	0,78	0,65	0,63	0,79
Hoffmann	0,17	0,56	0,77	0,72	0,70	0,89
Hoffmann	0,17	0,56	0,81	0,73	0,67	0,85
Bürgler	0,21	0,51	0,76	0,71	0,68	0,87
Mittelwert	0,19	0,53	0,79	0,72	0,66	0,85

Tabelle 3.4: Absorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall der zehn besten Proben der Architekturstudenten bei einem Abstand von $x = 100\text{mm}$ zur Rückwand

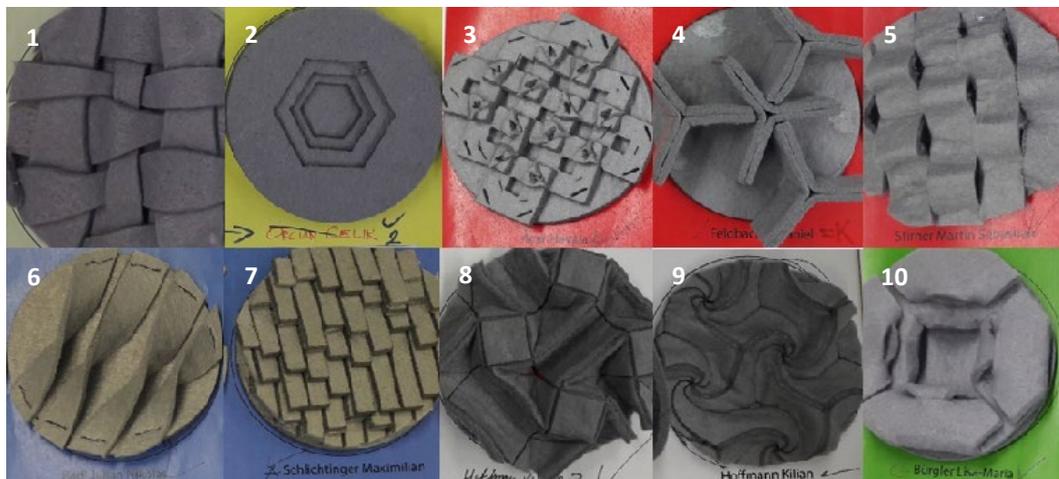


Abbildung 3.9: Proben der ArchitektInnen. 1 – Resch; 2 – Schreilechner; 3 – Acar; 4 – Feldbacher; 5 – Stirner; 6 – Radl; 7 – Schlichtinger; 8 – Hoffmann; 9 – Hoffmann; 10 – Bürgler

4 Sanierung und Simulation

Zuerst wurde für jeden zu sanierenden Raum untersucht, welche Probleme in den tiefen, mittleren und hohen Frequenzen existieren. Eine Simulation ist dabei äußerst hilfreich. Danach wurde überlegt, mit welchen Maßnahmen die jeweiligen Probleme behoben werden können.

Es folgt die Berechnung der fehlenden äquivalenten Absorptionsfläche der beiden Räume, die in unserer Arbeit und in der Arbeit von Frischmann, Hofer und Schiller [4] als am schlechtesten bewertet wurden (siehe Abschnitt 5.1, „*Objektiver Vergleich der Hörsäle*“). Dabei wird auf die normgerechten Toleranzbereiche geachtet. Es folgt eine Überlegung über die geeigneten Materialien, mit denen man die normgerechten Grenzen der Parameter einhalten und die fehlende äquivalente Absorptionsfläche erreichen kann. Zum Schluss wird die tatsächlich benötigte Materialfläche für die Sanierung berechnet.

Die oben erwähnten Berechnungen werden am Beispiel des Lehrsaales XIV in der Kronesgasse gezeigt. Dieses Berechnungsmuster wird dann auch für den Hörsaal FS11 in der Inffeldgasse verwendet. Die getroffenen Entscheidungen bzgl. der Auswahl von Materialien werden separat diskutiert.

Danach wird die Erstellung von CATT-Acoustic-Modellen erklärt. Es wird die Anpassung des 3D-Modells, welches in SketchUp erstellt worden ist und mittels „SU2Catt“ in CATT-Acoustic importiert worden ist, besprochen. Weiter wird die Anpassung des Raumes an den objektiven, gemessenen akustischen Parametern diskutiert. Zum Schluss wird anhand der oben erwähnten Berechnungen der äquivalenten Absorptionsfläche, ein Sanierungsvorschlag mithilfe der Simulation entwickelt und die einzelnen Maßnahmen erklärt.

4.1 Berechnung der nötigen Absorptionsfläche

Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze, diese Fläche zu berechnen bzw. abzuschätzen. Entweder leitet man aus den gemessenen Nachhallzeiten die äquivalente Absorptionsfläche im Raum ab oder man bestimmt die Materialien und deren Absorptionskoeffizienten im Raum und berechnet so die äquivalente Absorptionsfläche. Beide Berechnungen verwenden die Sabin'sche Nachhallzeitformel. Später vergleicht man die errechneten Werte mit den für ideale Nachhallzeiten für den Verwendungszweck Sprache. Aus der Differenz der beiden bekommt man die nötige äquivalente Absorptionsfläche, die sich leicht mithilfe der Absorptionskoeffizienten der Absorber in die reale Absorberfläche umrechnen lässt.

4.1.1 Berechnung fehlender äquivalenten Absorptionsfläche für LS XIV

Zuerst ist es notwendig, die äquivalente Absorptionsfläche im unsanierten Raumzustand, sowie die minimalen und die maximalen Sollwerte der äquivalenten Absorptionsfläche für jedes Frequenzband zu bestimmen. Letzteres wurde mithilfe der ÖNORM 8115 B – 3 gemacht (siehe Abschnitt 2.2.2). Die Differenz von Soll- und Ist-Werten ergibt die fehlende Absorptionsfläche jedes Frequenzbandes. Um einen besseren Überblick bekommen zu können, wird die Berechnung am Beispiel des Lehrsaales XIV in der Kronesgasse erklärt.

Lehrsaal XIV, Kronesgasse 5

$$V = 308,5 \text{ m}^3$$

Die Berechnung 4.1 erfolgt nach der Formel 2.13:

$$T_{opt} = 0,37 \cdot \log(V) - 0,14 = 0,78\text{s} \quad (4.1)$$

Die Berechnungen 4.2 und 4.3 berücksichtigen die Frequenzabhängigkeit der optimalen Nachhallzeit. Dabei wurden die Grenzwerte aus der Abbildung 2.2 übernommen.

$$T_{soll,max} = 1,2 \cdot T_{opt} = 0,936\text{s} \quad (4.2)$$

$$T_{soll,min} = 0,8 \cdot T_{opt} = 0,624\text{s} \quad (4.3)$$

Bei der Berechnung ist der relevante Frequenzbereich 125Hz bis 2kHz, da nur für diesen Bereich die Ergebnisse unserer Messung der Absorber relevant sind (siehe Abschnitt 2.4).

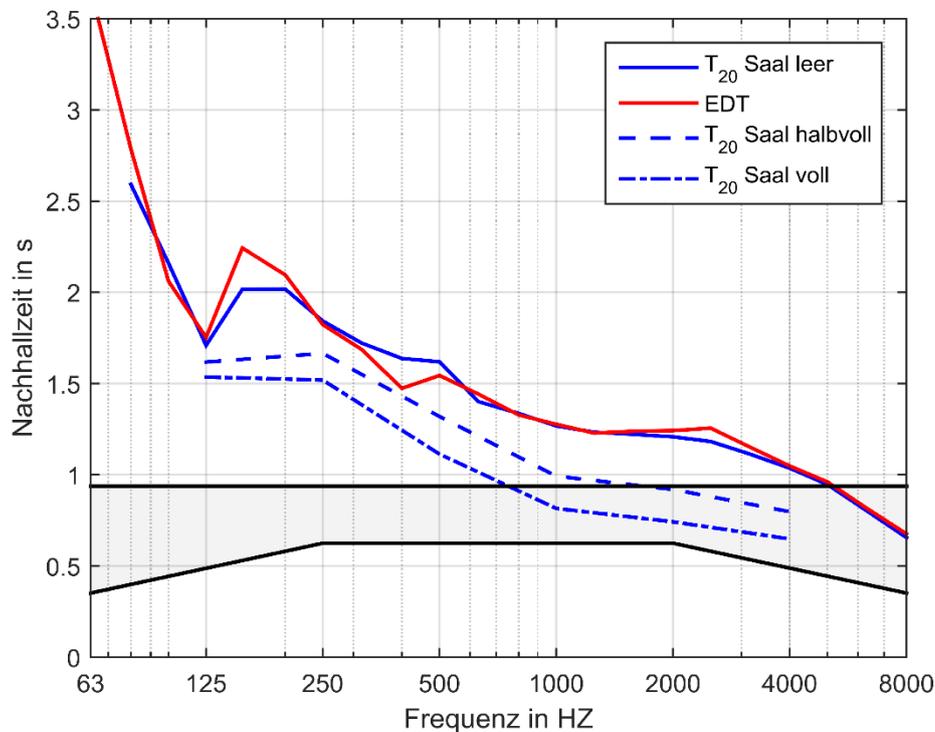


Abbildung 4.1: Nachhallzeitdiagramm für den Lehrsaal HSXIV

Da die untere Grenze bei 125 Hz aus Abbildung 2.2 etwa schwieriger zum Ablesen ist, kann die minimale T_{soll} für 125 Hz aus Abbildung 4.1 abgelesen werden.

$$T_{soll,min,125\text{Hz}} = 0,5\text{s}$$

Aus diesen Ergebnissen kann mithilfe der Sabin'schen Nachhallzeitformel die minimale und die maximale nötige äquivalente Absorptionsfläche berechnet werden. Durch Umformung der Sabin'schen Nachhallzeitformel und Einsetzen der Grenzwerte erhält man:

$$A_{soll,min} = 0,163 \cdot \frac{V}{T_{soll,max}} \quad (4.4)$$

$$A_{soll,max} = 0,163 \cdot \frac{V}{T_{soll,min}} \quad (4.5)$$

Die Werten, die sich aus der *Formel 4.4* ergeben, geben die Mindestwerten der äquivalenten Absorptionsfläche pro Frequenzband an, um die Nachhallzeiten innerhalb des Toleranzbandes zu halten. Unterhalb diesen Werten werden die Nachhallzeiten zu lang. Die Werten aus der *Formel 4.5* geben die maximalen Werten der äquivalenten Absorptionsfläche an, um die Nachhallzeiten innerhalb des Toleranzbandes zu halten. Oberhalb dieser Werte werden die Nachhallzeiten der jeweiligen Frequenzbänder zu kurz (zu gedämpft).

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T ₂₀ [s]	-	1,71	1,84	1,62	1,27	1,21	1,04	0,66

Tabelle 4.1: Die Werte der Nachhallzeit T₂₀ aus dem akustischen Datenblatt des Lehrsaales XIV übernommen (siehe Anhang E)

$$A = 0,163 \cdot \frac{V}{T_{20}} \quad (4.6)$$

Durch das Einsetzen der Werten aus der *Tabelle 4.1* in *Formel 4.6* erhält man die im Raum vorhandene äquivalente Absorptionsfläche (siehe *Tabelle 4.2*):

f[Hz]	125	250	500	1000	2000
Vorhandene äq. Absorptionsfläche A[m ²]	29,41	27,33	31,04	39,59	48,35

Tabelle 4.2: Die vor der Sanierung im Raum vorhandene äquivalente Absorptionsfläche

Aus den Differenzen zwischen minimalen und maximalen Sollwerten der äquivalenten Absorptionsfläche (*Formel 4.4* und *4.5*) und der tatsächlichen Werte von äquivalenten Absorptionsfläche im Raum (*Tabelle 4.2*), bekommt man den *Sollbereich* für die nötige äquivalente Absorptionsfläche, die eingebracht werden muss, um die Nachhallzeiten in den normgerechten Grenzen zu halten (siehe *Formel 4.7* und *4.8*, sowie *Tabelle 4.3*).

$$\Delta A_{min} = A_{soll,min} - A \quad (4.7)$$

$$\Delta A_{max} = A_{soll,max} - A \quad (4.8)$$

f[Hz]	125	250	500	1000	2000
ΔA _{min} [m ²]	24,31	26,39	22,68	14,13	5,37
ΔA _{max} [m ²]	71,65	53,26	49,55	41	32,24

Tabelle 4.3: Grenzwerte des Sollbereiches der fehlenden äquivalenten Absorptionsfläche für jedes Frequenzband des LS XIV

4.1.2 Berechnung der einzubringenden Materialfläche

Da sich LS XIV in der Kronesgasse befindet, wo hauptsächlich Architekturstudierenden studieren, entschieden wir uns, diesen Raum mit den von ihnen entworfenen akustischen Paneelen zu sanieren. Weiters haben wir zuerst die am stärksten absorbierende Probe genommen (siehe *Tabelle 4.4*):

Probe: Mosberger 50mm mit 100mm Luftpolster						
f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000
α	0,14	0,55	0,85	0,76	0,78	0,94

Tabelle 4.4: Absorptionsgrad α für Hartfilz mit 100mm Luftpolster und mit dem von „Mosberger“ designten Filz darauf

Um zu bestimmen, wie viel Material dieses Absorbertyps für jedes Frequenzband nötig ist, sodass die Nachhallzeit in den normgerechten Grenzen bleibt, haben wir folgende Bedingung aufgestellt (Formel 4.9).

$$\frac{\Delta A_{min}}{\alpha} \leq S \leq \frac{\Delta A_{max}}{\alpha} \quad (4.9)$$

Mit Formel 4.9 erhält man:

$$S_{min} \leq S \leq S_{max}$$

Setzt man die Werte aus den Tabellen 4.3 und 4.4 in Formel 4.9 ein, so ergeben sich folgende Grenzwerte der fehlenden Materialfläche (siehe Tabelle 4.5)

f[Hz]	125	250	500	1000	2000
S _{min} [m ²]	44,2	31,04	29,84	18,11	5,71
S _{max} [m ²]	129,38	62,66	65,2	52,6	34,3

Tabelle 4.5: Grenzwerte des Sollbereiches der fehlenden Materialfläche für die Probe vom Mosberger beim LS XIV

Anschließend sucht man die **höchst nötige Mindestfläche** und die **kleinste nötige Maximalfläche** aus, um die Grenzen des einzubringenden Materials zu bestimmen. So wird sichergestellt, dass sich keine Frequenz außerhalb des Toleranzbandes befindet. Hier wären *mindestens* 44,2m² und *maximal* 34,3m² nötig, was natürlich widersprüchlich ist (siehe Tabelle 4.5). Deswegen sucht man entweder nach einem anderen Material mit kleinerem α bei 2kHz (siehe Tabelle 4.6), oder kombiniert verschiedene Materialien um diese Differenz zu verringern.

Probe: Schreilechner 40mm mit 100mm Luftpolster						
f (Hz)	63	125	250	500	1000	2000
α	0,22	0,50	0,76	0,63	0,62	0,77

Tabelle 4.6: Absorptionsgrad α für Hartfilz mit 100mm Luftpolster und mit dem von „Schreilechner“ designten Filz darauf

Berechnung der untenstehenden Ergebnisse (siehe Tabelle 4.7) erfolgt komplett analog zur Berechnung der Werten aus der Tabelle 4.5, wobei die Absorberkoeffizienten aus der Tabelle 4.6 entnommen wurden:

f[Hz]	125	250	500	1000	2000
S _{min} [m ²]	48,62	34,72	36,00	22,79	6,97
S _{max} [m ²]	142,32	70,08	78,65	66,13	41,87

Tabelle 4.7: Grenzwerte des Sollbereiches der fehlenden Materialfläche für die Probe von Schreilechner beim LS XIV

Die einzubringende Materialfläche soll laut Tabelle 4.7 also mindestens 48,62m² und maximal 41,87m² groß sein, was ebenfalls einen Widerspruch ergibt. Die Differenz zwischen den beiden Grenzwerten ist allerdings mit der Auswahl dieser Probe kleiner geworden. Nimmt man den Mittelwert, so werden die beiden Frequenzbänder, 125Hz und 2kHz, näher zu den gewünschten Werten gebracht, was in diesen Frequenzbändern eine geringe Abweichung zu den genormten Nachhallzeiten zur Folge hat (siehe Berechnung 4.10).

$$S = \frac{48,62 \text{ m}^2 + 41,87 \text{ m}^2}{2} \approx 45 \text{ m}^2 \quad (4.10)$$

Bei allen anderen Frequenzbändern ist diese Materialmenge innerhalb der gewünschten Grenzen. Es wurde daher entschieden, **45m² Hartfilz** von Schreilechner für die Sanierung zu verwenden.

4.1.3 Berechnung der nötigen Absorberfläche für FSI1

Die Berechnung für HS FSI1 erfolgte analog zur Berechnung für LS XIV aus den vorigeren Abschnitten. Dabei erhält man folgende Ergebnisse für die fehlenden äquivalenten Absorptionsflächen (siehe *Tabelle 4.8*):

f[Hz]	125	250	500	1000	2000
ΔA_{\min}[m²]	47,67	34,88	24,07	2,77	6,32
ΔA_{\max}[m²]	109,14	76,41	65	44,3	44,85

Tabelle 4.8: Grenzwerte des Sollbereiches der fehlenden äquivalenten Absorptionsfläche für jedes Frequenzband beim HS FSI1

Hier ist es auffallend, dass das Material für die Sanierung im Grenzfall annähernd gleiche Absorptionseigenschaften bei 125Hz und 2kHz Frequenzbänder besitzen sollte, um die Bedingungen für die optimalen Nachhallzeiten zu erfüllen. Im Idealfall sollte der Absorptionskoeffizient bei 125Hz größer sein. Es wird offensichtlich, dass deswegen die von uns gemessene Materialien alleine zu einem brauchbaren Ergebnis nicht führen werden.

Aus folgenden Gründen liegt es nahe, Deckenabsorber für die Sanierung zu verwenden:

- Fast nur dort bietet sich genügend Platz für tiefe Absorber an, die aber aufgrund des tieffrequenten Problems im FSI1 notwendig sind.
- Die Deckenreflexion leistet einen wesentlichen Beitrag für die Verständlichkeit in einem Raum. Diese ist aber aufgrund des Unterzugs in diesem Hörsaal nur bedingt vorhanden. Da das von uns ausgewählte Material oberhalb von 2 kHz nicht nur absorbiert, sondern auch einen wesentlichen Anteil reflektiert, wird die Deckenreflexion für höhere Frequenzen wiederhergestellt. Diese reflektierende Wirkung lässt sich durch die niedrigen Absorptionskoeffizienten bei diesen Frequenzen begründen (siehe *Tabelle 4.9*).
- Eventuell tritt in den Ecken am Unterzug ein Kantenabsorbereffekt auf, was sehr willkommen wäre. Berechnen lässt sich dieser aber kaum.

Der Unterzug ist ca. 0,5m von der Decke abgehängt. Es liegt daher nahe, die Deckenabsorber/-reflektoren auf gleicher Höhe zu montieren, da es bautechnisch leicht realisierbar ist und so die Deckenreflexion nicht mehr durch den Unterzug verhindert werden. Dafür haben wir in den Datenblättern der Firma TOPAKUSTIK (siehe *Anhang C*) nach einem Absorber gesucht, der mit einem Luftpolster bzw. Wandabstand von ca. 0,5m, einen im Tieftonbereich besseren Absorptionskoeffizienten, als im Hochtonbereich hat (siehe *Tabelle 4.9*).

TOPAKUSTIK 5/3 T, VLIES SP 63 A, Schafwolle Doscha, Typ PP 2, 516 mm							
Abhängehöhe							
f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
α	-	0,83	0,71	0,80	0,74	0,54	0,37

Tabelle 4.9: Absorptionskoeffizient α für TOPAKUSTIK Absorber mit 516mm Abhängehöhe und Schafwolle dahinter

Nimmt man **40 m²** TOPAKUSTIK Absorber (*Tabelle 4.6*) und **29 m²** „Schreilechner“ Probe (*Tabelle 4.9*), so erhält man folgende äquivalente Absorptionsflächen (siehe *Tabelle 4.10*):

f[Hz]	125	250	500	1000	2000
Äquivalente Absorptionsfläche (TOPAKUSTIK Absorber) A' [m ²]	33,2	28,4	32	29,6	21,6
Äquivalente Absorptionsfläche (Schreilechner-Probe) A'' [m ²]	14,5	22,04	18,27	17,98	22,33
Äquivalente Absorptionsfläche (beide Materialien) A [m ²]	47,7	50,44	50,27	47,58	43,93

Tabelle 4.10: Äquivalente Absorptionsfläche von 40m² des TOPAKUSTIK-Absorbers, 29m² der „Schreileitner“ Probe, sowie von beiden Materialien zusammen

Die Werte in grüner Farbe in *Tabelle 4.10* sind im gewünschten Toleranzbereich. Bei 1000Hz entsteht eine Abweichung von +3,3m². Sie entspricht einer Überdämpfung um ca. 7,5%. Berücksichtigt man, dass alle andere Frequenzbänder sich im Toleranzbereich befinden, kann die Abweichung bei diesem Frequenzband vernachlässigt werden.

4.2 Catt Simulation

In diesem Kapitel wird die Simulation des Raumes Schritt für Schritt erklärt (siehe *Abbildung 4.2*). Als Programm wird „CATT-Acoustic“ verwendet, mit dem man sich zuerst auseinandersetzen musste, um einen Überblick der Funktionen zu bekommen und diese auch verstehen zu können.

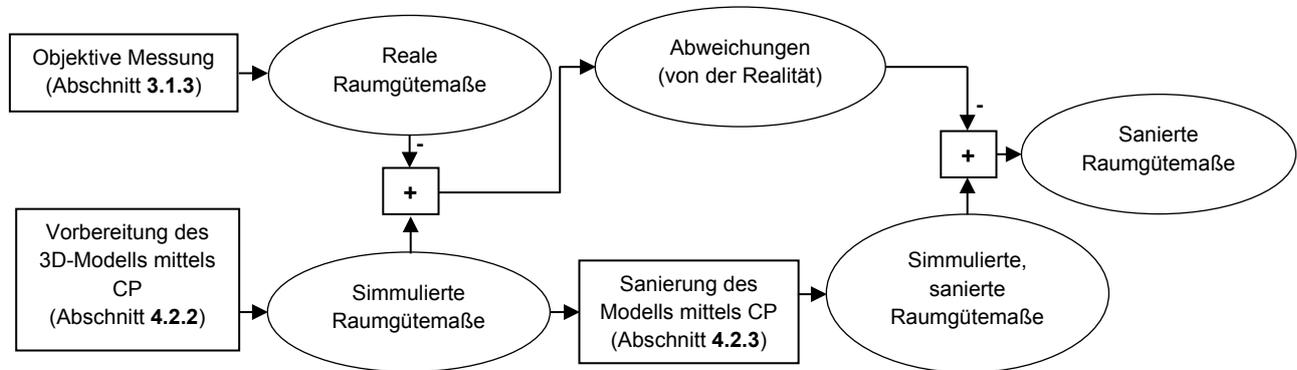


Abbildung 4.2: Block-Diagramm des ganzen Vorgangs der Sanierung mittels CP

Für die genaue akustische Sanierung wurde „Computer Prediction“ (CP) verwendet. Es wird sowohl für die Wirkung von Absorber als auch die Raumgütemaße bezüglich Position und Richtung verwendet. CP kann ebenso benutzt werden um die störenden Moden, Flatterechos und Resonanzen zu finden, was man mittels Berechnung sehr schwer ausrechnen kann. Dafür haben wir das Programm „CATT-Acoustic“ und seine „Prediction Tool“ („TUCT“) verwendet, was in nächsten Kapiteln beschrieben wird.

4.2.1 Einstellungen der Simulation

Um eine möglichst genaue Simulation der Räume durchzuführen, müssen folgende notwendige Daten in „CATT-Acoustic“ eingestellt werden:

- master.geo File (abhängig von der Absorptionsdatei „abs_defs.geo“ und Planesdatei „planes.geo“)
- Position vom Mikrofon und der Quelle (gespeichert in der Datei „rec.loc“ und „src.loc“)
- „Diffuse reflection“ und „scattering coefficient“
- „Predict SxR Settings“

master.geo File

Das master.geo - File wurde für beide Räume mithilfe von „SketchUp 2018“ und dem Plugin „SU2CATT“ erstellt, da es in SketchUp einfacher ist, kompliziertere Räume zu erstellen.

Wie aus *Abbildung 4.3* ersichtlich ist, fehlen in der Simulation kleine Flächen wie zum Beispiel Stühle, Computergehäuse und Monitore. Zwar wurden diese anfangs erstellt, wurden aber nach einem Vergleich von Ergebnissen entfernt. Die Simulationsdauer war außerdem unnötig lang. Weiters berechnet „CATT-Acoustic“ Reflexionen unabhängig von

der Größe der Fläche (solange es nicht manuell verändert wurde). Beugung kann von dem Programm „CATT-Acoustic“ nicht simuliert werden.

Wie man in *Abbildung 4.3, a)* erkennen kann, ist die Decke vom „LS XIV“ gerippt, was die Akustik des Raumes wesentlich beeinflusst. Sie darf auf keinen Fall in der Simulation mit einer flachen Fläche modelliert werden, weil die Decke, akustisch gesehen, eine Reihe von konkaven Reflektoren ist. Die Schallwellen von Frequenzen, deren Wellenlänge kürzer als die Reflektorbreite (Gewölbbebreite, *Abbildung 4.4*) ist, werden auf bestimmten Positionen fokussiert, daher in der Simulation notwendig. Da „CATT-Acoustic“ keine runde Fläche simulieren kann, wurden Rundungen, in mehrere flachen Flächen unterteilt.

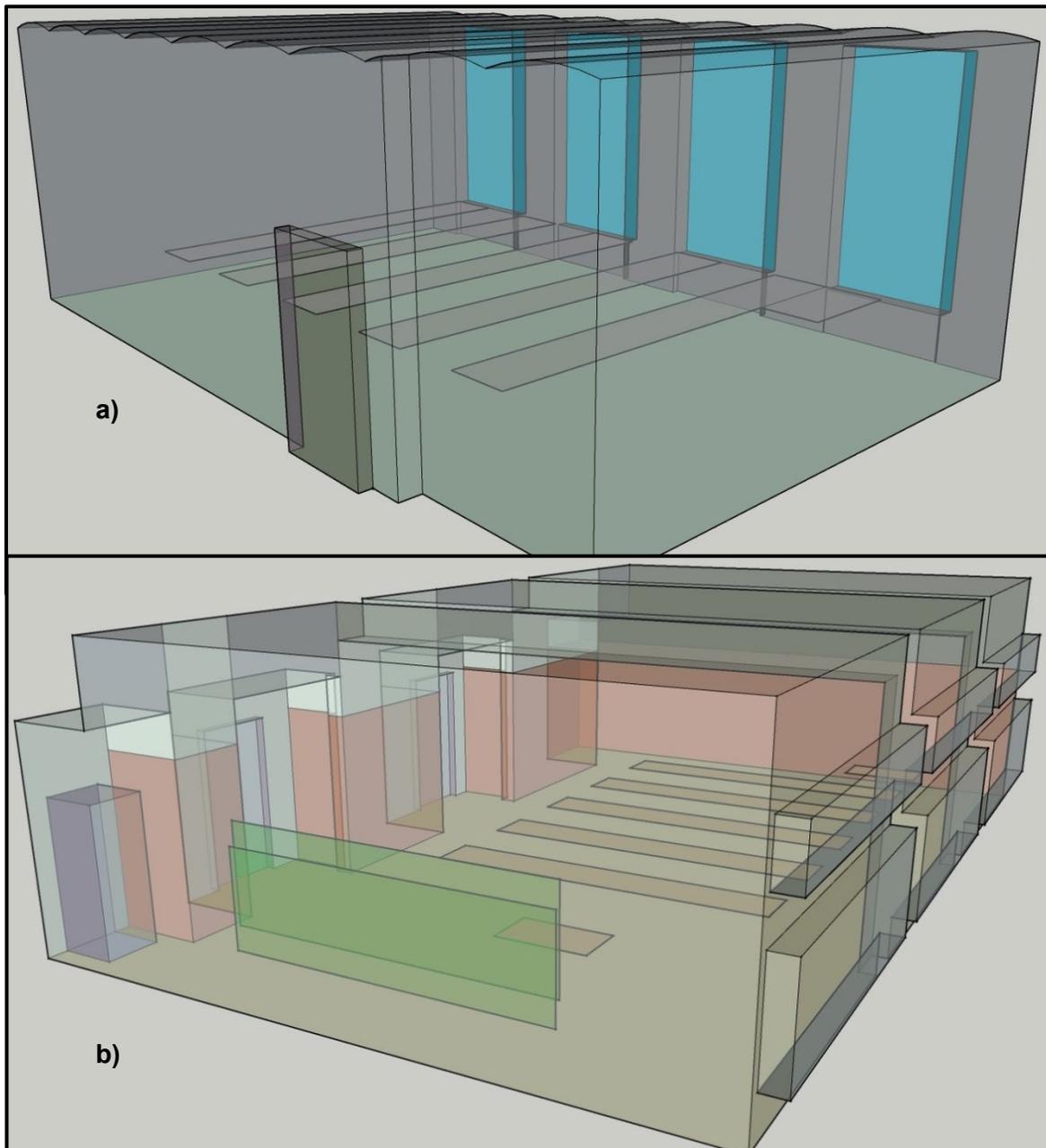


Abbildung 4.3: „SketchUp“ Modell der TUGraz-Räumen: a) LS XIV ARCHII in Kronesgasse 5, b) HS FS11 in Infeldgasse 13

Rundungen werden mit der *Formel 4.11* berechnet [14]:

$$f \cdot b^2 = 0,5 \cdot c \cdot a \quad (4.11)$$

f höchste, für Simulation gültige Frequenz = 8000Hz

c Schallgeschwindigkeit

a Zylinderradius (wurde aus dem „SketchUp“ Modell gemessen) = 2,11m

b Breite der Teilfläche

$$b^2 = \frac{0,5 \cdot c \cdot a}{f} \Rightarrow b = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 343 \frac{m}{s} \cdot 2,11m}{8000 \frac{1}{s}}} \approx 0,2127m \quad (4.12)$$

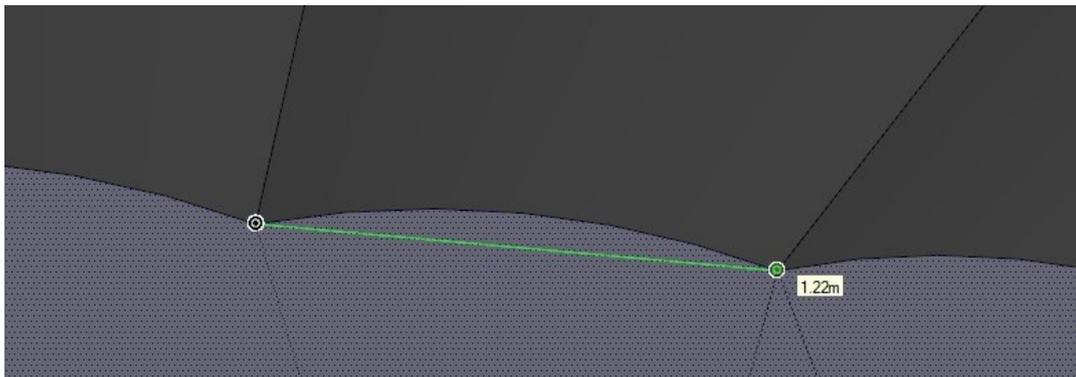


Abbildung 4.4: Gewölbebreite des „SketchUp“-Modells des Raumes LS XIV

Die Gewölbebreite beträgt insgesamt 1,22m (siehe *Abbildung 4.4*). Das ergibt **6 Teilstücke** nach *Berechnung 4.13*:

B Gewölbebreite = 1,22m

b Breite der Teilfläche (nach *Berechnung 4.12*) = 0,2127m

N_T Anzahl der Teilstücke

$$N_T = \frac{B}{b} \approx 5,74 \Rightarrow N_T = \mathbf{6} \text{ (gerundet)} \quad (4.13)$$

Position vom Mikrofon und der Quelle

Um die Simulation so realistisch wie möglich zu gestalten, sollten die gleichen Mikrofon- und Quellpositionen wie in der objektiven Messung gewählt werden (siehe *Abbildung 4.5* und *Datenblatt von LS XIV, S.3, Anhang E*).

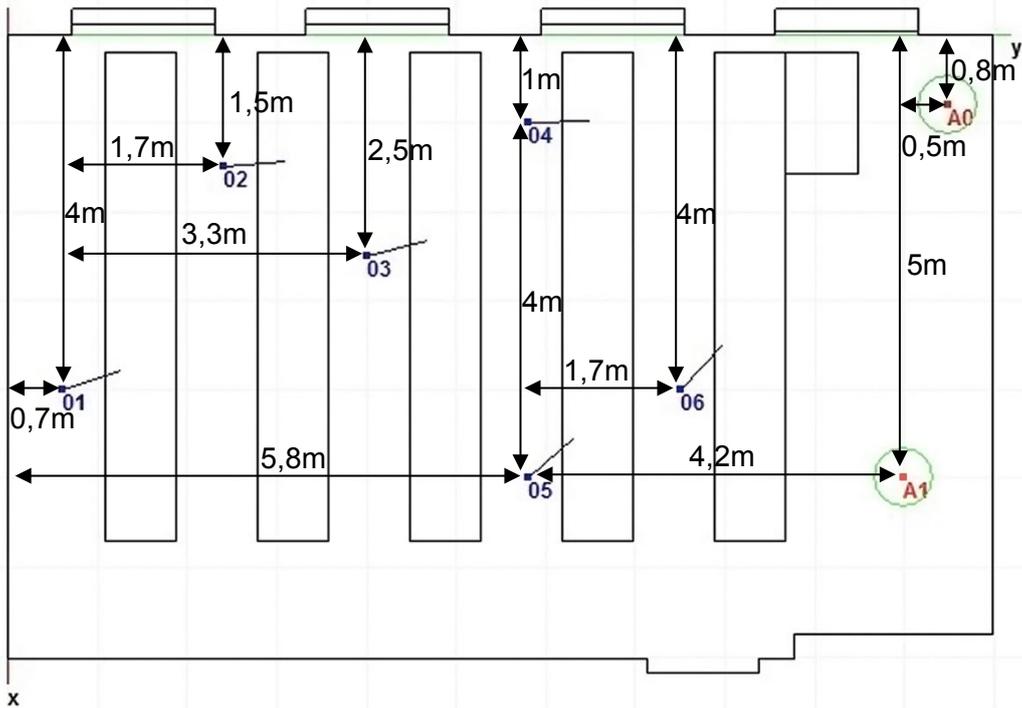


Abbildung 4.5: Grundriss des Raumes LS XIV mit horizontalen Abständen von Mikrofonen (01-06) und Quellen („Pult“ = A0 und „Tafel“ = A1)

Die geometrische (und akustische) Besonderheit des Modells von HS FSI1 waren die Unterzüge. Die Quell- und Mikrofonpositionen waren hier ebenso wie die echten Messpunkte bei der objektiven Messung gestellt (siehe Abbildung 4.6 und Datenblatt vom HS FSI1, S.3, Anhang D).

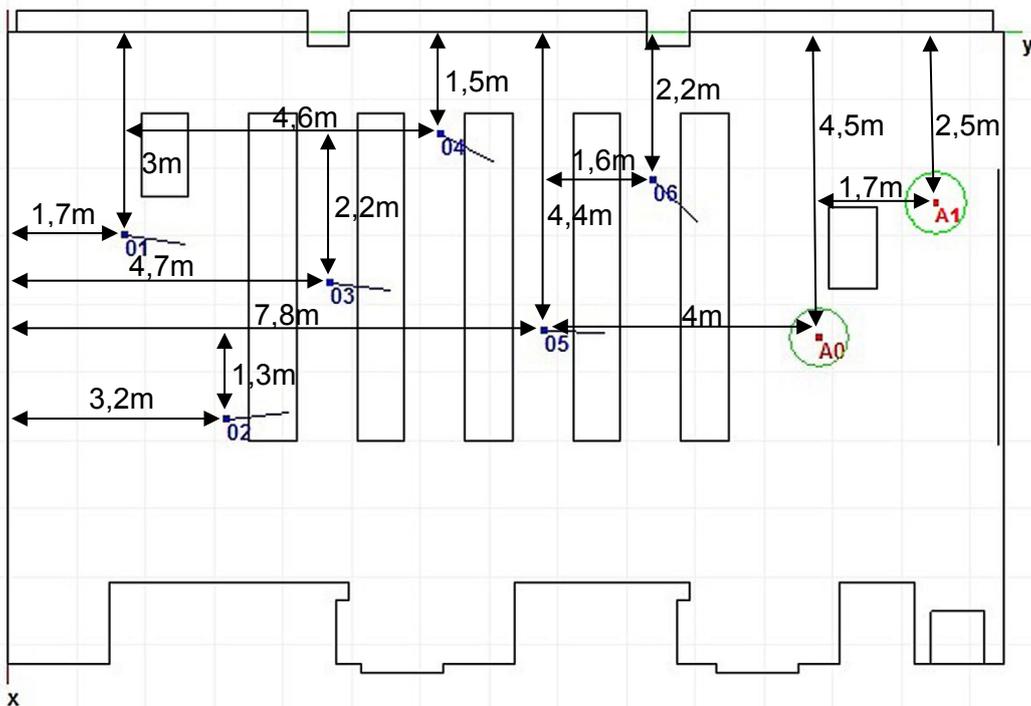


Abbildung 4.6: Grundriss des Raumes LS XIV mit horizontalen Abständen von Mikrofonen (01-06) und Quellen („Pult“ = A0 und „Tafel“ = A1)

Die Höhe der Mikrofonpositionen ist **1,2m** und der Quellpositionen **1,5m** in beiden Modellen. Sie entspricht derselben Höhe der Quell- und Mikrofonpositionen der echten Messung laut ÖNORM.

„Diffuse reflection“ und „scattering coefficient“

Ähnlich wie einen Absorptionsgrad, besitzt jede Fläche auch einen „Scattering coefficient“ (SC), welcher beschreibt, wie diffus diese Fläche den Schall bei derjenigen Frequenz reflektiert. Wenn der SC in „CATT-Acoustic“ auf 100% gestellt ist, wird Schall bei dieser Frequenz komplett diffus und nicht spiegelnd reflektiert (bei 0% genau umgekehrt), was in der Realität nie der Fall ist [15]. Um SC für eine Oberfläche zu ermitteln, muss diese genauestens laut der **Norm ISO 17497** vermessen werden:

„In einfacher Form werden dabei Impulsantworten für eine ausreichend große Materialprobe im Freifeld gemessen. Die Messungen erfolgen unter verschiedenen Winkeln bei Drehung der Probe in der Ebene senkrecht zur Flächennormalen sowie fester Mikrofon- und Lautsprecherposition, wobei sich der gestreute Anteil der Impulsantwort mit jeder Messung zufällig verändert, während der geometrische (oder kohärente) Anteil der Antwort unverändert bleibt.“ [2]

Für viele Flächen (wie z.B. Wände, Tafel, Fenster, usw.) ist es uns nicht möglich, diese Messung durchzuführen, da sie groß und unbeweglich sind.

Man muss die Flächen im Modell nach Rauheit, Größe und Form analysieren und den SC im CATT einstellen.

Bezüglich Rauheit sollte erwähnt werden, dass jede Unebenheit auf der Fläche (abhängig von der Wellenlänge der jeweiligen Frequenz) den SC verändern wird. Um das verständlich zu machen wird die *Abbildung 4.7* genauer analysiert [16]:

- Im Fall „a“ wird der Schall sehr stark spiegelnd und weniger diffus reflektiert, weil diese Unebenheiten für niedrige Frequenzen kein Hindernis darstellen.
- Im Fall „b“ wird der Schall ungefähr 50% spiegelnd und 50% diffus reflektiert, weil die Größe der Unebenheit und der Wellenlänge gleich ist.
- Im Fall „c“ wird der Schall sehr stark diffus und wenig spiegelnd reflektiert, weil diese Unebenheiten viel größer als die Wellenlänge sind.

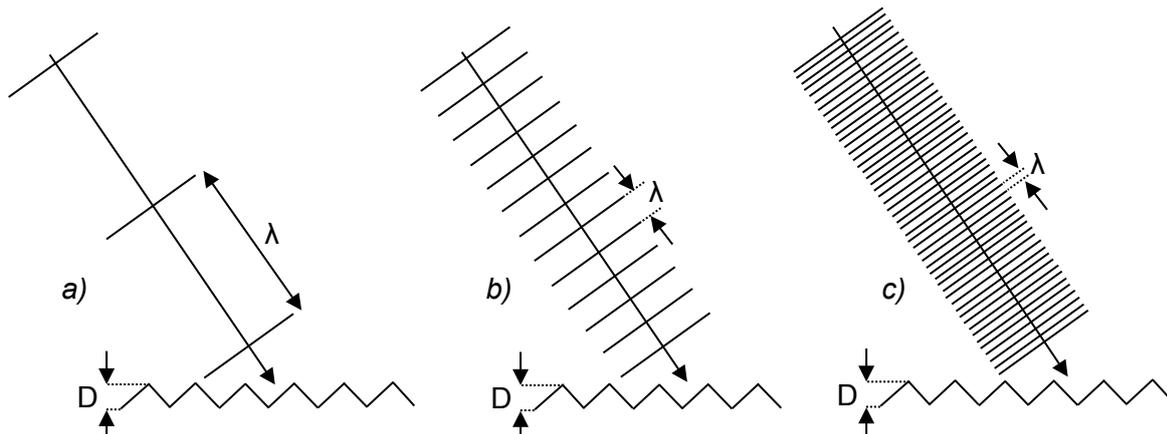


Abbildung 4.7: Einfallender Schall der Wellenlänge „ λ “ auf der rauen Fläche mit den Unebenheiten der Größe „ D “: a) $D \ll \lambda$; b) $D = \lambda$; c) $D \gg \lambda$

Um die größte Genauigkeit zu erreichen, haben wir uns für die „Surface + edge“ Einstellung entschieden (siehe *Abbildung 4.8*). Das ermöglicht uns, bei einigen Flächen (z.B. Tische, Fenster und Tafel) die „**Automatic edge scattering coefficients**“ verwenden. Die restlichen Flächen haben User-definierte „**Default scattering coefficients**“.

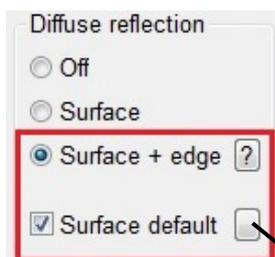


Abbildung 4.8: „Diffuse reflection“-Einstellung

Aus *Abbildung 4.7* zugehöriger Erklärung, ist bekannt, dass mit kürzerer Wellenlänge der SC zunimmt. Nach mehreren Versuchen von verschiedenen SC-Einstellungen, aufgrund des vereinfachten Modells, das überwiegend aus großen, glatten Flächen besteht, wurde „**Default**“ SC-Einstellung wie in folgender Tabelle gewählt:

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	16kHz
Scattering coefficient	20%	30%	40%	50%	60%	70%	70%	70%

Tabelle 4.11: „Default scattering coefficients“ (für Simulation bis 4kHz gültig) als Einstellung in „General settings“

Damit CATT die Auswirkung von Beugung der tiefen Frequenzen annähernd simulieren kann, wird „**Automatic edge scattering**“ verwendet. CATT löst dieses Problem, indem es in solchen Fällen den Schall diffus reflektiert. Damit wird der Schall gleichmäßig im Raum verteilt und störende Reflexionen, die in der Realität nicht vorhanden sind, werden vermieden.

Darum wurde im Manual von „Catt-Acoustic“ empfohlen „**Automatic edge scattering**“ für Flächen wie Tische, Fenster oder Tafel zu benutzen [17].

Der „**Automatic edge scattering**“ Algorithmus unterteilt eine Fläche in zwei Teilflächen (äußere und innere). S_{edge} (äußere Teilfläche) wird durch das Viertel der Wellenlänge ($\frac{\lambda}{4}$) der jeweiligen Frequenz bestimmt. Je größer die Wellenlänge, desto größer wird S_{edge} (siehe *Abbildung 4.9*). Je größer S_{edge} , desto diffuser wird der Schall reflektiert (desto größer wird der SC). Das Verhältnis zwischen S_{edge} und der gesamten Fläche $S_{surface}$ wird schlussendlich zu dem „**Default scattering coefficient**“ der jeweiligen Frequenz addiert (siehe *Formel 4.14*).

$$SC = SC_{default} + \frac{S_{edge}}{S_{surface}} \quad (4.14)$$

In manchen Fällen können die Werte von SC größer als 100% werden. Das ist für „Scattering coefficient“ physikalisch unmöglich ist. „CATT-Acoustic“ schneidet diese Werte auf 100% ab um dieses Problem zu vermeiden. Dann wirken solche Flächen als reine Diffusoren.

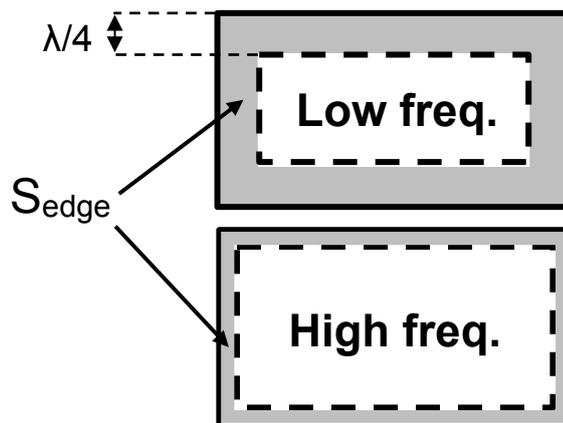


Abbildung 4.9: Die Größe der Randfläche S_{edge} in Bezug auf der Wellenlänge einer Schallwelle [17]

Predict SxR Settings

Schlussendlich muss noch „Predict SxR settings“ eingestellt werden, bevor man mit der Vorbereitung beginnen kann. Diese Einstellung beschreibt die Genauigkeit und Komplexität, mit der simuliert wird. Für einfache Geometrien, wie es bei unseren Simulationen der Fall ist, sind einfache Algorithmen ausreichend. (siehe *Abbildung 4.10*, Abschnitt „Algorithm“).

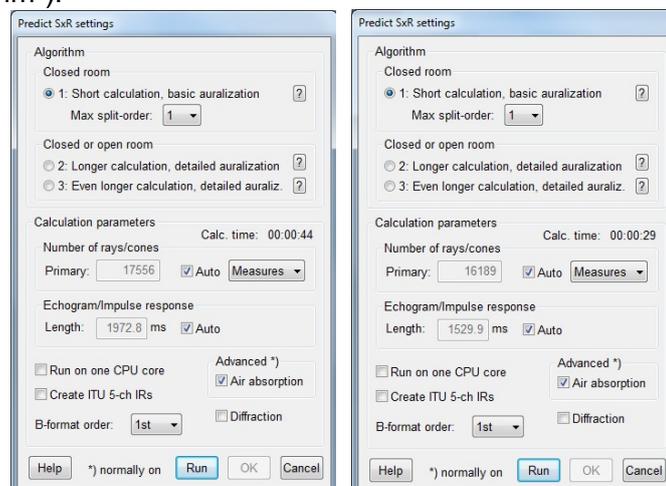


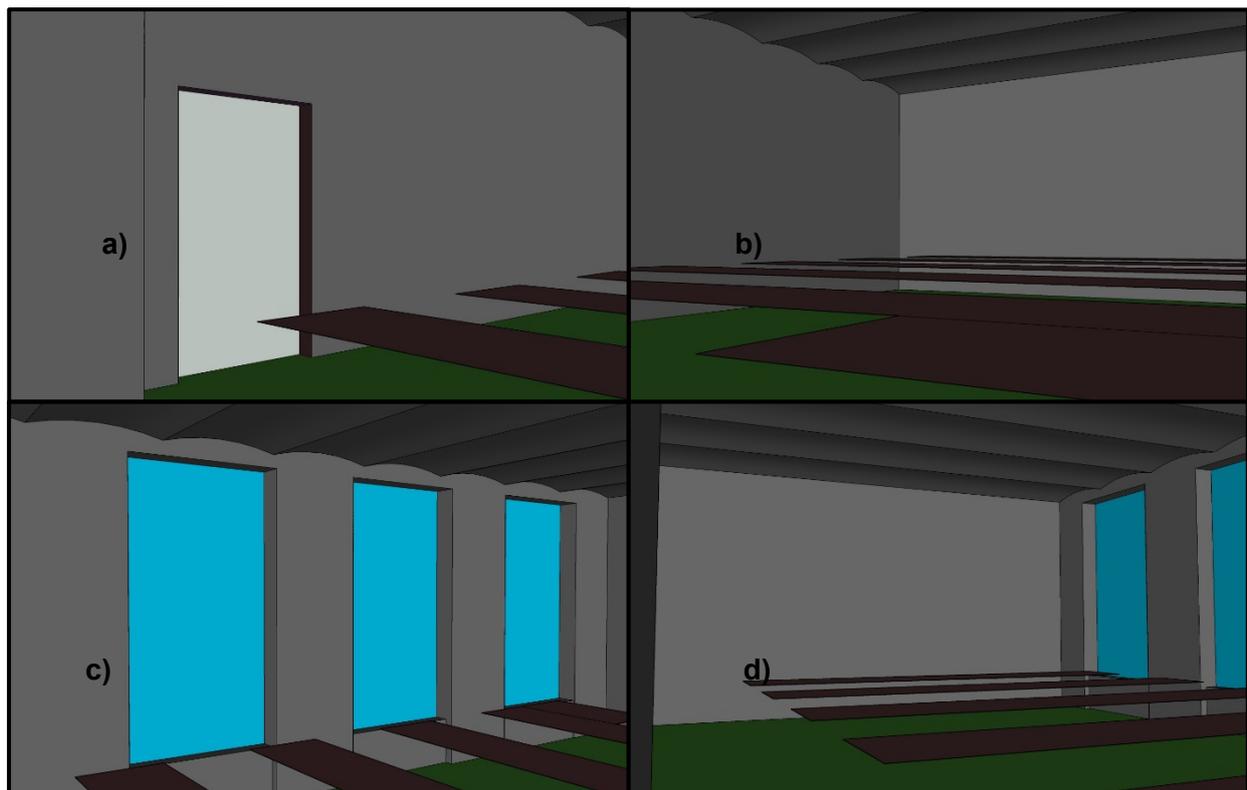
Abbildung 4.10: „Predict SxR settings“ von LS XIV (links) und HS FSI1 (rechts)

In diesem Abschnitt ist auch die „Max split-order“ von 0 auf 1 erhöht, was die Simulation genauer macht und die CP-Zeit dabei kaum erhöht. Für unsere Simulation ist die automatisch generierte Nummer von Strahlen und Länge von Impulsantwort genügend (siehe *Abbildung 4.10*, Abschnitt „Calculation Parameters“).

4.2.2 Vorbereitung der Räume

Zusammen mit der „master.geo“ Datei wird durch „SU2CATT“ auch die „abs_def.geo“ Datei generiert, in der die Absorptionsgrade von den Materialien eingetragen sind. In dieser Datei wird ein großer Teil der Vorbereitung und Sanierung durchgeführt.

LSXIV ARCHII



- - Beton
- (Tische und Türstock) - Holz
- - Glas
- - Beton
- - Linoleum
- - WOODEN_DOOR

Abbildung 4.11: Unsaniertes Modell des Raumes LS XIV mit der Flächenbeschreibung; **a)** und **b)**: Blick auf die Seiten- und Rückwand; **c)** und **d)**: Blick auf die Fensterseite und Rückwand

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Beton	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Glas	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Holz	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
Linoleum	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
WOODEN_DOOR ¹	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10

Tabelle 4.12: Absorptionsgrade verschiedener Materialien in der Abbildung 4.11 von LS XIV im nicht vorbereiteten Zustand [18]

¹ Dieser Absorptionsgrad (WOODEN_DOOR = Holz_Tür) ist bereits in „CATT Acoustic“ integriert. Sie dürfen nicht neu im „abs_def.geo“ definiert werden.

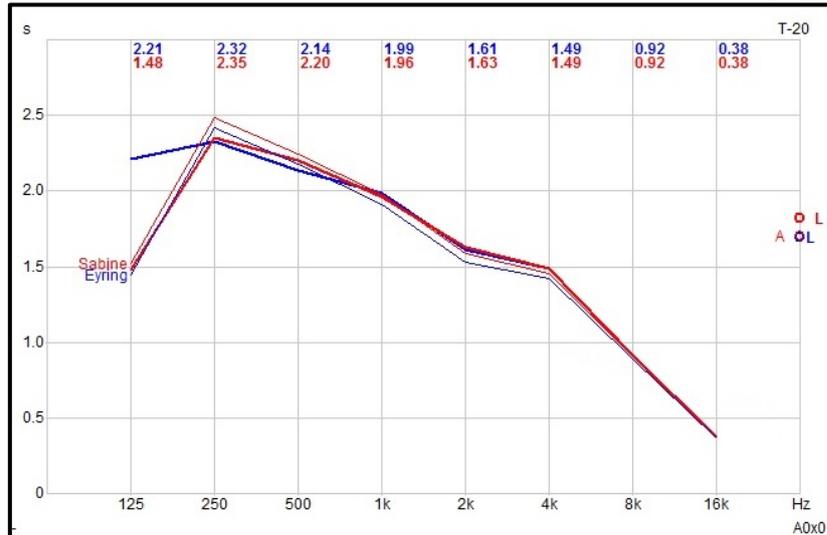


Abbildung 4.12: Von CATT berechnete Nachhallzeit (T_{20}) vom nicht vorbereiteten Modell des Raumes LS XIV (Position **A0** -> **02**)

In der *Abbildung 4.12* sind vier Kennlinien vorhanden. Die beiden dünneren Kennlinien sind, die von CATT berechneten „Sabine“ und „Eyring“ Annäherungen. Die beiden dickeren Kennlinien sind die durch „raytracing“ berechneten Werte:

- Rote dicke Kennlinie (im CATT-Manual als „*E*“ kenngezeichnet) ist auf der Schallenergie basiertes Echogramm (richtungunabhängig) [19]
- Blaue dickere Kennlinie (im CATT-Manual als „*h*“ kenngezeichnet) ist „binaural“ Impulsantwort und ist darum richtungabhängig [19]

Was für unsere Analyse der Diagramme wichtig ist, ist das Verhältnis zwischen diesen beiden Kurven. Wie aus der *Abbildung 4.12* sichtbar ist, sind diese Kurven bei 125Hz nicht ident. Dies ist auf die Phasenunterschiede im Tieftonbereich bei der Kurve „*h*“ zurückzuführen [19]. Darum werden für solche Fälle die „*E*“ und „*h*“ Ergebnisse gemittelt, um eine gute Annäherung zu bekommen.

Wenn alle für die Simulation notwendige Daten korrekt eingestellt sind, sollten dünnere und dickere Kennlinien nicht mehr als 5% voneinander abweichen, was in der *Abbildung 4.12* zum größten Teil der Fall ist.

Als nächster Schritt sollten die Simulationsergebnisse aus CATT mit den Messergebnissen verglichen werden. In *Tabelle 4.13* können die über alle Positionen gemittelte Ergebnisse aus CATT mit den Messergebnissen verglichen werden.

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{20} Messung [s]	1,71	1,84	1,62	1,27	1,21	1,04
T_{20} CATT [s]	1,82	2,34	2,2	1,99	1,63	1,49
Abweichung	+0,11	+0,5	+0,58	+0,72	+0,42	+0,45

Tabelle 4.13: Objektive Nachhallzeit (T_{20}) und CATT-berechnete Ergebnisse vom nicht vorbereiteten Modell von LS XIV

Aus der obenstehenden Tabelle ist ersichtlich, dass die CATT simulierte T_{20} Werte zu den objektiven gemessenen Parametern bis zu 40% abweichen (darum rot). Daher konnte noch nicht mit der Analyse der Reflexionen und Sanierung des Raumes begonnen werden. Daher muss das Modell noch vorbereitet werden.

Um die Simulation möglichst genau dem realen Zustand anzugleichen, werden die Absorberwerte in der Simulation so lange verändert bis der Unterschied möglichst gering ist. T_{20} wurde als Referenzparameter verwendet, da dieser leicht verständlich ist und sich andere akustischen Parameter daraus ausrechnen lassen. In den Frequenzbereichen, in denen die Abweichungen positiv sind, sollten die Absorptionskoeffizienten von bestimmten Flächen in der „abs_def.geo“ Datei erhöht werden, und umgekehrt (siehe *Tabelle 4.13*).

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{20} Messung [s]	1,71	1,84	1,62	1,27	1,21	1,04
T_{20} CATT [s]	1,59	1,83	1,58	1,29	1,23	1,08
Abweichung	-0,12	-0,01	-0,04	+0,02	+0,02	+0,04
t_s Messung [ms]	137	134	119	96	93	80
t_s CATT [ms]	112	134	116	96	90	78
Abweichung	-25	0	-3	0	-3	-2
D_{50} Messung [%]	27	31	32	37	40	45
D_{50} CATT [%]	35	32,2	34,3	40	44,3	46,5
Abweichung	+8	+1,2	+2,3	+3	+4,3	+1,5
STI Messung [%]	54					
STI CATT [%]	52					
Abweichung	-2					

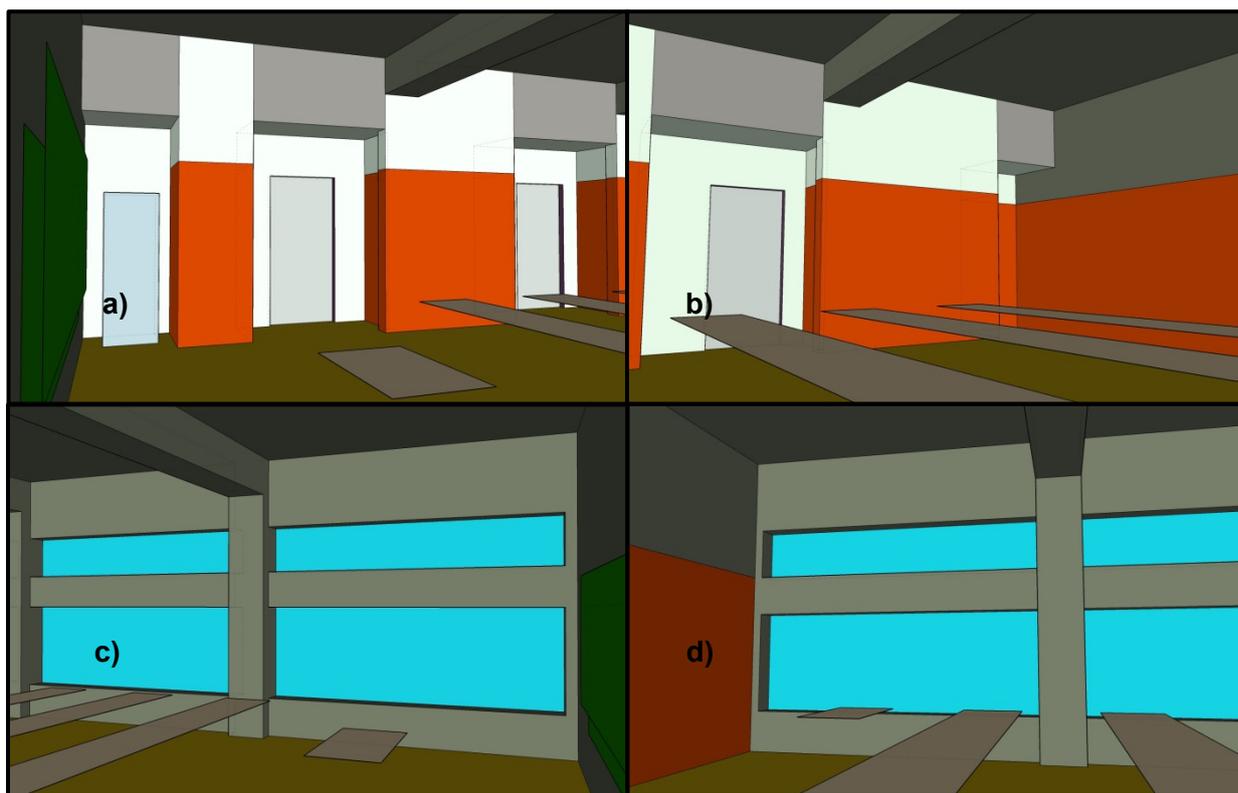
Tabelle 4.14: CATT-berechnete und gemessene Ergebnisse vom vorbereiteten Modell des Raumes LS XIV

Wie man in *Tabelle 4.14* sehen kann, gleichen die CATT-Ergebnisse den objektiven Ergebnissen nicht genau. Die Abweichungen aller Parameter ab 250Hz sind maximal 10% von den gemessenen Werten entfernt, was als eine gute Annäherung betrachtet werden könnte.

Die STI-Werte wurden aus dem Datenblatt abgelesen, indem die Werte für jede Position über alle Frequenzen gemittelt sind. Für unsere Simulation war es daher noch notwendig die Werte über alle Positionen zu mitteln, um ein Vergleich mit der Messung zu ermöglichen.

Der von CATT berechnete D_{50} Parameter bei 125Hz hat eine **relative** Abweichung zum gemessenen Wert von ca. +30%. Diese Abweichung ist zwar hoch, ist aber auf die Ungenauigkeit vom CATT-Acoustic bei diesem Frequenzband zurückzuführen [17] und wird in späterer Folge als Korrektur subtrahiert (siehe *Abbildung 4.2*).

HSFSI1



- - Beton
- (Tische und Türstock) - Holz
- (Fenster) - Glas
- - Beton
- - PVC
- - Glas
- - Lochabsorber 1
- - Lochabsorber 2
- - WOODEN_DOOR
- - Linoleum
- - Gips

Abbildung 4.13: Unsaniertes Modell des Raumes HS FSI1 mit der Flächenbeschreibung;
a) und b): Blick auf die Seiten- und Rückwand; c) und d): Blick auf die Fensterseite und Rückwand

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Beton	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Glas	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Holz	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
Linoleum	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Gips	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Lochabsorber 1	0,07	0,13	0,09	0,17	0,02	0,02
Lochabsorber 2	0,03	0,03	0,03	0,03	0,18	0,15
PVC	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
WOODEN DOOR	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10

Tabelle 4.15: Absorptionsgrade verschiedener Materialien in der Abbildung 4.13 von HS FSI1 im nicht vorbereiteten Zustand [18]

Die Vorbereitung von HS FSI1 erfolge auf gleiche Weise wie die des Raumes LS XIV (die Absorptionsgrade in der *Tabelle 4.15* wurden eingestimmt). Weil die unvorbereiteten Daten für die Sanierung nicht von Interesse sind, wurden nur die simulierte Raumgütemaße von dem bereits vorbereiteten Raum dargestellt.

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T ₂₀ Messung [s]	2,45	1,80	1,47	1,08	1,13	1,11
T ₂₀ CATT [s]	2,40	1,79	1,46	1,06	1,09	1,08
Abweichung [s]	-0,05	-0,01	-0,01	-0,02	-0,04	-0,03
t _s Messung[ms]	167	139	109	81	83	82
t _s CATT [ms]	184	137	111	81	84	83
Abweichung [ms] ²	+17	-2	+2	0	+1	+1
D ₅₀ Messung [%]	26	27	36	46	44	46
D ₅₀ CATT [%]	21,5	28,6	34,6	43,9	43,1	43,2
Abweichung D ₅₀ [%]	-4,5	+1,6	-1,4	-2,1	-0,9	-2,8
STI Messung [%]	53					
STI CATT [%]	54					
Abweichung [%]	+1					

Tabelle 4.16: CATT-berechnete und gemessene Ergebnisse vom vorbereiteten Modell des Raumes HS FS11

Eine Besonderheit dieses Raumes ist, dass an den Wänden bereits teilweise Lochabsorber vorhanden waren. Deren Absorptionsgrade konnten nur abgeschätzt werden. Die Werte dafür sind in *Tabelle 4.15* zu finden. Diese Lochabsorber hatten besonders im Tieftonbereich keinen größeren Einfluss auf die Akustik und deren Absorptionskoeffizienten wurden dementsprechend als gering angenommen.

4.2.3 Sanierung der Räume

LSXIV ARCHII

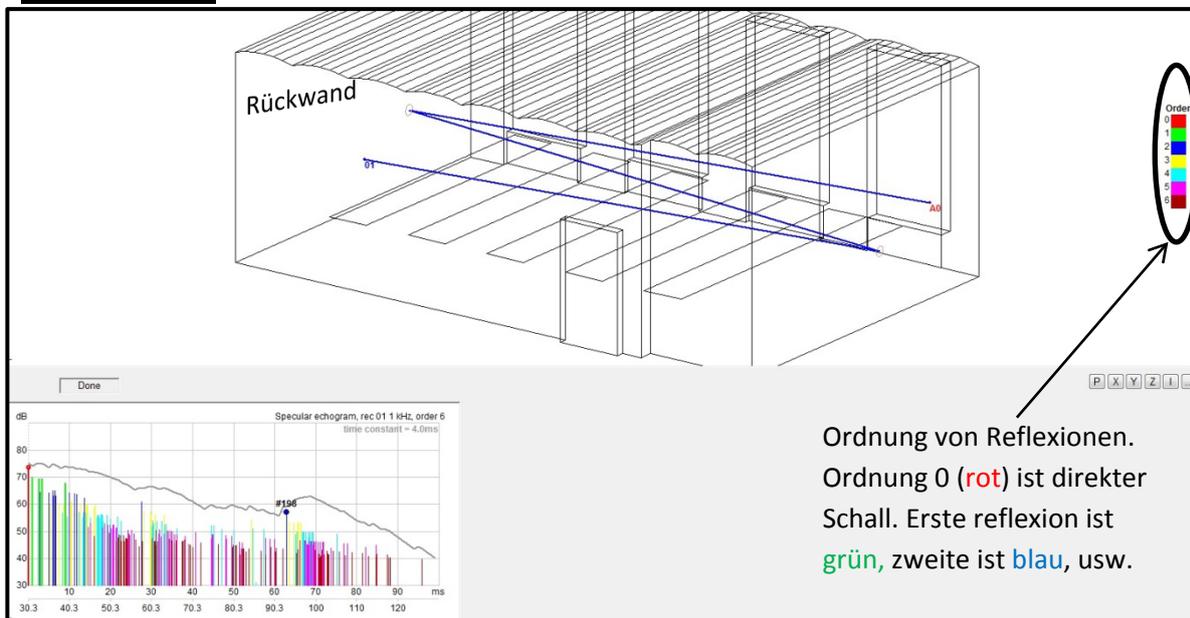


Abbildung 4.14: Echogramm des vorbereiteten Modells LS XIV mit dargestellten Reflexionen bis 6. Ordnung (bei 1 kHz, 198. Reflexion markiert)

² Der relevante Frequenzbereich für die Schwerpunktszeit ist von 500Hz bis 4000Hz.

In diesem Kapitel werden die Ideen von Abschnitt 4.1 übernommen um diese mithilfe der Simulation zu überprüfen. Dort wurde mit der Sabin'schen Nachhallzeitformel die einzubringende Materialfläche für die Sanierung berechnet. Obwohl es eine gute Annäherung ist, gilt es nur für die gleichmäßig verteilte Materialfläche, was in der Praxis aber selten der Fall ist. Darum kann man CATT benutzen, um genau zu überprüfen, wo die Flächen eingebracht werden sollten.

Wie man in der *Abbildung 4.14* sehen kann, gibt es Reflexionen 2. Ordnung (#198 in Diagramm links-unten), die erst zwischen 60ms und 70ms den Hörer erreichen. Diese Reflexionen werden einmal von der Rückwand und nochmals von der Vorderwand reflektiert bevor sie den Empfänger erreichen. Für einen Raum mit parallelen Wänden ist so etwas nichts Außergewöhnliches. Problematisch allerdings ist, dass sie kaum an Energie verloren haben und daher deutlich als Echo wahrnehmbar sind, was für die Anwendung „Sprache“ in diesem Zeitbereich unerwünscht ist. Grund dafür ist die geringe Dämpfung von unverkleideten Wänden. Daher wurde entschieden an der Rückwand Absorber anzubringen.

Es ist ebenso ersichtlich, dass andere Reflexionen höherer Ordnung in der Nähe von der Reflexion #198 (60ms bis 70ms) im Vergleich zu den Reflexionen zwischen 20ms und 30ms kaum leiser sind. Diese sollten auch gedämpft werden.

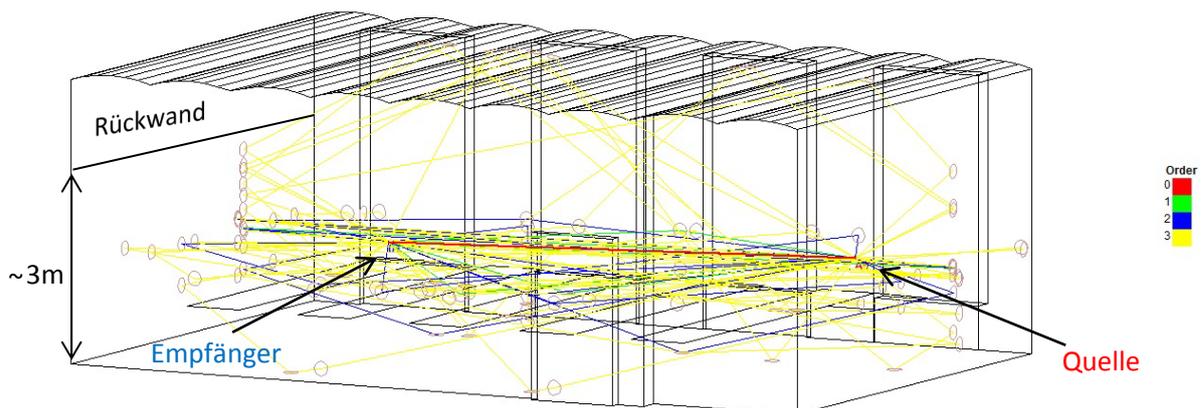


Abbildung 4.15: Echogramm des Modells LS XIV mit dargestellten Reflexionen bis 3. Ordnung

In *Abbildung 4.15* kann man auch die Reflexionen 3. Ordnung sehen (gelb dargestellt). Diese Reflexionen zeigen, dass sehr viel von der Rückwand reflektiert wird. Sie zeigen, dass die Absorber an der Rückwand eine Höhe von ca. 3m haben sollten.

Als Absorbertyp verwenden wir den in Kapitel 4.1 erwähnten **Hartfilz** von „Schreilechner“ (siehe *Tabelle 4.6*). In „CATT-Acoustic“ muss aber auch der Absorptionsgrad bei der Frequenz von 4000Hz eingestellt werden, welcher bei der Vermessung im Impedanzrohr nicht bestimmt werden konnte. Um ihn zu ermitteln, haben wir den Wert im Datenblatt vom Hartfilz (siehe *WS Sound Akustikmaterial 25mm mit 100mm Abstand, Anhang C*) analysiert. Obwohl die Werte aus diesem Datenblatt im Hallraum (nicht im Impedanzrohr, was der Fall bei uns ist) und ohne dünnen Filz gemessen wurden, ist es ersichtlich, dass sich der Wert für 4000Hz ungefähr beim arithmetischen Mittelwert der Werte von 1kHz und 2kHz befindet. Deswegen nehmen wir auch den Mittelwert zwischen dem Absorptionsgrad von 1kHz und 2kHz aus unserer Messung (in *Tabelle 4.6*). Dieser beträgt 0,7.

Aus dem „Time Trace“ im „TUCT“ könnte man auch sehen, dass besonders zwischen den parallelen Wänden die Energie lang hin und her reflektiert wird, ohne wirklich abgeschwächt zu werden. Akustisch zeigt sich das in Form von „Flatterechos“.

Obwohl auch von der Vorderwand der Großteil reflektiert und nicht absorbiert wird, wurde diese nicht verkleidet. Da diese Reflexionen nur eine sehr kleine Zeitdifferenz zum Direktschall haben, haben sie eine positive Wirkung auf die Sprachverständlichkeit. Die Vorderwand dient als Reflektor. Wie aus der *Berechnung 4.10* ersichtlich, wird ca. **45m²** benötigt. Die Rückwand hat 27m², die restlichen Absorber werden an den Seitenwänden verteilt.

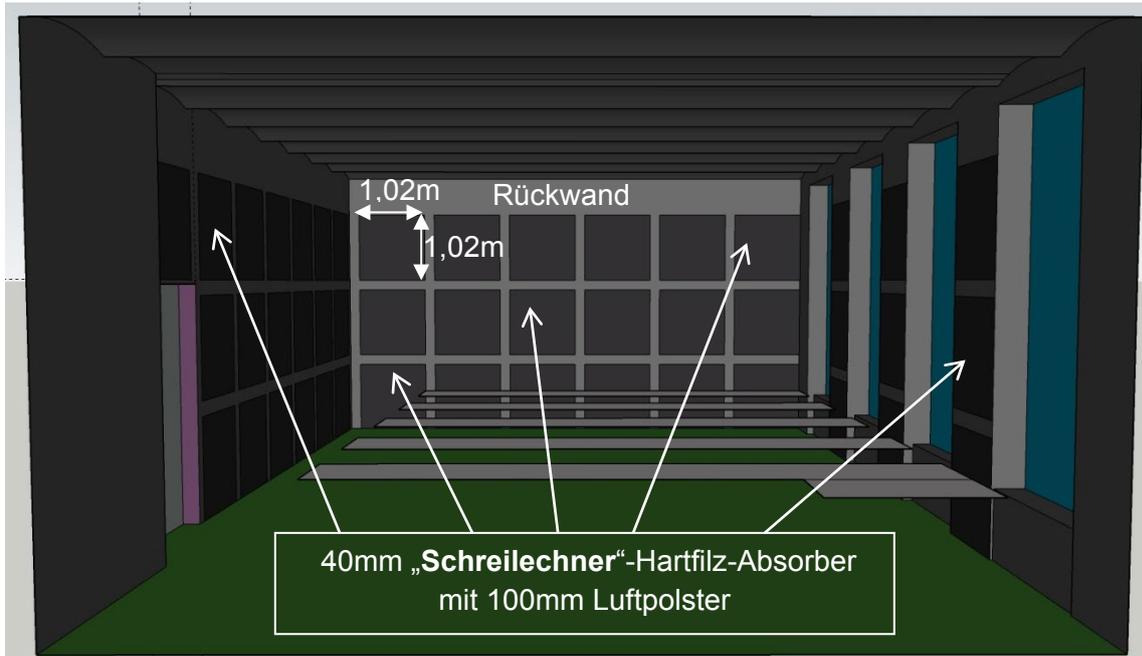


Abbildung 4.16: SketchUp Modell der ersten Version des sanierten Raumes LS XIV mit den Positionen von den neuen Absorberflächen

In der *Abbildung 4.17* kann man die Absorberflächen von 1m x 1m sehen.

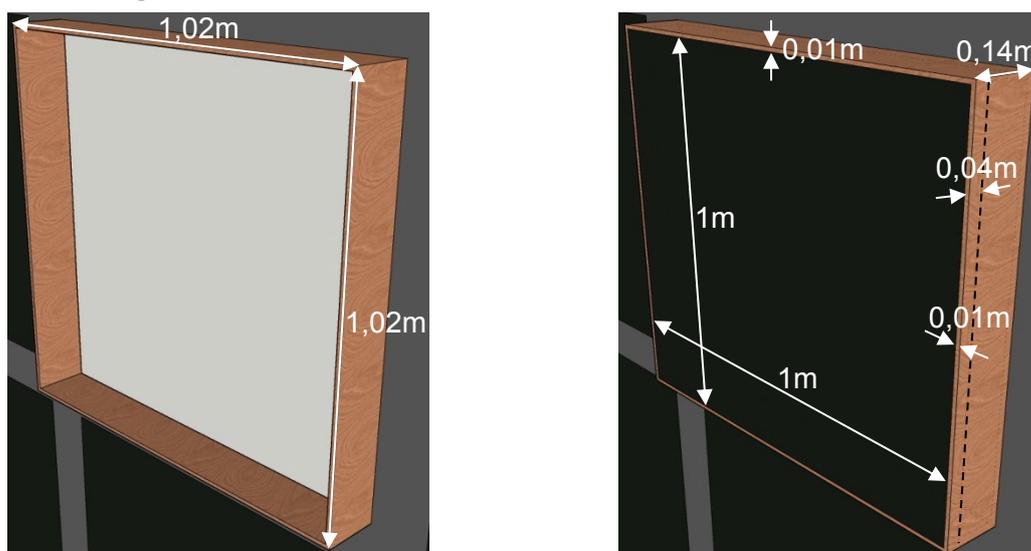


Abbildung 4.17: SketchUp Modell des **Hartfilz**-Absorbers (mit realen Dimensionen, nicht für CATT-Acoustic): links - Holzrahmen; rechts - Holzrahmen mit Absorber (Dicke 40mm)

Die untenstehenden Abbildungen sollen dazu dienen, die Absorber genau zu positionieren (siehe *Abbildungen 4.19, 4.20 und 4.21*). Wichtig ist, dass obwohl es in der Simulation so aussieht, als wären die Absorber direkt an der Wand montiert, müssen diese bei Montage den Wandabstand von 100mm einhalten. Wie es in Wirklichkeit aussehen sollte, kann man in *Abbildung 4.17* sehen.

Unsere erste Version der Sanierung hatte den Raum akustisch nicht komplett optimiert, obwohl **47m²** von den absorbierenden Flächen eingebaut wurden und laut der *Berechnung 4.10* nur circa **45m²** nötig wären. Die Nachhallzeiten für 125Hz, 250Hz und 500Hz sind noch leicht über dem Toleranzband; Deutlichkeitsgrad D_{50} hatte bei denselben Frequenzen den Mindestwert von 50% noch nicht erreicht; Auch bei dem Sprachübertragungsindex (*STI*) liegen die Ergebnisse nicht bei den Sollwerten.

Wir haben versucht zu vermeiden, die ganze Rückwand mit Absorbern zu verkleiden. Nur so war es aber möglich, passende Werte für die Raumgütemaße zu bekommen (siehe *Abbildung 4.18*). Das bestätigt unsere schon erwähnte Vermutung, dass die Reflexionen zwischen Vorder- und Rückwand für die ungünstigen Ergebnisse der Raumgütemaße verantwortlich waren.

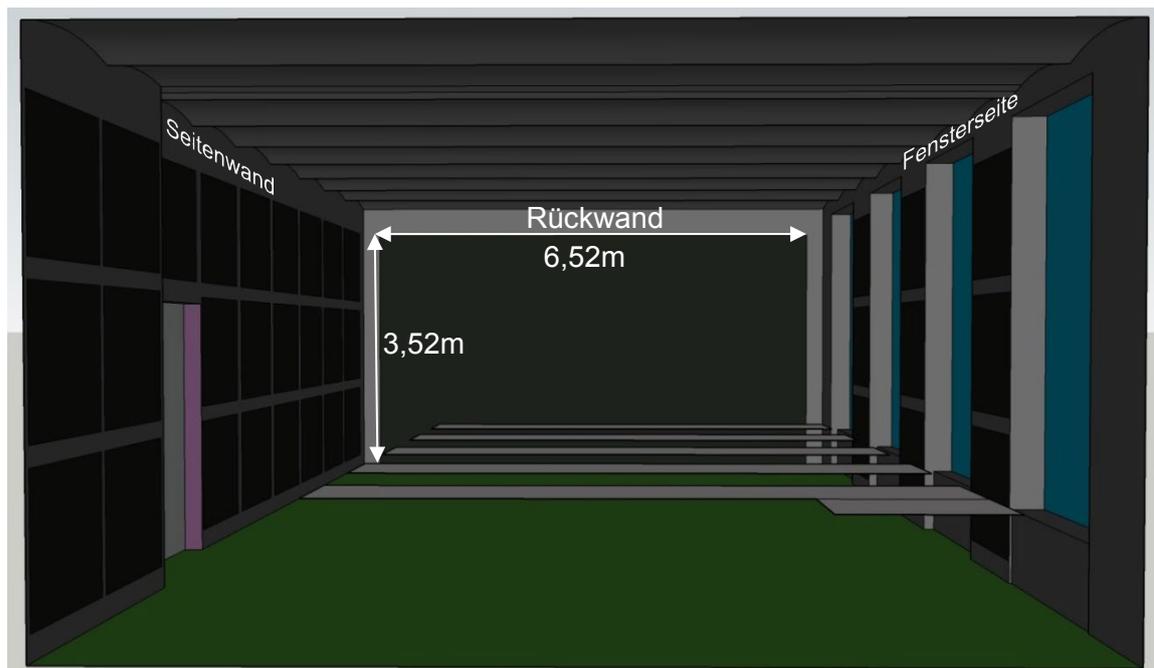


Abbildung 4.18: Finale Simulation des sanierten Raumes LS XIV mit den neuen Positionen der Absorberflächen

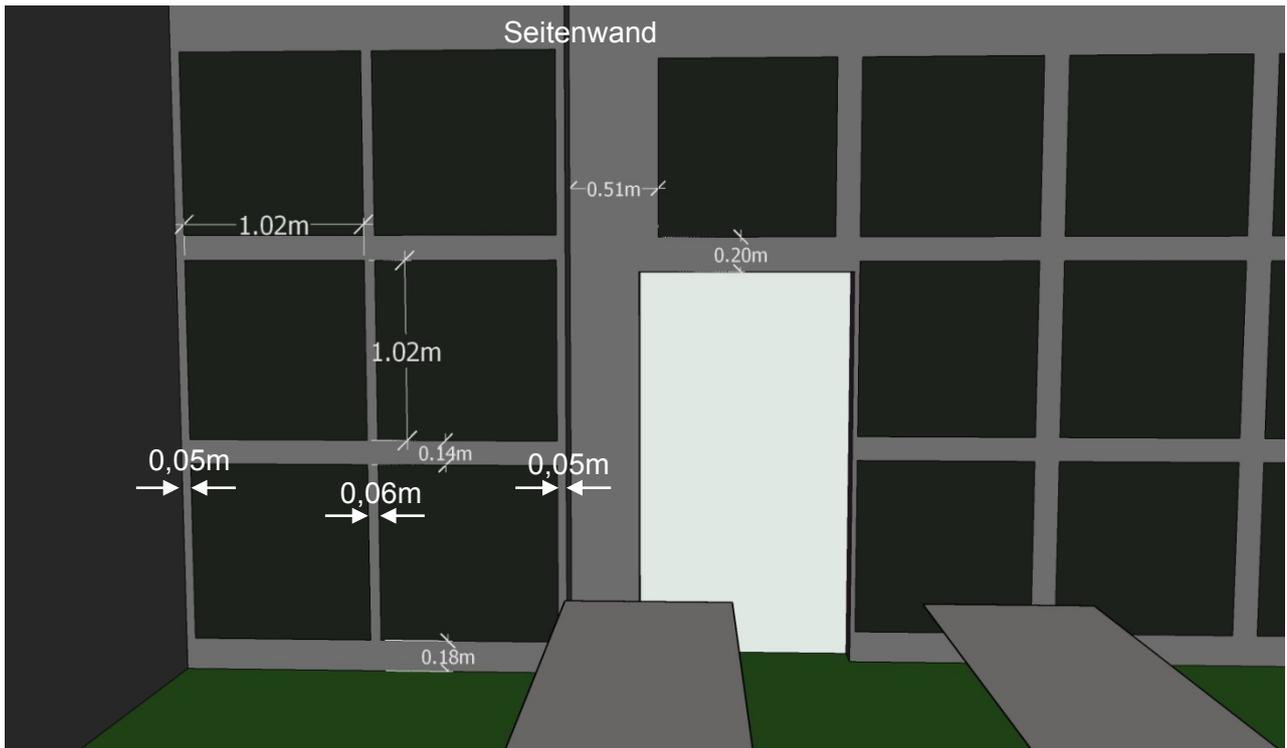


Abbildung 4.19: Absorberpositionen an der Seitenwand (links von der Tür) im Modell des sanierten Raumes LS XIV



Abbildung 4.20: Absorberpositionen an der Seitenwand (rechts von der Tür) im Modell des sanierten Raumes LS XIV

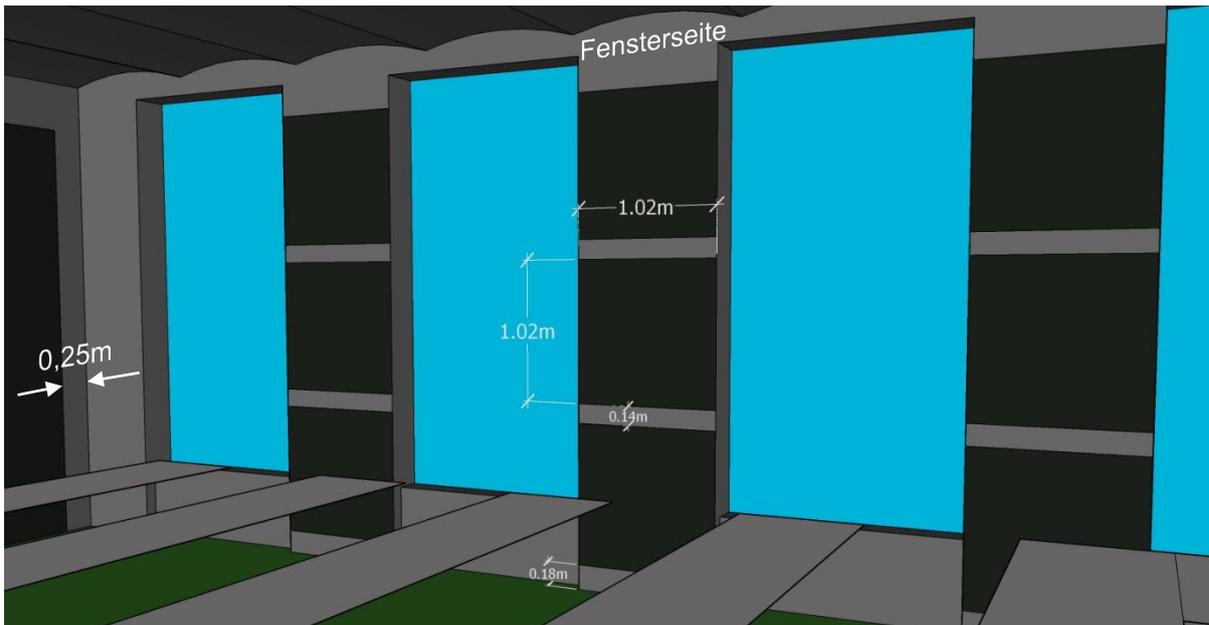


Abbildung 4.21: Absorberpositionen an der Fensterseite im Modell des sanierten Raumes LS XIV

Die Soll-Werte für das Modell wurden aus dem Datenblatt für den Raum LS XIV ARCHII (Anhang E) gelesen. Für eine übersichtlichere Darstellung wurden die Werte in folgender Tabelle zusammengefasst:

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{20} obere Grenze [s]	0,95		0,95			0,95
T_{20} untere Grenze [s]	0,51		0,62			0,51
t_s obere Grenze [ms]	irrelevant		65			
t_s obere Grenze [ms]	irrelevant		49			
D_{50} untere Grenze [%]			50			
STI untere Grenze [%]			60			

Tabelle 4.17: Soll-Werte für Raumgütemaße des Raumes LS XIV

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{20} unsaniert [s]	1,71	1,84	1,62	1,27	1,21	1,04
Abweichung von gemessenen T_{20} [s]	-0,12	-0,01	-0,04	+0,02	+0,02	+0,04
T_{20} saniert (aus CATT) [s]	0,95	0,88	0,97	0,94	0,75	0,78
T_{20} saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [s]	1,07	0,89	1,01	0,92	0,73	0,74
t_s unsaniert [ms]	137	134	119	96	93	80
Abweichung von gemessenen t_s [ms]	-25	0	-3	0	-3	-2
t_s saniert (aus CATT) [ms]	68	64	69	68	55	56
t_s saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [ms]	93	64	72	68	58	58
D_{50} unsaniert [%]	27	31	32	37	40	45
Abweichung von gemessenen D_{50} [%]	+8	+1,2	+2,3	+3	+4,3	+1,5
D_{50} saniert (aus CATT) [%]	52,5	53,3	50,7	51,8	59	58,5
D_{50} saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [%]	44,5	52,1	48,4	48,8	54,7	60
STI unsaniert [%]	54					
Abweichung von gemessenen STI [%]	-2					
STI saniert (aus CATT) [%]	62					
STI saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [%]	64					

Tabelle 4.18: CATT-berechnete Parameter des sanierten Modells von Raum LS XIV (verglichen mit den Soll-Werten aus Tabelle 4.17)

In der Tabelle 4.18 ist gezeigt, dass:

- die T_{20} -Werte des Raumes meistens innerhalb des Toleranzbandes sind. Die Werte für 125Hz und 500Hz befinden sich außerhalb des Toleranzbandes. Bei 125Hz ist die Abweichung 11% von der oberen Grenze des Toleranzbandes; bei 500Hz ist diese 6%. Da sich alle anderen T_{20} Werte innerhalb der Grenzen befinden, werden diese Abweichungen als akzeptabel angenommen;
- die t_s -Werte des Raumes nur bis 7ms zur Grenze abweichen;
- die D_{50} -Werte nicht überall innerhalb der Grenzen sind, sind aber ebenso akzeptabel (5% Abweichung von der Grenze);
- die STI Werte im „Gut“-Bereich liegen (über 60%), sind aber im Vergleich zu dem Raum vor der Sanierung extrem verbessert worden (Mittelwert um 10% erhöht).

Da die Sanierung auch ästhetisch sein sollte, haben wir uns entschieden die Absorber nur an den Wänden zu platzieren. Eventuell wäre es sonst noch möglich, bestimmte Werte (wie D_{50} und T_{20} bei 125Hz) zu verbessern (wird im Abschnitt 5.1 genauer diskutiert).

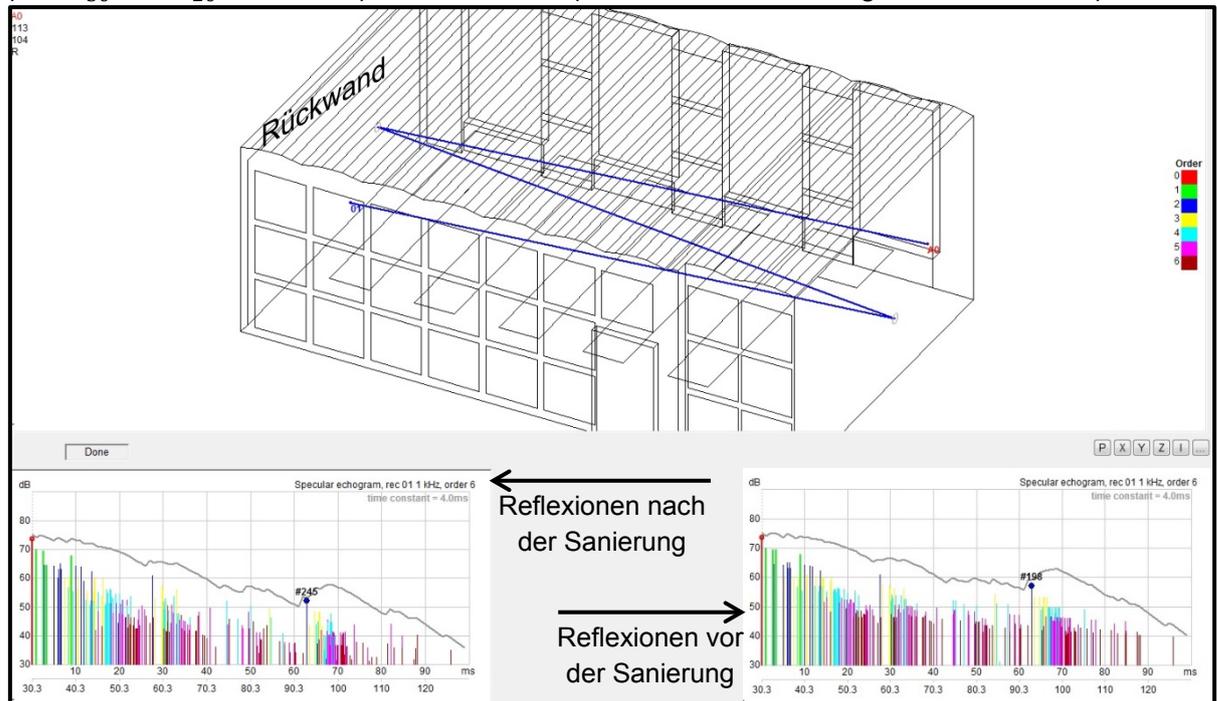


Abbildung 4.22: Echogramm von saniertem und vorbereitetem Modell des Raumes LS XIV mit dargestellten Reflexionen bis 6. Ordnung (bei 1 kHz)

In *Abbildung 4.22* sieht man die Reflexionen bis zur sechsten Ordnung vor der Sanierung im Vergleich zu den Reflexionen nach der Sanierung. Besonders auffallend ist, dass die späte Reflexion **#245** bzw. **#198** zweiter Ordnung, die vorher deutlich lauter als die anderen zeitgleichen Reflexionen war, jetzt um ca. 6dB leiser ist.

Es ist ebenso ersichtlich, dass alle Reflexionen nach 50ms gedämpft wurden, was zu höheren Werten des Deutlichkeitsgrades führt.

Die **grüne** Reflexionen (Reflexionen erster Ordnung), die zu einer guten Sprachverständlichkeit beitragen, sind in etwa gleich geblieben.

Insgesamt sind bei diesem Sanierungsvorschlag **56,75m²** des „**Schreilechner**“-Absorbers verwendet worden. Es sind also um **11,75m²** mehr benötigt worden als berechnet. Diese Abweichung lässt sich durch die ungleichmäßig positionierten Absorber im Raum erklären.

HS FS11

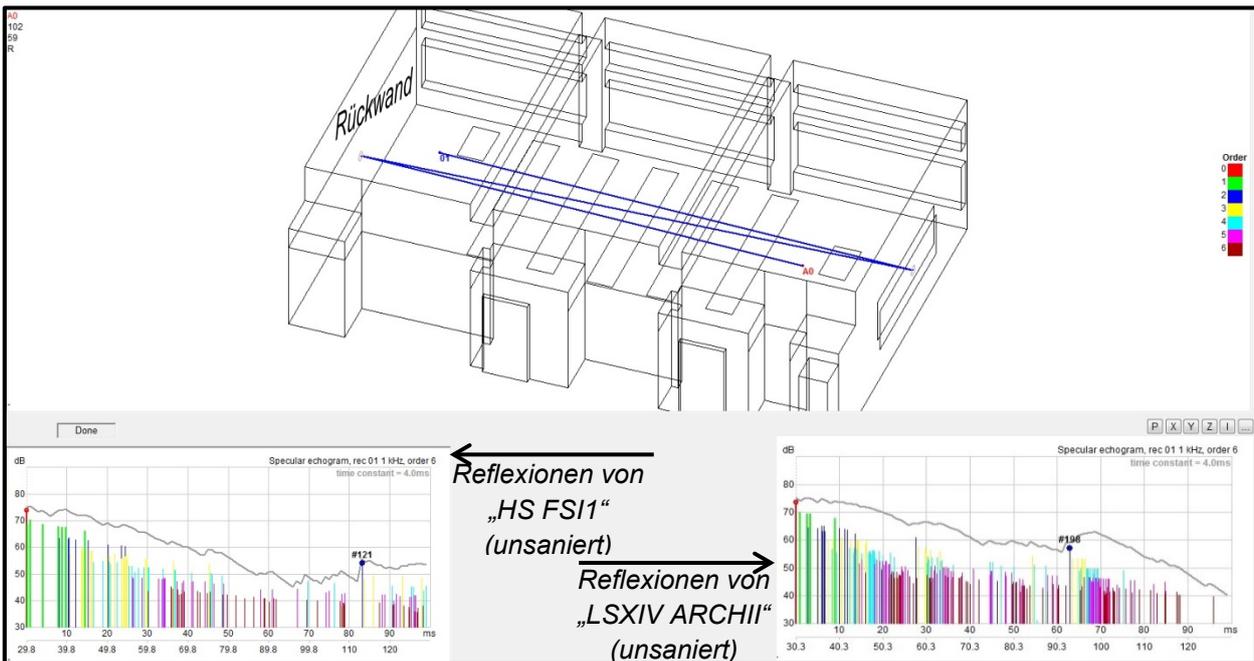


Abbildung 4.23: Echogramm vom vorbereiteten Modell des Raumes HS FS11 und LS XIV mit bis zur 6. Ordnung dargestellten Reflexionen (bei 1 kHz, „Rückwand-Vorderwand“ Reflexion (121. bzw. 198.) markiert)

Gleich wie bei dem Modell vom Raum LS XIV, gibt es hier auch spätere Reflexionen die störend sein können (siehe *Abbildung 4.23*). Die lange, schon erwähnte, „Rückwand-Vorderwand“ Reflexion passiert in diesem Modell noch später (#121, zwischen 80ms und 90ms) als beim Modell vom Raum LS XIV.

Auch hier haben wir uns entschieden, dass man die Rückwand mit Absorbieren verkleiden sollte, um späte Reflexionen zu dämpfen, und das Flatterecho zu vermeiden.

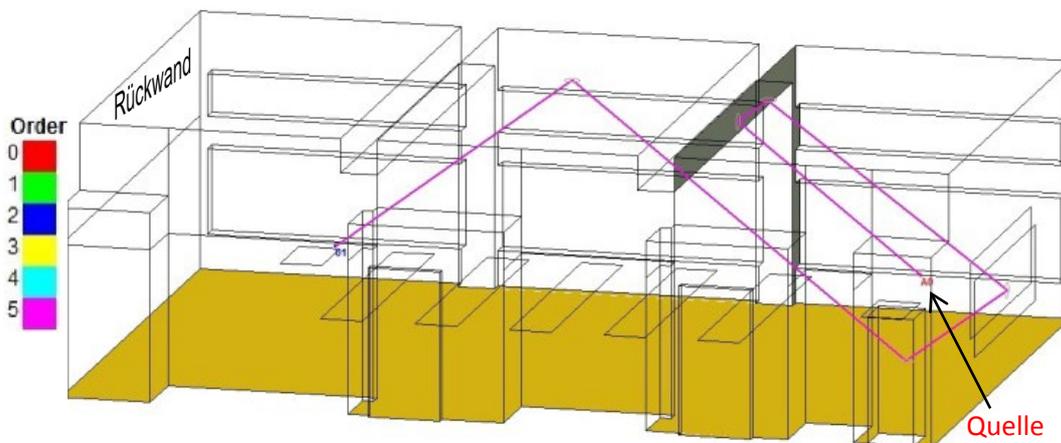


Abbildung 4.24: Bilder aus dem Echogramm mit einer durch den Unterzug verhinderten Reflexion (angetroffene Flächen gefärbt)

Schon im Abschnitt **4.1.3** wurde erwähnt, dass es bei dem Raum HS FS11 nicht möglich war, mit nur einem Absorbertyp ein akzeptables Ergebnis zu bekommen. Einer der Gründe ist in *Abbildung 4.24* ersichtlich. Zu sehen ist eine Reflexion, die wegen des Unterzuges erst in Richtung des Tafels reflektiert wurde, bevor sie auf den Hörer trifft. Die Ordnung der Reflexionen wird also dadurch erhöht. Dieses Problem trifft nicht auf tiefe Frequenzen zu, da diese um die Streben gebeugt werden.

Man stelle sich nun vor, die Decke sei eine gerade flache Fläche. In diesem Fall würde die Deckereflexion nach nur einer Reflexion (1. Ordnung) auf den Hörer treffen. Frequenzen über 1kHz werden dabei von der Decke größtenteils reflektiert. Dies ist mit einem Material möglich, das im Hochtonbereich einen niedrigen Absorptionskoeffizienten hat.

Deshalb haben wir uns für den Deckenabsorber **TOPAKUSTIK 5/3T** mit **Vlies SP 63A** und **Schafwolle Doscha Typ PP 2** (siehe *Anhang C*) entschieden. Da im Datenblatt eine **Abhängehöhe von 516mm** vorgeschrieben ist, passt es perfekt, um eine möglichst ebene Decke zu erzielen. Die Absorptionsgrade können aus *Tabelle 4.9* ausgelesen werden.

Die benötigten **40m²** Deckenabsorbers wurden so positioniert, um die Montage bautechnisch realisierbar zu halten und akustisch die größtmögliche Wirkung zu erzielen.

In der Mitte ist nur schwer möglich, Absorber an der Decke zu montieren, da dort Lüftungsrohre verlegt sind weswegen wir uns entschieden haben, die Absorber auf die äußeren beiden Drittel des Raumes zu verteilen (siehe *Abbildung 4.25* und *Abbildung 4.26*).

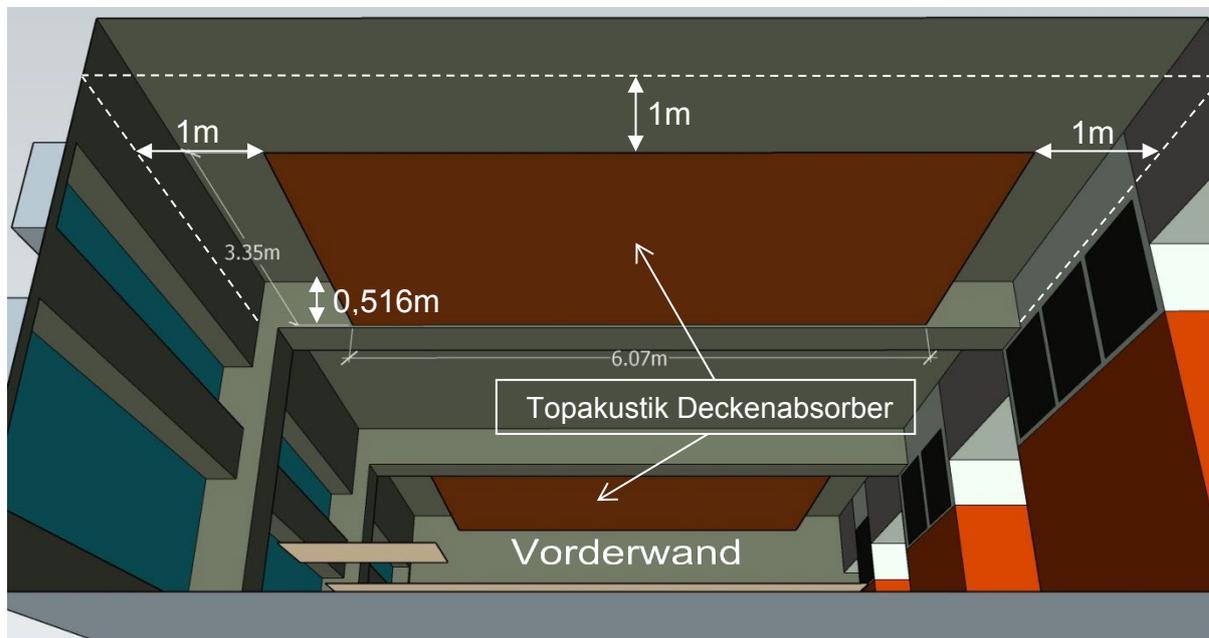


Abbildung 4.25: Absorberpositionen an der Decke neben der Rückwand im Modell des sanierten Raumes HS FS11

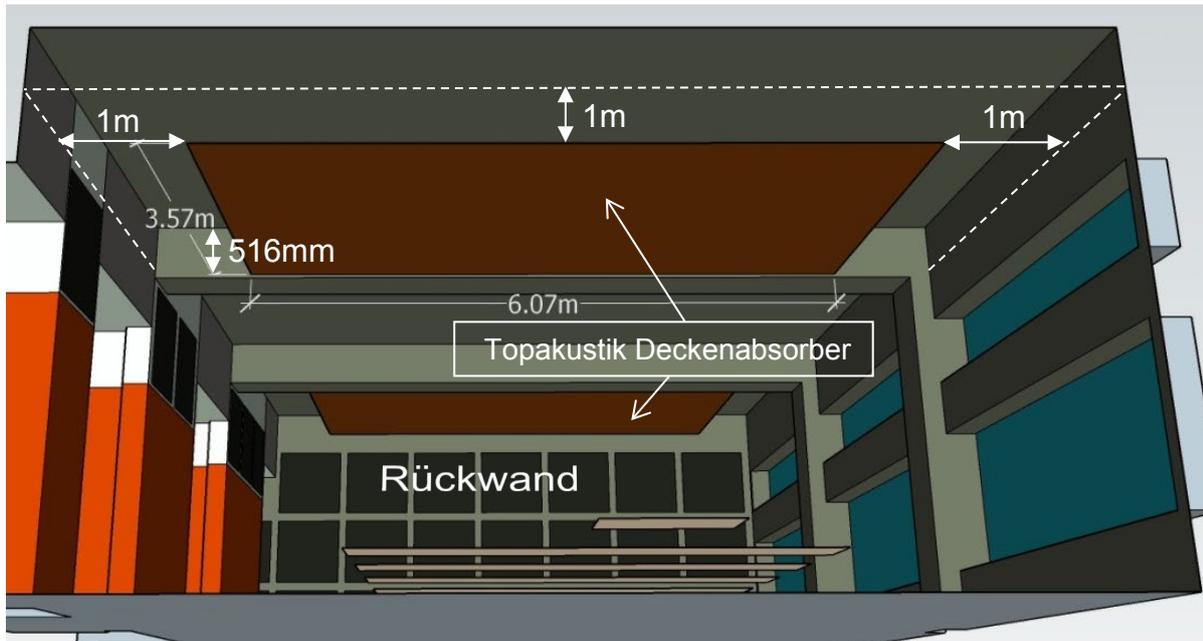


Abbildung 4.26: Absorberpositionen an der Decke neben der Vorderwand im Modell des sanierten Raumes HS FS1

Um die Sanierung fertigzustellen, muss noch **29m²** des „Schreilechner“-Hartfilz-Absorbers eingebracht werden. Diese Absorber sorgen für eine gute Dämpfung im Mittel- und Hochtonbereich.

Diese zusätzliche Absorptionsfläche haben wir an der Rückwand positioniert (siehe *Abbildung 4.27*). Wie in der Sanierung vom Raum LS XIV, haben wir auch hier ein Raster verwendet. Da die gewünschten Nachhallzeiten noch nicht erreicht wurden, haben wir die Absorber auch an den Seitenwänden verteilt (siehe *Abbildung 4.28*).

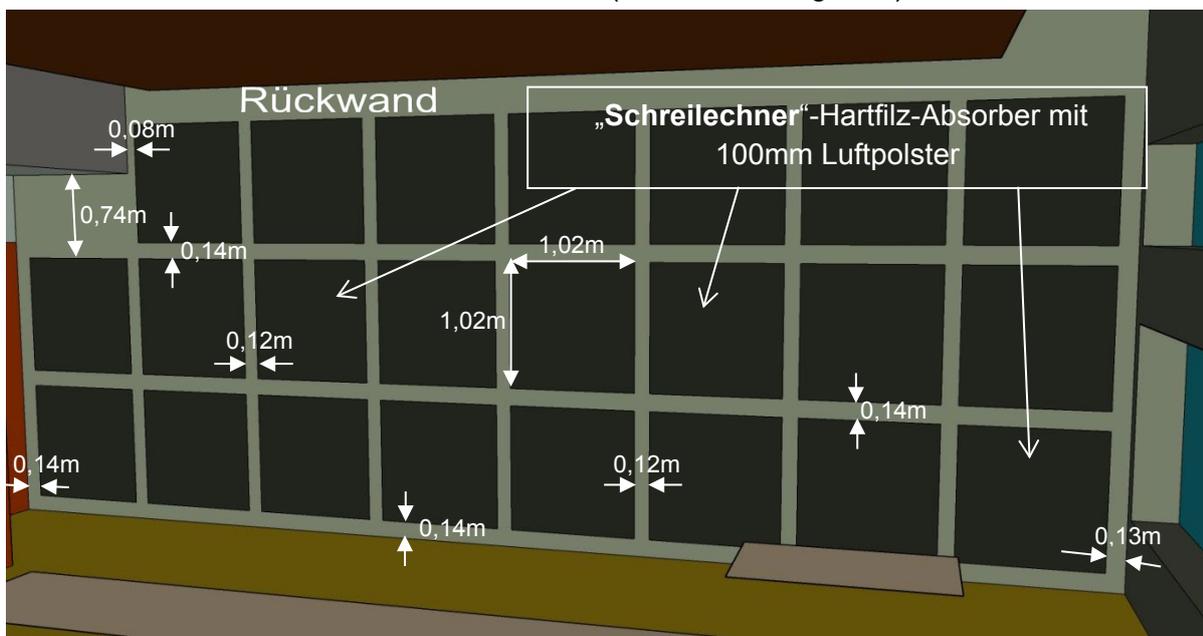


Abbildung 4.27: Positionen der Absorber an der Rückwand im Modell des sanierten Raumes HS FS1

Frequenz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{20} unsaniert [s]	2,45	1,80	1,47	1,08	1,13	1,11
Abweichung von vorbereiteten T_{20} [s]	-0,05	-0,01	-0,01	-0,02	-0,04	-0,03
T_{20} saniert (aus CATT) [s]	1,08	0,92	0,82	0,68	0,72	0,79
T_{20} saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [s]	1,13	0,93	0,83	0,70	0,76	0,82
t_s unsaniert [ms]	167	139	109	81	83	82
Abweichung von vorbereiteten t_s [ms]	+17	-2	+2	0	+1	+1
t_s saniert (aus CATT) [ms]	81	68	60	54	55	60
t_s saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [ms]	64	70	58	54	54	59
D_{50} unsaniert [%]	26	27	36	46	44	46
Abweichung von vorbereiteten D_{50} [%]	-4,5	+1,6	-1,4	-2,1	-0,9	-2,8
D_{50} saniert (aus CATT) [%]	44	48,6	55	59,7	58,5	55,5
D_{50} saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [%]	48,5	47	53,6	61,8	59,4	58,3
STI unsaniert [%]	53					
Abweichung von vorbereiteten STI [%]	+1					
STI saniert (aus CATT) [%]	63					
STI saniert, objektiv (Abweichungen einberechnet) [%]	62					

Tabelle 4.20: CATT-berechnete objektive Parameter des sanierten Modells von Raum HS FS11 (verglichen mit den Soll-Werten aus der Tabelle 4.19)

In der Tabelle 4.20 ist zu sehen, dass:

- die T_{20} Werte innerhalb des Toleranzbandes für diesen Raum sind (125Hz leicht unterdämpft);
- die t_s Werte überall innerhalb des Toleranzbandes liegen;
- die D_{50} -Werte nicht überall im Toleranzband aber akzeptabel sind (3% Abweichung von der Grenze);
- die STI Werte im „Gut“-Bereich liegen. Im Vergleich zum unsanierten Zustand ist der Mittelwert um 9% erhöht.

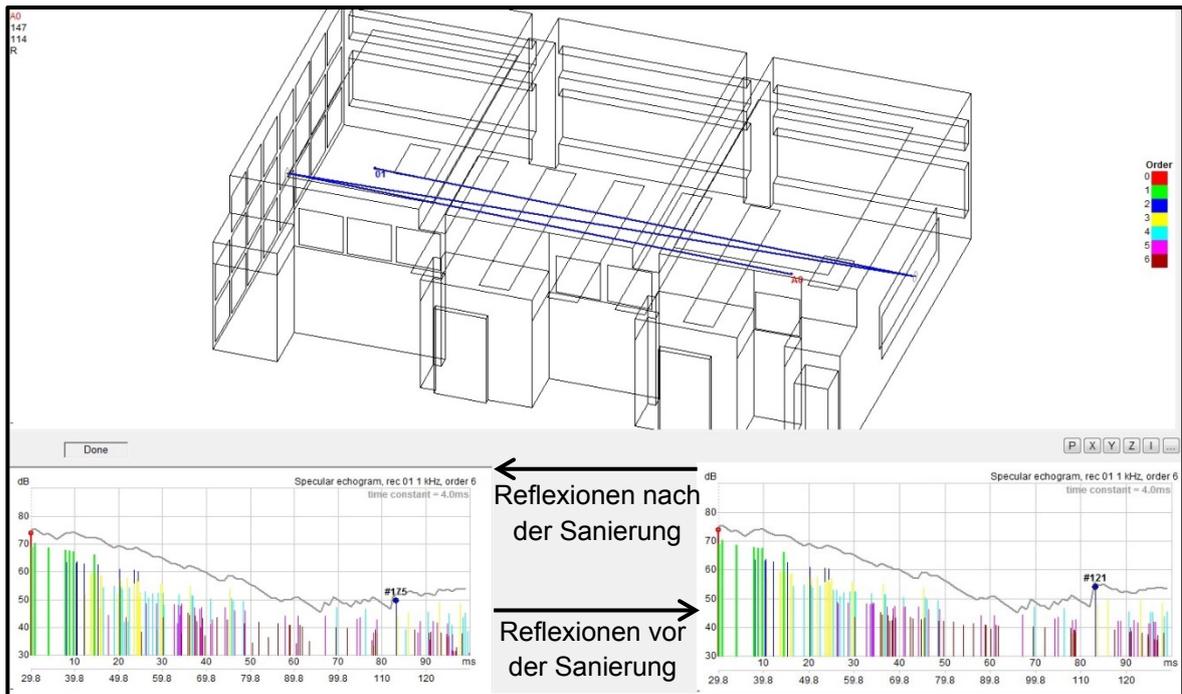


Abbildung 4.29: CATT-erstelltes Echogramm vom sanierten und vorbereiteten Modell des Raumes HS FSI1 mit dargestellten Reflexionen bis 6. Ordnung (bei 1 kHz, 175. bzw. 121. Reflexion markiert)

In der *Abbildung 4.29* kann man erkennen, dass, die „Rückwand-Vorderwand-Reflexion“ (wie im Echogramm für LS XIV) um mehr als 6dB gedämpft wurde.

Gleich geblieben ist der Pegel der Reflexionen erster Ordnung, welche zu einer guten Sprachverständlichkeit beitragen. Die Flächen, an denen die Reflexionen erster Ordnung reflektiert werden, sind unverändert.

Da im Fall von HS FSI1 nur die Rückwand mit Absorbern verkleidet wurde, werden dementsprechend insgesamt weniger Reflexionen als beim LS XIV gedämpft. Das ist auch aus dem Echogramm zu erkennen. Es wurden aber trotzdem gute Ergebnisse erzielt (siehe *Tabelle 4.20*).

Durch die flache Decke wird die Laufzeit der Deckenreflexionen vermindert. Die späten Reflexionen sind im Zeitbereich nach vorne verschoben. Das ist auch der Grund warum die Nummer von betrachteten Reflexion in *Abbildung 4.29* erhöht ist (von #121 zu #175). Die Nachhallzeit wird dadurch verbessert.

Was nicht so leicht aus dem Echogramm zu erkennen ist, ist die bessere Verteilung von Schallwellen (Schallenergie) im Raum. Darum analysiert man noch folgende Abbildungen:

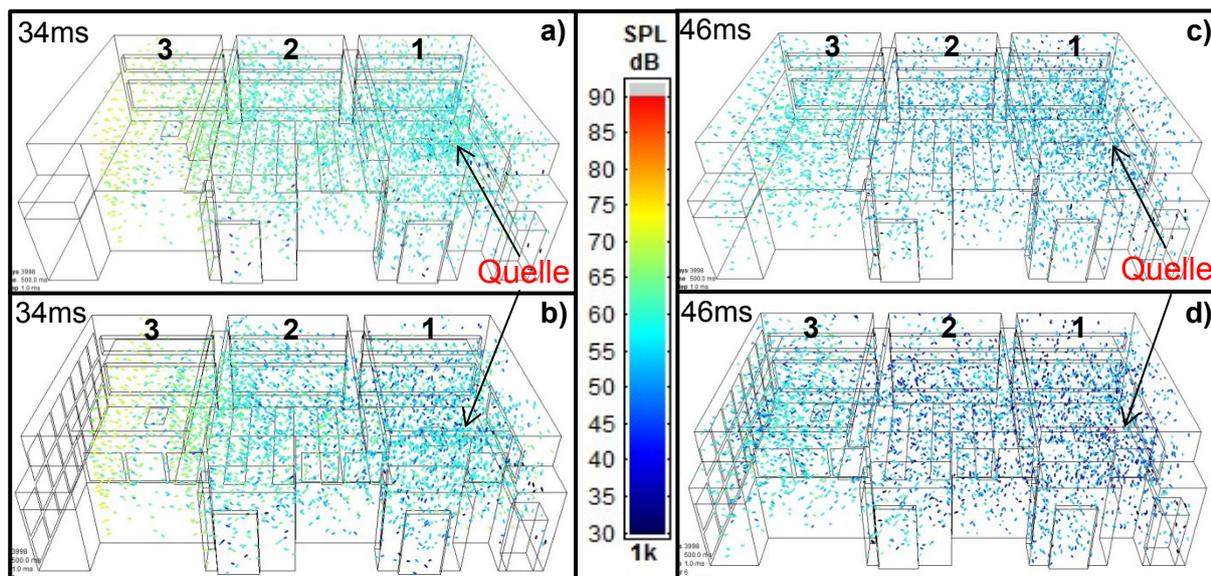


Abbildung 4.30: Bilder aus dem „Time Trace“ vom 1kHz omnidirektionellen Schallwelle im Modell des Raumes HS FS11 (unterteilt in 3 Volumenbereichen): a) Zeitpunkt 34ms, unsaniert; b) Zeitpunkt 34ms, saniert; c) Zeitpunkt 46ms, unsaniert; d) Zeitpunkt 46ms, saniert

Aus dem „Time Trace“ wurden die 4 Zustände des Modells erstellt. Die Punkte die unterschiedlich gefärbt sind, sind die einzelne Schallwellen, die aus der Quelle omnidirektional gespielt wurden. In der *Abbildung 4.30* kann man sehen, dass das ganze Volumen, für Analyse, in **3 Volumenbereiche** unterteilt wurde und zwar:

- Bereich 1 zwischen der Vorderwand und erstem Unterzug;
- Bereich 2 zwischen den zwei Unterzügen;
- Bereich 3 zwischen dem zweiten Unterzug und der Rückwand.

Auf den Bildern a) und b) kann man die Situation nach 34ms im unsanierten und sanierten Zustand sehen. Betrachtet man das unsanierte Zustand in a), ist die Energie viel dichter im Bereich 1 als im Bereich 2 verteilt. Nach der Sanierung (Zustand b)) ist sie viel besser verteilt, weil die Schallwellen weniger dicht und leiser (mehr dunkel blau) im Bereich 1 und etwas dichter im Bereich 2 sind. Das heißt, dass die Schallwellen im Bereich 1 nicht mehr durch den Unterzug verhindert werden.

Das gleiche kann man auf den Bildern c) und d) sehen, nachdem die Schallwellen sich auch im Bereich 3 verteilt haben. Im sanierten Zustand (d)) kann man sehen, dass die Bereiche 2 und 3 „mehr dunkel blau“ sind. Diese Schallwellen im Bereich 3 im sanierten Zustand sind die Schallwellen, die durch den Bereich 1 etwas gedämpft aber nicht verhindert wurden. Diese Reflexionen waren im unsanierten Zustand c) im Bereich 1 oder 2 gesperrt, was die Verständlichkeit im Bereich 3 verschlechtern kann. Die Schallenergie im Bereich 1 wäre dann im Vergleich zu den Bereichen 2 und 3 zu groß.

Am besten ist die Verteilung von der Energie in allen 3 Bereichen nach der Sanierung im Zustand d) sichtbar. Dies hat unsere Vermutungen bzgl. der Wirkung von Deckenabsorber bestätigt. Es wurde eine größere Diffusität im Raum erreicht.

Der große Unterschied im Vergleich zum LS XIV ist, dass die berechnete Fläche aus dem Kapitel 4.1.3 und die der Simulation übereinstimmen und der Grund dahinten wird im Kapitel 5.2 genauer erklärt.

5 Fazit

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte der Arbeit diskutiert und daraus die Ranglisten der Hörsäle und Materialien erstellt.

Es folgt eine Zusammenfassung dieser Diskussionen in den wichtigsten Erkenntnissen unserer Arbeit.

Abschließend werden noch Fragen und Aufgaben für diejenigen gestellt, die sich in Zukunft mit diesem Thema beschäftigen oder das Projekt weiterführen wollen.

5.1 Diskussion

Impedanzrohrmessung

Aufgrund einer Resonanzerscheinung bei unseren ersten Vermessungen der Hartfilzprobe um 600Hz, wurde die Probe leicht zugeschnitten. Die Resonanz wurde zwar entfernt, leider war danach der Schallabsorptionsgrad bei 63Hz leicht verschlechtert. So hatte unsere Testmessung mit einfachem Filz bei dieser Frequenz einen Absorptionsgrad von 0,22, spätere Messungen von Proben mit ähnlichem Aufbau Werte um 0,17. Dieser Effekt ist ausschließlich bei diesem Frequenzband erkennbar. Es kann daher sein, dass die Dämpfung im 63Hz - Frequenzband höher als berechnet sein wird.

Für Sanierung und Simulation vom LS XIV haben wir die Absorptionswerte der Probe von Schreilechner verwendet. Da es aber weder interessant aussieht, noch Ziel des Projekts der ArchitektInnen war, 50 m² des gleichen Absorbers herzustellen und zu verwenden, haben wir uns entschieden, den ArchitektInnen einen Pool von zehn Absorbertypen für die Sanierung zur Auswahl zu stellen (siehe Tabelle 5.1). Damit bleibt ein gewisser Spielraum in der Gestaltung übrig, ohne eine größere Änderung auf die Akustik auszuüben. Die Abweichung von der Referenzprobe zu dem Mittelwert der verschiedenen Typen liegt je nach Frequenz bei maximal 10%.

Name \ Frequenz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz
Resch	0,21	0,53	0,81	0,71	0,65	0,83
Schreilechner	0,22	0,50	0,76	0,63	0,62	0,77
Acar	0,19	0,51	0,82	0,74	0,64	0,83
Feldbacher	0,17	0,53	0,79	0,78	0,72	0,93
Stirner	0,18	0,55	0,76	0,72	0,65	0,84
Radl	0,17	0,52	0,79	0,76	0,66	0,85
Schlichtinger	0,22	0,57	0,78	0,65	0,63	0,79
Hoffmann	0,17	0,56	0,77	0,72	0,70	0,89
Hoffmann	0,17	0,56	0,81	0,73	0,67	0,85
Bürgler	0,21	0,51	0,76	0,71	0,68	0,87
Mittelwert	0,19	0,53	0,79	0,72	0,66	0,85

Tabelle 5.1: Absorptionskoeffizienten für senkrechten Schalleinfall der zehn besten Proben der Architekturstudierenden bei einem Abstand von $x = 100\text{mm}$ zur Rückwand.

Falls die Sanierung doch nur mit einem Material durchgeführt wird aber aus ästhetischen Gründen ein anderer Absorber ausgewählt werden sollte, empfehlen wir die Probe vom **Schlichtinger**. Nach einer Probesimulation in CATT-Acoustic wurde ersichtlich, dass diese Probe ein sehr ähnliches Ergebnis zu dem vom Schreilechner liefert.

Objektiver Vergleich der Hörsäle

Um nach den Messungen eine Rangliste der Hörsäle erstellen zu können, haben wir uns entscheiden müssen welche Parameter wir für die Bewertung verwenden. Weiters musste überlegt werden, wie diese zu werten sind, weil sie unterschiedlich stark schwanken. Um die Bewertung sowohl übersichtlich und verständlich als auch zu der Rangliste der vorherigen Bachelor-Arbeit kompatibel zu halten, entschieden wir uns schlussendlich für eine Rangliste nach der Nachhallzeit T_{20} . Auch ist es uns nur bei diesem Parameter möglich, das Publikum miteinzurechnen. Ein weiteres Argument für die Bewertung nach T_{20} war, dass es sich viele andere raumakustische Parameter daraus berechnen lassen (z.B. Al_{cons} oder BR).

Wir haben uns entschieden, drei Ranglisten zu erstellen. Eine für leere (*Tabelle 5.2*), bei der die Werte der Messung verwendet wurden, eine für halbvolle (*Tabelle 5.3*) und eine Rangliste für volle Hörsäle (*Tabelle 5.4*). Es ist wichtig, dass in allen Fällen eine ausreichend gute Verständlichkeit gegeben ist. Das Publikum wurde wie in Kapitel 2.3 besprochen nach Sabine einberechnet.

Platzierung	Hörsaal	Abweichung von T_{opt} in %	Volumenkennzahl in $m^3 / Pers.$
1	HS XII	2	7,2
2	HS VIII	3	4,8
2	HS VI	3	5,5
4	LS XIII	4	14,0
5	HS II	7	20,6
6	HS L	13	5,4
7	HS V	14	9,1
8	HS I	18	4,5
9	LS XIV	86	7,4
10	Bespr.Raum	117	7,1

Tabelle 5.2: Objektive Rangliste der Hörsäle in leerem Zustand

Platzierung	Hörsaal	Abweichung von T_{opt} in %	Volumenkennzahl in $m^3 / Pers.$
1	HS II	1	20,6
2	HS V	2	9,1
3	LS XIII	3	14,0
4	HS XII	9	7,2
5	HS L	10	5,4
6	HS VI	17	5,5
7	HS VIII	19	4,8
8	HS I	32	4,5
9	LS XIV	56	7,4
10	Bespr. Raum	88	7,1

Tabelle 5.3: Objektive Rangliste der Hörsäle in halbvollem Zustand

Platzierung	Hörsaal	Abweichung von T_{opt} in %	Volumenkennzahl in $m^3 / Pers.$
1	HS II	5	20,6
2	HS V	8	9,1
3	LS XIII	9	14,0
4	HS XII	16	7,2
5	HS L	23	5,4
6	HS VI	27	5,5
7	HS VIII	29	4,8
8	LS XIV	36	7,4
9	HS I	41	4,5
10	Bespr. Raum	67	7,1

Tabelle: 5.4: Objektive Rangliste der Hörsäle in vollem Zustand

Vergleicht man die Tabellen 5.2, 5.3 und 5.4, kann man erkennen, dass mit steigender Volumenkennzahl die akustischen Unterschiede zwischen leerem und vollem Raum kleiner werden.

Zum Beispiel ist die Nachhallzeit von HS II in leerem Zustand 7% über dem Optimalwert, in vollem Zustand, dank der hohen Volumenkennzahl, nur 5% darunter.

T_{20} von HS I, einem Hörsaal von ähnlicher Größe, ist in leerem Zustand schon um 18% und in vollem um 41% zu kurz. Der Nachhallzeitunterschied ist wegen der geringeren Volumenkennzahl also fast doppelt so groß.

Subjektiver Vergleich der Hörsäle

Bei der Bewertung der subjektiven Ergebnisse wurden alle Parameter verwendet und ohne Faktor gemittelt. Das war nur möglich, da alle drei Verfasser in etwa gleich streng bewertet haben. In Tabelle 5.5 ist die Rangliste der Bewertung der Verfasser zu sehen, in Tabelle 5.6 die des Publikums. Bewertet wurden die Hörsäle wie im Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

Platzierung	Hörsaal	Grundgeräuschpegel L_{Aeq} in dB(A)
1	HS VIII	34,7
2	HS XII	34,4
3	HS V	40,1
4	Bespr.-Raum	24,4
5	HS VI	34,2
6	HS I	40,5
7	LS XIII	37,2
8	HS II	33,1
9	HS L	40,0
10	LS XIV	39,6

Tabelle 5.5: Subjektive Rangliste der Hörsäle, bewertet von den Verfassern.

Inspiziert man Tabelle 5.5 erkennt man einen groben Trend zwischen der Platzierung und des Grundgeräuschpegels. Zwar ist grundsätzlich die Akustik in einem Raum für die

Sprachverständlichkeit ausschlaggebend, allerdings ist dafür ein gewisser Signal-Rauschabstand Voraussetzung.

Vergleicht man die subjektive mit der objektiven Rangliste bei leerem Zustand, gibt es gewisse Ähnlichkeiten. Zum Beispiel belegen sowohl HS XII und HS VIII Platz eins und Platz zwei. Auch wurde LS XIV mit beiden Bewertungsmethoden schlecht beurteilt.

Es gibt aber auch Räume, die sehr unterschiedlich bewertet wurden, wie zum Beispiel HS L oder der Besprechungsraum. Der Grund, warum HS L subjektiv so schlecht bewertet worden ist, ist der hohe Hintergrundschallpegel, der bei der objektiven Rangliste durch T_{20} nicht berücksichtigt wird. Bei dem Besprechungsraum war genau umgekehrtes der Fall.

Zwar ist die Nachhallzeit in leerem Zustand deutlich zu hoch, der Hintergrundgeräuschpegel allerdings ist ausgesprochen niedrig. Abgesehen davon ist der Raum äußerst klein und daher weitaus akustisch unproblematischer.

Platzierung	Hörsaal	Grundgeräuschpegel L_{Aeq} in dB(A)
1	HS VIII	34,7
2	HS V	40,1
3	HS XII	34,4
4	HS I	40,5
5	HS VI	34,2
6	HS L	40,0
7	HS II	33,1

Tabelle 5.6: Subjektive Rangliste der Hörsäle, bewertet durch Publikum

Die Rangliste der durch die Studenten bewertete Hörsäle ist der oberen ähnlich. Allerdings wurden verschiedene Studenten mit verschiedenen Ansprüchen befragt was die Aussagekraft dieser Rangliste stark mindert.

CATT Simulation

Obwohl sich die Ergebnisse der tiefen Frequenzen in der Simulation meistens im Normbereich befinden, weist „CATT-Acoustic“ darauf hin, die tiefste zwei Frequenzbänder nicht immer korrekt berechnen zu können [17]. Da unsere Berechnungen der Sabin'schen Nachhallzeitformel ähnliche Werte ergeben haben, gehen wir von korrekten Simulationsergebnissen aus.

Aus den absorbierenden Flächen wurde ein Raster erstellt (siehe *Abbildung 4.19*). Wenn man nahe bei einer stark absorbierenden Wand sitzt bekommt man einen merkwürdigen Raumeindruck. Deswegen wird empfohlen, die Absorber in Raster zu verteilen, um ein zu trockenes Klangbild an dieser Stelle zu vermeiden.

Eine weitere Möglichkeit für die Sanierung von LS XIV wäre, die absorbierende Fläche auch an der Decke zu verteilen. Dadurch würde eventuell auch die benötigte Fläche aus der Berechnung mittels Sabin'schen Nachhallzeitformel mit der laut Simulation notwendigen Fläche übereinstimmen (siehe Kapitel **4.1.2**).

Wie man in der *Abbildung 4.25* sehen kann, sind die Abmessungen vom Deckenabsorber: 3,35m x 6,07m bzw. 3,57m x 6,07m. Zur leichteren Fertigung kann ohne akustische Auswirkungen auch eine Abmessung von: **3,5m x 6m** verwendet werden.

5.2 Erkenntnisse

Messpunktdichte:

Da die Messungen mit zwei verschiedenen Messpunktdichten durchgeführt wurden, war es uns auch möglich, abzuschätzen, wie viele Messpunkte für einen Hörsaal ausreichen. Dazu wird an dieser Stelle ein Vergleich vom Hörsaal HSII und Lehrsaal XIV dargestellt.

Beim HSII wurde mit zwei Mikrofon- und zwei Quellenpositionen gemessen. Objektiv befindet sich dieser Raum am 5. Platz auf der Rangliste in leerem Zustand und am **1. Platz** in halbvollem- und vollem Zustand. Subjektiv wurde er von den Studierenden aber als der **schlechteste** Raum am Campus Alte Technik bewertet. Bei unserer subjektiven Evaluierung befindet er sich am 8. Platz. Es wurde nur der Hörsaal HS L am Campus Alte Technik als schlechter empfunden. Die objektiven Ergebnisse haben also unseren und den Eindruck der Studierenden nicht bestätigt.

Auf der anderen Seite wurde im LS XIV mit sechs Mikrofon- und zwei Quellenpositionen gemessen. Er gilt sowohl subjektiv als auch objektiv bei allen Ranglisten als der schlechteste Raum (Ausnahme: voller Zustand, wo er sich am 8. Platz befindet).

Der Grund für diese starke Abweichung von subjektiven und objektiven Ergebnissen bei HSII könnte die geringe Anzahl an Messpositionen sein. Wenn ein Mikrofon nah zur Schallquelle und das andere weit von der Schallquelle steht, ist die Sprachverständlichkeit an den näheren Stellen meistens gegeben und an der anderen nicht. Wenn man dann aber diese zwei Ergebnisse mittelt, kann es passieren, wie es beim HSII der Fall war, dass sich die gemittelte Gütemaßen überall im normgerechten Bereich befinden, obwohl man aus subjektiven Eindrücken weiß, dass es tatsächlich nicht so ist.

Wenn die Mikrofone aber an sechs Positionen überall im Raum verteilt werden, stimmen die objektiven und subjektiven Ergebnisse besser überein.

Daher wird es empfohlen, Hörsäle immer nach der ÖNORM EN ISO 3382-1 zu vermessen. Falls es sich um einen gewöhnlichen Raum mit größerem Volumen für die Anwendung Sprache handelt, sollte sich man in der ÖNORM EN ISO 3382-2 fürs Präzisionsverfahren entscheiden.

Relevanz der subjektiven Evaluierung:

Mit der Ausnahme vom HS II, hatten die subjektiven und objektiven Ergebnisse einzelner Parameter (siehe Netzdiagramme in Datenblättern, *Anhang E*) bei allen Hörsälen gleiche Tendenzen. Sowohl diese Erkenntnis, als auch der Fall vom HSII weisen auf das Gleiche hin: **die subjektive Evaluierung ist sehr wichtig und kann eine fehlerhafte Messung andeuten.** Eine zu große Abweichung der subjektiven von den objektiven Ergebnissen, kann bedeuten, dass die Messung wiederholt werden muss. Deswegen wird empfohlen, immer eine subjektive Evaluierung durchzuführen und diese auch gut zu dokumentieren.

Subjektive Beschreibung des Bassverhältnisses:

Der einzige Parameter, bei dem die Tendenzen von subjektiven und objektiven Ergebnissen stark abweichen, ist das Bassverhältnis. Subjektiv wurde einem hohen Bassverhältnis die Beschreibung „brummend“ und einem niedrigen die Beschreibung „klirrend“ zugeordnet. Bei sogar 5 Hörsälen (LS XIII, HS XII, HS VI, HS V, HS II) wurde der jeweilige Raum als eher klirrend bezeichnet obwohl er objektiv ein eher hohes Bassverhältnis besitzt (d.h. eher brummend ist). **Deswegen schlagen wir vor, dass dem Bassverhältnis eine passendere subjektive Bezeichnung zugeordnet wird** (z.B. „dünn“ und „fett“).

Volumenkennzahl:

Eine weitere hilfreiche Erkenntnis war, dass die Volumenkennzahl (Volumen pro Person in einem Raum) nicht nur eine Anforderung an die Raumgröße für das Wohlbefinden des Publikums darstellt, sondern auch das Ausmaß der Auswirkung des Publikums auf die Akustik beschreibt: **je größer die Volumenkennzahl, desto weniger Einfluss hat die Absorption des Publikums auf die Nachhallzeiten**. Diese Abhängigkeit ist zwar offensichtlich, wird aber nirgends in der Literatur erwähnt. Die Volumenkennzahl kann dazu verwendet werden, auf den ersten Blick zu sagen, wie viel Einfluss Publikum auf die Akustik hat.

(Ir-)relevanz der Schwerpunktszeit:

Der Parameter, der am wenigsten Auskunft über die Akustik gibt, war unserer Meinung nach die **Schwerpunktszeit t_s** . **Da die idealen Grenzen dieses Parameters sich in verschiedener Literatur voneinander unterscheiden, ist es auch schwer, sie richtig zu interpretieren**. Eine mögliche Lösung wurde von Frischmann, Hofer und Schiller entwickelt. Diese sollte unserer Meinung nach als ein Ausgangspunkt für zukünftige Forschung sein.

Zuverlässigkeit der Sabin'schen Nachhallzeitformel:

Die Sabin'sche Nachhallzeitformel basiert auf einem Modell mit diffusem Schallfeld und nimmt keine Rücksicht auf die Position von Absorbern und Geometrien des Raumes. Deswegen können tatsächliche Werte von den berechneten abweichen. Das hat auch unsere CATT-Simulation gezeigt: Bei LS XIV brauchte man ca. 12m² mehr Absorberfläche als berechnet, um auf die normgerechten Grenzen der Nachhallzeit und anderen Parametern zu kommen. Dabei wurden die Absorber nur an den Wänden verteilt. Bei FS11, bei dem die Absorber sowohl an den Wänden als auch an der Decke platziert worden, war für die Sanierung in CATT genau so viel Absorberfläche nötig, wie in Abschnitt 4.1.3 berechnet.

Absorberpositionierung:

Bei einfachen quadratischen Räumen sind Absorber am effektivsten, wenn sie gleichmäßig an allen Flächen verteilt sind. Wichtig dabei ist, dass es keine großen stark reflektierenden parallelen Flächen mehr gibt. Je komplexer ein Raum wird, desto positionsabhängiger ist die Wirkung des Absorbers.

Unnötige Komplexität des 3D-Modells

Obwohl es naheliegen könnte, dass eine Simulation realistischer ist, je genauer es modelliert wurde, muss man in der Akustik bestimmte Effekte in Rücksicht nehmen, die die Simulation nicht berechnen kann. Ein Beispiel ist der Beugungseffekt der von CATT nur in annähernder Form realisiert werden kann. Daher sollte man ein Modell so einfach wie möglich und so detailreich wie notwendig halten.

Zusammenarbeit mit den Architekten:

Es war sowohl für uns Toningenieure als auch die ArchitektInnen interessant, einmal mit der jeweils anderen Sichtweise konfrontiert zu werden. Obwohl beide Seiten im Grunde das Ziel haben, einen Raum zu entwerfen in dem man sich gerne aufhält, legen sie eher wenig Wert auf die anderen Ansprüche. So lernten wir andere Sichtweisen kennen und so manch angehende ArchitektInnen machten sich das erste Mal ernsthafte Gedanken über die Akustik eines Raumes und dessen subjektiven Eindruck.

5.3 Ausblick

Anhand der objektiven- und subjektiven Rangliste, akustischen Datenblättern aber auch der Bachelorarbeit von Frischmann, Hofer und Schiller [4], haben wir uns entschieden, im Rahmen unserer Arbeit den Hörsaal **FSI1** und den Lehrsaal **LS XIV** zu sanieren. Der im „CATT-Acoustic“ entwickelte Sanierungsvorschlag kann als Vorlage für die bautechnische Realisierung verwendet werden. Es wird empfohlen, dass der Besprechungsraum **KRDGo24** ebenso akustisch saniert wird, wobei eine Simulation in diesem Fall nicht notwendig ist. Für die restlichen Räume haben wir folgende Vorschläge und Bemerkungen:

HS I: Einbau von Reflektoren an der Decke, um Energie ins Publikum zu richten;

HS L: Austausch von Glasplatten in der Galerie mit einem akustisch transparenteren Material;

HS V: Austausch von Fenstern mit schallisierenden Fenstern;

HS VI: Einbringung von Reflektoren bei der Tafel, um den Schall nach hinten zu lenken;

HS VIII: Behebung vom Klicken in der Decke bei hinteren Fenstern;

LS XIII: Schallisolation von den Rechnern.

HS II war ein Spezialfall. Der subjektiv schlechteste bewertete Raum war objektiv in allen betrachteten Parametern ausgesprochen gut. Es wird deswegen empfohlen, den Raum nach der ÖNORM 3382-1 neu zu vermessen und dabei eventuell weitere akustische Parameter zu betrachten. Eine mögliche Erklärung für solche Abweichungen wurde im Abschnitt **5.2** besprochen (geringe Messpunktdichte). Es liegt daher nahe, die Abhängigkeit der Messpunktdichte vom Volumen näher zu untersuchen. HS II besitzt das größte Volumen an der Alten Technik und war der einzige Raum, wo sich die subjektiven Bewertungen mit den objektiven Ergebnissen so drastisch widersprochen haben. Nach

dem die ÖNORM 3382-1 nur anhand der Anzahl von Sitzplätzen eine Anzahl von Mikrofonpositionen vorschreibt, wäre es interessant zu betrachten, ab welchem Volumen die Ergebnisse mit 2 Mikrofon- und 2 Quellenpositionen nicht mehr zuverlässig sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Sabine, W. C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*.
Harvard University Press
- [2] Möser, M. (2010). *Messtechnik der Akustik* (1. Ausgabe).
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [3] Rossing D. T. (Ed.). (2007). *Springer Handbook of Acoustics*.
Springer Science+Business Media, LLC New York
- [4] Frischmann C., Hofer R., Schiller K. (2019). *Akustische Bestandsaufnahme der TU – Hörsäle Inffeldgasse*.
Technische Universität Graz
- [5] Schwarz, M. (2008). *Sprachverständlichkeit in Vortragsräumen*.
Technische Universität Graz
- [6] Weinzierl, S. (2008). *Handbuch der Audiotechnik*.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- [7] ÖNORM EN ISO 3382-2: 2009. *Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*.
Austrian Standards Institute
- [8] ÖNORM EN ISO 3382-1: 2009. *Akustik - Messung von raumakustischen Parametern. Teil 1: Aufführungsplätze*.
Austrian Standards Institute
- [9] ÖNORM B 8115-3: 2005. *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau. Teil 3: Raumakustik*.
Austrian Standards Institute
- [10] ÖNORM EN ISO 10534-2: 2001. *Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Teil 2 – Verfahren mit Übertragungsfunktion*.
Austrian Standards Institute
- [11] Brunnader, R. (2002). *Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter*.
Technische Universität Graz
- [12] Deter, S. (2013). *Erstellen eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung von Transmissionsgraden poröser Materialien mit einem Impedanzrohr*.
Technische Universität Berlin
- [13] ÖNORM EN ISO 9921: 2003. *Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation*.
Austrian Standards Institute
- [14] Vorländer, M. (2008). *Auralization*.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
- [15] S. Cerdá, R. Lacatis and A. Giménez (2013). *On Absorption and scattering coefficient effects in modellisation software*.
Acoustics Australia Vol.41, No. 2, August 2013
- [16] Bengt-Inge Dalenbäck, Ph.D., CATT (1999). *Reverberation time, diffuse reflection, Sabine, and computerized prediction*.
- [17] CATT-A v9.1a (2016). *User's Manual*.
CATT Gothenburg 2016
- [18] Seep B., Glosemeyer R., Hulce E., Linn M., Aytar P. (2000). *Classroom Acoustics*.
Acoustical Society of America
- [19] TUCT v2.0a (2016). *User's Manual*.
CATT Gothenburg 2016

Anhang A

Messablaufplan:

- Vor dem Start der Messung sollte man sich über den gewünschten Raum informieren.
 - Verfügbarkeit
 - Zugang ins Gebäude und zum dem Raum
- Checkliste: Kontrolle, ob alle für die Messung notwendigen Gegenstände mitgenommen werden.
- Die Raummaße mit dem im Kleinteilekoffer dafür vorgesehenen Entfernungsmesser abmessen und dadurch das Raumvolumen bestimmen. Die berechneten Werte sollen in das Messprotokoll eingetragen werden (siehe Anhang D).
- Aufbau der Messausrüstung
- Erste Testmessung durchführen. Mithilfe deren Auswertung soll die mittlere Nachhallzeit eingeschätzt und der SNR kontrolliert werden. Durch die Nachhallzeit kann man die Schröderfrequenz sowie die Abstände zwischen Quelle und Mikrofonen berechnen. Bei der Kontrolle des SNRw soll darauf geachtet werden, dass dieser hoch genug ist, um die gewünschte Nachhallzeit zu berechnen.
- Überlegung der Sender- und Empfängerposition. Dafür sollen auf einem Grundrissplan des Raumes die Mikrofonpositionen eingezeichnet werden, sodass sie gut im Raum verteilt sind und die erforderlichen Mindestabstände eingehalten werden. Die Schallquellen sollen dort platziert werden, wo sich der Sender auch beim Normalbetrieb befindet. Die erforderlichen Abstände berechnet man wie folgt:
 - Mindestabstände Mikrofon – Lautsprecher:

$$a = 2 * \sqrt{\frac{V}{c} * T}$$

V ... berechnetes Volumen des Hörsaals[m³]

c ... Schallgeschwindigkeit (≈ 340 m/s)

T ... geschätzte gemittelte Nachhallzeit aus Testmessung (125Hz – 4kHz)

a ... Abstand von Mikrofon zu Lautsprecher

- Abstand Mikrofon – Wand: $\lambda/4 \triangleq 1m$
 - Abstand Lautsprecher – Wand: $\lambda/2 \triangleq 2m$
- Den Hintergrundgeräuschpegel mit dem Schallpegelmessgerät messen („XL2 Audio and Acoustic Analyzer“ von NTi Audio“). Damit wird der äquivalente Dauerschallpegel L_{Aeq} über 10 Sekunden gemessen. Die Messung soll an 3 Positionen durchgeführt werden und zur Vermeidung von Körperschall soll ein Stativ verwendet werden. Das Mikrofon muss kalibriert sein.

- Ausfüllen des Prüfberichts
- Messeinstellungen bei WinMLS vor Beginn der Messung:
 - Einstellung der Quelle:
 - Input: Soundkarte (Mikrofoneingang), Output: Soundkarte (Ausgang)
 - Programmauswahl:
 - Bei WinMLS kann zwischen 1- und 2-Kanal-Messungen gewählt werden. Für 2-Kanal-Messungen wählt man „Impulse/Frequency Response Advanced“ (siehe Abbildung 3.1.1.1)

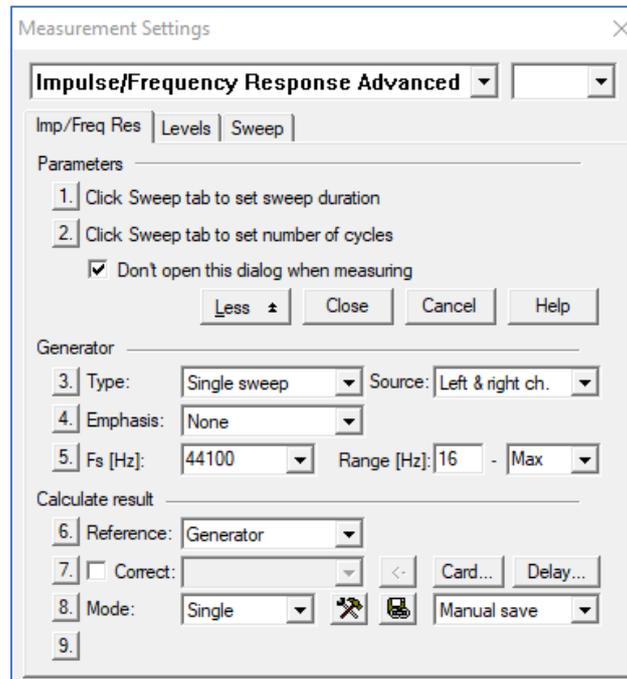


Abbildung 3.1.1.1: Einstellung des Messprogrammes bei WinMLS

- Kalibrierung
 - Mikrofon in den Kalibrator stecken
 - Kanal wählen
 - Im Fenster „Input Level Calibration for Channel X“ den Button „Calibrate“ betätigen
 - Kalibrierwerte des Kalibrators eingeben (siehe Abbildung 3.1.1.2)

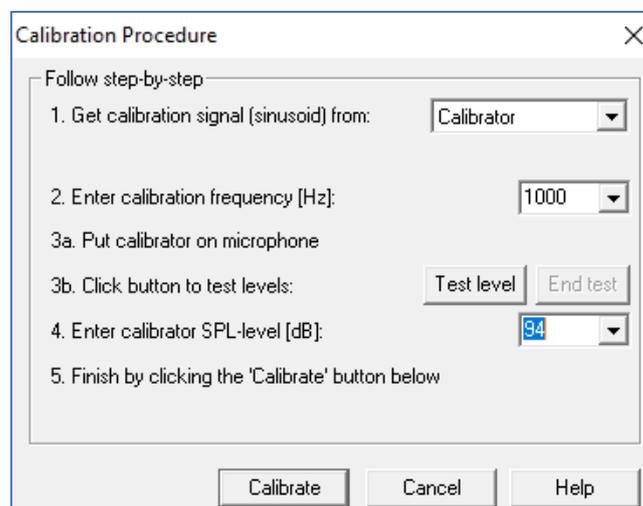


Abbildung 3.1.1.2: Einstellung für die Kalibrierung bei WinMLS

- Denselben Vorgang für den zweiten Kanal wiederholen, falls dieser verwendet wird.
- Eigentliche Messung:
 - a) Einstellung in WinMLS
 - Signaltyp wählen (siehe Abbildung 3.1.1.3)
 - Samplingfrequenz im Programm auf die der Soundkarte einstellen

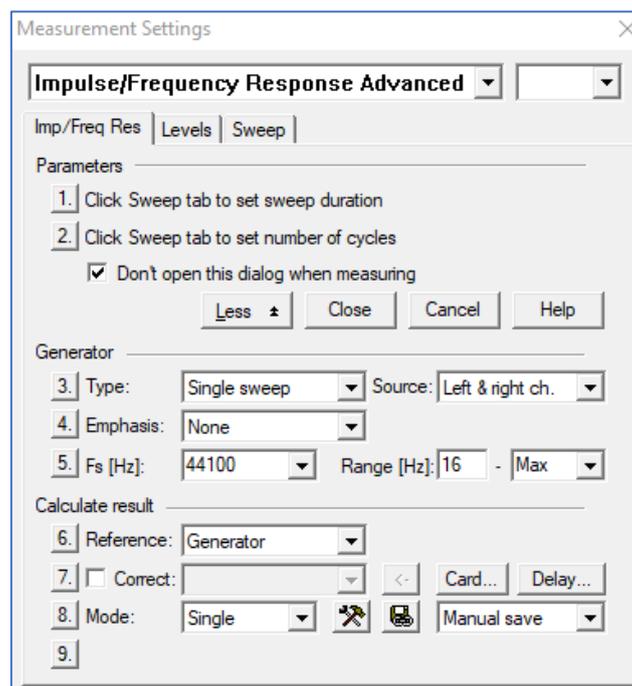


Abbildung 3.1.1.3: Wahl der Messmethode bei WinMLS

- Messung mit Sweep (siehe Abbildung 3.1.1.5)
- Sweepdauer ca. 10s (wegen der hohen Belastung der Membran des Lautsprechers, nicht länger)
- 2-5 Measurements cycles
- Limitierung der Raumimpulsantwort auf 1,5s aufheben (durch Entfernen des Häkchens auf der Einstellungsseite)

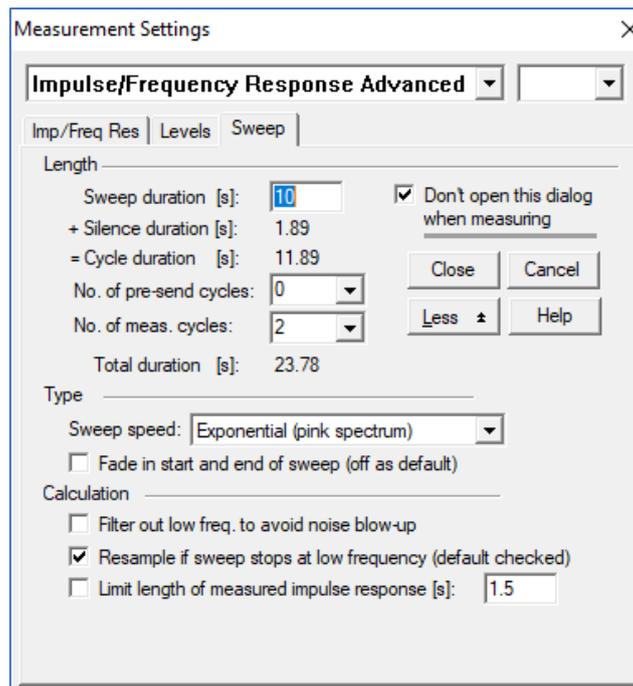


Abbildung 3.1.1.4 Einstellung der Werte bei Messung mit Sweep

- b) Während der Messung sollten sich so wenig Personen wie möglich im Raum aufhalten. Die Mikrofone sollen auf den vorab festgelegten Positionen aufgestellt werden. Durch Betätigung des grünen „Go Buttons“ wird die Messung gestartet. An jeder Mikrofonposition sollte man die genaue Entfernung zwischen Mikrofon und Empfänger ausmessen und im Protokoll notieren. Bei „Ausreißern“ oder unrealistischen Werten ist es empfehlenswert, die Messung zu wiederholen.
- Vor Verlassen des Messraumes soll eine zweite Checkliste ausgefüllt werden, sodass sichergestellt werden kann, die vollständige Messausrüstung wieder zurückzubringen.

Prüfbericht

Anmerkungen	
Raumbezeichnung ,-und Ort:	
Grundriss (Anhang)	
Volumen:	
Anzahl/Art der Sitze:	
Form/Material d. Raumwände/Flächen:	
Besetzung/Anzahl Personen anwesend:	
Bedingungen veränderlicher Einrichtungen	
(Sicherheitsvorhang)	
(Beschreibung Bühne/Konzertzimmer)	
Temperatur [C°]: Luftfeuchte [%]:	
Beschreibung: 1.) Messgerät 2.) Schallquelle 3.) Mikrofon	
Beschreibung Schallsignal:	
(Messpunktdichte)	

Hörsaal:

Datum:

Volumen	$V =$	m^3
Nachhallzeit	$T =$	s

Grundgeräuschpegel (im Nutzbetrieb, z.B. mit Beamer EIN):

$L_{Aeq1} =$	$dB(A)$	vorne
$L_{Aeq2} =$	$dB(A)$	mittig
$L_{Aeq3} =$	$dB(A)$	hinten

Schröderfrequenz:

$$f_{Schröder} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = \quad Hz$$

optimale Nachhallzeit nach ÖNORM 8115-3:

$$T_{opt} = 0,37 \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,14 = \quad s$$

Mindestabstände nach ÖNORM EN ISO 3382-1 bzw. 3382-2 :

Wand ↔ Empfänger = $1m$
Empfänger ↔ Empfänger = $2m$
Sender ↔ Empfänger = $2 \sqrt{\frac{V}{c * T}} = \quad m$

Sender ↔ Empfänger (+20cm Box)		Verstärker	Messmethode	durchgeführt
E1 S1	ch1 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
E1 S2	ch1 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
E2 S2	ch1 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
E2 S1	ch1 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
E3 S1	ch1 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
E3 S2	ch1 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>

E....Empfängerposition S....Senderposition

Anhang B

Fragebogen

Hörsaalakustik

Hörsaal: _____

Sitzreihe: _____

Stimme des Vortragenden über die Anlage: ja/nein (bitte zutreffendes unterstreichen)

- Wie gut verstehen Sie den Vortragenden in diesem Hörsaal? (bitte ein Feld ankreuzen)

Sehr gut

Sehr schlecht

- Wie angenehm empfinden Sie den Raumklang auf Dauer?

Angenehm

Anstrengend

- Welchen Hörsaal am Campus „Alte Technik“ finden Sie, bezüglich Verständlichkeit, besonders gut?
Bzw. welchen besonders schlecht?

- Haben Sie noch zusätzlichen Anmerkungen zu diesem Thema (störende Grundgeräusche, Straßenverkehr, usw.)?

Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme! Die Ergebnisse dieser Umfrage dienen zur Erfassung einer Bachelorarbeit von Studenten der Studienrichtung Elektrotechnik-Toningenieur. Diese Arbeit hat das Ziel, einen Hörsaal am Campus Alte Technik akustisch zu sanieren.

Anhang C

WS Sound Akustikmaterial 25 mm

Akustikmaterial: 100% Polyester, recycelbar
 Ökotex Standard 100
 Produktklasse 1
 gemäß ISO 17050-1
 Brandklasse: B1 gemäß DIN 4102

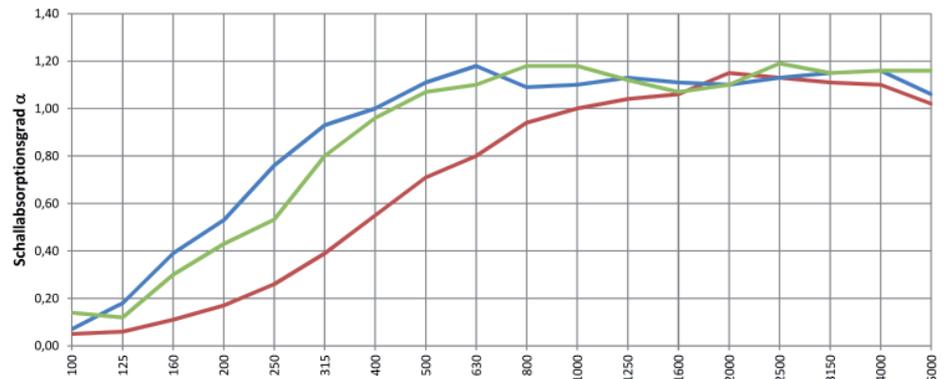
Format: max. 2070 x 3070 mm
Farbe: grau oder weiß
Dicke: 25 mm
Raumgewicht: 160 (kg/m³)
Gewicht (g/m²): 4000g/qm
Berbeitung: lackierung der Oberfläche, schneiden, fräsen, bohren, umformen, verkleben, verschrauben, laminieren, ...



Prüfgegenstand:
 stabiles Akustivlies
 Elementstärke: (Dicke) ca. 25 mm

Prüfaufbau ohne Abstand:
 6 Platten á 2000 x 1000 mm
 ohne Rahmen
 Prüffläche 12m²

Prüfaufbau 200 mm Abstand:
 200 mm Abstand zum Hallboden
 Seiten luftdicht verschlossen
 Prüffläche 11,7 m²

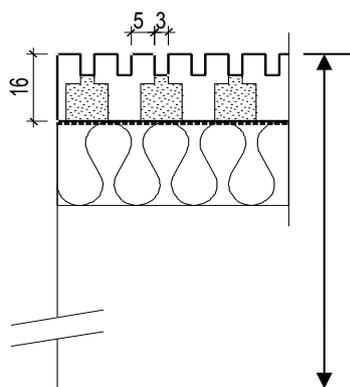


f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α_s ohne Abstand	0,05	0,06	0,11	0,17	0,26	0,39	0,55	0,71	0,80	0,94	1,00	1,04	1,06	1,15	1,13	1,11	1,10	1,02
α_p ohne Abstand		0,05			0,25			0,70			1,00			1,00				1,00
α_s 100mm Abstand	0,14	0,12	0,30	0,43	0,53	0,80	0,96	1,07	1,10	1,18	1,18	1,12	1,07	1,10	1,19	1,15	1,16	1,16
α_p 100mm Abstand		0,20			0,60			1,00			1,00			1,00				1,00
α_s 200mm Abstand	0,07	0,18	0,39	0,53	0,76	0,93	1,00	1,11	1,18	1,09	1,10	1,13	1,11	1,10	1,13	1,15	1,16	1,06
α_p 200mm Abstand		0,20			0,75			1,00			1,00			1,00				1,00

Acoustical Absorption Coefficient according to ISO 354

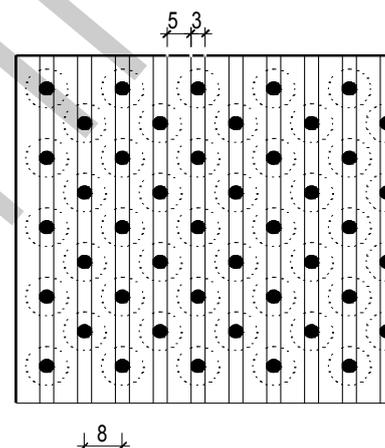
Objet: TOPAKUSTIK® wall- and ceiling panelling
Type TOPAKUSTIK® 5/3 T 5/49%

Research: Laboratory: ITA 18.03.1994
 Test area: 10 m² Relative atmospheric humidity: 67%
 Echo space volume: 218 m³ Temperature: 10 degrees

TOPAKUSTIK® 5/3 T
Acoustic fleece

Sheep wool Doscha Typ PP 2

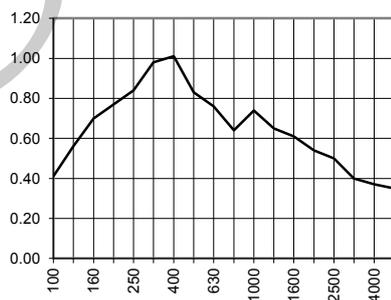
Suspension heights:
216/516 mm
 Cavity 170/470 mm



Acoustical Absorption - Medium values

Low frequency range: (100-315 Hz): 0.71
 Medium frequency range: (400-1250 Hz): 0.77
 High frequency range: (1600-5000 Hz): 0.46

Freq.	Terz
100	0.41
125	0.56
160	0.70
200	0.77
250	0.84
315	0.98
400	1.01
500	0.83
630	0.76
800	0.64
1000	0.74
1250	0.65
1600	0.61
2000	0.54
2500	0.50
3150	0.40
4000	0.37
5000	0.35

Suspension height 216 mm

Acoustical Absorption - Medium values

Low frequency range: (100-315 Hz): 0.75
 Medium frequency range: (400-1250 Hz): 0.75
 High frequency range: (1600-5000 Hz): 0.47

Freq.	Terz
100	0.72
125	0.83
160	0.85
200	0.77
250	0.71
315	0.60
400	0.75
500	0.80
630	0.78
800	0.75
1000	0.74
1250	0.68
1600	0.61
2000	0.54
2500	0.48
3150	0.41
4000	0.37
5000	0.39

Suspension height 516 mm

Anhang D

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



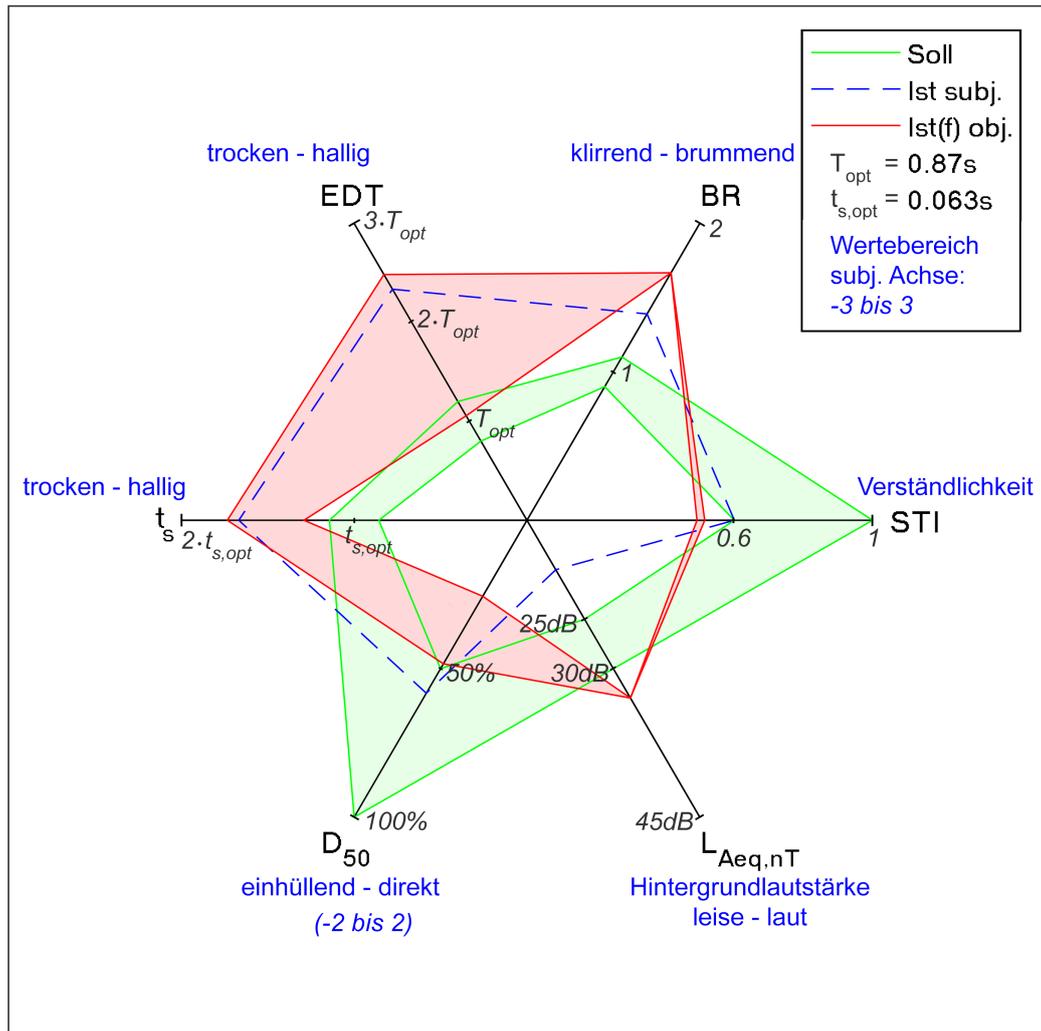
DATENBLATT HSFSI1



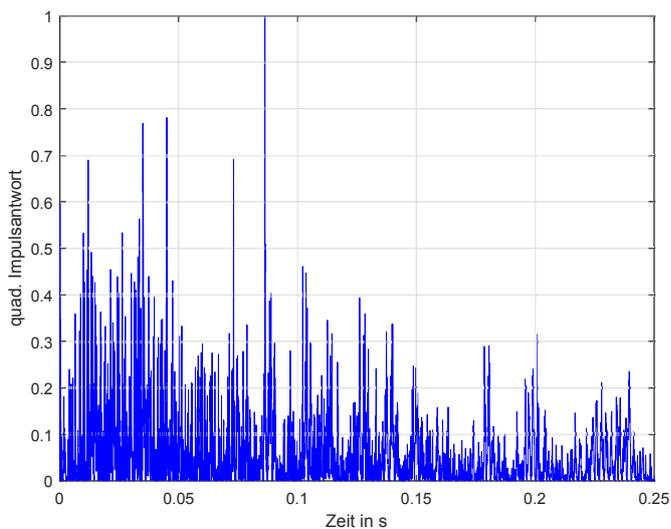
INFFELDGASSE 11

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

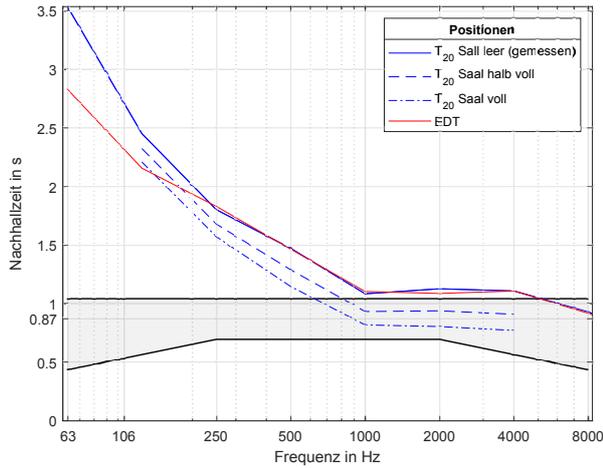
Sommersemester 2018



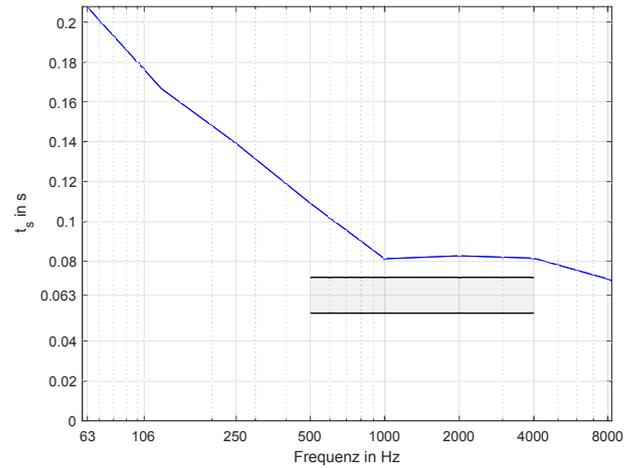
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Anlagengeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



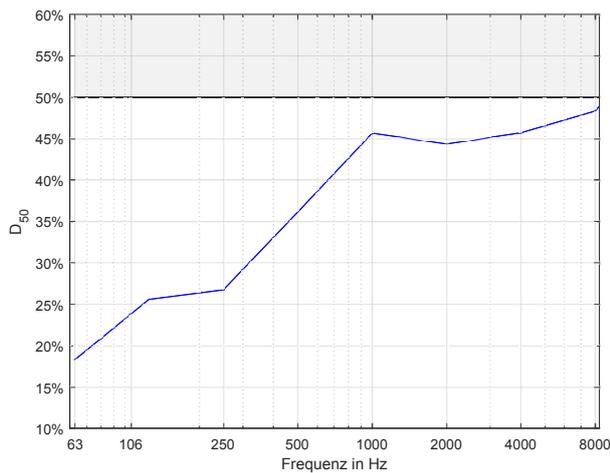
Messbedingungen	
Datum	09.06.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	532 m ³
Temperatur	25,1 °C
Luftfeuchtigkeit	59,8%
L _{Aeq}	33,4 dB(A)
Bestuhlung	48 Sessel Holz
Boden	Linoleum
Wände	Holz, Fenster, Putz
Decke	Putz
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



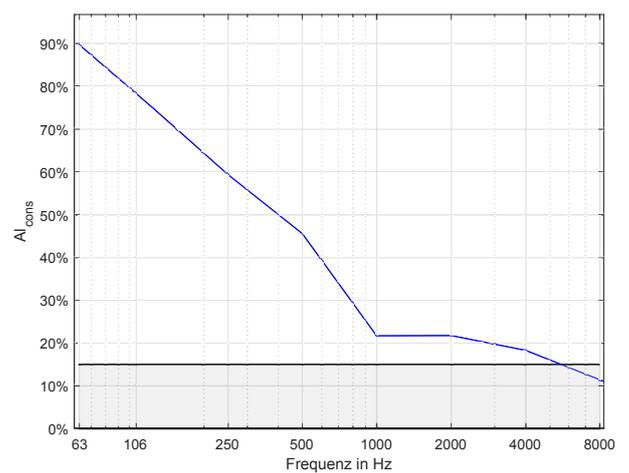
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	3.54	2.45	1.80	1.47	1.08	1.13	1.11	0.93
T_{20} halbvoll in s	–	2.32	1.68	1.29	0.93	0.94	0.91	–
T_{20} voll in s	–	2.21	1.57	1.15	0.82	0.80	0.77	–
EDT in s	2.83	2.16	1.83	1.47	1.10	1.09	1.11	0.92



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.208	0.167	0.139	0.109	0.081	0.083	0.082	0.071



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	18	26	27	36	46	44	46	48



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	90	75	59	46	22	22	18	11

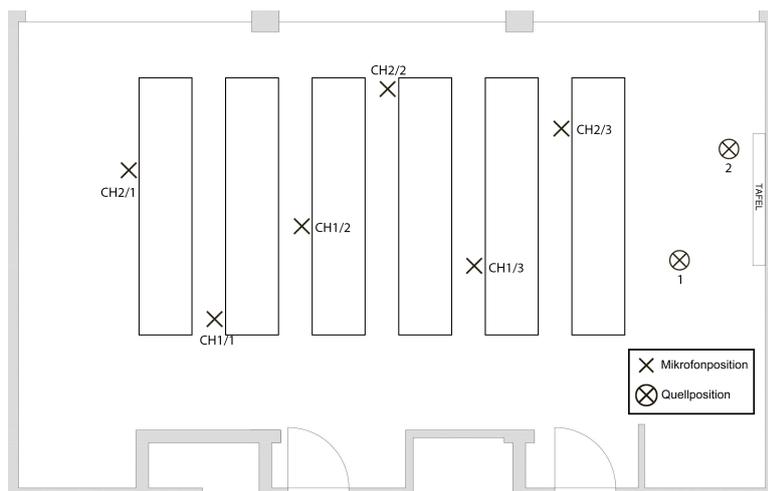
Diskussion:

Im Hörsaal FS1 sind die Nachhallzeiten bereits unterhalb von $f = 4kHz$ außerhalb des Toleranzbandes und unterhalb von $f = 1kHz$ sehr hoch. Die sonst in den tiefen wirkenden Fensterfassaden sind in diesem Gebäude durch deren Beschaffenheit nicht wirksam. Die lange Nachhallzeit in den tiefen Frequenzen wird subjektiv als brummend empfunden und verschlechtert die Sprachverständlichkeit. Die im Hörsaal verbauten Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet. Bis $t = 200ms$ sind noch starke Reflexionen vorhanden. Diese werden als störend empfunden und verschlechtern die Verständlichkeit.

Fazit:

Wegen hoher Nachhallzeit, Echos und zu hohem Grundgeräuschpegel ist die Sprachverständlichkeit nicht gewährleistet. Eine akustische Sanierung des Hörsaales ist notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	3.71	2.54	1.81	1.48	1.12	1.14	1.11	0.95
	Ch2/1	4.24	2.44	1.71	1.46	1.08	1.12	1.13	0.94
	Ch1/2	3.58	2.56	1.99	1.39	1.10	1.18	1.11	0.94
	Ch2/2	2.95	2.34	1.74	1.52	1.07	1.11	1.11	0.93
	Ch1/3	2.81	2.55	1.83	1.51	1.06	1.11	1.09	0.90
	Ch2/3	3.94	2.28	1.74	1.48	1.06	1.10	1.09	0.92
EDT in s	Ch1/1	2.23	1.94	2.03	1.40	1.14	1.12	1.21	0.98
	Ch2/1	3.33	2.34	1.79	1.63	1.21	1.16	1.15	1.01
	Ch1/2	3.69	2.49	1.76	1.55	1.14	1.09	1.15	0.94
	Ch2/2	2.17	2.00	1.88	1.40	1.05	1.06	1.12	0.91
	Ch1/3	2.74	2.06	1.72	1.47	1.09	1.07	1.02	0.84
	Ch2/3	2.82	2.11	1.80	1.34	1.00	1.03	1.01	0.82
t_s in s	Ch1/1	0.193	0.164	0.149	0.114	0.087	0.088	0.092	0.078
	Ch2/1	0.256	0.189	0.148	0.138	0.093	0.090	0.093	0.083
	Ch1/2	0.238	0.194	0.144	0.115	0.086	0.085	0.088	0.077
	Ch2/2	0.175	0.146	0.150	0.107	0.079	0.080	0.078	0.069
	Ch1/3	0.164	0.149	0.122	0.093	0.073	0.078	0.072	0.060
	Ch2/3	0.219	0.159	0.122	0.087	0.070	0.075	0.066	0.060
A_{cons} in %	Ch1/1	100.00	100.00	96.32	79.80	38.28	37.20	31.13	19.87
	Ch2/1	100.00	100.00	100.00	95.86	46.84	46.88	41.02	25.16
	Ch1/2	100.00	98.61	78.33	38.03	19.99	21.47	16.32	10.21
	Ch2/2	100.00	81.61	45.11	34.45	14.41	14.21	12.34	7.64
	Ch1/3	51.42	37.41	19.17	12.84	5.19	5.43	4.41	2.69
	Ch2/3	87.07	31.35	17.42	12.51	5.41	5.30	4.53	2.83
D_{50} in %	Ch1/1	15.97	14.34	23.38	28.69	42.04	39.94	39.27	42.04
	Ch2/1	13.09	19.03	23.25	19.76	37.74	39.55	37.02	38.86
	Ch1/2	21.97	21.38	22.97	34.50	41.25	42.77	40.48	42.00
	Ch2/2	11.89	33.61	21.04	35.42	46.61	46.72	48.19	51.11
	Ch1/3	31.00	39.36	32.85	48.31	52.67	49.13	52.93	58.20
	Ch2/3	15.69	25.88	37.04	50.16	53.73	48.13	56.44	57.94



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.51	1.68
Ch2/1	0.50	1.63
Ch1/2	0.51	1.83
Ch2/2	0.53	1.57
Ch1/3	0.56	1.70
Ch2/3	0.56	1.58

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

Anhang E

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



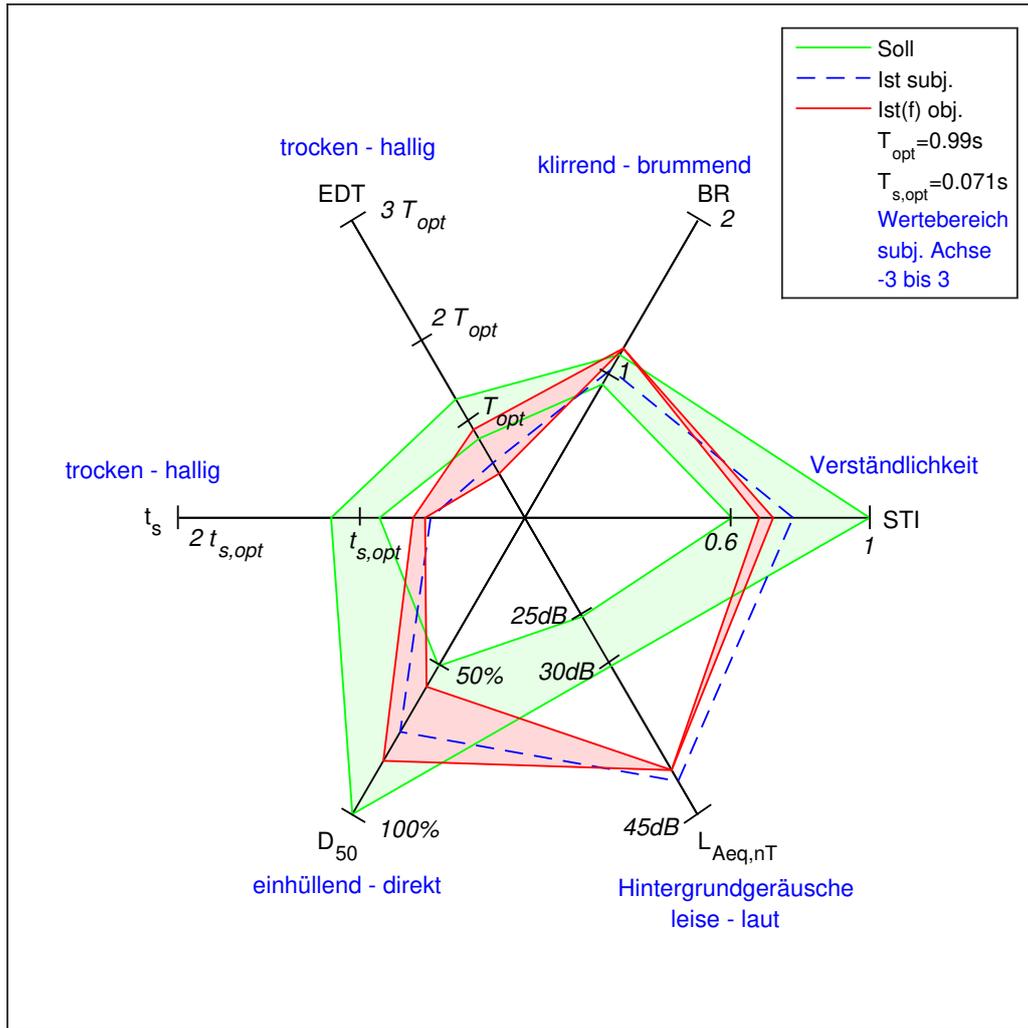
DATENBLATT HS I



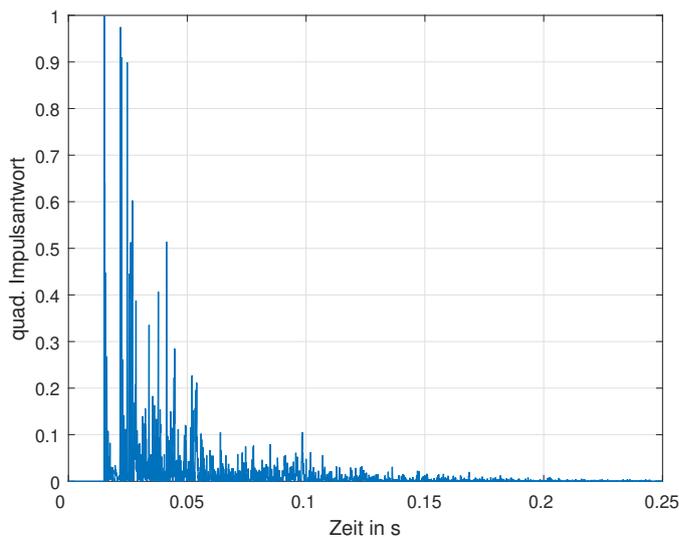
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

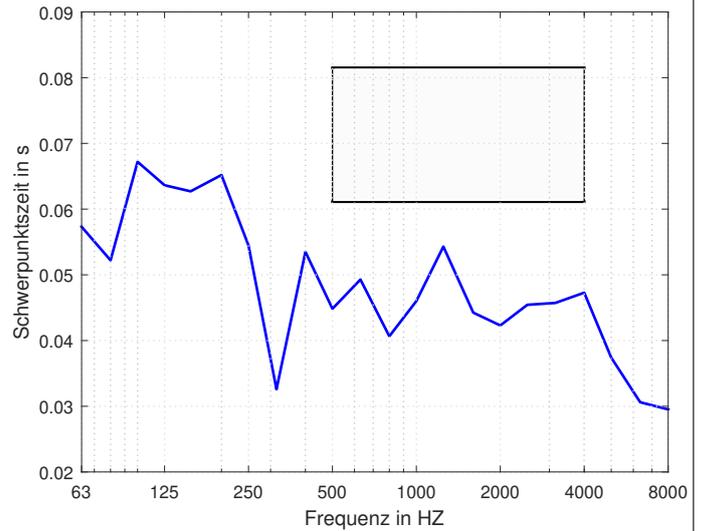
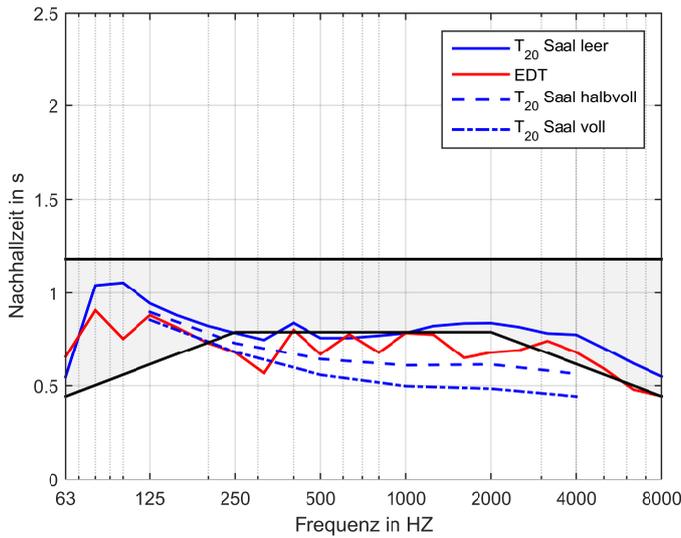
Wintersemester 2018/2019



EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis

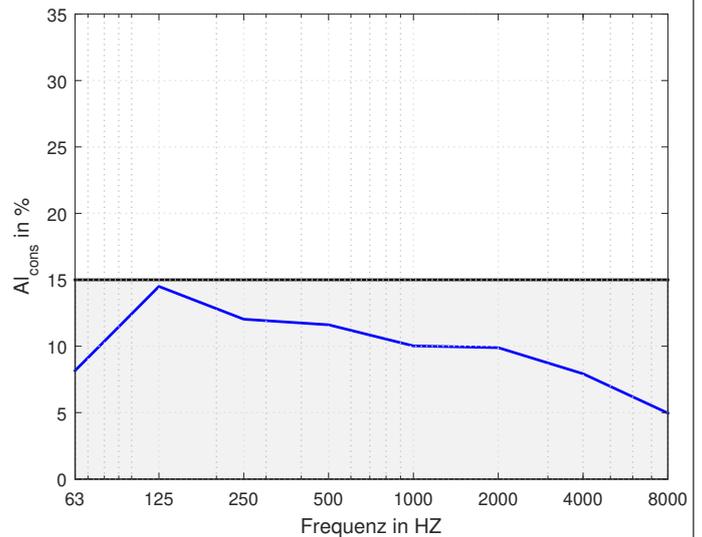
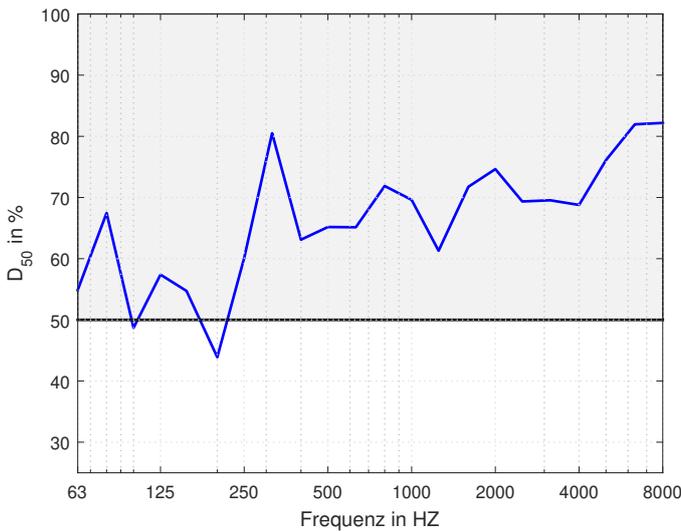


Messbedingungen	
Datum	08.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	1092 m ³
Temperatur	19,9°C
Luftfeuchtigkeit	58%
L_{Aeq}	40,5 dB(A)
Bestuhlung	243 Sitze Holz
Boden	Linoleum, Holzparkett
Wände	Verputz, Beton
Decke	Lochabsorber
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



Nachhallzeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.53	0.94	0.78	0.76	0.78	0.84	0.77	0.55
T_{20} halbvoll in s	–	0.90	0.73	0.64	0.61	0.61	0.56	–
T_{20} voll in s	–	0.85	0.68	0.56	0.50	0.48	0.44	–
EDT in s	0.65	0.88	0.68	0.67	0.78	0.68	0.68	0.44

Schwerpunktszeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.057	0.064	0.054	0.045	0.046	0.042	0.047	0.030



Deutlichkeitsgrad								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	54	57	60	65	70	75	69	82

Artikulationsverlust								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	8	14	12	12	10	10	8	5

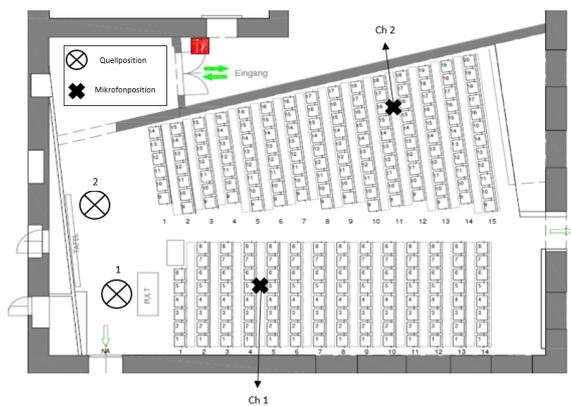
Diskussion:

Im Hörsaal HS I liegen die Nachhallzeiten im leeren Zustand an der unteren Grenze des Toleranzbereichs. Die Schwerpunktszeit liegt bereits weit darunter. Im halbvollen und vollen Zustand liegen daher die Nachhallzeiten deutlich unter den Grenzen. Trotz der eher schlechten Werte sind aber D_{50} und Al_{cons} auch in Hinblick auf die Größe ausgesprochen gut. Negativ ist allerdings, und bei diesen beiden Parametern nicht berücksichtigt, der hohe Hintergrundgeräuschpegel, der durch die Lüftung erzeugt wird, wenn diese läuft. In Kombination mit der kurzen Nachhallzeit wirkt die Stimme sehr leise, worunter die Verständlichkeit leidet.

Fazit:

Empfehlenswert sind Maßnahmen, die den Signal-Rauschabstand erhöhen, wie zum Beispiel eine leisere Lüftung oder Reflektoren an der Decke, um die Energie besser ins Publikum zu richten.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.16	1.11	0.83	0.69	0.85	0.86	0.85	0.56
	Ch2/1	0.86	0.87	0.62	0.78	0.75	0.84	0.76	0.53
	Ch1/2	0.60	0.87	0.81	0.88	0.76	0.83	0.75	0.58
	Ch2/2	0.64	0.91	0.94	0.64	0.75	0.84	0.77	0.55
EDT in s	Ch1/1	0.41	1.31	0.73	0.59	0.72	0.49	0.67	0.43
	Ch2/1	0.86	0.91	0.33	0.66	0.67	0.63	0.56	0.45
	Ch1/2	0.45	0.78	0.93	0.64	0.81	0.89	0.78	0.37
	Ch2/2	0.86	0.56	0.66	0.82	1.02	0.75	0.72	0.49
t_s in s	Ch1/1	0.038	0.082	0.047	0.051	0.038	0.034	0.050	0.029
	Ch2/1	0.068	0.065	0.026	0.043	0.037	0.038	0.043	0.031
	Ch1/2	0.048	0.064	0.078	0.053	0.052	0.050	0.054	0.029
	Ch2/2	0.077	0.045	0.065	0.037	0.059	0.048	0.043	0.029
A_{cons} in %	Ch1/1	13.86	24.63	19.72	17.02	16.80	17	13.46	8.43
	Ch2/1	2.83	5.04	4.18	4.03	3.48	3.44	2.75	1.72
	Ch1/2	11.20	19.89	16.51	15.93	13.75	13.57	10.87	6.81
	Ch2/2	4.75	8.44	7.00	6.76	5.84	5.76	4.61	2.88
D_{50} in %	Ch1/1	71.15	43.84	74.01	58.45	77.05	83.34	64.05	82.66
	Ch2/1	50.50	60.98	89.07	64.89	77.66	77.77	75.95	82.16
	Ch1/2	62.88	48.33	32.59	57.69	64.11	69.70	65.88	85.14
	Ch2/2	31.15	75.28	47.13	72.06	58.27	68.05	68.71	80.69



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.72	1.25
Ch2/1	0.71	0.97
Ch1/2	0.68	1.02
Ch2/2	0.70	1.33

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



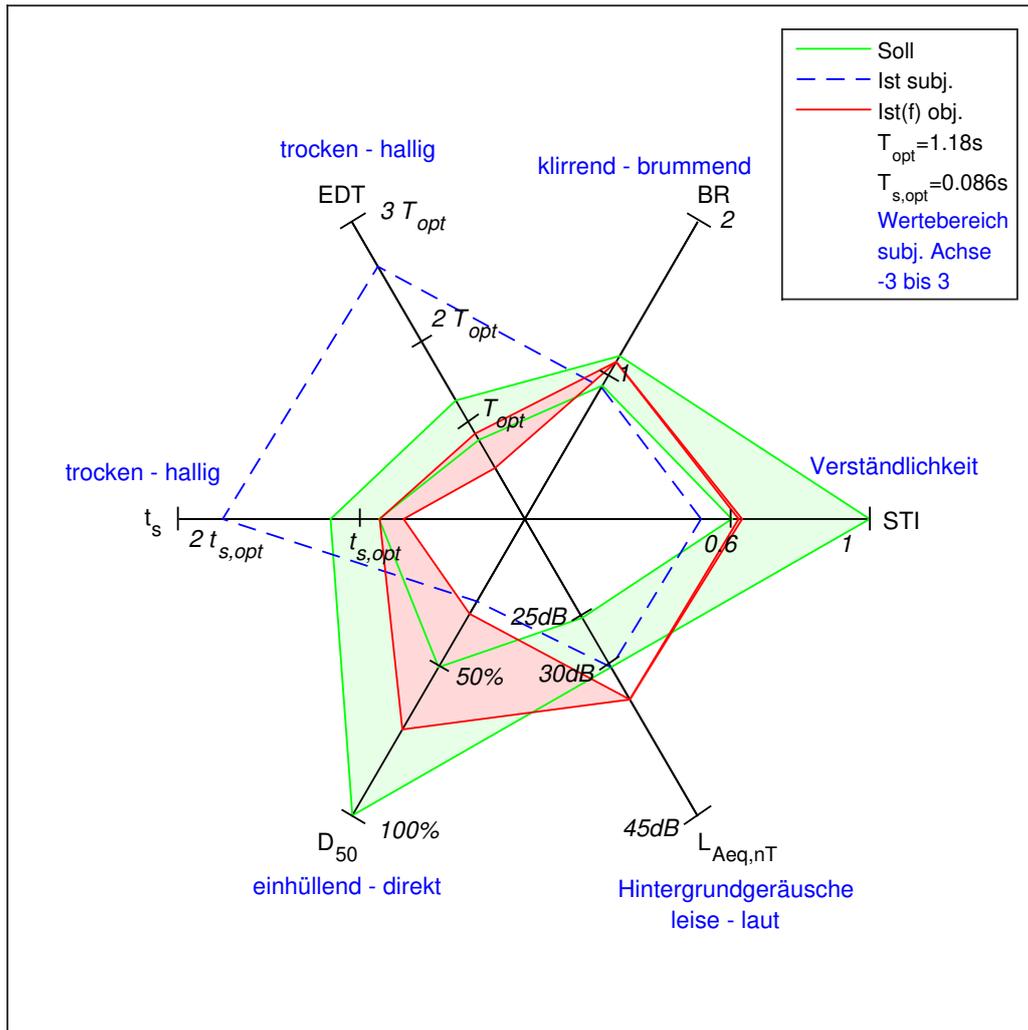
DATENBLATT HS II



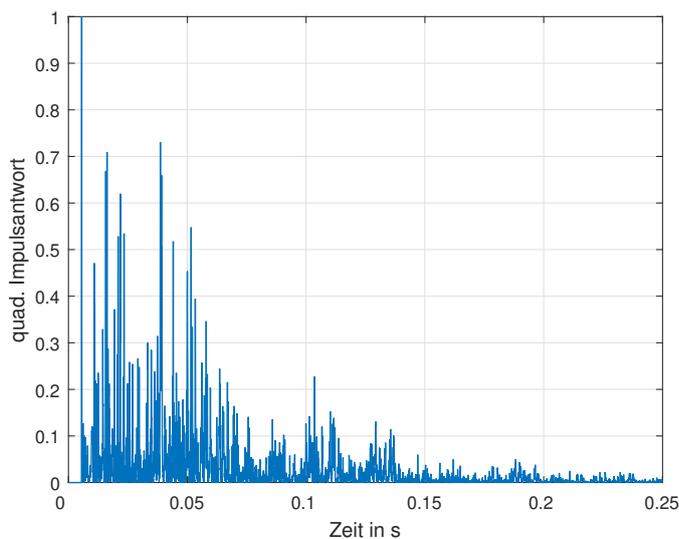
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

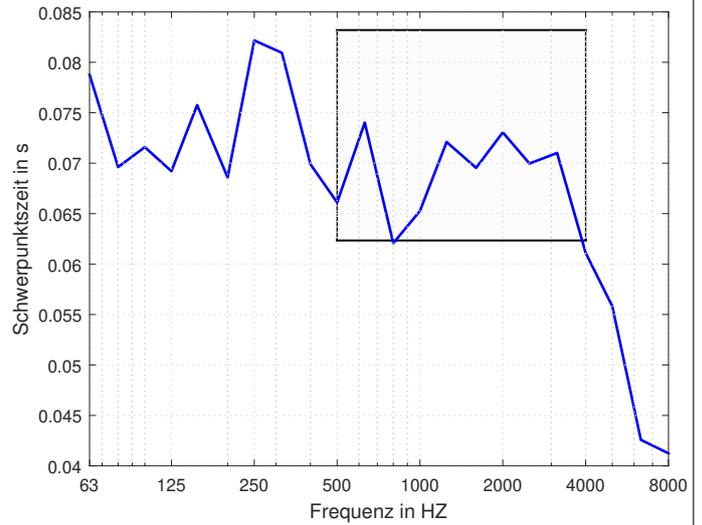
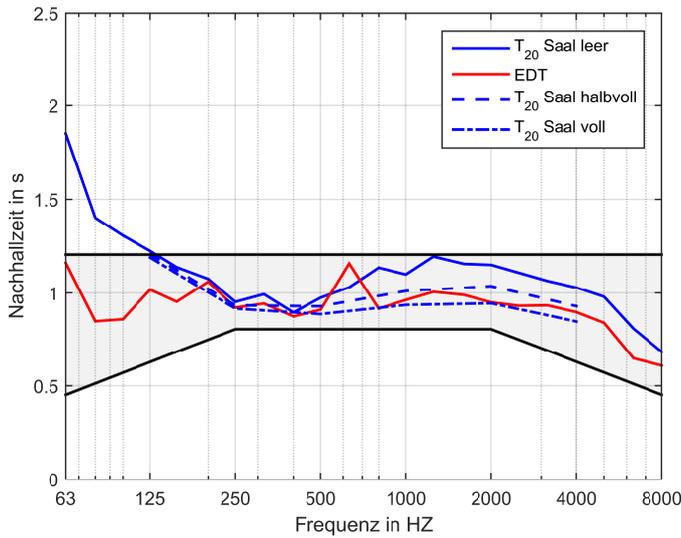
Wintersemester 2018/2019



EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D₅₀... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis

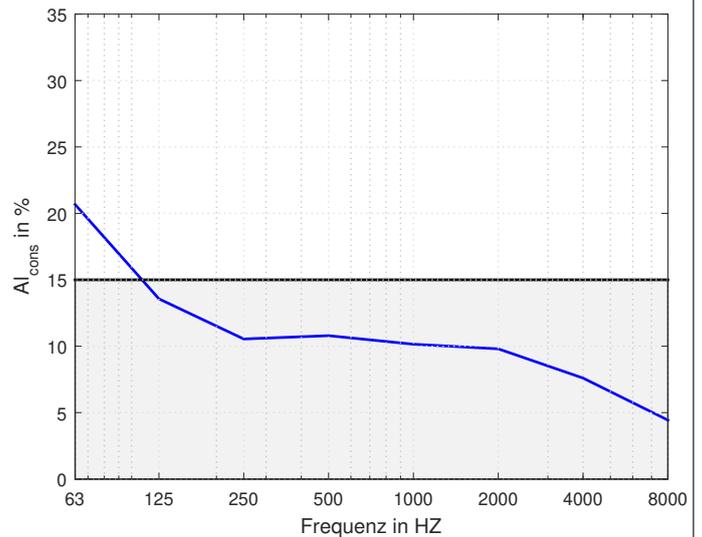
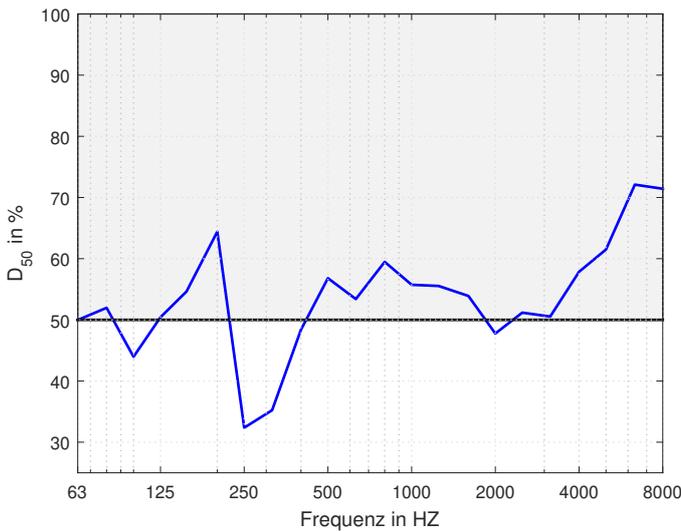


Messbedingungen	
Datum	08.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	1236 m ³
Temperatur	21,4°C
Luftfeuchtigkeit	53,1%
LAeq	33,06 dB(A)
Bestuhlung	60 Sitze Holz
Boden	Stein
Wände	Verputz, Beton, Glas
Decke	Lochabsorber
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Glasplatten



Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	1.87	1.22	0.95	0.97	1.10	1.15	1.03	0.68
T_{20} halbvoll in s	–	1.21	0.93	0.93	1.01	1.04	0.93	–
T_{20} voll in s	–	1.19	0.91	0.89	0.94	0.94	0.85	–
EDT in s	1.17	1.02	0.92	0.91	0.96	0.95	0.90	0.61

Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.079	0.069	0.082	0.066	0.065	0.073	0.061	0.041



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	50	50	32	57	56	48	58	71

Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	21	14	11	11	10	10	8	4

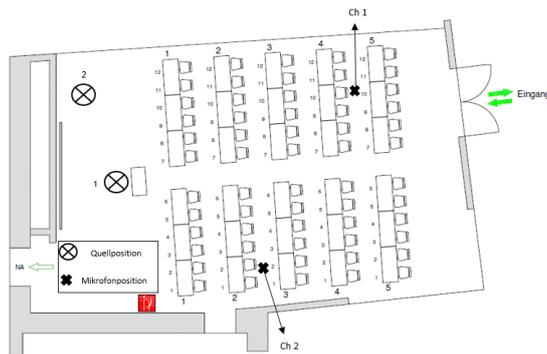
Diskussion:

Der HS II ist ein Multifunktionsraum, in dem sowohl Vorlesungen als auch andere Veranstaltungen stattfinden. Auffallend ist, dass der Hörsaal außergewöhnlich hoch ist, wodurch sich mit nur 60 Sitzplätzen eine Volumenskennzahl von $20 m^3/Pers$ ergibt (zwei bis drei Mal so hoch wie üblich). Zwar sind die objektiven Ergebnisse für T_{20} innerhalb des Toleranzbandes, subjektiv wurde der Hörsaal aber als zu hallig empfunden. Obwohl die gemessenen objektiven Werte wie Nachhallzeit und Schwerpunktszeit im Toleranzbereich liegen, ist D_{50} an bzw. unter der Grenze der geforderten Verständlichkeit. Dieser Eindruck bestätigt sich durch die schlechten subjektiven Eindrücke der befragten Studenten. Die Verständlichkeit ist stark positionsabhängig.

Fazit:

Durch die lange Nachhallzeit ist die Sprachverständlichkeit nicht gegeben. Eine akustische Sanierung ist notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	2.21	1.26	0.87	0.90	1.11	1.15	1.05	0.69
	Ch2/1	0.74	1.13	0.76	1.03	1.10	1.10	1.02	0.68
	Ch1/2	1.92	1.38	1.07	0.92	1.11	1.20	1.03	0.70
	Ch2/2	1.38	1.15	1.16	0.97	1.14	1.16	1.00	0.67
EDT in s	Ch1/1	0.82	1.27	0.85	1.32	1.11	1.02	0.86	0.58
	Ch2/1	1.04	1.07	1.26	0.93	0.81	0.93	0.92	0.65
	Ch1/2	1.26	0.88	0.95	0.75	0.92	0.87	0.96	0.62
	Ch2/2	1.59	0.89	0.61	0.77	0.91	0.93	0.83	0.58
t_s in s	Ch1/1	0.076	0.076	0.073	0.088	0.072	0.072	0.062	0.042
	Ch2/1	0.078	0.070	0.104	0.070	0.062	0.068	0.055	0.044
	Ch1/2	0.061	0.063	0.073	0.061	0.079	0.076	0.069	0.052
	Ch2/2	0.100	0.065	0.078	0.046	0.050	0.076	0.058	0.028
Al_{cons} in %	Ch1/1	26.26	17.23	13.40	13.71	12.90	12.45	9.66	5.64
	Ch2/1	17.65	11.59	9.01	9.22	8.67	8.37	6.49	3.79
	Ch1/2	24.93	16.36	12.72	13.02	12.24	11.82	9.17	5.35
	Ch2/2	4.75	8.44	7.00	6.76	5.84	5.76	4.61	2.88
D_{50} in %	Ch1/1	41.54	56.93	51.79	48.23	53.62	54.63	61.90	71.06
	Ch2/1	36.12	49.19	28.12	55.50	57.11	51.63	63.82	69.71
	Ch1/2	71.98	53.19	37.19	56.77	40.23	45.40	51.69	65.37
	Ch2/2	48.66	44.46	12.62	68.52	65.96	37.94	55.23	79.11



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.64	1.04
Ch2/1	0.62	0.89
Ch1/2	0.62	1.21
Ch2/2	0.62	1.10

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



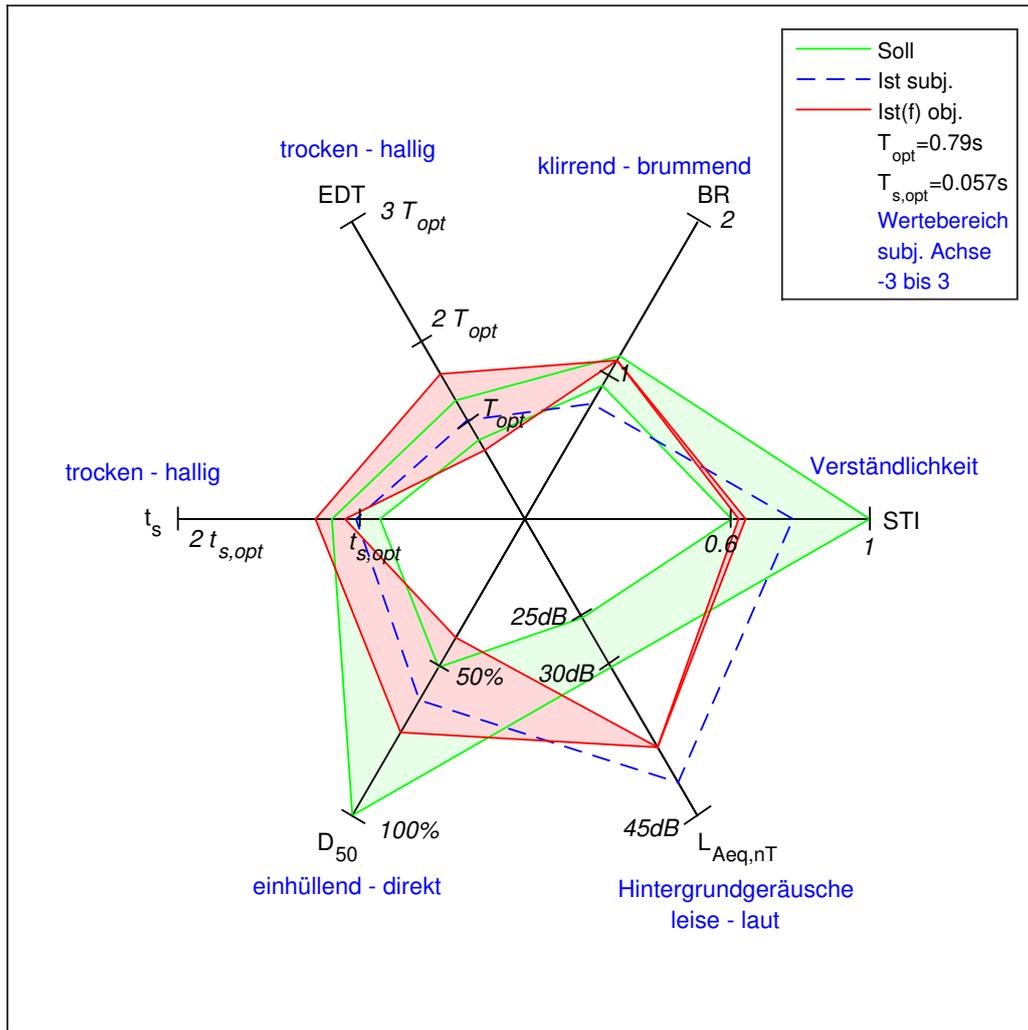
DATENBLATT HS V



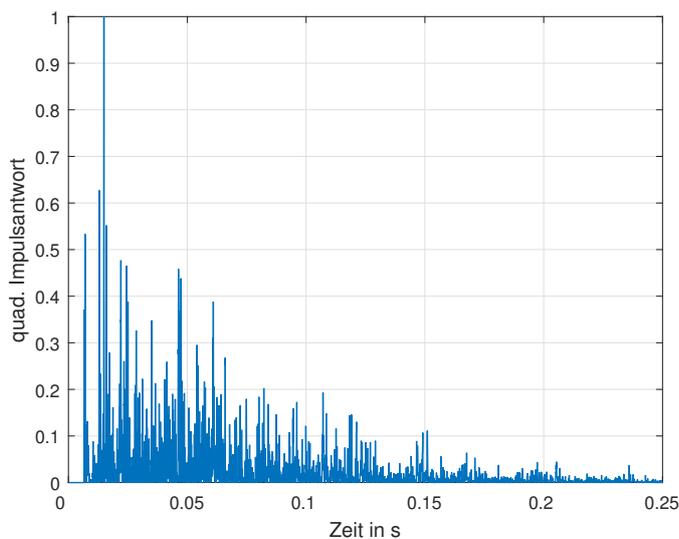
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

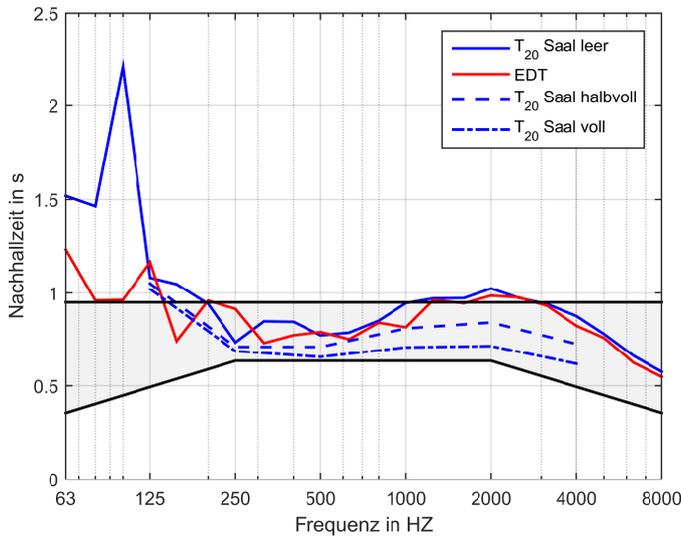
Wintersemester 2018/2019



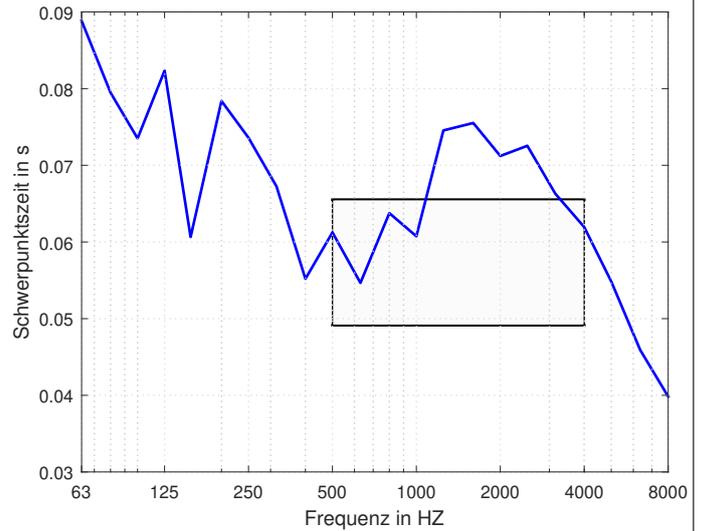
EDT ... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI ... Sprachübertragungsindex BR ... Bassverhältnis



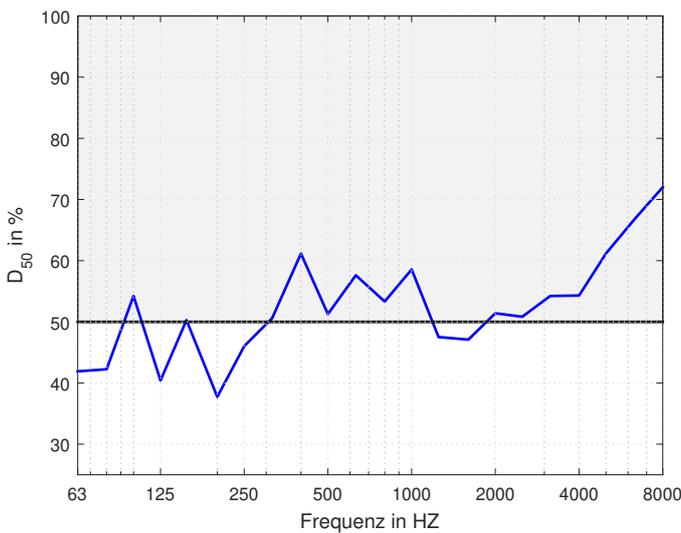
Messbedingungen	
Datum	08.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	328 m ³
Temperatur	20,8°C
Luftfeuchtigkeit	52,8%
L_{Aeq}	40,1 dB(A)
Bestuhlung	36 Sitze Holz
Boden	Linoleum
Wände	Verputz, Beton
Decke	Gipsplatten
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



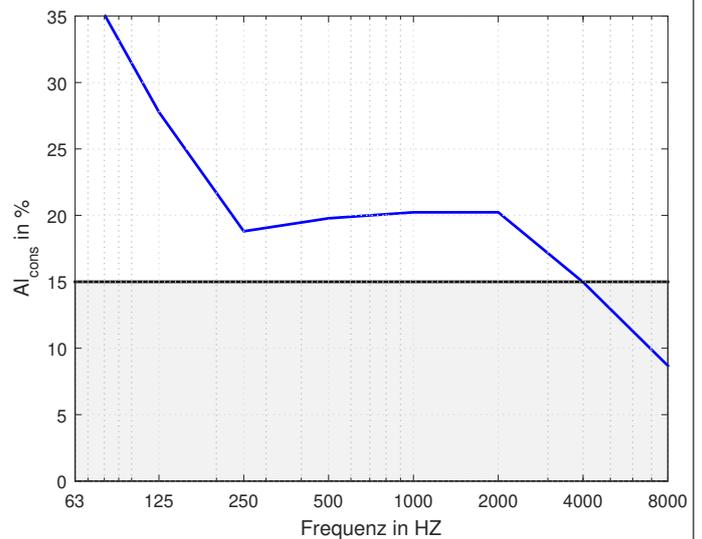
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	1.52	1.08	0.73	0.77	0.95	1.02	0.87	0.57
T_{20} halbvoll in s	–	1.05	0.71	0.71	0.81	0.84	0.72	–
T_{20} voll in s	–	1.02	0.68	0.65	0.70	0.71	0.62	–
EDT in s	1.24	1.16	0.91	0.79	0.81	0.99	0.82	0.55



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.089	0.082	0.074	0.061	0.061	0.071	0.062	0.040



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	42	40	46	51	59	51	54	72



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	39	28	19	20	20	20	15	9

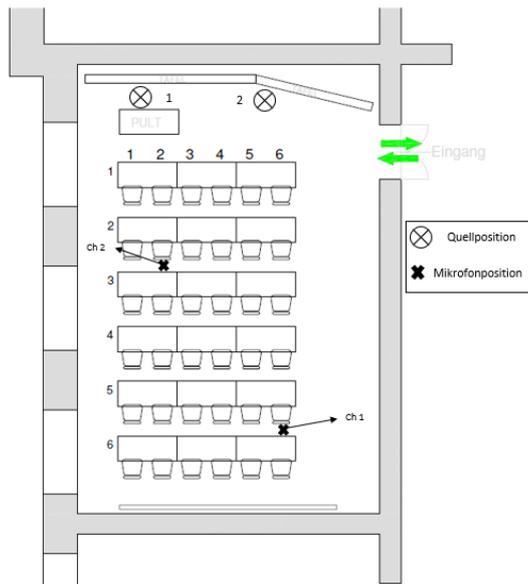
Diskussion:

Hörsaal V ist ein kleiner Hörsaal mit nur 36 Sitzplätzen, der für seine Größe als eher „einhüllend“ als „direkt“ beschrieben worden ist. Dementsprechend befinden sich die Werte von Nachhallzeit und Deutlichkeitsgrad im Bereich der Grundfrequenzen von Sprache außerhalb des Toleranzbereichs. Weil die dünnen Fenster direkt auf die Straße gehen, ist der Hintergrundgeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ mit 40, 1dB sehr hoch.

Fazit:

Da der Hörsaal weder eine besonders gute noch eine besonders schlechte Akustik aufweist, und bei kleinen Hörsälen die Akustik weniger ausschlaggebend ist, sehen wir hier keine Notwendigkeit für eine Sanierung. Eine Verbesserungsmöglichkeit wäre, die bestehenden Fenster durch bessere, schallisolierende Fenster auszutauschen.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.16	0.87	0.81	0.85	0.90	0.99	0.83	0.56
	Ch2/1	0.71	0.97	0.60	0.77	1.01	1.00	0.85	0.57
	Ch1/2	0.98	1.14	0.66	0.62	0.92	1.05	0.91	0.58
	Ch2/2	0.74	1.36	0.89	0.82	0.96	1.07	0.92	0.59
EDT in s	Ch1/1	1.17	1.77	1.06	1.06	0.79	1.04	0.79	0.56
	Ch2/1	0.98	0.68	0.88	1.02	0.83	0.92	0.85	0.52
	Ch1/2	1.63	1.27	1.00	0.79	0.77	0.96	0.86	0.55
	Ch2/2	0.99	0.97	0.71	0.81	0.77	1.08	0.80	0.58
t_s in s	Ch1/1	0.085	0.067	0.104	0.053	0.054	0.067	0.066	0.045
	Ch2/1	0.059	0.062	0.055	0.073	0.064	0.070	0.058	0.039
	Ch1/2	0.087	0.101	0.072	0.059	0.061	0.077	0.067	0.042
	Ch2/2	0.106	0.100	0.063	0.059	0.062	0.071	0.058	0.034
A_{cons} in %	Ch1/1	50.98	36.24	24.53	25.81	26.39	26.40	19.53	11.32
	Ch2/1	22.59	16.06	10.87	11.44	11.70	11.70	8.66	5.01
	Ch1/2	48.00	34.12	23.10	24.30	24.85	24.86	18.39	10.66
	Ch2/2	34.68	24.65	16.69	17.55	17.95	17.96	13.29	7.70
D_{50} in %	Ch1/1	44.59	69.90	21.34	57.41	67.45	55.61	47.18	68.60
	Ch2/1	59.70	60.55	61.28	43.57	51.91	50.63	57.27	72.60
	Ch1/2	52.63	18.14	52.45	53.42	61.58	46.71	52.16	68.51
	Ch2/2	12.43	12.47	50.47	51.31	53.50	53.56	59.67	77.17



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.64	0.96
Ch2/1	0.62	0.88
Ch1/2	0.63	1.17
Ch2/2	0.64	1.27

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



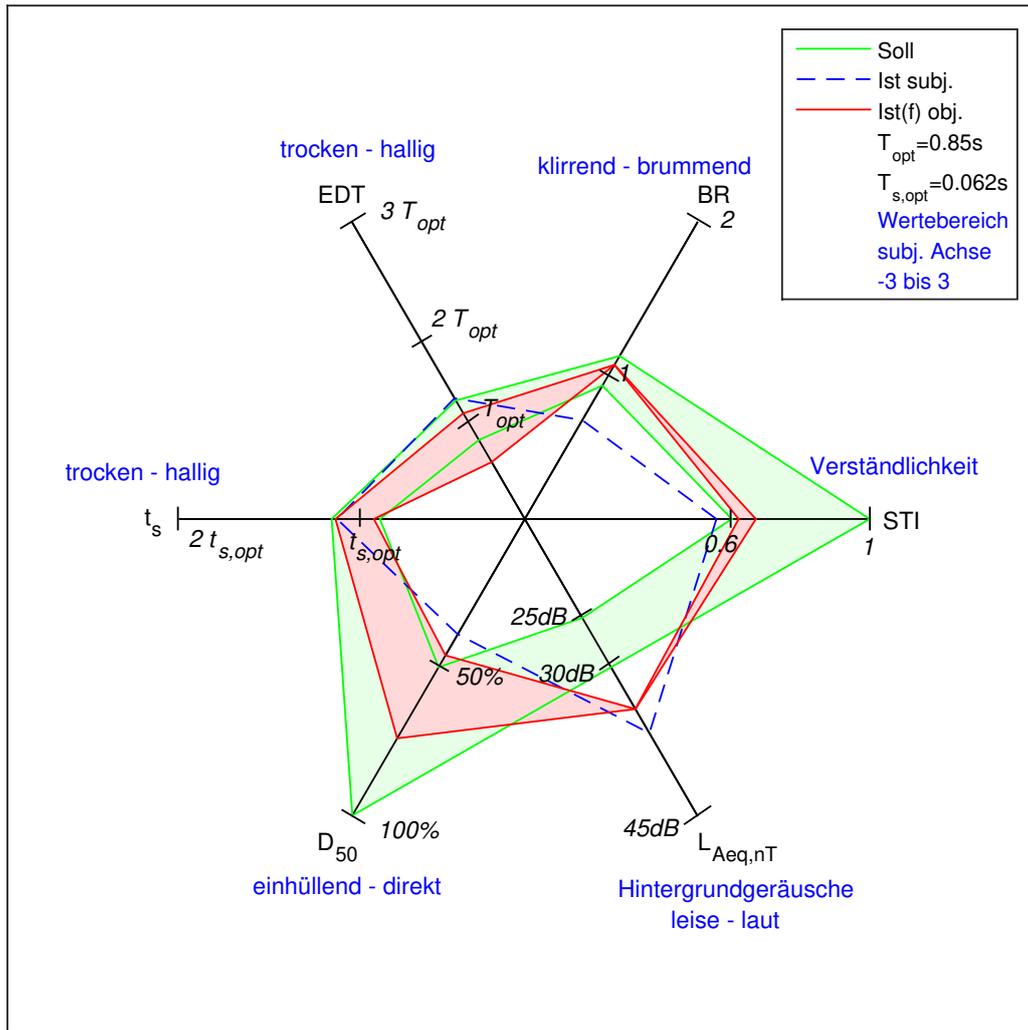
DATENBLATT HS VI



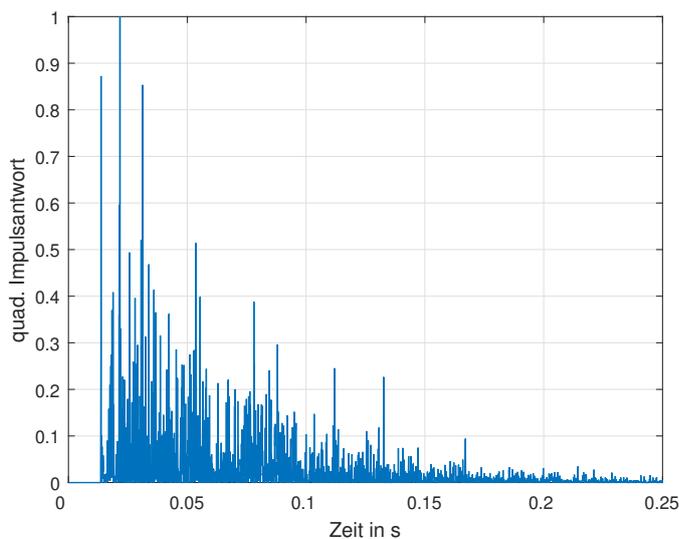
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

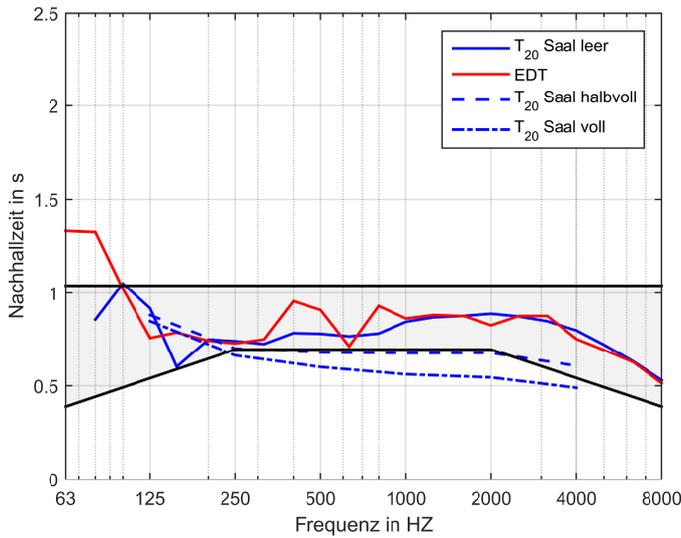
Wintersemester 2018/2019



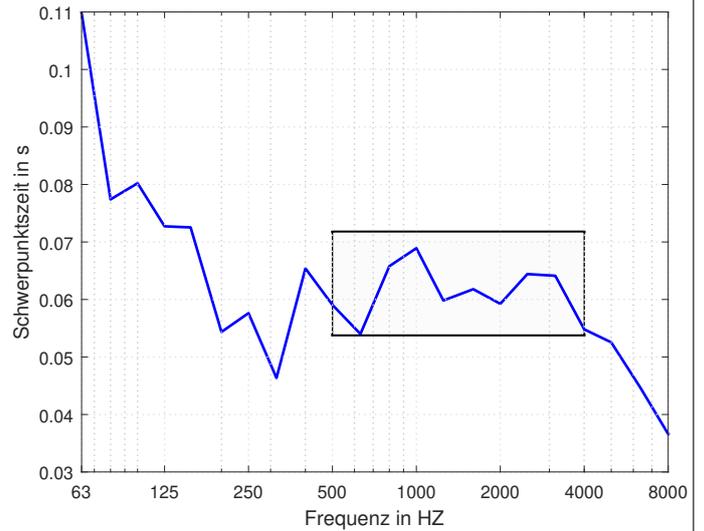
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Hintergrundgeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



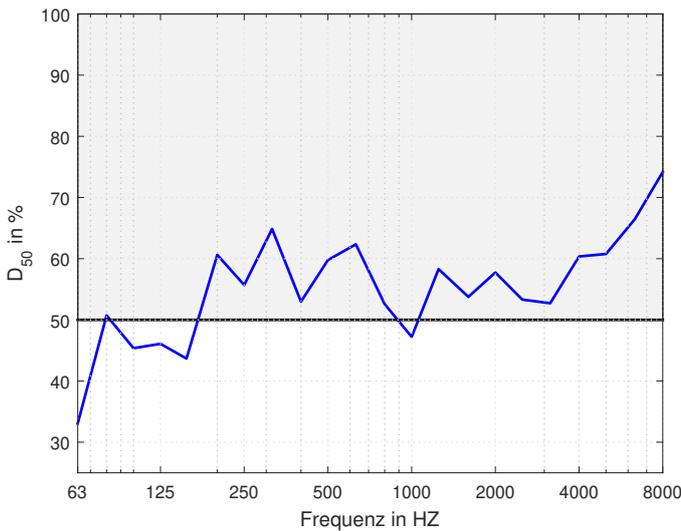
Messbedingungen	
Datum	09.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	525 m ³
Temperatur	18,6°C
Luftfeuchtigkeit	56,5%
L _{Aeq}	34,23 dB(A)
Bestuhlung	95 Sitze Holz
Boden	Holzparkett
Wände	Verputz, Holzplatten
Decke	Lochabsorber
Absorber	Holzplatten, Lochabs.
Reflektoren	Nein



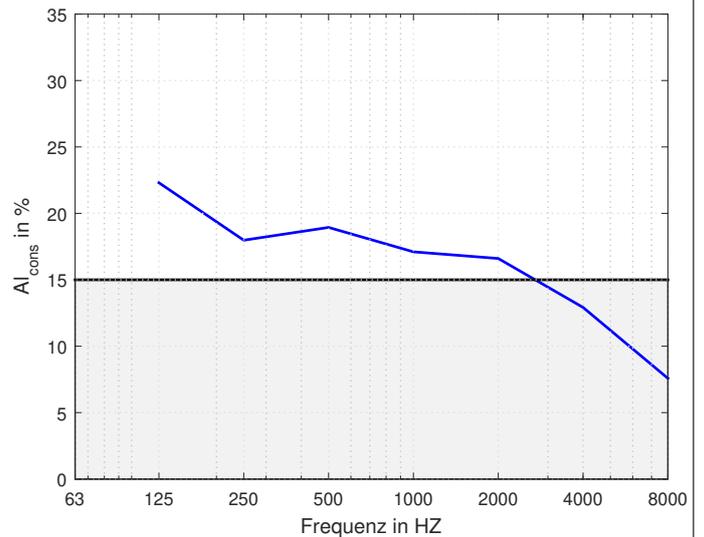
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	–	0.92	0.74	0.78	0.84	0.89	0.80	0.53
T_{20} halbvoll in s	–	0.88	0.70	0.68	0.67	0.67	0.61	–
T_{20} voll in s	–	0.85	0.66	0.60	0.56	0.54	0.49	–
EDT in s	1.33	0.76	0.73	0.91	0.86	0.82	0.75	0.51



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.111	0.073	0.058	0.059	0.069	0.059	0.055	0.037



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	32	46	56	60	47	58	60	74



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	–	22	18	19	17	17	13	8

Diskussion:

Hörsaal HS VI ist ein schmaler, niedriger und länglicher Hörsaal, bei dem die Verständlichkeit nach hinten stark abnimmt. Die schlechte Artikulationsverlustkurve ergibt sich aus den stark unterschiedlichen Werten der unterschiedlichen Positionen der Messpunkte. Als Ursache hierfür wird die ungünstig geformte Decke, ähnlich wie in HS Fsi1, angenommen. Alle Wände sind mit Holzplatten verkleidet, welche besonders in den Tiefen eine absorbierende Wirkung haben.

Fazit:

Damit Sprache auch in den hinteren Sitzreihen noch verständlich ist, empfehlen wir, im Bereich der Tafel Reflektoren anzubringen, die den Schall gezielt nach hinten lenken.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	–	0.83	0.76	0.76	0.85	0.84	0.80	0.54
	Ch2/1	2.61	1.04	0.96	0.75	0.86	0.91	0.79	0.55
	Ch1/2	0.83	0.97	0.69	0.84	0.83	0.89	0.82	0.52
	Ch2/2	0.97	0.84	0.61	0.73	0.81	0.88	0.77	0.51
EDT in s	Ch1/1	2.16	0.70	0.71	0.79	0.75	0.83	0.77	0.51
	Ch2/1	1.28	1.28	0.58	0.84	0.81	0.73	0.72	0.47
	Ch1/2	1.05	0.46	0.75	0.88	0.98	0.84	0.75	0.53
	Ch2/2	0.90	0.57	0.83	1.15	0.85	0.81	0.73	0.51
t_s in s	Ch1/1	0.169	0.079	0.067	0.065	0.070	0.060	0.054	0.040
	Ch2/1	0.081	0.115	0.037	0.050	0.059	0.061	0.050	0.030
	Ch1/2	0.090	0.040	0.053	0.069	0.075	0.061	0.059	0.038
	Ch2/2	0.093	0.056	0.070	0.055	0.069	0.051	0.054	0.036
A_{cons} in %	Ch1/1	–	34.62	27.91	29.40	26.55	25.77	20.05	11.76
	Ch2/1	–	9.62	7.75	8.17	7.37	7.16	5.57	3.26
	Ch1/2	–	33.86	27.29	28.76	25.97	25.21	19.61	11.51
	Ch2/2	–	11.10	8.95	9.42	8.51	8.26	6.43	3.77
D_{50} in %	Ch1/1	20.37	23.15	38.83	62.90	41.19	58.05	61.16	74.01
	Ch2/1	58.84	27.05	79.93	59.97	54.89	51.33	64.78	79.48
	Ch1/2	21.59	83.67	68.47	49.68	47.54	58.48	55.06	70.88
	Ch2/2	29.35	53.46	36.01	63.62	47.92	64.60	62.58	74.33



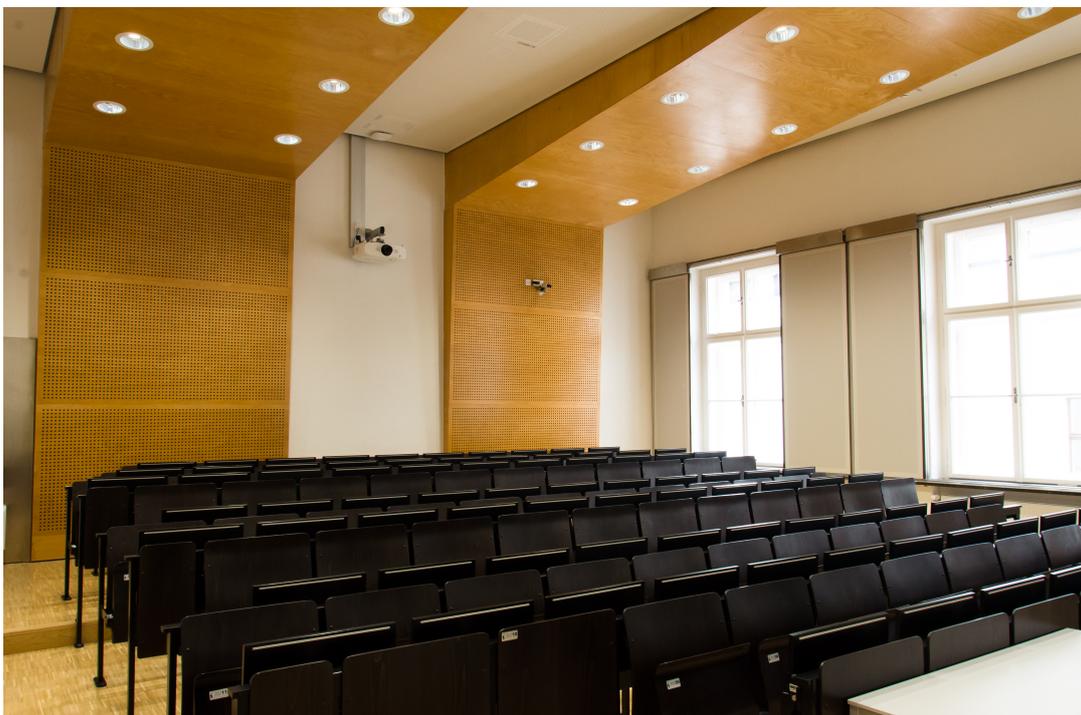
Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.64	0.99
Ch2/1	0.66	1.24
Ch1/2	0.62	0.99
Ch2/2	0.67	0.94

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



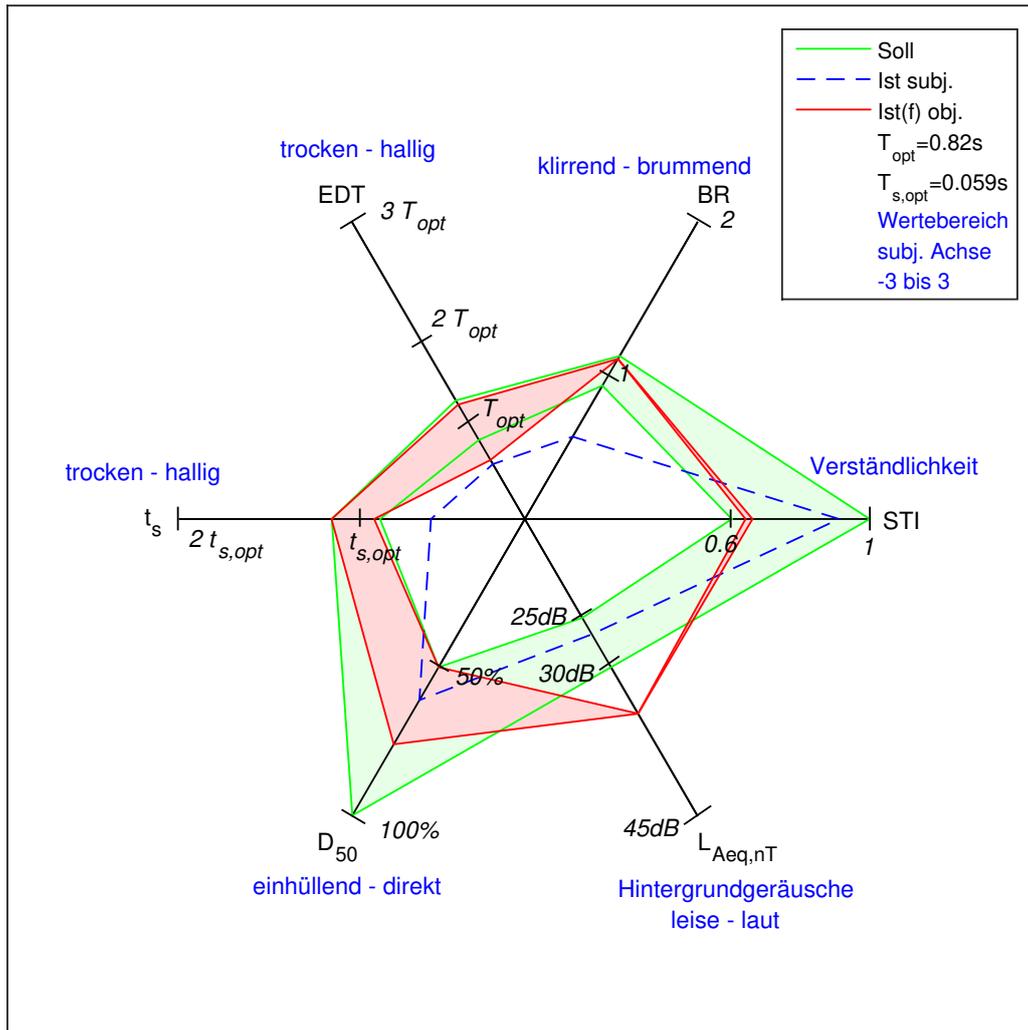
DATENBLATT HS VIII



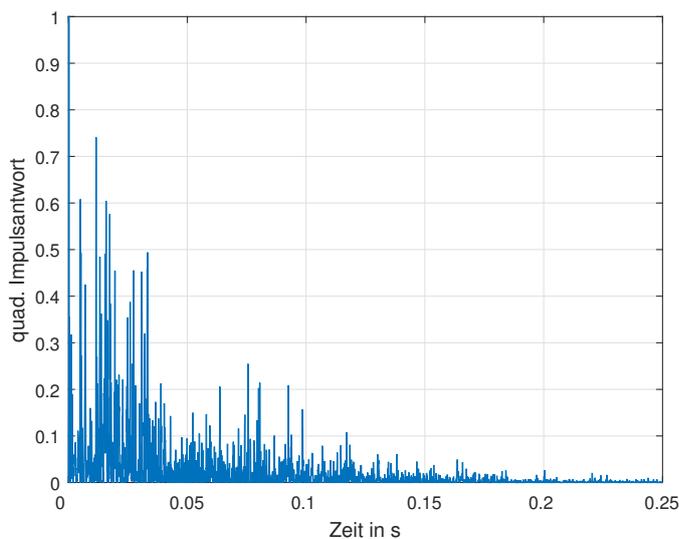
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

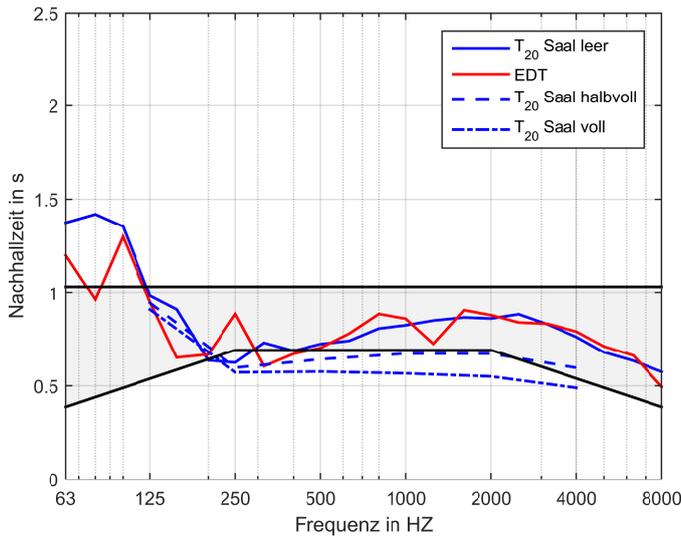
Wintersemester 2018/2019



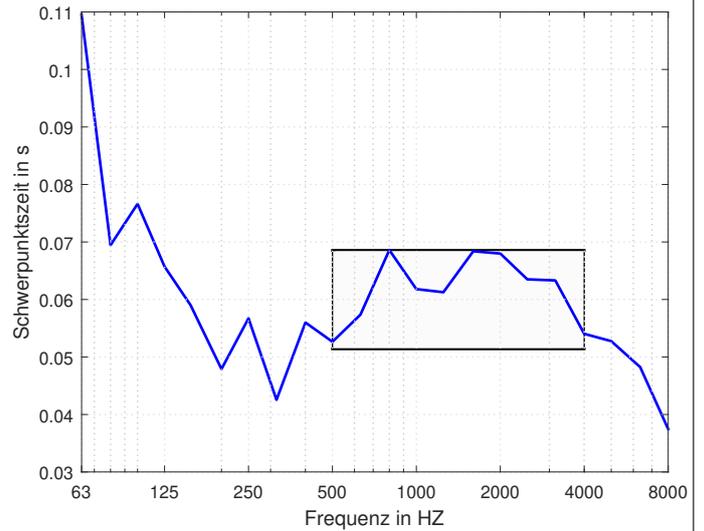
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



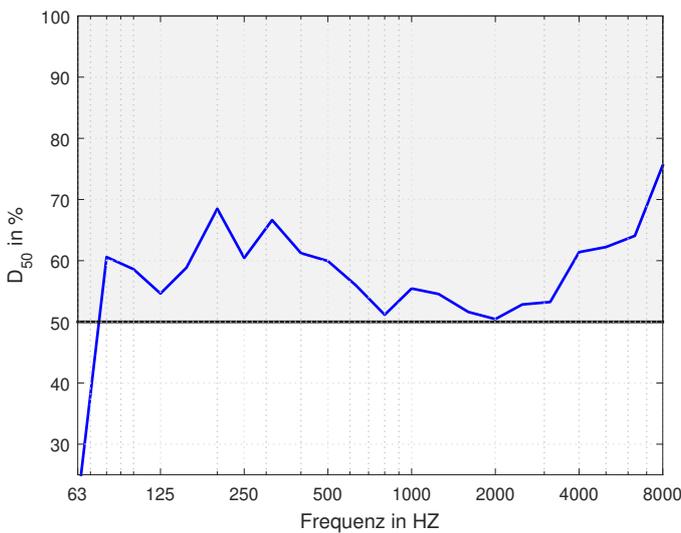
Messbedingungen	
Datum	09.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	412 m ³
Temperatur	20,9°C
Luftfeuchtigkeit	48,3%
L_{Aeq}	34,7 dB(A)
Bestuhlung	86 Sitze Holz
Boden	Holzparkett
Wände	Verputz, Beton
Decke	Lochabsorber
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



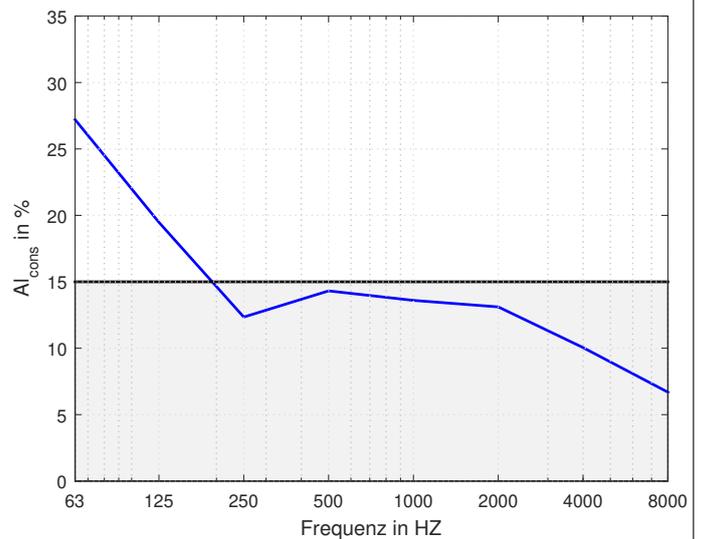
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	1.37	0.98	0.62	0.72	0.82	0.86	0.76	0.57
T_{20} halbvoll in s	–	0.94	0.59	0.62	0.64	0.64	0.57	–
T_{20} voll in s	–	0.89	0.56	0.55	0.53	0.51	0.45	–
EDT in s	1.21	0.95	0.88	0.70	0.86	0.88	0.79	0.49



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.111	0.066	0.057	0.053	0.062	0.068	0.054	0.037



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	19	55	60	60	55	50	61	76



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	27	19	12	14	14	13	10	7

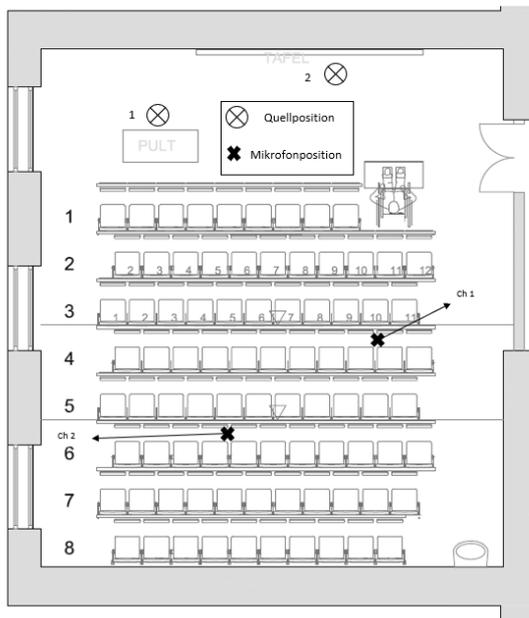
Diskussion:

Alle Parameter, mit ein paar irrelevanten Ausnahmen, liegen innerhalb der Grenzwerte. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass der Raum in vollem Zustand eine Nachhallzeit unter dem Grenzwert haben wird. HS VIII ist weder zu scharf, noch brummt er. Einzig ein eigenartiges leises Klicken oder Knacken lässt sich in der Decke nahe der Fenster feststellen.

Fazit:

Das „Klicken“ oder „Knacken“ sollte behoben werden. Gerade wenn es sehr leise ist, kann es störend werden. Ansonsten ist es ein ausgesprochen guter Hörsaal, was sowohl objektive als auch subjektive Messungen bestätigen. Eine Sanierung ist nicht notwendig.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.68	1.49	0.62	0.69	0.85	0.84	0.74	0.57
	Ch2/1	1.40	0.78	0.58	0.74	0.78	0.87	0.74	0.58
	Ch1/2	1.35	0.79	0.68	0.74	0.84	0.89	0.76	0.58
	Ch2/2	1.22	0.89	0.61	0.67	0.77	0.86	0.80	0.58
EDT in s	Ch1/1	1.27	0.75	0.75	0.94	0.78	0.93	0.82	0.54
	Ch2/1	1.16	0.97	0.89	0.69	0.69	0.83	0.69	0.44
	Ch1/2	1.34	0.99	0.90	0.42	1.05	0.84	0.81	0.45
	Ch2/2	1.09	1.02	0.97	0.76	0.79	0.89	0.80	0.50
t_s in s	Ch1/1	0.103	0.074	0.041	0.052	0.057	0.070	0.058	0.041
	Ch2/1	0.112	0.071	0.061	0.066	0.059	0.066	0.051	0.036
	Ch1/2	0.140	0.064	0.061	0.061	0.061	0.061	0.050	0.032
	Ch2/2	0.092	0.052	0.062	0.052	0.065	0.070	0.055	0.039
A_{cons} in %	Ch1/1	23.99	17.17	10.88	12.62	11.99	11.56	8.86	5.89
	Ch2/1	36.00	25.77	16.33	18.94	17.99	17.34	13.29	8.85
	Ch1/2	36.49	26.12	16.56	19.20	18.24	17.58	13.47	8.97
	Ch2/2	12.32	8.82	5.59	6.48	6.16	5.93	4.55	3.03
D_{50} in %	Ch1/1	32.25	39.56	76.62	65.48	55.82	44.04	57.76	71.32
	Ch2/1	11.99	53.54	63.41	38.14	57.81	52.46	64.09	77.55
	Ch1/2	6.25	53.43	53.43	74.68	60.94	57.02	65.75	80.56
	Ch2/2	25.32	71.68	50.78	63.70	51.00	50.27	59.71	75.73



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.64	1.37
Ch2/1	0.66	0.89
Ch1/2	0.66	0.93
Ch2/2	0.65	1.04

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



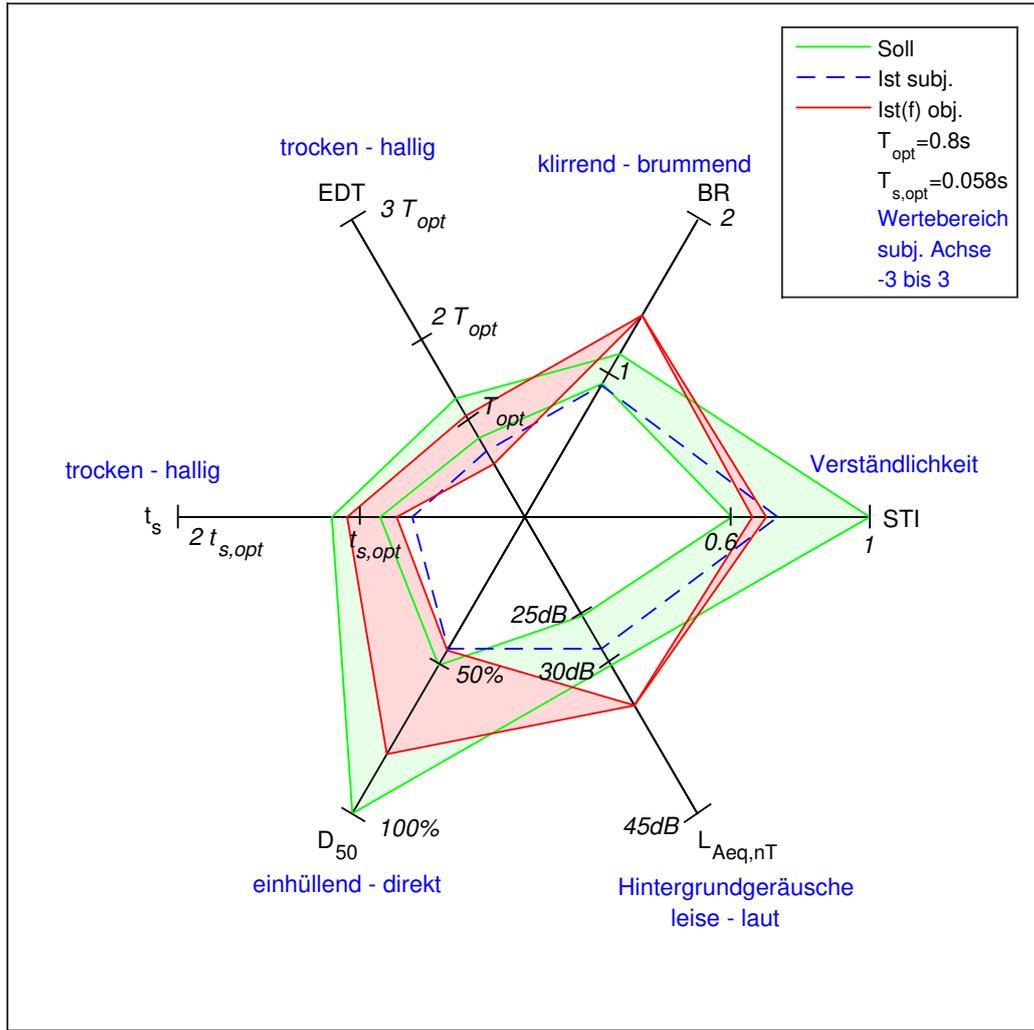
DATENBLATT HS XII



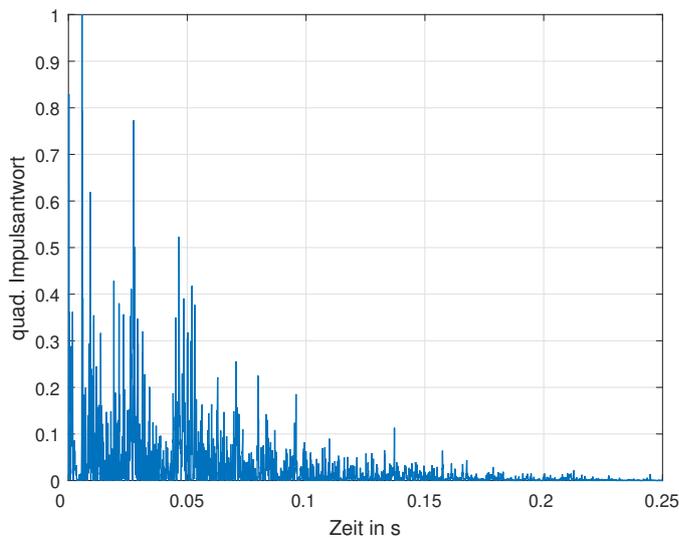
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

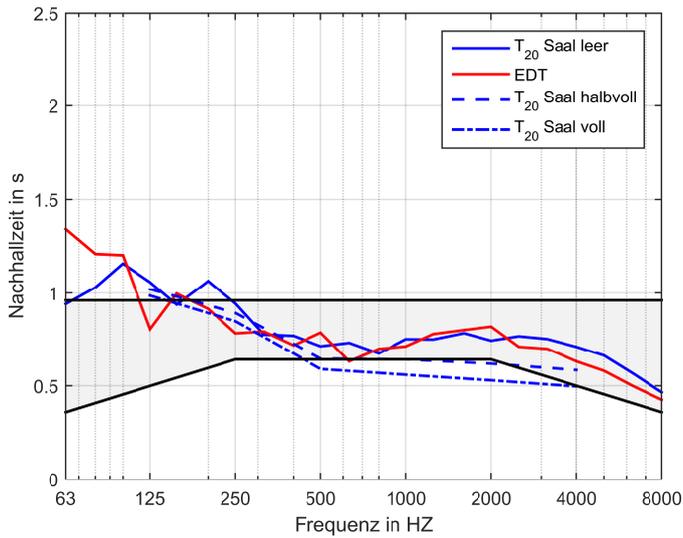
Wintersemester 2018/2019



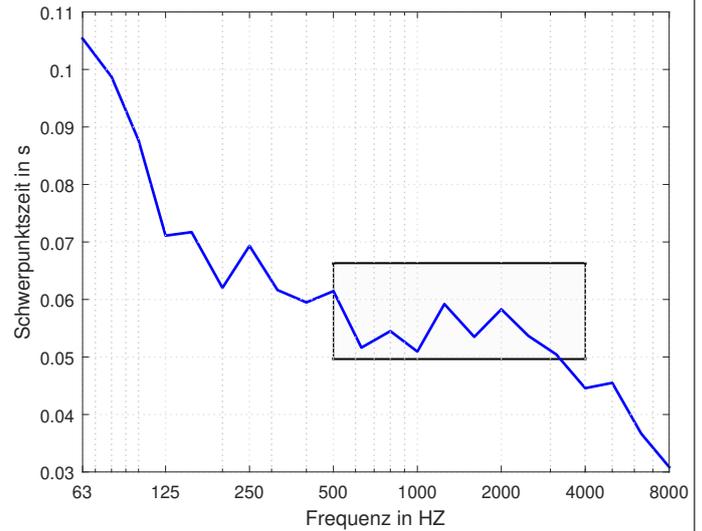
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Hintergrundgeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



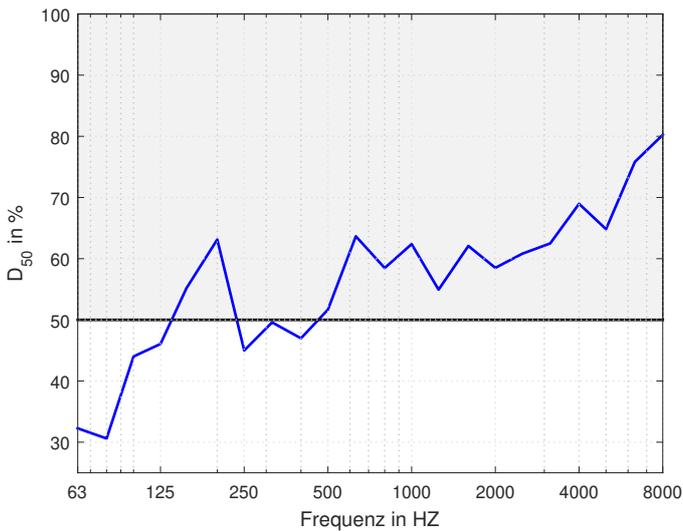
Messbedingungen	
Datum	09.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	347 m ³
Temperatur	20, 5°C
Luftfeuchtigkeit	45,4%
<i>L_{Aeq}</i>	34,4 dB(A)
Bestuhlung	48 Sitze Holz
Boden	Holzparkett
Wände	Verputz
Decke	Lochabsorber
Absorber	Poröse Absorber
Reflektoren	keine



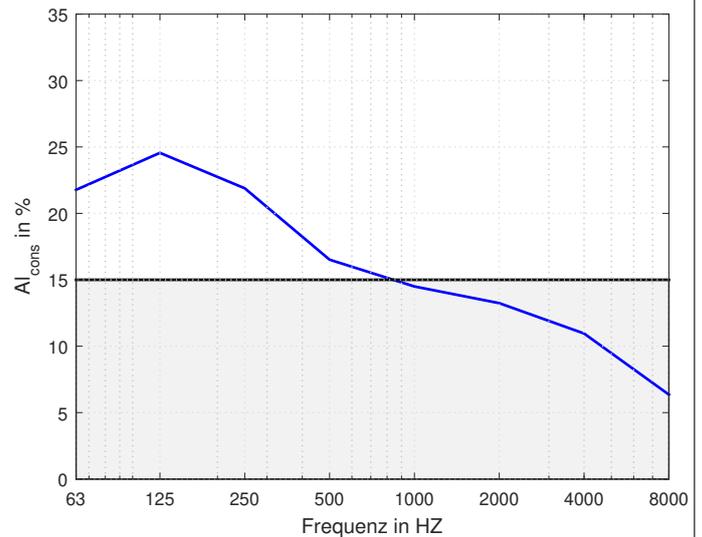
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.94	1.06	0.94	0.71	0.75	0.74	0.71	0.47
T_{20} halbvoll in s	–	0.92	1.02	0.97	0.80	0.72	0.65	–
T_{20} voll in s	–	0.89	0.96	0.85	0.67	0.60	0.54	–
EDT in s	1.34	0.80	0.78	0.78	0.71	0.82	0.63	0.43



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.105	0.071	0.069	0.061	0.051	0.058	0.044	0.031



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	32	46	45	51.5	62	58.5	69	80



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	10	8	12	8	9	6	5	3

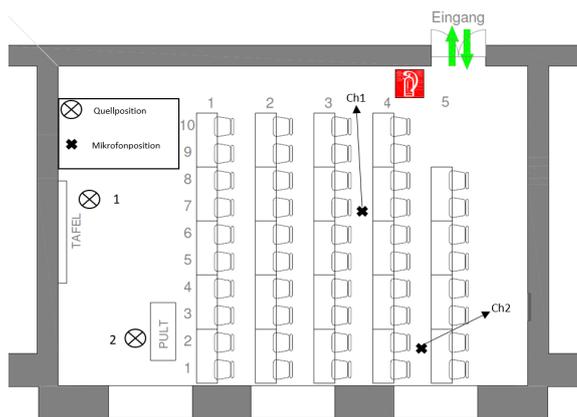
Diskussion:

Im Hörsaal HS XII liegt die Nachhallzeit EDT über alle Frequenzen innerhalb der Grenzwerte mit Ausnahme von T_{20} im Bereich von 125 Hz bis ca. 250 Hz. In diesem Frequenzbereich ist auch der Artikulationsverlust Al_{cons} größer als 20%, was zu einer unbrauchbaren Verständlichkeit bei dieser Frequenz führt. Subjektiv wurde dieses Phänomen nicht wahrgenommen. Der Raum wurde lediglich als dumpf, aber sehr angenehm beschrieben. Durch die Anwesenheit von Publikum sinkt die Nachhallzeit in vollem Zustand, im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4 kHz, unter den Toleranzbereich. Die Schwerpunktszeit liegt, wie sonst bei wenigen Hörsälen, innerhalb der Grenzwerte.

Fazit:

Trotz des ein oder anderen kritischen Wertes ist anhand der ausreichenden Sprachverständlichkeit keine Sanierung notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.85	1.28	1.56	1.64	1.91	2.06	1.69	1.51
	Ch2/1	0.92	1.41	1.44	1.71	1.95	2.07	1.75	1.55
	Ch1/2	1.09	1.44	1.47	1.70	1.99	2.03	1.72	1.55
	Ch2/2	0.96	1.48	1.59	1.65	1.93	2.05	1.71	1.55
EDT in s	Ch1/1	0.87	1.20	1.29	1.78	1.88	2.02	1.66	1.44
	Ch2/1	0.62	0.93	1.50	1.58	1.87	2.06	1.63	1.43
	Ch1/2	0.69	1.20	1.64	1.72	1.95	2.09	1.70	1.47
	Ch2/2	0.98	1.17	1.46	1.67	1.87	2.20	1.70	1.55
t_s in s	Ch1/1	0.076	0.094	0.096	0.115	0.126	0.136	0.109	0.104
	Ch2/1	0.065	0.083	0.093	0.101	0.133	0.130	0.108	0.093
	Ch1/2	0.067	0.107	0.124	0.128	0.143	0.140	0.119	0.098
	Ch2/2	0.081	0.097	0.105	0.115	0.136	0.162	0.125	0.118
A_{lcons} in %	Ch1/1	24.19	56.20	83.58	90.20	95.16	99.50	64.33	45.40
	Ch2/1	26.67	63.32	66.76	93.62	97.80	96.54	65.12	45.55
	Ch1/2	19.19	33.69	35.45	47.79	54.24	51.70	32.39	23.22
	Ch2/2	9.79	24.51	27.02	29.12	33.03	34.53	20.85	15.10
D_{50} in %	Ch1/1	43.11	45.17	45.07	39.30	38.21	34.18	41.58	38.44
	Ch2/1	42.31	39.12	44.48	44.70	33.83	39.05	42.62	46.31
	Ch1/2	49.54	30.76	28.81	34.52	28.79	32.16	35.73	44.20
	Ch2/2	39.48	40.40	35.62	40.57	29.96	24.68	31.72	32.14



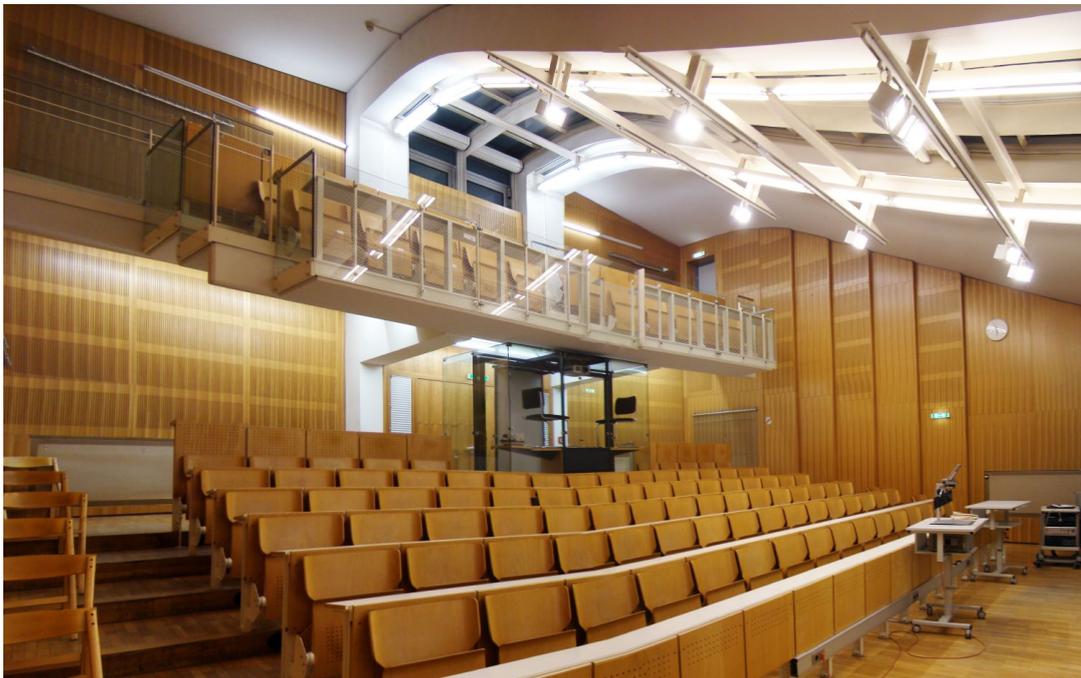
Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.67	1.59
Ch2/1	0.66	1.26
Ch1/2	0.70	1.23
Ch2/2	0.67	1.36

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



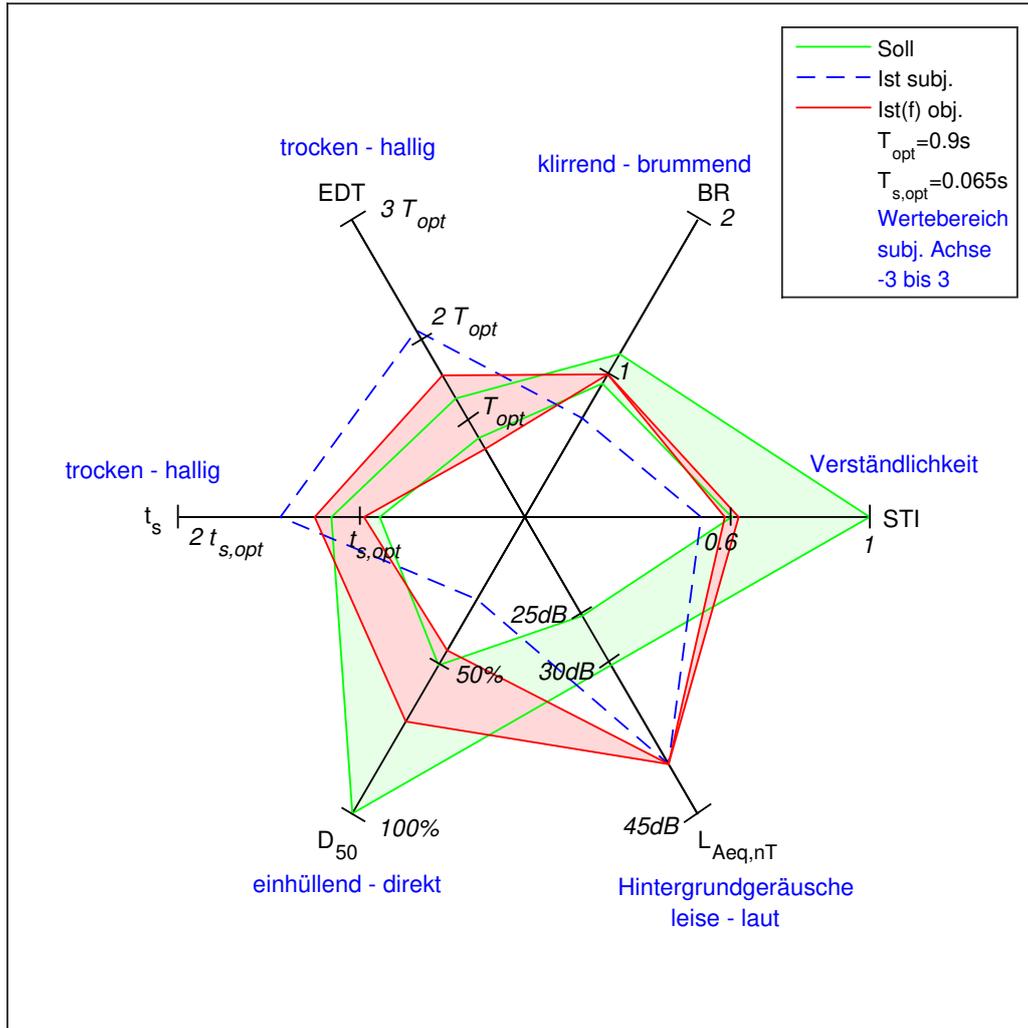
DATENBLATT HS L



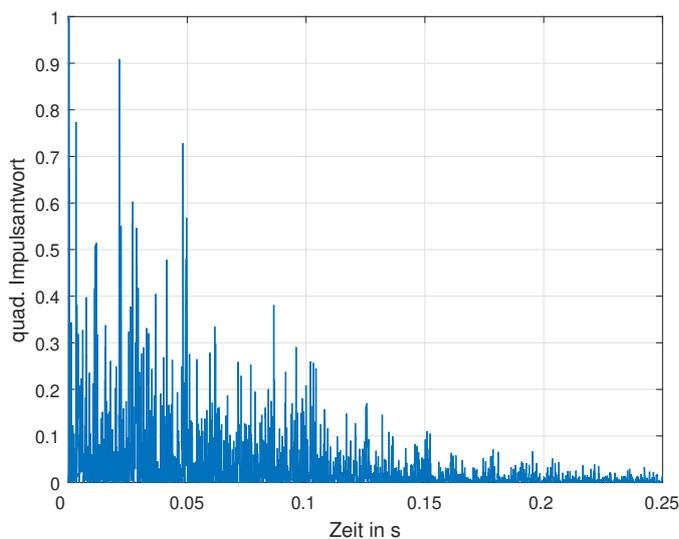
RECHBAUERSTRASSE 12

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

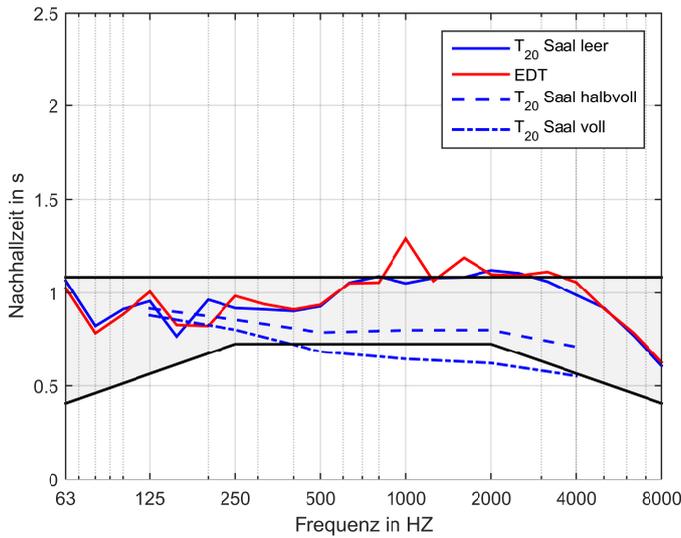
Wintersemester 2018/2019



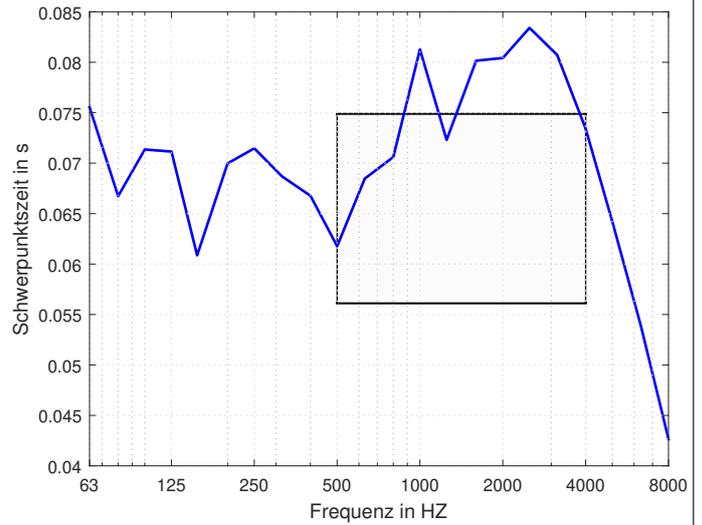
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Hintergrundgeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



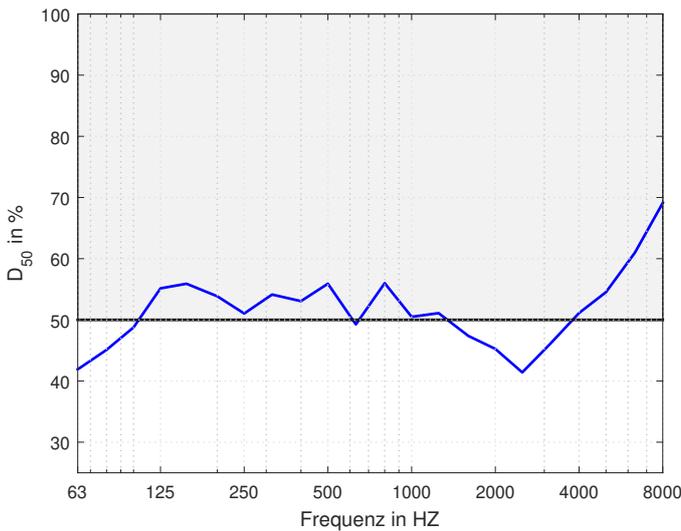
Messbedingungen	
Datum	09.12.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	662 m ³
Temperatur	21,4°C
Luftfeuchtigkeit	53,1%
L _{Aeq}	40 dB(A)
Bestuhlung	122 Sitze Holz
Boden	Parkett
Wände	Holzplatten, Gips
Decke	Gips, Fenster
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Fenster, Glasplatten



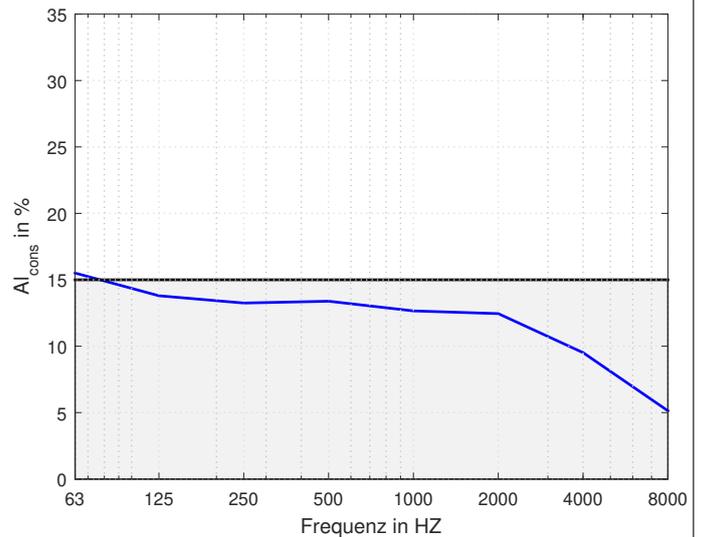
Nachhallzeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	1.07	0.96	0.92	0.93	1.05	1.12	0.99	0.60
T_{20} halbvoll in s	–	0.92	0.85	0.79	0.80	0.80	0.71	–
T_{20} voll in s	–	0.88	0.80	0.68	0.64	0.62	0.55	–
<i>EDT</i> in s	1.03	1.01	0.98	0.94	1.29	1.10	1.06	0.62



Schwerpunktzeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.076	0.071	0.071	0.062	0.081	0.080	0.073	0.043



Deutlichkeitsgrad								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	42	55	51	56	50	45	51	69

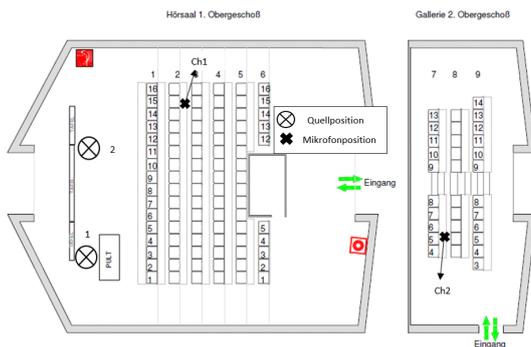


Artikulationsverlust								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	16	14	13	13	13	12	10	5

Diskussion: Durch die niedrige Volumenskennzahl von $5,4m^3/Pers$ sind die akustischen Unterschiede zwischen leerem und vollem Raum besonders groß. So liegen die Nachhallzeiten des Hörsaals T_{20} und EDT im leeren Zustand teilweise oberhalb und bei vollem Zustand unterhalb der Grenzwerte. Ein weiteres Problem ist die laute Lüftung des Raumes, welche zu einer sehr schlechten subjektiven Verständlichkeit führt. Von der Galerie aus schaut man durch ein Glasgänder auf die Tafel und den/die Vortragende/n, was keinen Direktschall erlaubt. Wie aus den Tabellen für einzelne Positionen ersichtlich, ist die Verständlichkeit dort weit unterhalb des erlaubten Bereichs, wenn sich die Quelle vor der Tafel befindet.

Fazit: Durch die Glasgänder ist die Sprachverständlichkeit in der Galerie nicht gegeben. Es ist notwendig und einfach realisierbar, die Glasplatten durch ein akustisch transparentes Material zu ersetzen.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.14	0.94	1.09	0.96	1.04	1.16	0.95	0.60
	Ch2/1	0.49	1.05	0.78	0.79	1.03	1.06	1.01	0.63
	Ch1/2	0.90	0.89	1.05	0.87	1.02	1.09	1.00	0.60
	Ch2/2	1.78	0.95	0.83	1.08	1.13	1.16	1.01	0.62
EDT in s	Ch1/1	1.07	1.50	0.71	0.90	1.29	1.00	1.06	0.59
	Ch2/1	0.82	0.98	1.16	1.09	1.31	1.20	1.02	0.63
	Ch1/2	0.77	0.59	0.94	0.95	1.36	1.11	1.05	0.61
	Ch2/2	1.46	0.97	1.11	0.78	1.17	1.10	1.09	0.65
t_s in s	Ch1/1	0.092	0.099	0.065	0.067	0.073	0.076	0.077	0.047
	Ch2/1	0.078	0.058	0.072	0.052	0.077	0.080	0.063	0.037
	Ch1/2	0.057	0.036	0.057	0.046	0.081	0.080	0.068	0.031
	Ch2/2	0.075	0.095	0.092	0.082	0.094	0.085	0.085	0.055
A_{cons} in %	Ch1/1	20.43	18.18	17.45	17.64	16.68	16.41	12.54	6.77
	Ch2/1	14.76	13.14	12.61	12.74	12.05	11.85	9.06	4.89
	Ch1/2	3.07	2.73	2.62	2.65	2.51	2.46	1.88	1.01
	Ch2/2	23.75	21.13	20.29	20.50	19.38	19.07	14.57	7.87
D_{50} in %	Ch1/1	23.95	39.42	50.15	51.47	56.32	48.70	47.38	63.70
	Ch2/1	21.09	68.42	53.27	63.75	53.44	46.59	60.91	73.71
	Ch1/2	57.98	81.32	64.02	72.86	52.25	44.48	53.82	79.56
	Ch2/2	64.70	28.69	38.46	34.60	38.57	42.33	42.52	59.98



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.59	1.02
Ch2/1	0.62	1.00
Ch1/2	0.62	1.02
Ch2/2	0.58	0.81

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



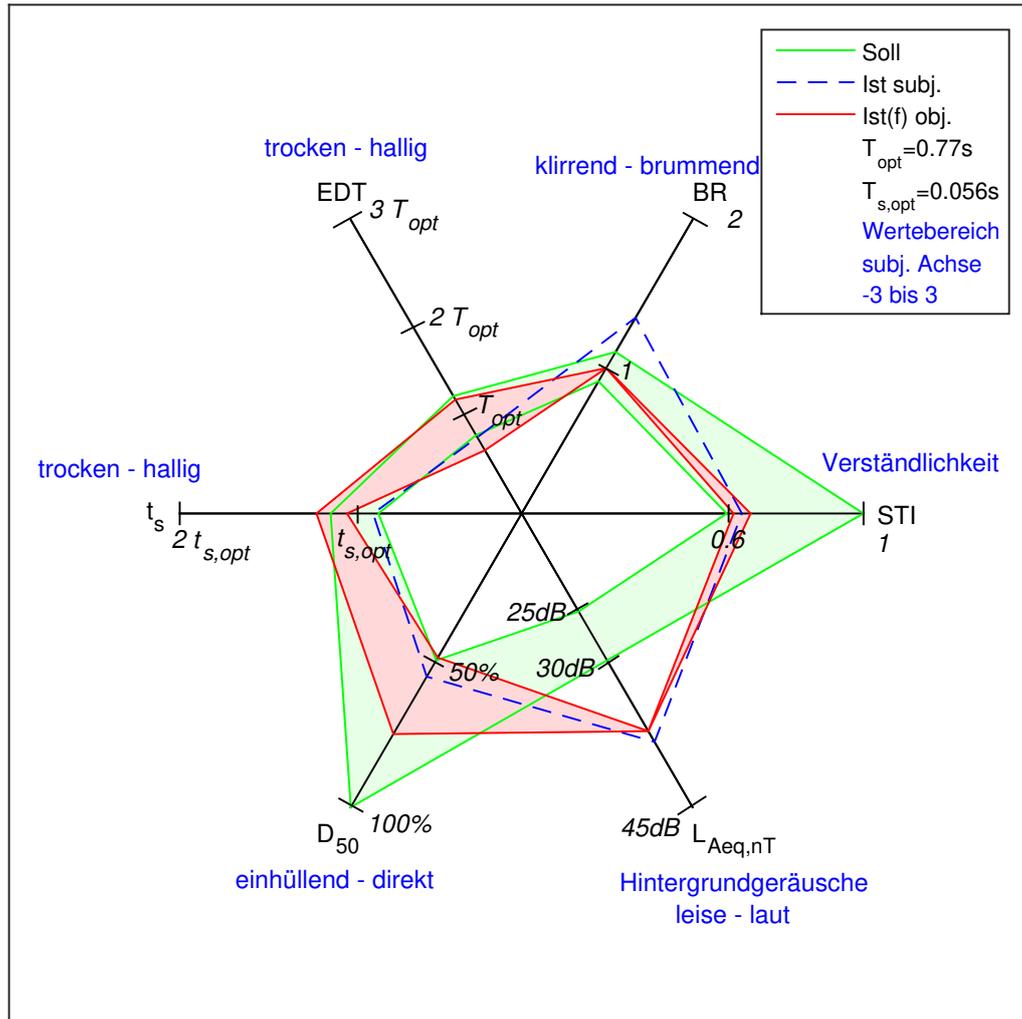
DATENBLATT LS XIII (ARCH I)



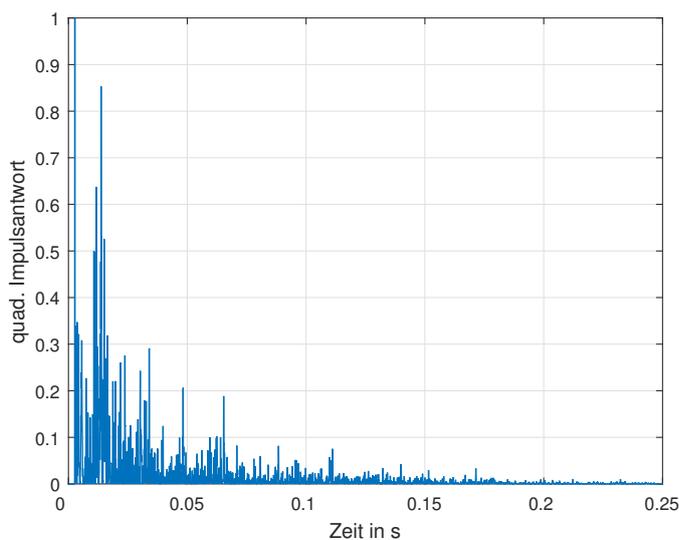
KRONESGASSE 5

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

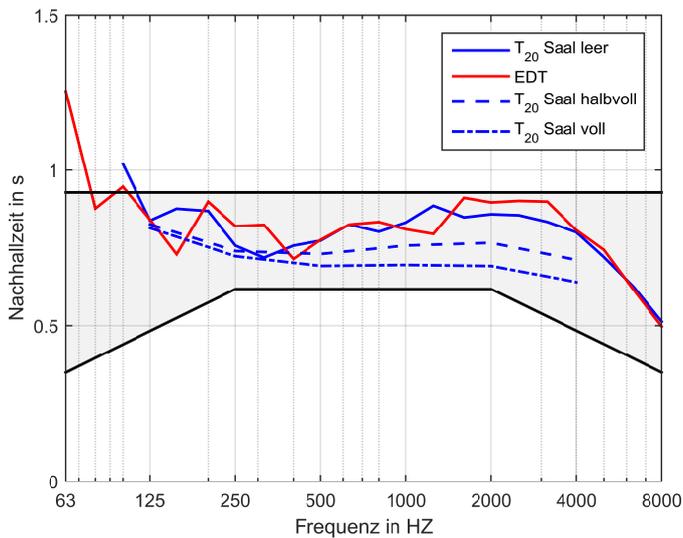
Wintersemester 2018/2019



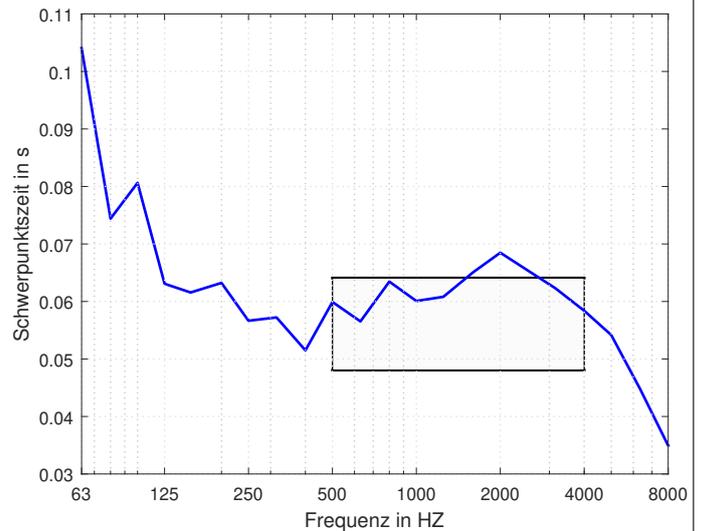
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



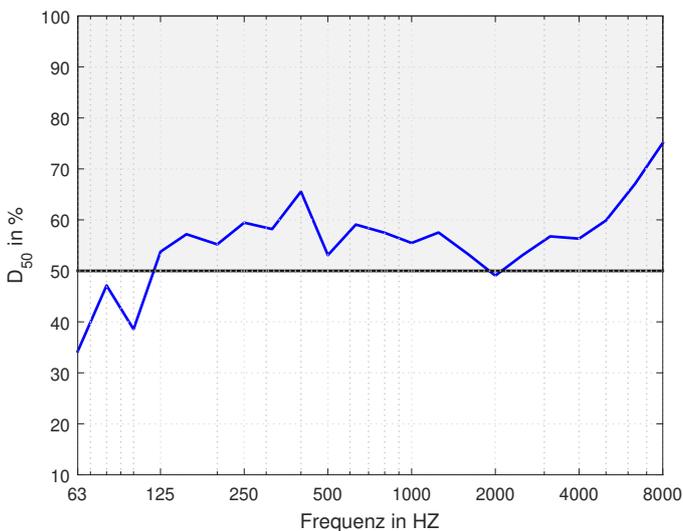
Messbedingungen	
Datum	02.02.2019
Messmethoden	Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	295 m ³
Temperatur	23°C
Luftfeuchtigkeit	30,2%
L _{Aeq}	37,23dB(A)
Bestuhlung	21 Sitze Holz
Boden	Linoleum
Wände	Verputz, Beton
Decke	Gipsplatten
Absorber	Lochabsorber
Reflektoren	keine



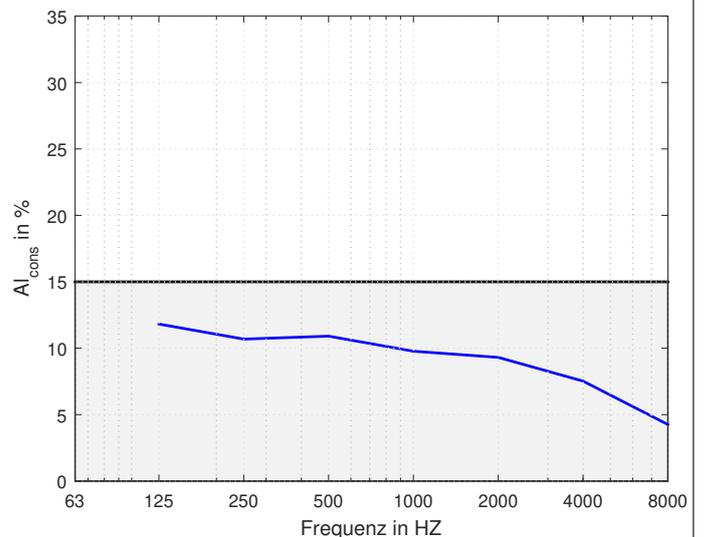
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	–	0.84	0.76	0.77	0.83	0.86	0.80	0.51
T_{20} halbvoll in s	–	0.83	0.74	0.73	0.76	0.76	0.71	–
T_{20} voll in s	–	0.81	0.72	0.69	0.70	0.69	0.64	–
EDT in s	1.26	0.84	0.82	0.78	0.81	0.90	0.81	0.50



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.105	0.063	0.057	0.060	0.060	0.068	0.058	0.035



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	34	54	59	53	55	49	56	75



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	–	12	11	11	10	9	8	4

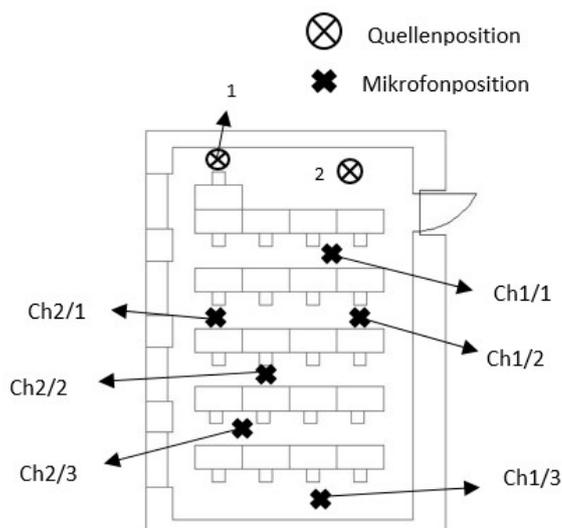
Diskussion:

Bis auf den Hintergrundgeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ befinden sich alle Parameter in den zulässigen Bereichen. Dies ist sowohl aus dem Netzdiagramm als auch aus den Diagrammen ersichtlich. Der hohe Hintergrundgeräuschpegel wird hauptsächlich durch die hohe Anzahl der Standrechner im Raum verursacht, wodurch auch die Sprachverständlichkeit nur knapp gut genug ist. Objektive und subjektive Messungen stimmen gut überein.

Fazit:

Eine akustische Sanierung ist nicht notwendig. Eventuell ist es empfehlenswert, den Raum aufgrund des Hintergrundrauschens der Rechner leicht zu überdämpfen.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.33	0.95	0.94	0.66	0.74	0.83	0.79	0.49
	Ch2/1	1.46	1.01	0.74	0.69	0.80	0.82	0.83	0.50
	Ch1/2	1.67	0.73	0.58	0.74	0.75	0.88	0.77	0.49
	Ch2/2	1.34	0.64	0.83	0.81	0.83	0.85	0.80	0.50
	Ch1/3	0.85	0.70	0.73	0.79	0.87	0.83	0.79	0.52
	Ch2/3	1.76	0.89	0.81	0.75	0.89	0.84	0.84	0.53
EDT in s	Ch1/1	0.77	0.84	0.41	1.07	0.82	0.80	0.76	0.45
	Ch2/1	0.77	1.15	0.91	0.82	0.71	0.97	0.73	0.51
	Ch1/2	1.30	0.59	0.72	0.67	0.78	0.88	0.77	0.44
	Ch2/2	0.41	1.17	0.93	0.75	0.94	0.94	0.79	0.56
	Ch1/3	1.68	1.10	1.14	0.64	0.81	1.04	0.83	0.54
	Ch2/3	2.15	0.51	0.76	0.99	0.80	0.91	0.76	0.52
t_s in s	Ch1/1	0.070	0.075	0.026	0.063	0.062	0.051	0.044	0.029
	Ch2/1	0.063	0.058	0.048	0.066	0.062	0.074	0.057	0.036
	Ch1/2	0.110	0.039	0.058	0.042	0.056	0.065	0.052	0.030
	Ch2/2	0.046	0.070	0.064	0.058	0.058	0.080	0.064	0.040
	Ch1/3	0.157	0.098	0.084	0.058	0.073	0.083	0.063	0.039
	Ch2/3	0.139	0.057	0.041	0.057	0.069	0.075	0.068	0.043
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	–	6.04	5.46	5.57	4.99	4.75	3.84	2.17
	Ch2/1	–	9.74	8.81	8.99	8.05	7.67	6.20	3.50
	Ch1/2	–	13.65	12.34	12.59	11.29	10.75	8.69	4.91
	Ch2/2	–	17.83	16.12	16.45	14.74	14.04	11.35	6.41
	Ch1/3	–	47.08	42.57	43.45	38.93	37.08	29.97	16.95
	Ch2/3	–	30.29	27.39	27.96	25.05	23.86	19.28	10.90
D_{50} in %	Ch1/1	44.12	39.97	89.32	53.06	47.34	66.41	71.60	81.33
	Ch2/1	54.39	56.89	59.83	43.68	53.89	37.82	54.37	74.34
	Ch1/2	29.03	80.87	52.20	72.66	62.64	52.48	61.42	79.97
	Ch2/2	75.70	44.93	55.74	56.68	60.72	36.48	55.04	68.61
	Ch1/3	12.45	24.02	30.20	44.29	36.62	39.58	51.60	71.87
	Ch2/3	36.68	48.19	77.83	60.03	48.53	43.74	41.85	68.80



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.68	1.35
Ch2/1	0.65	1.17
Ch1/2	0.67	0.88
Ch2/2	0.62	0.90
Ch1/3	0.64	0.86
Ch2/3	0.63	1.04

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



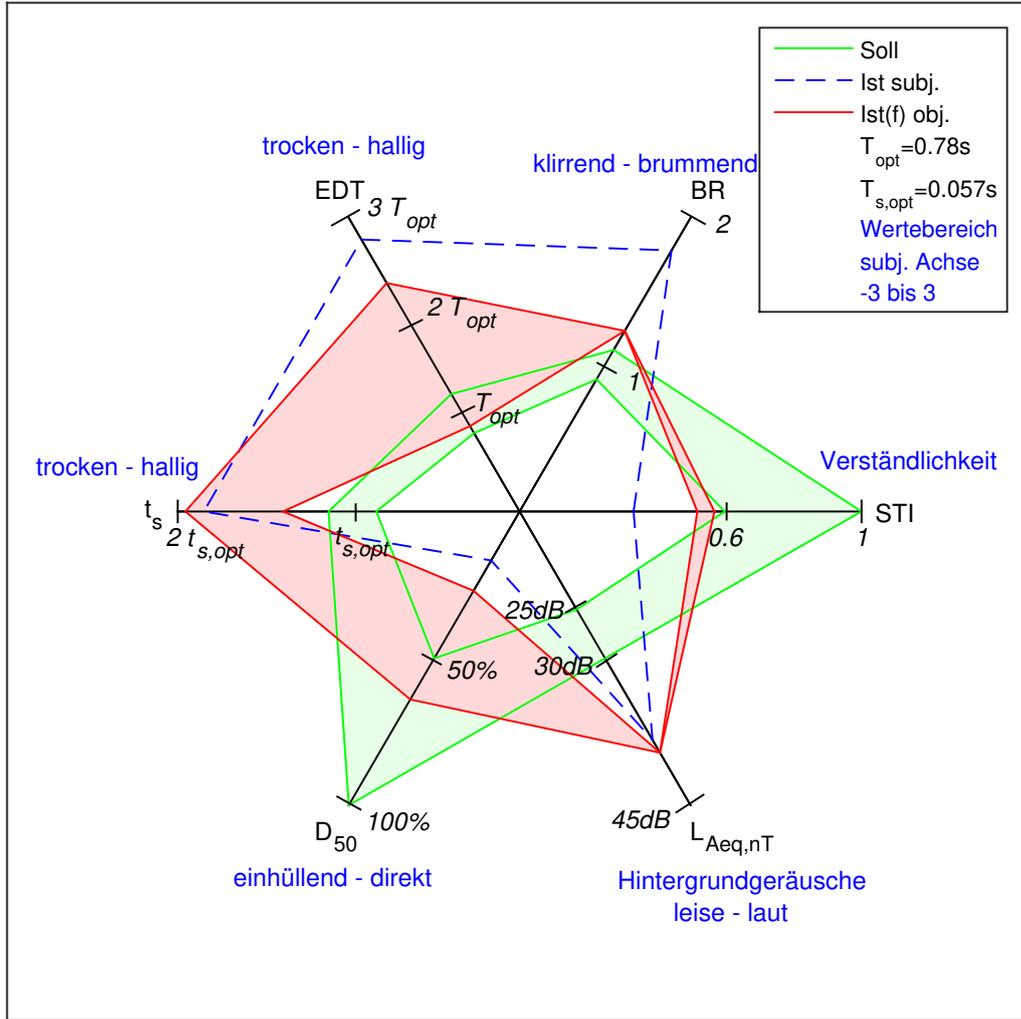
DATENBLATT LS XIV (ARCH II)



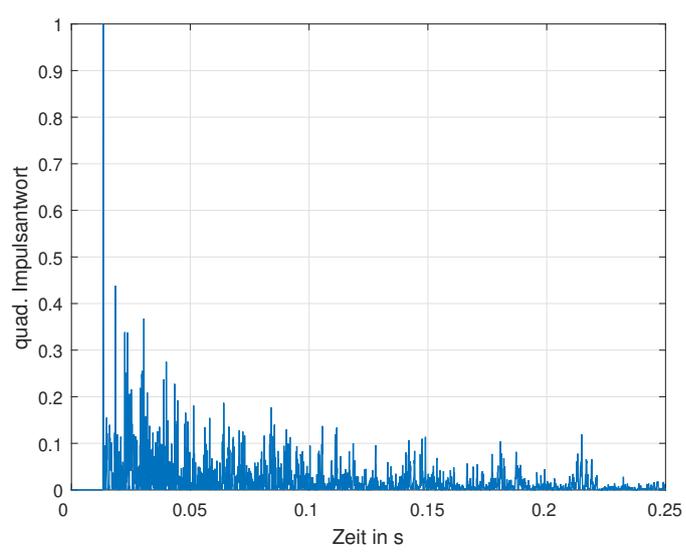
KRONESGASSE 5

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

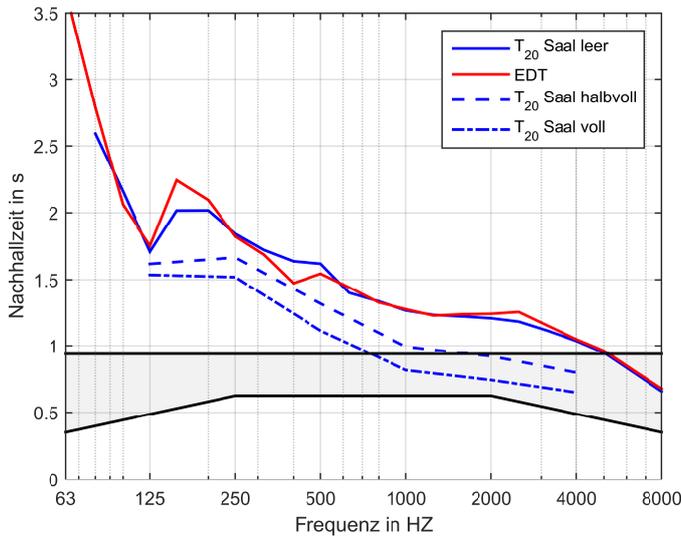
Wintersemester 2018/2019



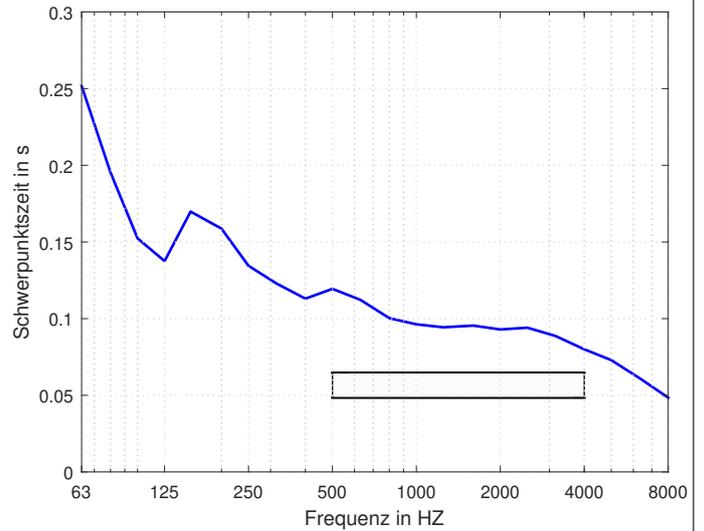
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



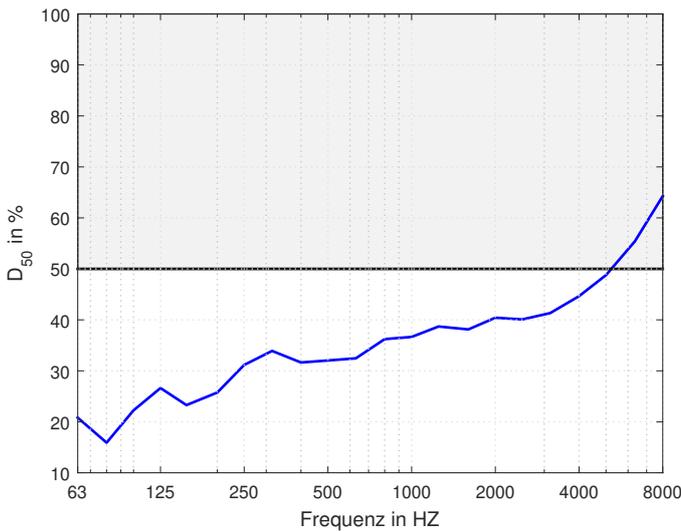
Messbedingungen	
Datum	02.02.2019
Messmethoden	Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	308,5 m ³
Temperatur	22,9°C
Luftfeuchtigkeit	34%
LAeq	39,6 dB(A)
Bestuhlung	41 Sitze Holz
Boden	Linoleum
Wände	Verputz, Beton
Decke	Verputz
Absorber	Nein
Reflektoren	keine



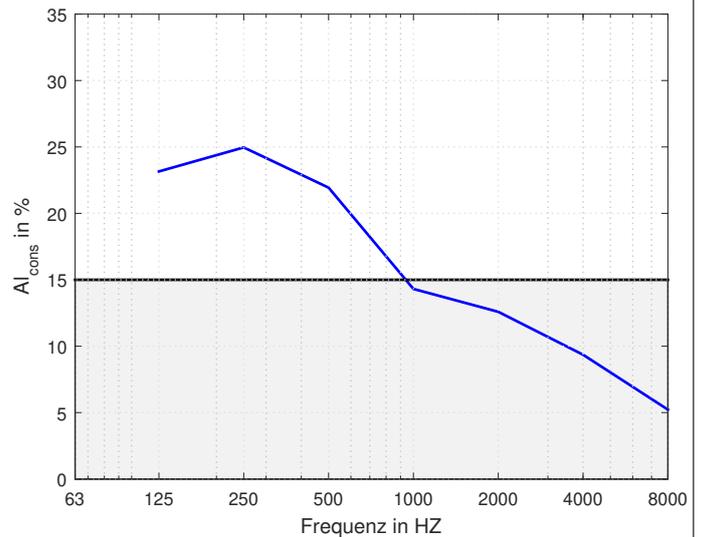
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	—	1.71	1.84	1.62	1.27	1.21	1.04	0.66
T_{20} halbvoll in s	—	1.62	1.67	1.32	0.99	0.92	0.80	—
T_{20} voll in s	—	1.54	1.52	1.11	0.82	0.74	0.65	—
EDT in s	3.69	1.75	1.82	1.54	1.28	1.24	1.05	0.68



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.254	0.137	0.134	0.119	0.096	0.093	0.080	0.048



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	21	27	31	32	37	40	45	64



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	—	23	25	22	14	13	9	5

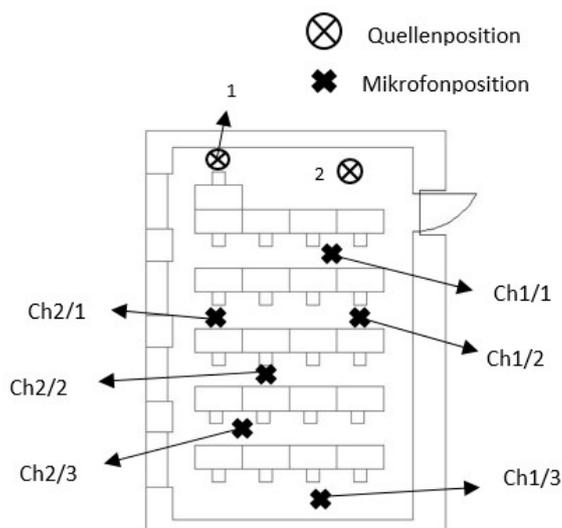
Diskussion:

In diesem Raum gibt es bisher keine Absorber oder sonstigen Maßnahmen, die einer guten Akustik dienen. Die gekrümmten Pberflächen an der Decke wirken wie Diffusoren, die in diesem Fall negative Auswirkungen haben. Bemerkenswert ist auch, dass es fast nicht möglich ist, Sprache zu verstehen, sobald zwei oder mehr Personen gleichzeitig reden. Alle objektiven Parameter sind fast ausschließlich außerhalb der zu erfüllenden Grenzen, was ebenfalls dem subjektiven Eindruck entspricht.

Fazit:

Durch die lange Nachhallzeit ist die Sprachverständlichkeit nicht gegeben. Eine akustische Sanierung ist unbedingt notwendig.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	3.71	1.64	1.78	1.73	1.25	1.26	1.04	0.65
	Ch2/1	3.37	1.78	1.80	1.56	1.27	1.19	0.98	0.66
	Ch1/2	3.45	1.67	1.89	1.58	1.25	1.25	1.01	0.64
	Ch2/2	4.07	1.39	1.72	1.67	1.29	1.17	1.05	0.66
	Ch1/3	–	1.79	1.84	1.59	1.21	1.24	1.07	0.65
	Ch2/3	4.66	2.08	2.25	1.76	1.26	1.16	1.08	0.65
EDT in s	Ch1/1	3.66	2.45	1.47	1.50	1.17	1.42	0.98	0.60
	Ch2/1	3.41	1.70	2.20	1.60	1.48	1.29	1.04	0.65
	Ch1/2	3.51	1.68	1.98	1.73	1.18	1.18	1.07	0.63
	Ch2/2	3.53	1.94	1.55	1.46	1.31	1.28	1.05	0.70
	Ch1/3	3.42	1.80	2.46	1.39	1.21	1.30	1.06	0.73
	Ch2/3	4.23	1.89	1.37	1.29	1.45	1.31	1.06	0.75
t_s in s	Ch1/1	0.238	0.183	0.118	0.097	0.086	0.081	0.068	0.041
	Ch2/1	0.230	0.112	0.133	0.127	0.101	0.102	0.074	0.044
	Ch1/2	0.243	0.116	0.156	0.142	0.090	0.088	0.083	0.049
	Ch2/2	0.208	0.174	0.130	0.125	0.109	0.112	0.086	0.055
	Ch1/3	0.231	0.165	0.190	0.110	0.101	0.089	0.087	0.053
	Ch2/3	0.249	0.164	0.121	0.114	0.105	0.103	0.089	0.055
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	–	12.06	13.00	11.43	7.45	6.56	4.87	2.72
	Ch2/1	–	16.85	18.16	15.96	10.41	9.16	6.81	3.80
	Ch1/2	–	27.70	29.86	26.23	17.12	15.06	11.19	6.25
	Ch2/2	–	36.00	38.81	34.10	22.25	19.57	14.55	8.12
	Ch1/3	–	80.05	86.30	75.83	49.48	43.52	32.35	18.07
	Ch2/3	–	59.04	63.65	55.93	36.49	32.10	23.86	13.32
D_{50} in %	Ch1/1	12.09	21.18	29.82	48.16	40.21	54.81	54.47	73.03
	Ch2/1	24.45	48.73	32.42	24.79	37.21	30.11	48.63	68.05
	Ch1/2	20.85	41.70	29.06	22.60	39.95	41.50	42.79	62.92
	Ch2/2	32.86	4.55	27.36	30.03	27.64	24.60	39.23	55.18
	Ch1/3	27.48	9.22	13.08	34.93	30.55	50.50	38.85	61.68
	Ch2/3	31.87	14.44	26.72	26.50	32.60	33.04	40.09	58.64



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.57	1.15
Ch2/1	0.53	1.27
Ch1/2	0.54	1.26
Ch2/2	0.52	1.05
Ch1/3	0.54	1.30
Ch2/3	0.54	1.43

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



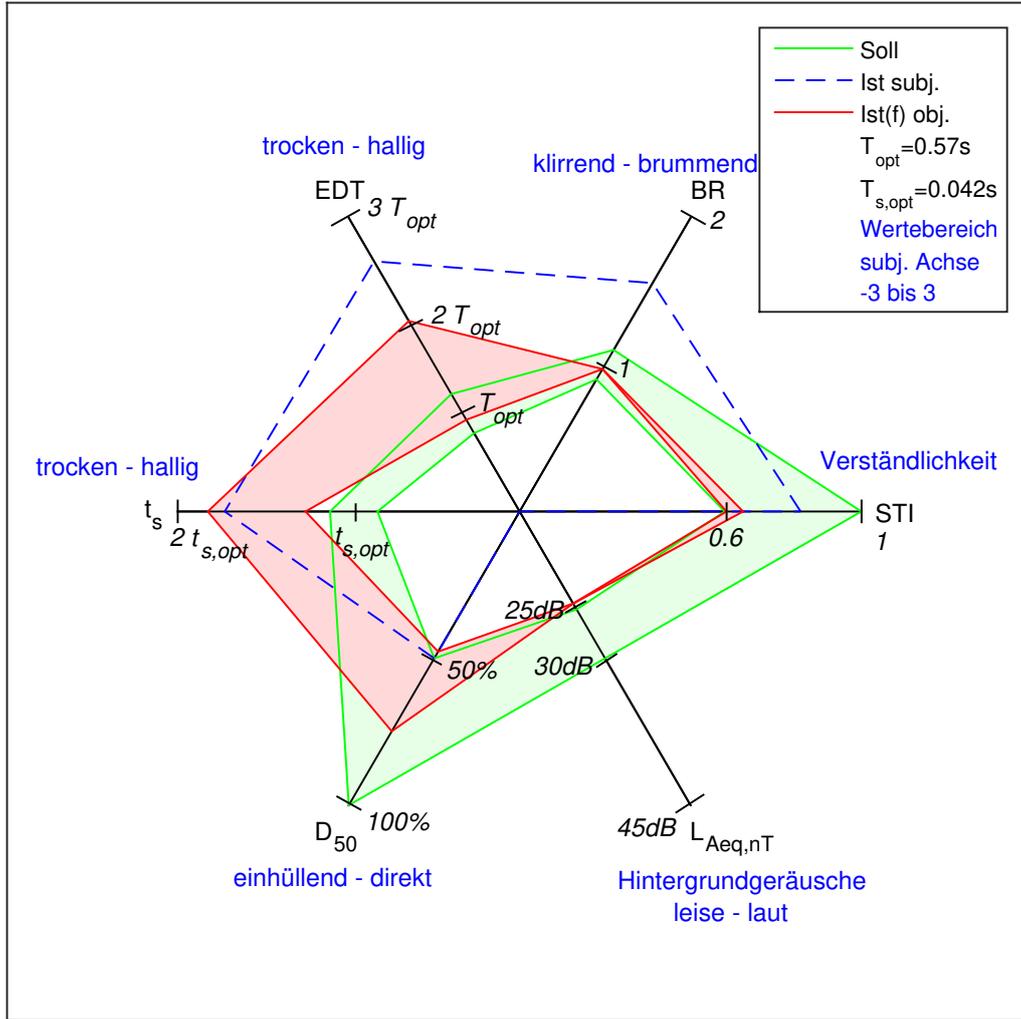
DATENBLATT BESPRECHUNGSRAUM KRdGo24



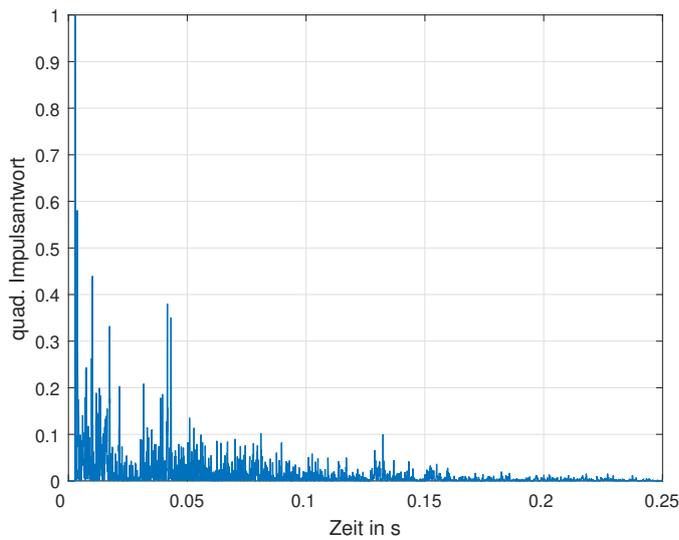
KRONESGASSE 5

DJ. PERINOVIC, L. RADOVANOVIC, A. MÜLLEDER

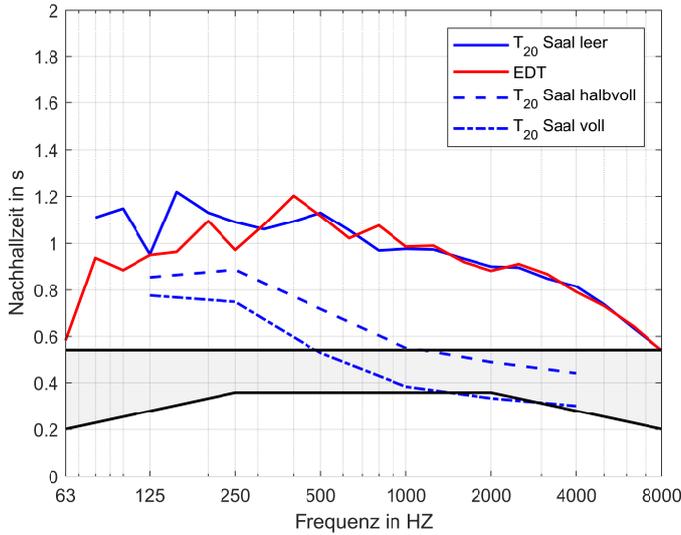
Wintersemester 2018/2019



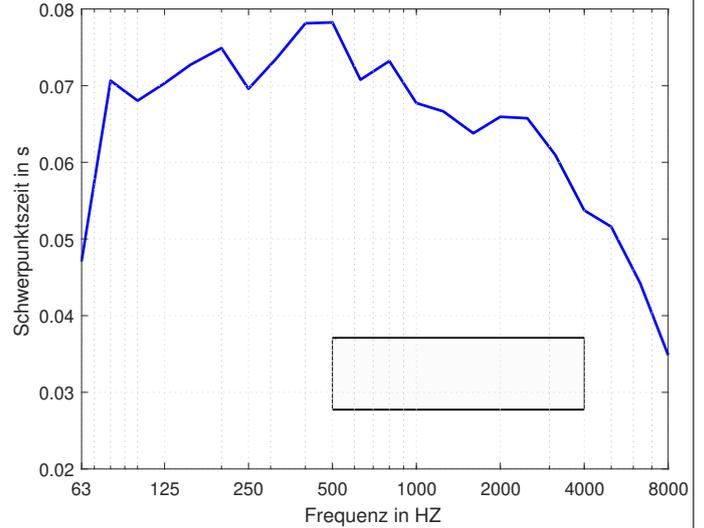
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Hintergrundgeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



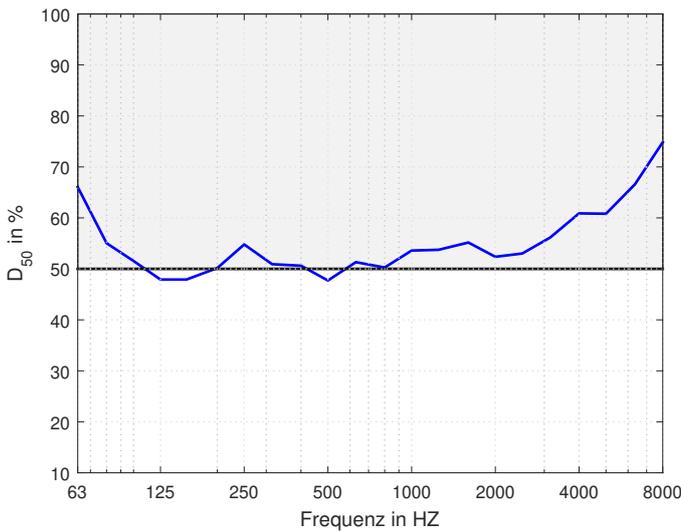
Messbedingungen	
Datum	02.02.2019
Messmethoden	Exp. Sweep
Personen im Raum	3
Raumvolumen	85 m ³
Temperatur	21.6°C
Luftfeuchtigkeit	34,5%
L_{Aeq}	24,4dB(A)
Bestuhlung	12 Sitze Holz
Boden	Parkett
Wände	Beton, Glasplatten, Gips
Decke	Gips
Absorber	Nein
Reflektoren	Glasplatten



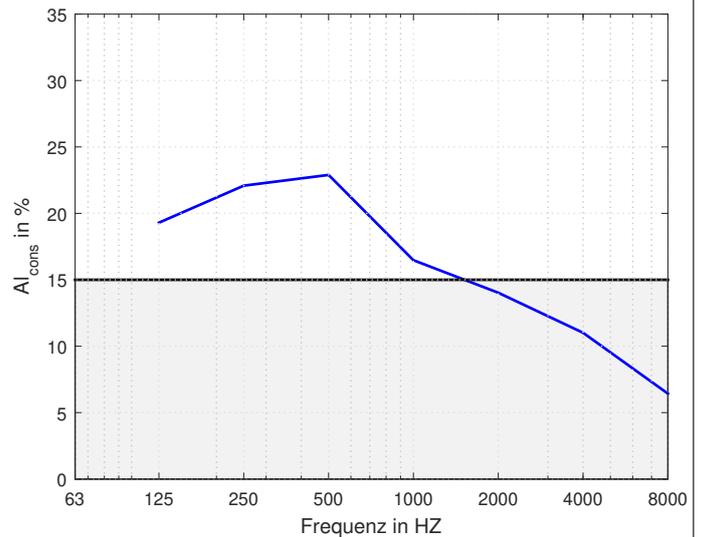
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	—	0.95	1.09	1.13	0.98	0.90	0.82	0.54
T_{20} halbvoll in s	—	0.92	1.02	0.97	0.80	0.72	0.65	—
T_{20} voll in s	—	0.89	0.96	0.85	0.67	0.60	0.54	—
EDT in s	0.57	0.95	0.97	1.12	0.99	0.88	0.79	0.54



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.046	0.070	0.070	0.078	0.068	0.066	0.054	0.035



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	66	48	55	48	54	52	60	75



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	—	19	22	23	16	14	11	6

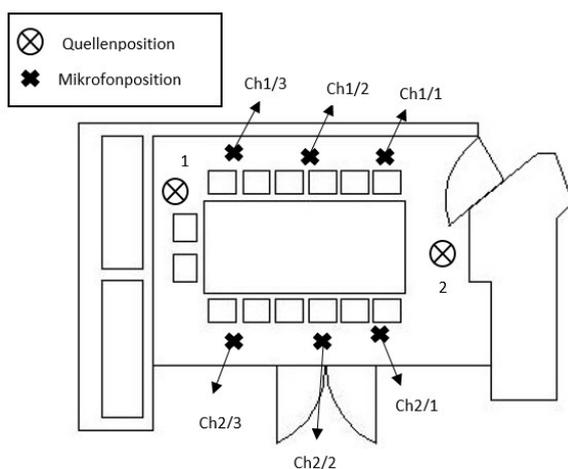
Diskussion:

Obwohl der Raum akustisch schlecht ist, versteht man gesprochene Sprache sehr gut. Als Grund dafür wird der niedrige Hintergrundgeräuschpegel und die geringe Größe des Raumes angenommen, weshalb akustische Gegebenheiten kleinere Auswirkungen haben. Die objektive Messung hat Ähnliches ergeben: Obwohl die Nachhallzeiten weit von den Optimalwerten entfernt sind, ist der Deutlichkeitsgrad D_{50} und der Speech Transmission Index innerhalb der Grenzwerte.

Fazit:

Eine akustische Sanierung wird empfohlen, auch weil es sehr einfach zu realisieren ist.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.88	0.82	1.04	1.14	1.03	0.84	0.80	0.54
	Ch2/1	0.61	0.78	0.98	1.13	0.96	0.90	0.82	0.54
	Ch1/2	0.75	1.00	1.20	1.11	0.96	0.90	0.83	0.56
	Ch2/2	1.17	0.95	1.28	1.06	0.90	0.93	0.82	0.51
	Ch1/3	–	1.05	1.21	1.13	1.03	0.95	0.77	0.54
	Ch2/3	–	1.04	1.06	1.35	0.97	0.86	0.76	0.51
EDT in s	Ch1/1	0.87	1.23	1.00	1.08	1.00	1.00	0.88	0.51
	Ch2/1	0.48	0.95	0.94	1.18	0.90	0.84	0.83	0.52
	Ch1/2	0.71	1.19	0.79	1.09	1.01	0.92	0.78	0.51
	Ch2/2	0.57	1.44	0.96	1.23	1.03	0.90	0.67	0.53
	Ch1/3	0.24	0.95	0.90	0.99	0.95	0.75	0.75	0.52
	Ch2/3	0.22	0.64	1.34	0.90	1.04	0.81	0.70	0.52
t_s in s	Ch1/1	0.093	0.113	0.067	0.079	0.084	0.069	0.062	0.040
	Ch2/1	0.044	0.065	0.077	0.065	0.066	0.061	0.056	0.037
	Ch1/2	0.034	0.100	0.061	0.081	0.067	0.060	0.056	0.035
	Ch2/2	0.051	0.069	0.067	0.093	0.073	0.076	0.051	0.034
	Ch1/3	0.018	0.072	0.062	0.067	0.061	0.063	0.046	0.031
	Ch2/3	0.018	0.047	0.089	0.086	0.056	0.059	0.042	0.023
Al_{cons} in %	Ch1/1	–	22.95	26.26	27.22	19.59	16.68	13.09	7.64
	Ch2/1	–	32.36	37.03	38.39	27.62	23.52	18.46	10.78
	Ch1/2	–	8.96	10.26	10.63	7.65	6.51	5.11	2.98
	Ch2/2	–	12.91	14.77	15.31	11.02	9.38	7.36	4.30
	Ch1/3	–	2.24	2.56	2.65	1.91	1.62	1.27	0.74
	Ch2/3	–	3.22	3.69	3.82	2.75	2.34	1.84	1.07
D_{50} in %	Ch1/1	13.17	12.61	56.83	43.80	40.15	48.11	56.88	70.74
	Ch2/1	67.30	59.37	54.82	59.49	54.87	58.62	59.22	74.07
	Ch1/2	84.57	19.04	58.40	46.28	55.53	56.52	55.76	74.36
	Ch2/2	62.55	57.26	68.21	29.07	50.07	45.32	63.75	76.07
	Ch1/3	94.74	37.49	56.12	58.83	56.46	49.43	66.78	78.12
	Ch2/3	92.47	75.57	39.38	37.49	59.53	57.72	72.03	82.07



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.61	0.85
Ch2/1	0.65	0.84
Ch1/2	0.61	1.07
Ch2/2	0.61	1.13
Ch1/3	0.63	1.04
Ch2/3	0.63	0.90

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Architectural Acoustics - Acoustic Design of Lecture Halls“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.