
BACHELORARBEIT

RAUMAKUSTISCHE SANIERUNGEN MITTELS
KANTENABSORBER UND HERKÖMMLICHER
METHODIK IM VERGLEICH

durchgeführt am
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
Technische Universität Graz, Österreich

von
Benedikt Peters, 01131337

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

Graz, Oktober 2018

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den zwei verschiedenen raumakustischen Sanierungskonzepten von Unterrichtsräumen, welche in den Hörsälen Hs i14 und Hs i15 der Technischen Universität Graz zur Anwendung kommen. Dazu wurde zuerst eine Datenrecherche- und Analyse von mit Kantenabsorbern sanierten Räumen durchgeführt und versucht eine simple Variation der Sabine'schen Nachhallzeitformel in Anbetracht des Kantenabsorbers zu finden. Weiters wurde eine Vorlesung im Hörsaal i15 aufgezeichnet und mit einer bestehenden, vor der Sanierung entstandenen Aufnahme verglichen. Außerdem wurde die Nachhallzeit im Hörsaal i14 für verschiedene Positionen der vorhandenen Absorber gemessen und verglichen.

Abstract

This thesis deals with two different methods of acoustic renovation that were used in the lecture rooms Hs i14 and Hs i15 of the Graz University of Technology. First data concerning rooms that were acoustically renovated with edge absorbers was collected and analyzed, resulting in an attempt to find a simple variation of Sabine's reverberation equation considering edge absorbers. Furthermore a lecture taking place in Hs i15 was recorded and compared to a recording that was made prior to the renovation. Additionally the reverberation times for different positions of the absorbers in Hs i14 were measured and compared.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Allgemeines	9
1.2	Ziel & Motivation	9
2	Datenauswertung von mit Kantenabsorbern sanierten Räumen	11
2.1	Aufbau und Funktion von Kantenabsorbern	11
2.2	Berechnung des Absorptionsgrads nach Sabine	13
2.3	Optimierte Berechnung des Absorptionsgrads	14
2.4	Bestimmung geeigneter Koeffizienten	16
2.4.1	Ergebnis der Berechnungen	17
2.5	Zusammenfassung	20
3	Vergleich von Aufnahmen im Hs i15	23
3.1	Ausgangssituation im Hörsaal	23
3.2	Aufnahme einer Vorlesung	25
3.2.1	Aufnahme nach der Sanierung	25
3.2.2	Aufnahme vor der Sanierung	26
3.3	Auswahl geeigneter Hörbeispiele	26
3.4	Beschreibung des Vergleichstools	27
3.4.1	Installation und Programmstart	27
3.4.2	Bedienung	27
3.4.3	Konfiguration des Programms	28
3.5	Auswertung der Aufnahmen mithilfe des Noise Level Analyzers	30
3.6	Ausblick	32
4	Optimierung der raumakustischen Maßnahme im Hs i14	33
4.1	Ausgangssituation im Hörsaal	33
4.2	Erarbeiten einer Optimierung	34
4.3	Messung der Nachhallzeit	36
4.3.1	Messaufbau	36
4.3.2	Absorberpositionierungen	37
4.4	Auswertung	40
4.4.1	Bass Ratio in Abhängigkeit der Messpositionen	42
4.4.2	Zusammenfassung	42
5	Zusammenfassung und Ausblick	45
6	Anhang	46
6.1	Raumdaten zur Absorptionsgradberechnung	46
6.2	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten	47
6.3	Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln	51
6.4	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz	55
6.5	Boxplots der Nachhallzeitmessungen	60
	Geräteverzeichnis	63
	Abbildungsverzeichnis	63
	Tabellenverzeichnis	65

1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Ein großer Teil des Alltags vieler Menschen findet in Büros, Klassenzimmern und Seminarräumen statt, also in kleinen bis mittelgroßen Mehrzweckräumen. In diesen Räumen wird unterrichtet, telefoniert und verhandelt. Dieser nicht zu vermeidende Arbeitslärm wird stark beeinflusst von der vorhandenen Raumakustik. Eine schlechte Akustik führt zu erhöhtem Stress, welcher über einen längeren Zeitraum negative Auswirkungen auf die Gesundheit und Produktivität hat. Die am häufigsten verbauten raumakustischen Maßnahmen zeigen geringe Wirkung im tieffrequenten Bereich unter 500 Hertz, welcher aber genauso Bestandteil der menschlichen Wahrnehmung ist. Die zusätzlichen Maßnahmen, die notwendig sind, um eine Bedämpfung bei tiefen Frequenzen zu erreichen ist meist aufwendig und teuer. Öffentliche Einrichtungen, kleinere bzw. Firmen mit geringer Flächenproduktivität haben meist nicht die Mittel Büro- und sonstige Aufenthaltsräume raumakustisch sinnvoll zu sanieren.

Kantenabsorber könnten an dieser Stelle Abhilfe schaffen. Dank einfacher Montage und herkömmlicher Materialien sind sie vergleichsweise günstig und trotzdem überraschend effizient bei der Verringerung der so schwer zu beherrschenden tieffrequenten Nachhallzeit.

1.2 Ziel & Motivation

Ziel dieser Arbeit war es herkömmliche Sanierungsmethoden mit Methoden mittels Kantenabsorbern zu vergleichen. Im ersten Schritt wurde dazu versucht verlässliche und reproduzierbare Daten über verbaute Kantenabsorber zu sammeln. Es wurden aus den Dokumentationen verschiedener Sanierungen Raum- und Absorberabmessungen, sowie die Nachhallzeiten aufgenommen. Mithilfe dieser Daten sollte versucht werden, eine verbesserte Abschätzung der Wirkung von Kantenabsorbern auf die Akustik eines Raumes zu erhalten, um somit künftige Planungen zu vereinfachen.

Des Weiteren sollten diese Sanierungen auch erfahrbar gemacht werden. So wurden Vorlesungsaufnahmen im Hörsaal i15 der TU Graz benutzt, um den Effekt einer Sanierung mittels Kantenabsorber für jene hörbar zu machen, die aus den klassischen Gütemaßen und der Nachhallzeit nicht auf die tatsächliche Auswirkung auf die Akustik schließen können.

Um die Grenzen einer herkömmlichen Sanierungsmethode zu überprüfen, wurden außerdem die verbauten Absorber im Hörsaal i14 der TU Graz in ihrer Anzahl und Position mehrfach verändert und die Unterschiede vermessen.

2

Datenauswertung von mit Kantenabsorbern sanierten Räumen

Die Wirkungsweise von Kantenabsorbern wurde schon häufig unter Laborbedingungen, etwa in Hallräumen, untersucht. Ziel war es nun bereits erhobene empirische Daten von verbauten Kantenabsorbern zu sichten, um aus diesen die Wirkungsweise der Absorber in alltäglicher Umgebung zu ermitteln. Hierfür diente als Kennwert der Absorptionsgrad. Ausgangspunkt für die Untersuchung war vor allen Dingen die Literatur von Prof. Dr. Fuchs (vgl. [FUCHS, 2017]). Prof. Fuchs beaufsichtigte innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte die Sanierung vieler Räume mit Kantenabsorbern und beschrieb diese in seiner Literatur.

2.1 Aufbau und Funktion von Kantenabsorbern



(a) Sander-Berufsschule, Berlin-Mitte

(b) Schmid-Oberschule, Berlin-Spandau

Abbildung 2.1: Beispiele für installierte Kantenabsorber, vgl. [FUCHS, 2017]

In dieser Arbeit bezeichnen Kantenabsorber poröse Absorber, genauer Mineralwolle, die mit handelsüblichem Gipskarton umschlossen ist, wobei eine Seite gelocht ausgeführt ist. Dieser Aufbau wird in Raumkanten platziert (vgl. Abb. 2.1). Alle betrachteten Kantenabsorber folgen dem schematischen Aufbau aus Abbildung 2.3 c) bzw. 2.3 d). Die Außenmaße können variieren, werden aber bei allen Berechnungen berücksichtigt. Die verwendeten Gipskartonplatten weisen

beidseitig eine Stärke von 9,5 mm auf. Die gelochte Seite besitzt einen Lochanteil von 16%. Die verwendete Mineralwolle weist zumindest bei allen von Prof. Fuchs sanierten Räumen eine Dichte von 25 kg/m^3 auf. Abbildung 2.2 zeigt beispielhaft den im Messrohr gemessenen Absorptionsgrad von Mineralwolle mit einer Stärke von 50 bzw. 100 mm. Gut zu erkennen ist der starke Abfall des Absorptionsgrads zu tiefen Frequenzen hin.

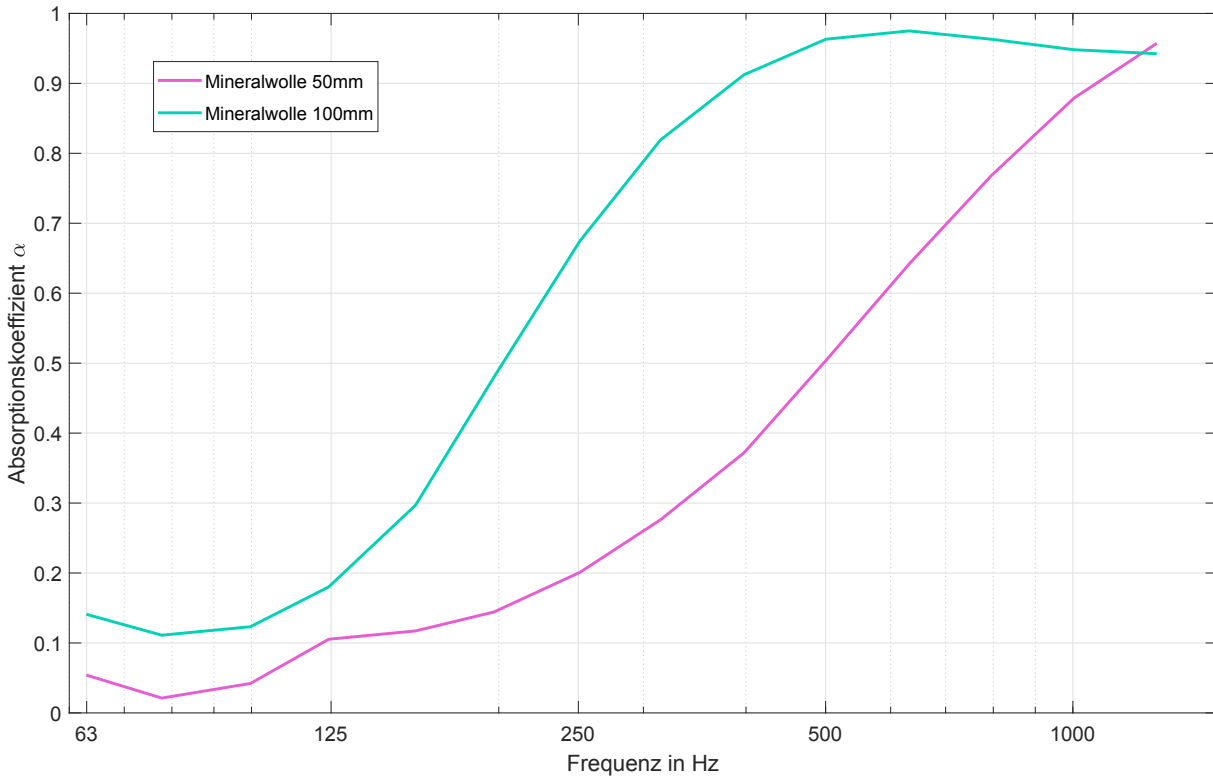


Abbildung 2.2: Absorptionsgrade von Mineralwolle im Messrohr, vgl. [ZIESEMER, 2016].

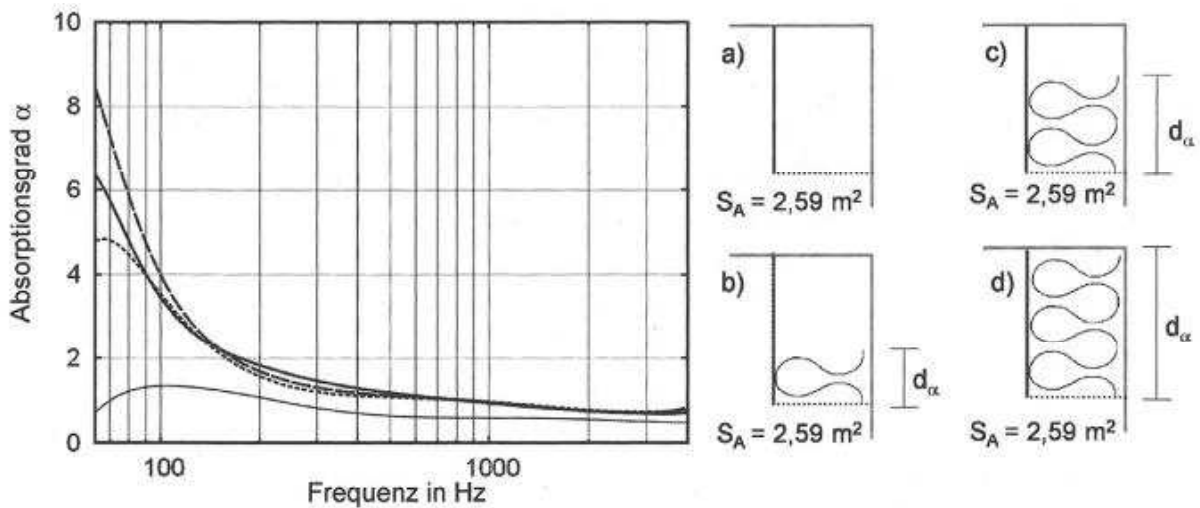


Abbildung 2.3: Absorptionsgrad von Kantenabsorberrn in Abhängigkeit von der Frequenz, bezogen auf $S_A = 2,59 \text{ m}^2$, a leer (dünn durchgezogen), b $d_a = 160 \text{ mm}$ (gepunktet), c 320 mm (gestrichelt), d 500 mm (dick durchgezogen), vgl. [FUCHS, 2017].

Im Gegensatz zu an Wänden und Decken positionierten porösen Absorberrn, welche häufig bei raumakustischen Maßnahmen zur Anwendung kommen, weisen Kantenabsorberrn hingegen einen

sehr hohen Absorptionsgrad bei tiefen Frequenzen auf. Dieser kann mitunter sogar über $\alpha = 1$ liegen (vgl. Abb. 2.3).

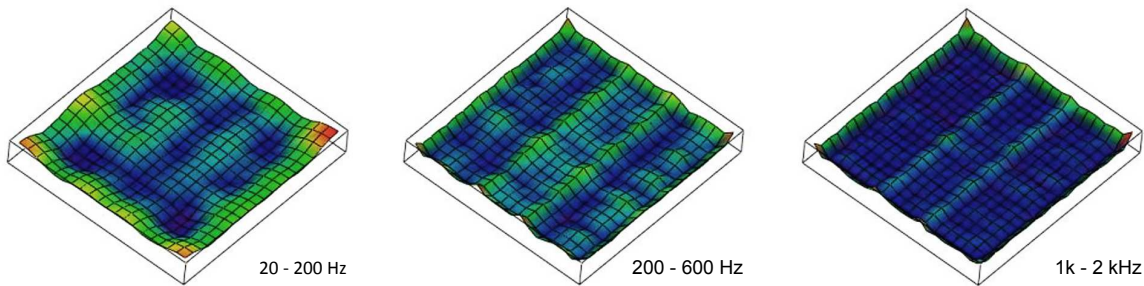


Abbildung 2.4: Schalldruckpegelverteilung im Raum, vgl. [ZICKMANTEL, 2008].

Abbildung 2.4 zeigt qualitativ die Schalldruckpegelverteilung in einem Raum. Besonders bei tiefen Frequenzen unter 200 Hz steigt der Schalldruck in Raumecken und -kanten stark an. Da das Funktionsprinzip des porösen Absorbers aber hauptsächlich auf der Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie mittels Reibung beruht - er also in einem Schnellemaximum besonders gut wirkt - , sollten diese Positionen für poröse Absorber jedoch eigentlich ungünstig sein, da sich zusammen mit dem Druckmaximum auch das Schnelleminimum dort befindet. Frau Dipl.-Ing. Jammilla Balint schreibt in "Gedanken zu Absorptionsgraden sowie Kantenabsorbern": "Anscheinend sind poröse Absorber nicht nur schnellempfindlich, sondern ebenfalls druckempfindlich. Weiter Untersuchungen werden sicherlich noch folgen" (vgl. [BALINT, 2017]).

Mögliche Antworten zu den offenen Fragen bezüglich der Funktionsweise von porösen Absorbern in Raumkanten und Raumecken werden durch die folgenden Untersuchungen erarbeitet und in Abschnitt 2.5 angeführt.

2.2 Berechnung des Absorptionsgrads nach Sabine

Als Grundlage für die Berechnung des Absorptionsgrads dient die umgeformte Nachhallzeitformel nach Sabine für eine eingebrachte Fläche S (vgl. Gl. 2.1). Hierfür werden folgende Daten benötigt:

- Nachhallzeit vor der Sanierung T_{vorher}
- Nachhallzeit nach der Sanierung $T_{nachher}$
- Volumen des Raumes V
- Eingebrachte Absorberfläche S

$$\alpha = 0,161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{S} \cdot \left(\frac{1}{T_{nachher}} - \frac{1}{T_{vorher}} \right) \quad (2.1)$$

In der Literatur von Prof. Fuchs ließen sich insgesamt 7 Sanierungen mit Kantenabsorbern finden, die alle notwendigen Daten aufwiesen (vgl. [FUCHS, 2017]). Zusätzlich konnten noch zwei weitere Sanierungen herangezogen werden: Die Sanierung des Hörsaals i15 durch [HETZ, KORDESCH, 2017] und die raumakustische Planung eines Studios durch [STEFFEK, 2018]. Alle gesammelten Daten sind im Anhang zu finden (vgl. Kapitel 6.1). Die mittels der Sabine'schen Formel berechneten Absorptionsgrade sind Abbildung 2.5 zu entnehmen. Erstaunlich ist die enorme Streuung der Werte, besonders angesichts der Tatsache, dass die verwendeten Absorber bei den verschiedenen Sanierungen strukturell fast identisch sind. Für die Streuung können

einerseits Messungenauigkeiten bei den Nachhallzeitmessungen, andererseits systematische Fehler verantwortlich sein. Ein möglicher systematischer Fehler basiert auf der Annahme, dass die Schallenergieverteilung im Raum konstant ist (statistische Raumakustik); eine Voraussetzung für die Sabine'sche Nachhallzeitformel, welche infolgedessen die Position der Absorber nicht berücksichtigt. Besonders im tieffrequenten Bereich entspricht diese Annahme nicht der Realität (vgl. Kapitel 2.1). Da alle Messungen der Nachhallzeit von Akustik-Büros bzw. StudentInnen der TU Graz durchgeführt wurden, scheint die Messungenauigkeit als alleinige Fehlerquelle nicht ausreichend. Wahrscheinlicher ist wohl eine Abhängigkeit von beiden Fehlerquellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, die Sabine'sche Nachhallzeitformel zu erweitern, sodass die Position des Absorbers im Raum berücksichtigt wird, um so eine praktikable Planung von raumakustischen Maßnahmen mittels Kantenabsorber zu ermöglichen.

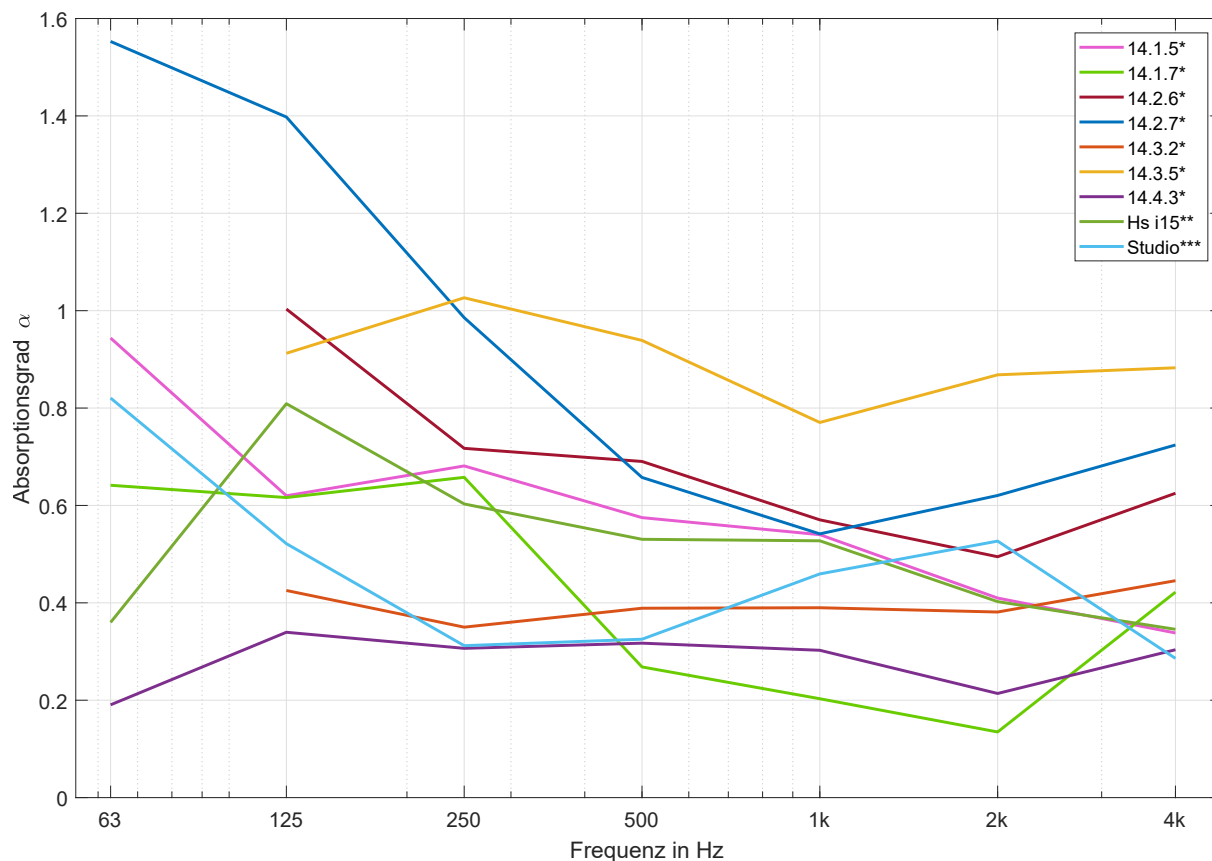


Abbildung 2.5: Absorptionsgrade nach Sabine von verschiedenen mit Kantenabsorbern; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].

2.3 Optimierte Berechnung des Absorptiongrads

Um die Position der Kantenabsorber in die Nachhallzeitformel nach Sabine einzubeziehen, muss zunächst ein mathematischer Ansatz gefunden werden, welcher den physikalischen Gegebenheiten möglichst gerecht wird. Messungen im Hallraum zeigen, dass der Absorptionsgrad eines Absorbers in Raumkanten und -ecken zunimmt, sogar bis zu Werten über $\alpha = 1$ (vgl. Abb. 2.3, S. 12). Das würde theoretisch bedeuten, dass im Absorber für diesen Frequenzbereich mehr Schallenergie in Wärme umgewandelt wird, als auf den Absorber eintrifft. Dieser Sachverhalt macht den systematischen Fehler, der bei Berechnungen des Absorptionsgrads mittels Sabine auftritt, deutlich. Ziel aller weiteren Überlegungen und Berechnungen ist es nun, die Abhängigkeit des Absorptions-

onsgrads von der Absorberposition zu berücksichtigen, um so einen realistischen Absorptionsgrad zu erhalten.

Der grundlegende Ansatz besteht in der unterschiedlichen Gewichtung des Parameters A , also der äquivalenten Absorberfläche. Die Länge des verbauten Kantenabsorbers wird in drei Abschnitte unterteilt: Länge auf Fläche L_F , Länge in Kante L_K und die Länge in der Ecke (vgl. Abb. 2.6). L_K und L_E werden nun mit jeweils einem Koeffizienten, β und γ multipliziert, da davon auszugehen ist, dass in den Kanten und Ecken der Absorber eine andere Wirkung zeigt. Als Erwartungswerte wurden $\beta = 2$ und $\gamma = 4$ angenommen, da von einer Verdopplung der Wirkungsweise in Raumkanten und einer Vervierfachung in Raumecken ausgegangen wurde. So lässt sich nun mithilfe der Breite B und der Tiefe T des Kantenabsorbers die eingebrachte Absorptionsfläche berechnen (vgl. Gl. 2.3).

$$A = \alpha \cdot (B + T) \cdot (L_F + \beta \cdot L_K + \gamma \cdot L_E) \quad | : \alpha \quad (2.2)$$

$$\frac{A}{\alpha} = (B + T) \cdot (L_F + \beta \cdot L_K + \gamma \cdot L_E) \quad (2.3)$$

Der Wert L_K ergibt sich aus Gleichung 2.4, wobei $L_{K_{ante,gesamt}}$ die gemessene Länge des Kantenabsorbers in der Kante inklusive des Eckbereichs ist. Die Länge des Eckbereichs L_E ergibt sich aus der Wellenlänge.

$$L_K = L_{K_{ante,gesamt}} - L_E, \quad \text{wobei } L_E = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.4)$$

Setzt man die Gleichung 2.3 in Gleichung 2.1 ein, so ergibt sich der Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Koeffizienten β und γ .

$$\alpha = 0,161 \cdot V \cdot \frac{\frac{1}{T_{nachher}} - \frac{1}{T_{vorher}}}{(B + T) \cdot (L_F + \beta \cdot L_K + \gamma \cdot L_E)} \quad (2.5)$$

Zur besseren Übersicht lassen sich jetzt noch einige Konstanten in der Konstante k zusammen fassen (vgl. Gl. 2.6)

$$k = 0,161 \cdot V \cdot \frac{\frac{1}{T_{nachher}} - \frac{1}{T_{vorher}}}{B + T} \quad (2.6)$$



Abbildung 2.6: Markierte Bereiche des Kantenabsorbers.

2.4 Bestimmung geeigneter Koeffizienten

Betrachtet man alle Datensätze für jedes Oktavband einzeln, ergibt sich ein „Absorptionsgrad-Vektor“ pro Oktavband (vgl. Gl. 2.7). Jeder Wert repräsentiert einen Raum bzw. Datensatz.

$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} \frac{k_1}{L_F + \beta \cdot L_K + \gamma \cdot L_E} \\ \vdots \\ \frac{k_N}{L_F + \beta \cdot L_K + \gamma \cdot L_E} \end{pmatrix} \quad N \dots \text{Anzahl 'Datensätze'} \quad (2.7)$$

Gesucht waren zunächst β_{opt} und γ_{opt} pro Oktavband für die die empirische Varianz (s^2) der Absorptionsgrade minimal werden sollte. Dafür musste ein geeignetes Optimierungsverfahren gefunden werden. Überblicksmäßig betrachtet wurden zum Beispiel das Simplex-Verfahren und die quadratische Optimierung. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass aufgrund der relativ engen Grenzen („constraints“) der Variablen β und γ , der kleinen Dimension des Werteraums der Variablen ($dim(W) = 2$) und der einfachen Berechnungsmethode mit wenigen Bedingungen, alle Werte der Varianz innerhalb der Grenzen ausreichend hoch auflösend direkt berechnet werden können. So kann die optimale Lösung in guter Näherung einfach aus allen berechneten Werten ausgewählt werden. Als problematisch erwies sich allerdings die Formulierung einer geeigneten mathematischen Bedingung, die erfüllt werden sollte. Versucht man β_{opt} und γ_{opt} unter der Bedingung $s^2 \rightarrow 0$ zu berechnen, gehen die Werte, unabhängig vom Verfahren, grundsätzlich gegen die oberen Grenzen und global gegen unendlich. Für die berechnete Varianz gilt $s^2 \rightarrow 0$ für $\alpha \rightarrow 0$ und für den Absorptionsgrad aus Gleichung 2.5 gilt: $\alpha \rightarrow 0$ für $\beta, \gamma \rightarrow \infty$. Eine Lösung des Problems ergibt sich, wenn die Varianzberechnung so manipuliert wird, dass sie an einen vorher festgelegten 'Mittelwert' gebunden wird. Das beste Ergebnis wurde erzielt, indem lediglich der Mittelwert der zuvor berechneten Absorptionsgrade α_{mean} in die Varianzberechnung mit einbezogen wurde (vgl. Gl 2.8)

$$Var(\vec{\alpha}) = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{pmatrix} \quad N \dots \text{Anzahl 'Datensätze'} \quad (2.8)$$

Auf diese Weise konnte verhindert werden, dass β_{opt} und γ_{opt} gegen 0 konvergieren. Die Berechnungen wurden nicht für das 63Hz-Oktavband durchgeführt, da nur drei der fünf Datensätze Nachhallzeitwerte enthalten und die korrespondierenden Absorptionswerte sehr stark von einander abweichen (vgl. Abb. 2.5).

2.4.1 Ergebnis der Berechnungen

Als Ergebnis der Berechnungen erhält man für jedes Oktavband ein Koeffizientenpaar β_{opt} und γ_{opt} . Mithilfe dieser Koeffizienten lassen sich „neue“ Absorptionsgrade mit geringerer Streuung berechnen. Tabelle 2.1 zeigt die berechneten Koeffizienten pro Oktavband.

Koeffizienten	f in Hz:	125	250	500	1k	2k	4k
β_{opt}		1,54	2,17	1,9	1,36	1,72	2,35
γ_{opt}		1	1	1	1	1	1

Tabelle 2.1: Berechnete Koeffizienten

β_{opt} bewegt sich zwischen 1,36 und 2,35 und befindet sich damit sehr nah an dem angenommenen Wert von 2. γ_{opt} hingegen befindet sich über alle Frequenzbänder hinweg an der unteren Grenze, sprich 1. Möglicherweise hängt dieses Ergebnis damit zusammen, dass sich gemeinsam mit dem Druckmaximum auch eine Schnelleminimum in der Raumecke befindet (vgl. Abb. 2.4, S. 13). Um die Ergebnisse besser zu verstehen, kann Abbildung 2.7 herangezogen werden. Diese zeigt für den Wertebereich $1 < \beta, \gamma < 5$ alle berechneten Varianzen der Absorptionsgrade für das 250Hz-Oktavband. Dieses Oktavband ist nur exemplarisch gewählt, da sich die Werte für jedes Oktavband qualitativ gleichen. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass die Varianz stark von β und nur im geringen Ausmaß von γ abhängt. Solange sich β auf der rot markierten Linie befindet, beeinflusst γ die Varianz nur sehr gering.

Berechnet man nun mittels β_{opt} und γ_{opt} die Absorptionsgrade unter Verwendung der Gleichung 2.5 so ergeben sich Verläufe mit geringerer Streuung (vgl. Abb. 2.9) im Vergleich zu den Absorptionsgraden, welche mit der herkömmlichen Sabine'schen Formel berechnet wurden (vgl. Abb. 2.8). Die Verbesserung ist besonders gut ersichtlich, wenn man die optimierte Varianz mit der Varianz der „klassisch“ berechneten Werte vergleicht (vgl. Abb. 2.10).

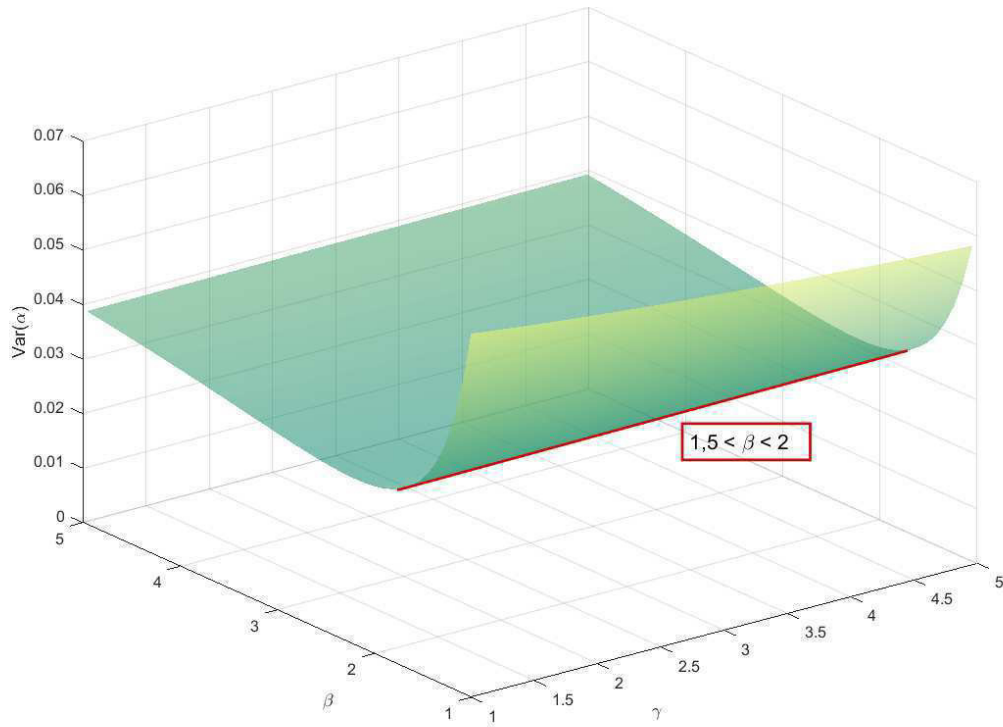


Abbildung 2.7: Varianz der Absorptionsgrade in Abhängigkeit der Koeffizienten (250 Hz).

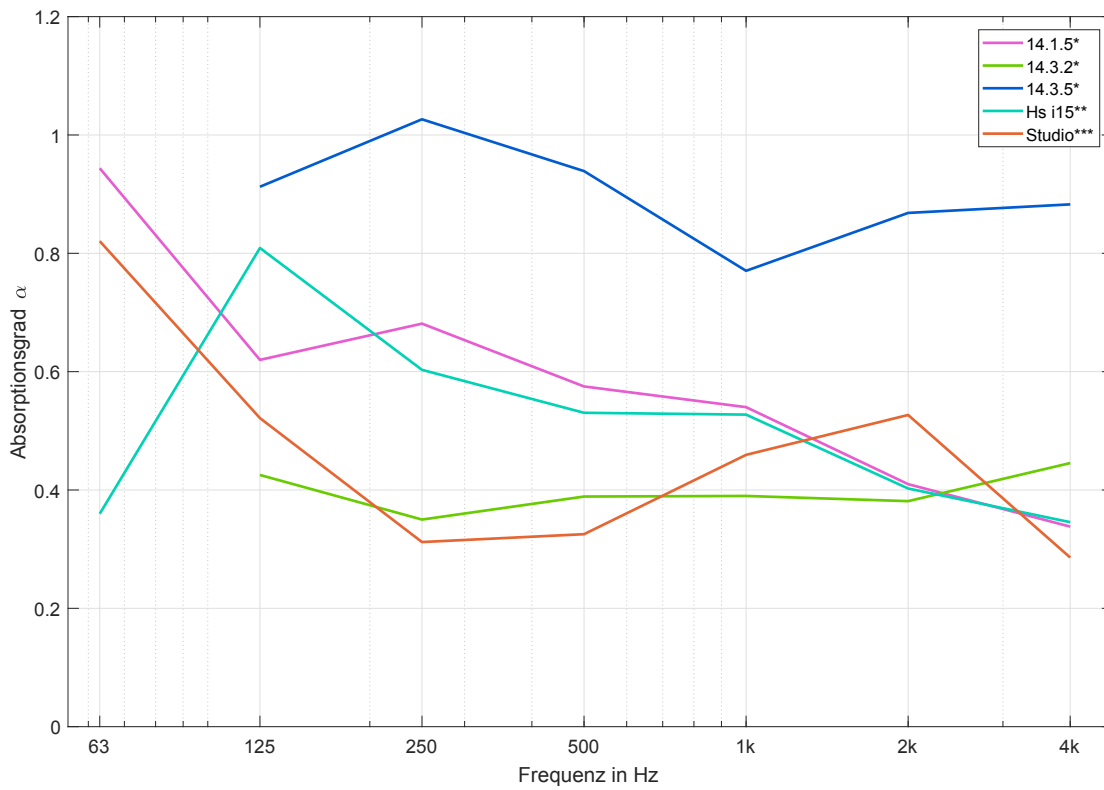


Abbildung 2.8: Absorptionsgrade der Kantenabsorber nach Sabine; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].

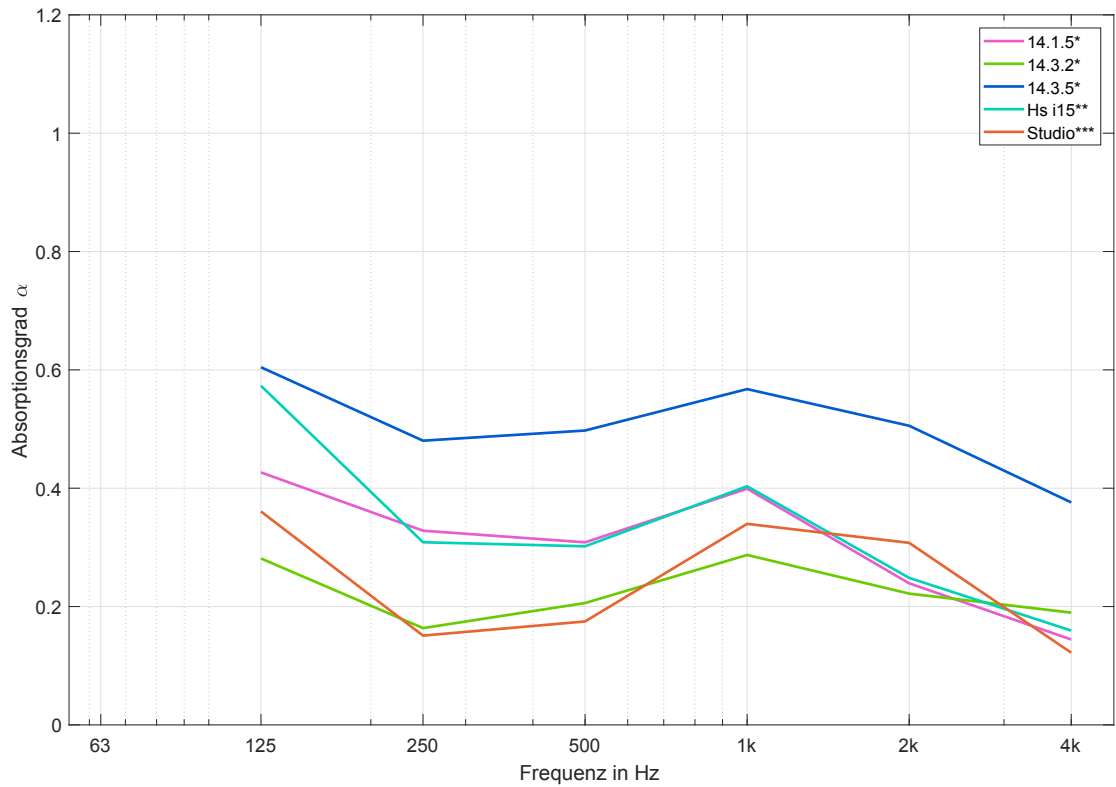


Abbildung 2.9: Absorptionsgrade der Kantenabsorber mittels optimierter Formel; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].

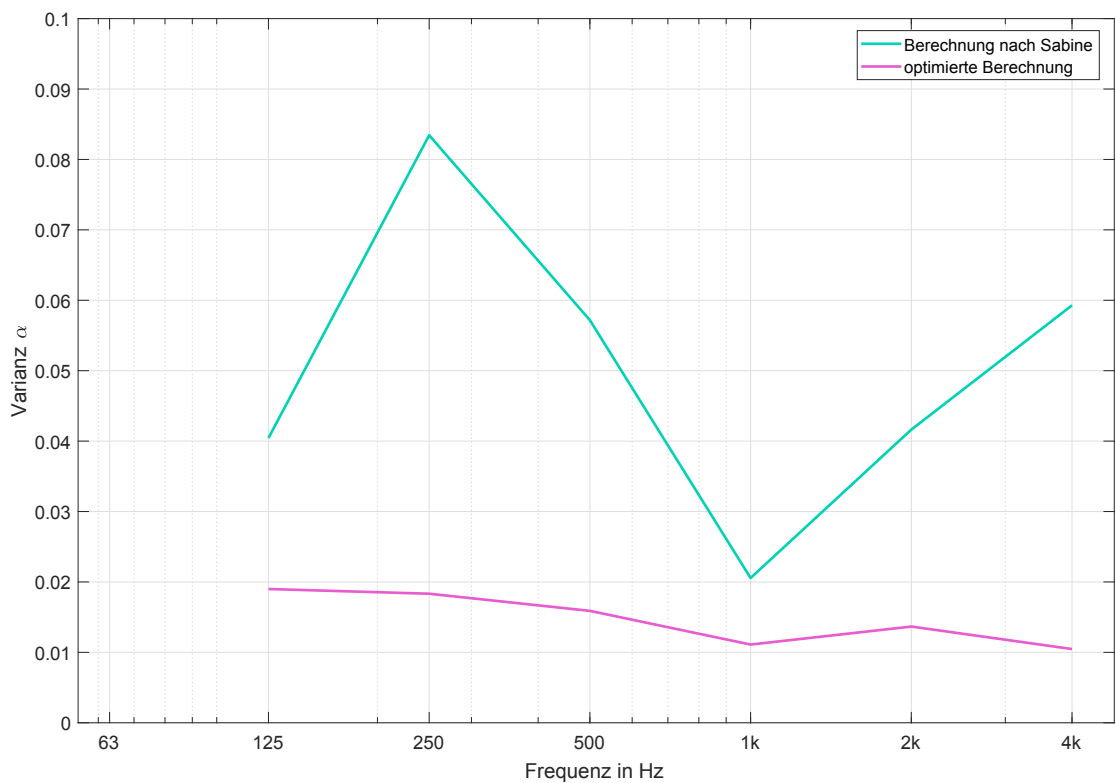


Abbildung 2.10: Vergleich der Varianzen der Absorptionsgrade

2.5 Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass, zumindest für den betrachteten Datensatz, der Koeffizient β_{opt} ausreichend ist, um eine wesentliche Verbesserung (Verringerung) der Streuung herbeizuführen. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass das Berechnungssystem sehr instabil auf Änderungen in den Datensätzen bzw. auf das Entfernen oder Hinzufügen von Datensätzen reagiert. Um zu zeigen, dass die Ergebnisse nicht auf etwaige Besonderheiten der zugrundeliegenden Daten beruhen, sollte die Anzahl der Stichproben deutlich vergrößert werden. Die Verringerung des Absorptionsgrads α durch die optimierte Berechnung beruht auf der Tatsache, dass der berechnete Wert die Wirkung des Absorbers so angibt, als würde sich dieser auf der Fläche befinden.

Bezüglich der Wirkungsweise des Kantenabsorbers ist es hilfreich sich zunächst die Schalldruck- bzw. schnelleverteilung eindimensional vor Augen zu führen und dann den dreidimensionalen Fall zu betrachten.

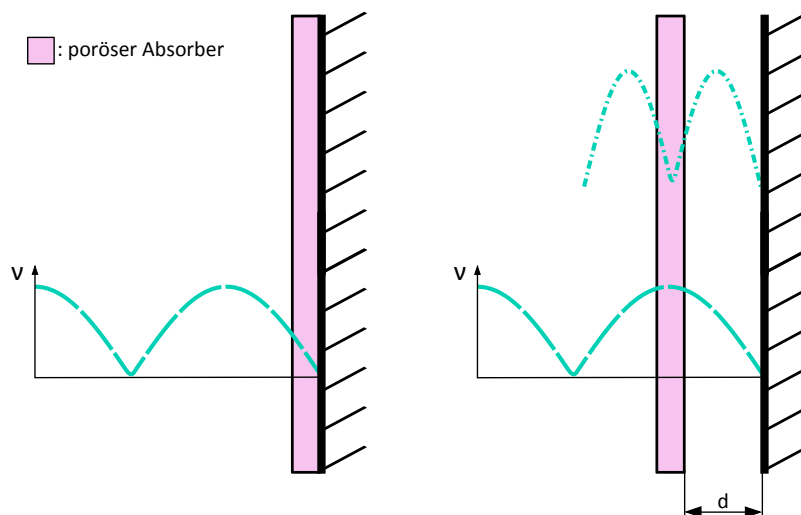


Abbildung 2.11: **Links:** poröser Absorber im Schnelleminimum bei tiefer Frequenz. **Rechts:** Absorber im Schnellemaximum bei tiefer Frequenz (lang strichliert), bei einer Entfernung von der Wand von $\frac{\lambda}{4}$.

Abbildung 2.11 zeigt ein eindimensionales Schema für die Schnelleverteilung vor einer Wand bei senkrechtem Schalleinfall (in Richtung der Wandnormale). Links ist der Absorber direkt vor der Wand platziert, wo die Schallschnelle minimal ist. Rechts befindet sich der Absorber mit einem Abstand d dort, wo die Schallschnelle für die tiefere Frequenz maximal ist. Betrachtet man lediglich diesen Sachverhalt sollte die optimale Position für Kantenabsorber folglich nicht direkt an der Wandfläche sondern in einer von der Wellenlänge abhängigen Entfernung liegen. Dies lässt sich durch Messung jedoch nicht bestätigen (vgl. [BALINT, 2017]).

Abbildung 2.12 zeigt die Schalldruckpegelverteilung im Seminarraum HF01092 der TU Graz. Die strichlierten Markierungen zeigen beispielhaft die Schnellemaxima für eine Kante. Für senkrecht, also in Richtung der Wandnormale einfallenden Schall ist die Schnelle zwar Null, jedoch bilden sich hier die Schnellemaxima parallel zur Kante bzw. tangential zur Wand aus. Da sich in allen Ecken des Raumes Druckmaxima ausbilden, kann durch die Platzierung des Absorbiermaterials in den Kanten garantiert werden, dass sich, bei hinreichend großer Wellenlänge, Schnellemaxima im Bereich des Absorbers befinden. An Wand- und Deckenflächen hingegen bilden sich etwaige Schnellemaxima in Abhängigkeit von der Frequenz an unterschiedlichen Orten aus und die Absorber lassen sich nur weniger effizient dort platzieren.

Aus den Ergebnissen aus Abschnitt 2.4.1 geht hervor, dass der poröse Absorber in der Raumecke keine verbesserte Wirkung zeigt ($\gamma_{opt} = 1$), hingegen in der Kantenposition die in etwa doppelte

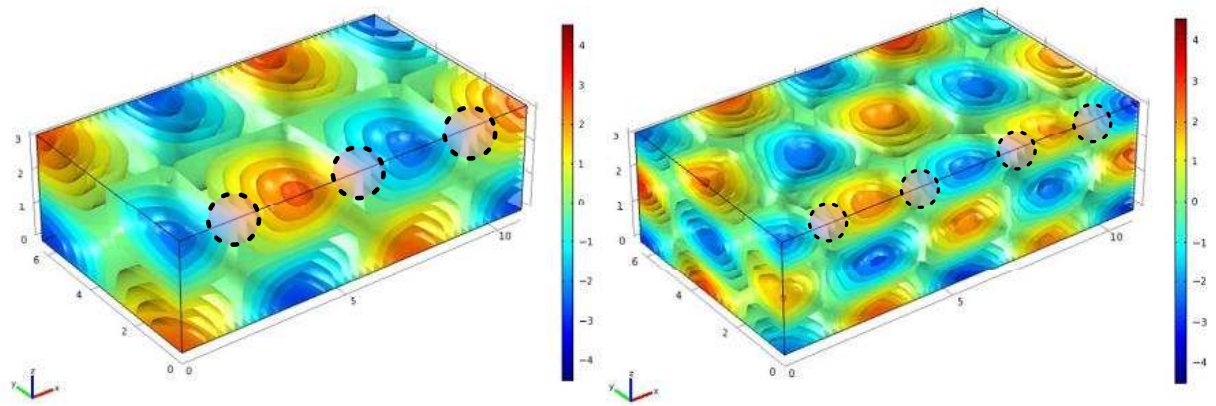


Abbildung 2.12: Schalldruckpegelverteilung im Raum, links: die 3-1-1 Mode bei 77,5 Hz und rechts: die 4-2-2 Mode bei 138,7 Hz im Seminarraum HF01092 (Inffeldgasse 12), Abmessungen $L \times B \times H$: 10,8 x 6,24 x 3,15 m. Strichlierte Markierungen: Vermutete Schnellemaxima, beispielhaft in einer Raumkante.

äquivalente Absorptionsfläche aufweist ($\beta_{opt} = 2$). Dies fügt sich gut in die oben angeführte Hypothese. Da in den Raumecken die Schallschnelle gering ist, wirkt der Kantenabsorber dort schlechter als im Kantenbereich, wo sich die tangentialen Schnellemaxima befinden. Danach ist der poröse Absorber also auch in den Kanten ausschließlich schnellempfindlich.

Zur experimentellen Überprüfung der Hypothese kann ein Hallraum mit konstanter Wellenlänge λ angeregt werden, sodass sich stehende Wellen bilden. Nun können Absorber mit der Länge $\frac{\lambda}{4}$ dort angebracht werden, wo sich Druckmaxima in der Kante befinden (vgl. Abb. 2.12). Die Nachhallzeit wird gemessen und der Absorptionsgrad der Absorber ermittelt. In Folge werden die Absorberstücke um $\frac{\lambda}{4}$ entlang der Kante verschoben, sodass sich diese im Bereich der Schnellemaxima befinden. Die Nachhallzeitmessung wird wiederholt und der neue Absorptionsgrad berechnet. Liegt der Absorptionsgrad der zweiten Messung deutlich über dem der ersten, bekräftigt dies die angeführte Hypothese. Dieses Experiment könnte dann für verschiedene Frequenzen wiederholt werden.

3

Vergleich von Aufnahmen im Hs i15

Die Messung der Nachhallzeit zählt zu den grundlegenden Werkzeugen der Raumakustik bei der Einschätzung eines Raumes. Jedoch ist es schwer, besonders für Laien, die Verbindung zwischen der grafische Darstellung der Nachhallzeit und der tatsächlich erfahrbaren Akustik des Raumes herzustellen. Zusätzlich wird die Nachhallzeit in der Regel als Mittlung von mehreren Messungen dargestellt. Auf diese Weise ist die Ortsabhängigkeit der Nachhallzeit nicht ersichtlich, obwohl diese in jedem Fall eine wichtige Eigenschaft des Raumes ist. Um einen hörbaren Eindruck von der Wirkungsweise von Kantenabsorberrn zu ermöglichen und so die Akustik qualitativ zu erfahren, wurden zwei Aufnahmen von einer Vorlesung im Hörsaal i15 der TU Graz (Inffeldgasse 18, 8010 Graz) verglichen. Eine der Aufnahmen entstand vor der Sanierung des Raumes, die zweite, im Rahmen dieser Arbeit, nach der Sanierung.

3.1 Ausgangssituation im Hörsaal

Der Hörsaal Hs i15 (Inffeldgasse 18, 8010 Graz) wurde im Jahr 2017 unter der Leitung von Prof. Helmut V. Fuchs mittels Kantenabsorberrn saniert [HETZ, KORDESCH, 2017]. Insgesamt wurden 21,46 m Kantenabsorberr in den Raum eingebracht. Vor der Sanierung stellte die leichte Akustikdecke die einzige raumakustische Maßnahme im Raum dar. Das Ziel und Ergebnis der Sanierung war das Absenken der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen, da sich besonders im tieffrequenten Bereich die Nachhallzeit außerhalb des Toleranzbandes nach [ÖNORM B 8115-3] befand.

Im Hörsaal finden insgesamt 24 Hörer für kleinere Lehrveranstaltungen Platz. Die Grundfläche beträgt 57,67 m² (vgl. Abb. 3.4). Eine Fensterreihe befindet sich einseitig ab einer Höhe von etwa 2,8 m, da sich der Raum im Untergeschoss befindet.



Abbildung 3.1: Hörsaal Hs i15 vor der Sanierung.

Abbildung 3.3 zeigt die Nachhallzeiten des Raumes vor und nach der Sanierung. Vor der



Abbildung 3.2: Hörsaal Hs i15 nach der Sanierung.

Sanierung lag die Nachhallzeit unterhalb von 4 kHz über dem Toleranzband und stieg zu den tiefen Frequenzen hin an. Die Sanierung sorgte für eine deutliche Absenkung über den gesamten gemessenen Frequenzbereich, besonders jedoch im tieffrequenten Bereich. Das Ergebnis ist eine Nachhallzeit die sich ab ca. 85 Hz innerhalb des Toleranzbands befindet und sich über einen großen Bereich hinweg um die Soll-Nachhallzeit bewegt.

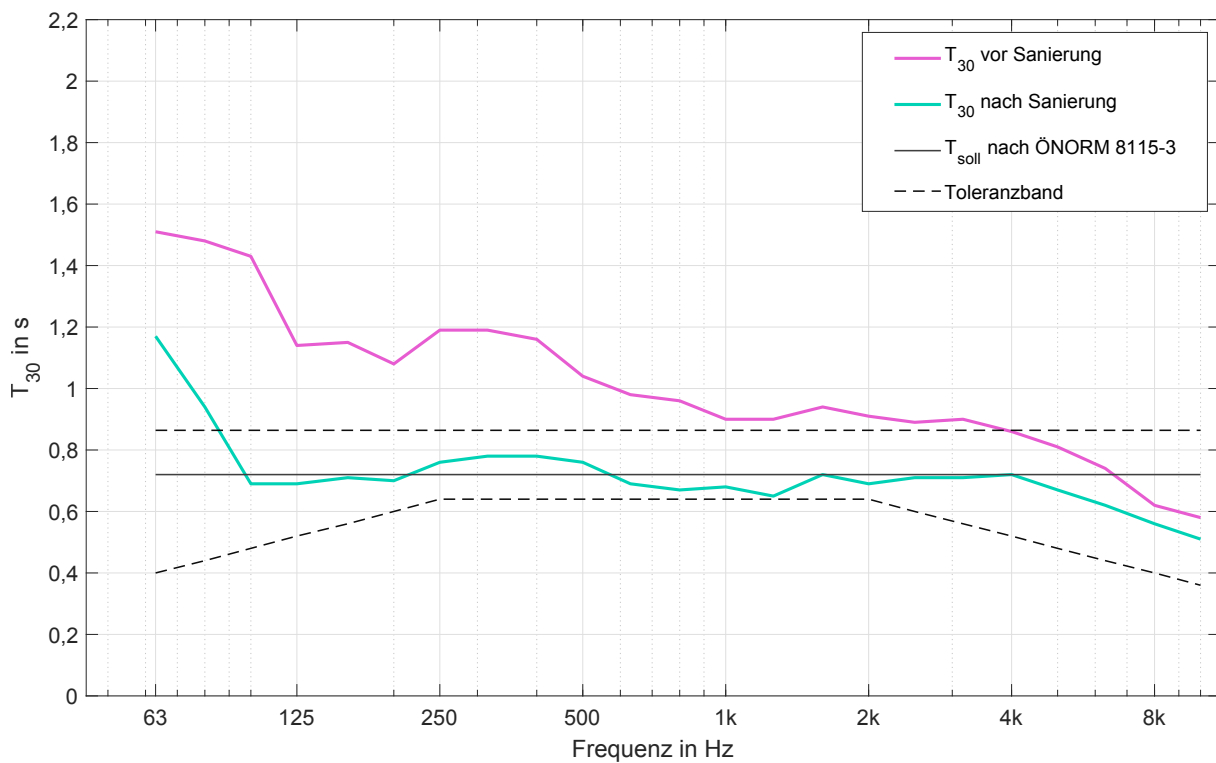


Abbildung 3.3: Nachhallzeiten vor und nach Sanierung [HETZ, KORDESCH, 2017].

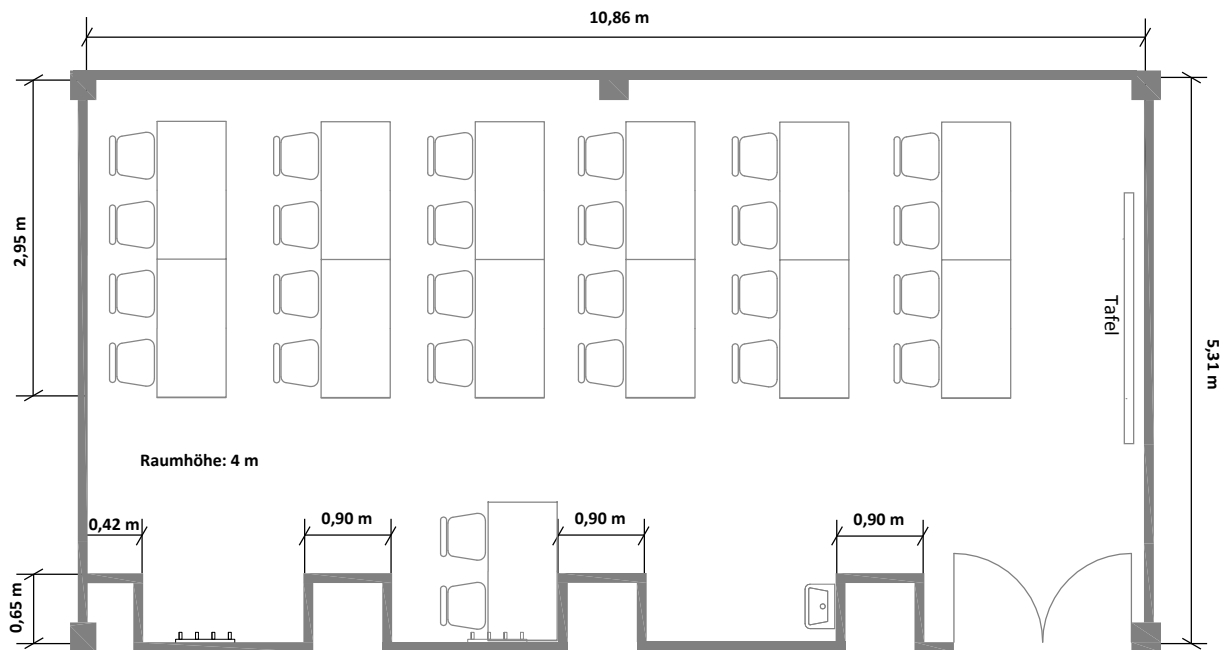


Abbildung 3.4: Grundriss des Hörsaal i15 nach der Sanierung.

3.2 Aufnahme einer Vorlesung

3.2.1 Aufnahme nach der Sanierung

Die Aufnahme fand am 26.04.2018 um 14:15 Uhr statt und dauerte ca. 135 Minuten. Die aufgezeichnete Vorlesung war Teil der Lehrveranstaltung „Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit“ (LV-Nr. 432.164), vorgetragen von Prof. Herwig Renner.

Abbildung 3.5 zeigt den schematischen Aufbau der Aufnahmevorrichtung. Die genauen Gerätebezeichnungen sind dem Geräteverzeichnis zu entnehmen (vgl. Tab. 7.1). Insgesamt wurden 8 Kugelmikrofone benutzt. Die Mikrofonsignale wurden über den Vorverstärker/AD-Umsetzer und das USB-Interface an die DAW weitergeleitet und aufgezeichnet.

Während der Vorlesung befanden sich zunächst ca. 12 Personen im Raum. Nach etwa 75 Minuten erhöhte sich die Anzahl der Zuhörer auf ca. 25 Personen. Die Aufnahmepositionen wurden über den gesamten Raum verteilt gewählt und orientierten sich an den Sitzreihen, also an den Abhörpositionen der Zuhörer (vgl. Abb. 3.6).

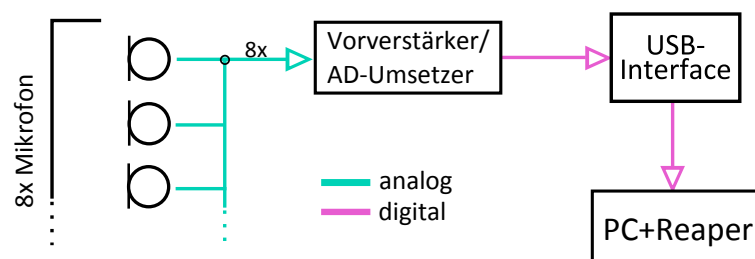


Abbildung 3.5: Blockdiagramm des Aufbaus für die Vorlesungsaufnahme.

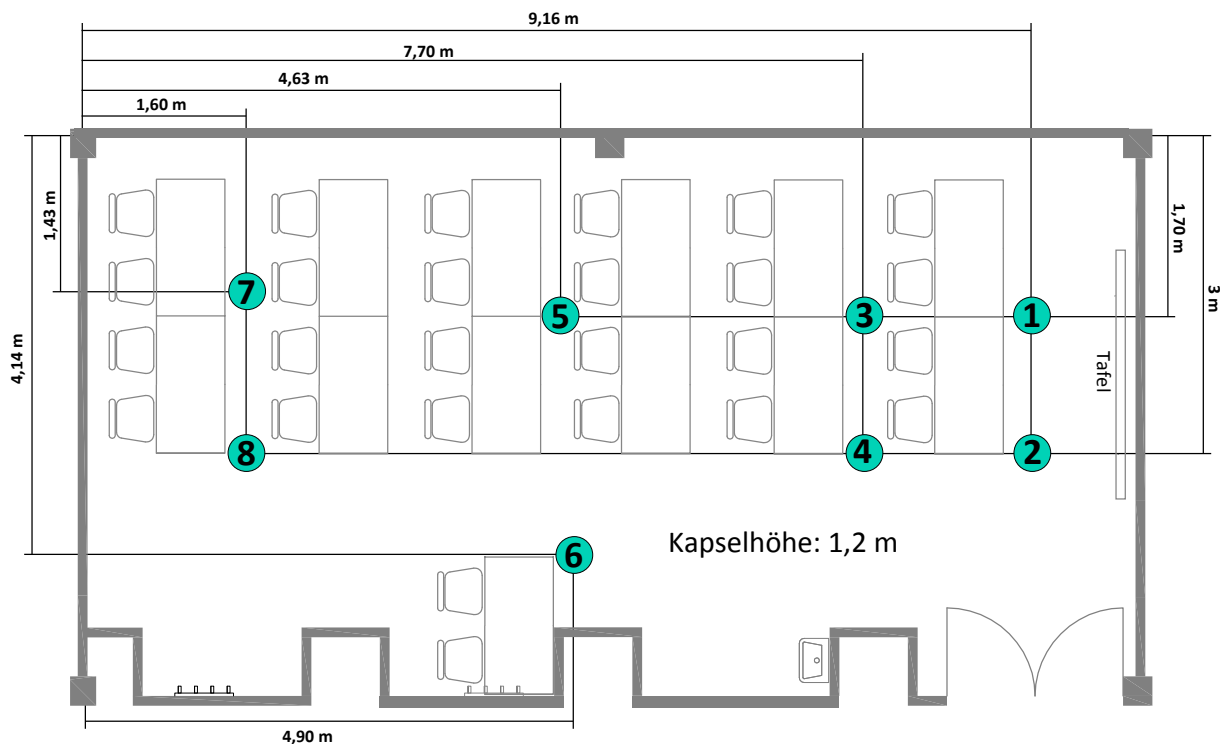


Abbildung 3.6: Aufnahmepositionen während der Vorlesung

3.2.2 Aufnahme vor der Sanierung

Die Aufnahme fand am 20.01.2017 um 9:45 Uhr statt und dauerte ca. 80 Minuten. Auch hier wurde eine Vorlesung der Lehrveranstaltung „Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit“ (Nr. 432.164), vorgetragen von Prof. Herwig Renner, aufgezeichnet. Der Aufbau der Aufnahmevorrichtung und die genauen Aufnahmepositionen sind leider nicht dokumentiert, ähneln aber, laut Prof. Gerhard Graber, denen der Aufnahme vom 26.04.2018.

3.3 Auswahl geeigneter Hörbeispiele

Um einen guten A/B-Vergleich der raumakustischen Maßnahme zu ermöglichen, wurden aus beiden Aufnahmen repräsentative Hörbeispiele herausgeschnitten. Die Auswahl erfolgte in 3 Kategorien, für die aus beiden Aufnahmen jeweils ein Beispiel ausgewählt wurde:

Frontalunterricht:

Hier ist ausschließlich der Vortragende, Prof. Herwig Renner, zu hören. Da der Hörsaal vorwiegend für diese Art von Unterricht genutzt wird, repräsentieren diese Beispiele die Akustik, die Anwesende erfahren, am besten.

Gruppenarbeit:

Während beider Aufnahmen wurden die Zuhörer aufgefordert über eine Problemstellung zu diskutieren. Die Beispiele geben einen Teil dieser Diskussionen wieder. Im Gegensatz zum Frontalunterricht wird der Raum nun von mehreren Quellen akustisch angeregt.

Unruhe:

Beim Verlassen des Raumes verursachen die Zuhörer in beiden Aufnahmen vergleichsweise laute Geräusche durch das Rücken von Stühlen oder das Bewegen von Taschen und

Rucksäcken. Anhand dieser Beispiele lässt sich die Raumakustik im Hinblick auf kurzzeitig erhöhte Schallpegel erfahren.

Insgesamt wurden so 48 verschiedene Ton-Beispiele aus den Vorlesungsaufnahmen herausgeschnitten (2 Aufnahmen x 3 Kategorien x 8 Messpositionen). Als Richtwert für die Dauer der Beispiele wurde 30 Sekunden gewählt, sodass beim Hören genügend Zeit vorhanden ist, um sich auf die Raumakustik einzustellen.

3.4 Beschreibung des Vergleichstools

Um den Vergleich der aufgenommenen Beispiele möglichst einfach zu halten, wurde ein Windows-basiertes Tool erstellt. Ziel war es, die Aufnahmen unabhängig von der zur Verfügung stehenden Software, abgesehen von einem Windows Betriebssystem, für jede interessierte Person zugänglich zu machen. Außerdem sollte die Bedienung schnell und möglichst übersichtlich sein.

3.4.1 Installation und Programmstart

Das Tool „RA-Vergleich“ (Raumakustik-Vergleich) besitzt keinen Intallationsklienten. Die einzigen Vorraussetzungen für die einwandfreie Funktion sind einerseits das Betriebssystem (kompatibel sind Windows 7/8/10) und andererseits die vorgegebene Ordnerstruktur des Ordners „RA-Vergleich“ (vgl. Abb. 3.7). Der Dateipfad des Ordners im Kontext des User-PCs ist irrelevant (z.B.: C:\Program Files\RA-Vergleich). Gestartet wird das Programm durch Öffnen der Programmdatei „RA-Vergleich.exe“. Von dieser Programmdatei kann natürlich auch eine Verknüpfung erstellt werden, um einen anderen Zugriffsort zu wählen (z.B.: Desktop/Startmenü).

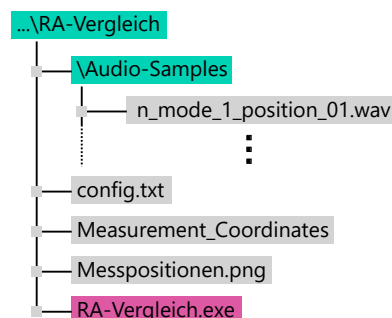


Abbildung 3.7: Struktur des Ordners „RA-Vergleich“

3.4.2 Bedienung

Das Tool besteht lediglich aus dem Hauptfenster, welches beim Öffnen der Programmdatei erscheint (vgl. Abb. 3.8). In der Mitte der Benutzeroberfläche befindet sich der Grundriss des Hörsaals i15 inklusive der Aufnahmepositionen. Um ein Hörbeispiel abzuspielen, muss zunächst eine der drei Unterrichtsformen aus der Dropdown-Liste (1) ausgewählt werden. Die Auswahl der Aufnahmeposition erfolgt in der Grafik durch einen Mausklick auf die gewünschte Position. Die Schaltflächen 2 und 3 ermöglichen es zwischen den Aufnahmen vor und nach der Sanierung zu wählen. Im Anschluss muss die Schaltfläche „Abspielen“ (4) angeklickt werden, und das gewünschte Hörbeispiel wird abgespielt. Das Beispiel wird so lange in einer Schleife wiederholt, bis die Schaltfläche 4 erneut betätigt wird oder einer der Auswahlparameter (Unterrichtsform, Aufnahmeposition, vor Sanierung/nach Sanierung) vom User geändert wird. Um zwischen den Hörbeispielen zu wechseln muss der Abspielvorgang also nicht beendet werden. Das Programm

registriert die Änderung des Parameters und spielt sofort das zugehörige Beispiel ab, um einen möglichst einfachen Direktvergleich der Aufnahmen zu ermöglichen. Beendet wird das Programm durch die „Schließen“-Schaltfläche (5) des Betriebssystems.

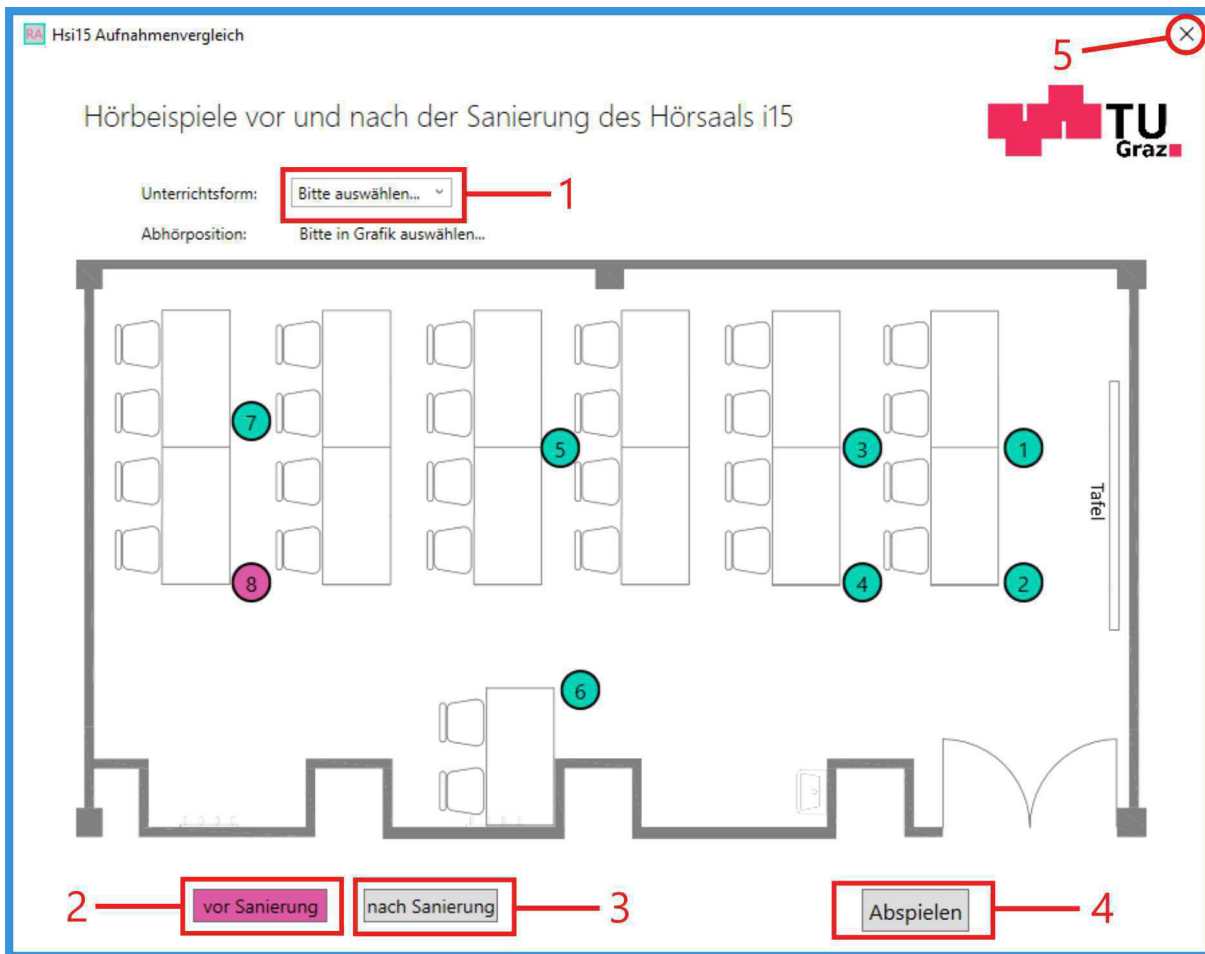


Abbildung 3.8: Benutzeroberfläche des Vergleichstools (Betriebssystem Windows 10).

3.4.3 Konfiguration des Programms

Mithilfe der im Programmordner abgelegten Konfigurationsdateien wird es dem User ermöglicht das Programm für andere Vergleichsaufnahmen zu konfigurieren. Dazu sind die folgenden Schritte in der angegebenen Reihenfolge durchzuführen:

Änderung des Grundriss:

Möchte man einen anderen Grundriss verwenden, muss dieser zunächst als png-Datei vorliegen. Idealerweise weist diese ein Seitenverhältnis von 1,87:1 auf (z.B. 935x500 px). Die Datei „Messpositionen.png“ (vgl. Abb. 3.7) wird dann mit dem neuen Bild überschrieben.

Bearbeiten der config-Datei:

Die eigentliche Personalisierung erfolgt durch Veränderung der Text-Datei „config.txt“ (vgl. Abb. 3.7). Die Zeilen des Textes haben folgende Funktion (vgl. Abb. 3.9):

1. Titel der Vergleichsaufnahme
2. Name des Hauptfensters (Fenstername oben links)
3. Anzahl der Messpositionen (max. 99)

4. Erster Modus (Unterrichtsform). Jede weitere Zeile wird vom Programm als zusätzlicher Modus interpretiert (max. 9 Modi).

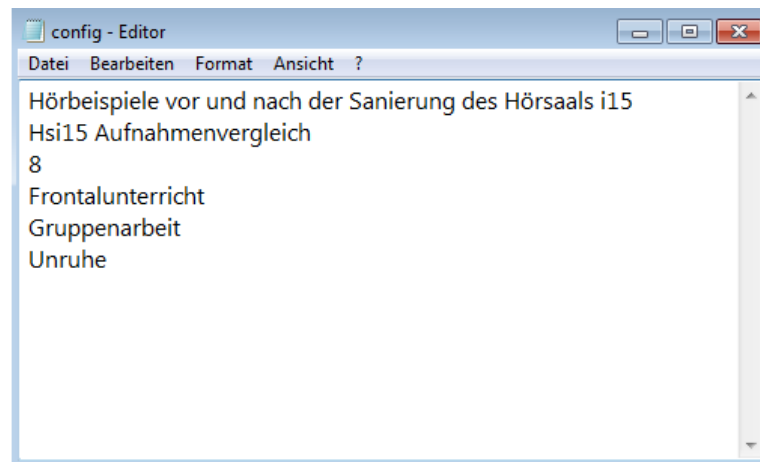


Abbildung 3.9: Beispiel für eine ausgefüllte config-Datei.

Speichern der Audio-Samples:

Alle zu verwendenden Audio-Samples müssen im wav-Format vorliegen und im Ordner „Audio-Samples“ (vgl. Abb. 3.7) abgespeichert werden. Die Dateinamen müssen folgendem Schema folgen:

X_mode_**Y**_position_**ZZ**.wav

X muss durch 'v' für 'vor der Sanierung' oder 'n' für 'nach der Sanierung' ersetzt werden. **Y** muss durch die fortlaufende Nummer des Modus/der Unterrichtsform ersetzt werden. Die Nummer korrespondiert mit der Anzahl, die in der config-Datei angegebenen Anzahl von Modi. **ZZ** muss durch die Nummer der Messposition ersetzt werden. Nummern unter Zehn müssen mit führender Null geschrieben werden (z.B. '03').

Konfigurieren der Aufnahmepositionen:

Nachdem die ersten drei Schritte durchgeführt und die entsprechenden Dateien ersetzt wurden, wird „RA-Vergleich.exe“ gestartet. Bei Programmstart erscheinen die Aufnahmepositionen links oben über dem neuen Grundriss. Die Anzahl entspricht der in der config-Datei hinterlegten Zahl. Um die Punkte korrekt zu positionieren wird mit der Taste 'E' in den „Edit-Mode“ gewechselt. Es erscheint die Aufschrift „Edit-Mode“ und eine Schaltfläche „Speichern“. Nun kann die jeweilige, mit Mausklick ausgewählte Position mithilfe der Pfeiltasten verschoben werden (vgl. Abb. 3.10). Sind alle Positionen korrekt angeordnet, werden diese durch Betätigen der Schaltfläche „Speichern“ gespeichert und der „Edit-Mode“ wird verlassen. Beim erneuten Starten des Programms wird auf die veränderten Positionen zurückgegriffen.

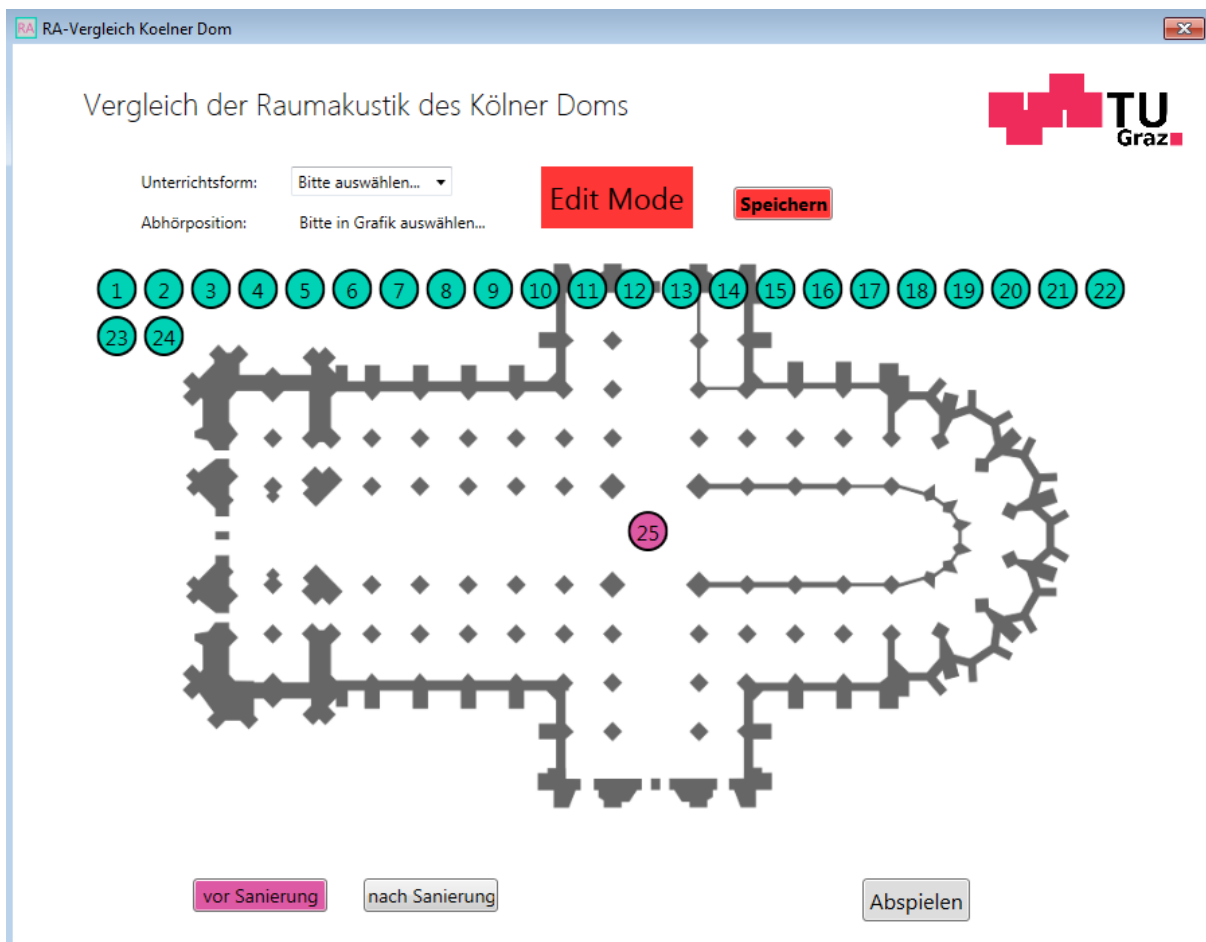


Abbildung 3.10: Benutzeroberfläche des Vergleichstools im Edit-Mode (Betriebssystem Windows 7).

3.5 Auswertung der Aufnahmen mithilfe des Noise Level Analyzers

Auf Grundlage der vorhandenen Aufnahmen lassen sich auch Berechnungen in Bezug auf die Raumakustik durchführen. Dazu wurde der „Noise Level Analyzer“ verwendet, der im Rahmen des TI-Projekts von Rafael Ludwig entwickelt wurde (vgl. [LUDWIG, 2014]). Für die Berechnungen wurden insgesamt 16 Ton-Dateien analysiert (2 Aufnahmen x 8 Messpositionen). Die Dauer pro Datei betrug 5 Minuten und entsprach inhaltlich der Kategorie „Frontalunterricht“ aus Kapitel 3.3.

Bei Betrachtung der Daten ist zu beachten, dass die Basis der Berechnungen nicht den Anforderungen für eine Messung genügen. Die Aufnahmen stellen kein Messsignal in Anbetracht ihrer Reproduzierbarkeit dar. Des Weiteren sind unter Umständen die Aufnahmepositionen über beide Aufnahmen hinweg nicht konstant und die Quelle (der Vortragende) bewegt sich im Raum.

Abbildung 3.11 zeigt die kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln an Position 8 (vgl. Abb. 3.6). Die Entfernung zur Quelle ist also relativ groß. Deutlich zu sehen ist, dass sich die Auftrittswahrscheinlichkeiten um ca. 3 dB nach unten verschieben, höhere Pegel also seltener auftreten. Diese konforme Verschiebung lässt sich durch den direkten Einfluss der verbauten Absorber erklären, die Schallenergie im Raum in Wärmeenergie umwandeln. Die Grafiken für alle Positionen sind im Anhang zu finden (vgl. Anhang 6.3).

Abbildung 3.12 zeigt die Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Frequenz ebenfalls an Position 8. Zu erkennen ist eine Absenkung des Pegels unter ca. 125 Hz., um 200 Hz, 350 Hz und zwischen 1 kHz und 4 kHz. Die Absenkung zwischen 1kHz und 4 kHz ist über alle Positionen

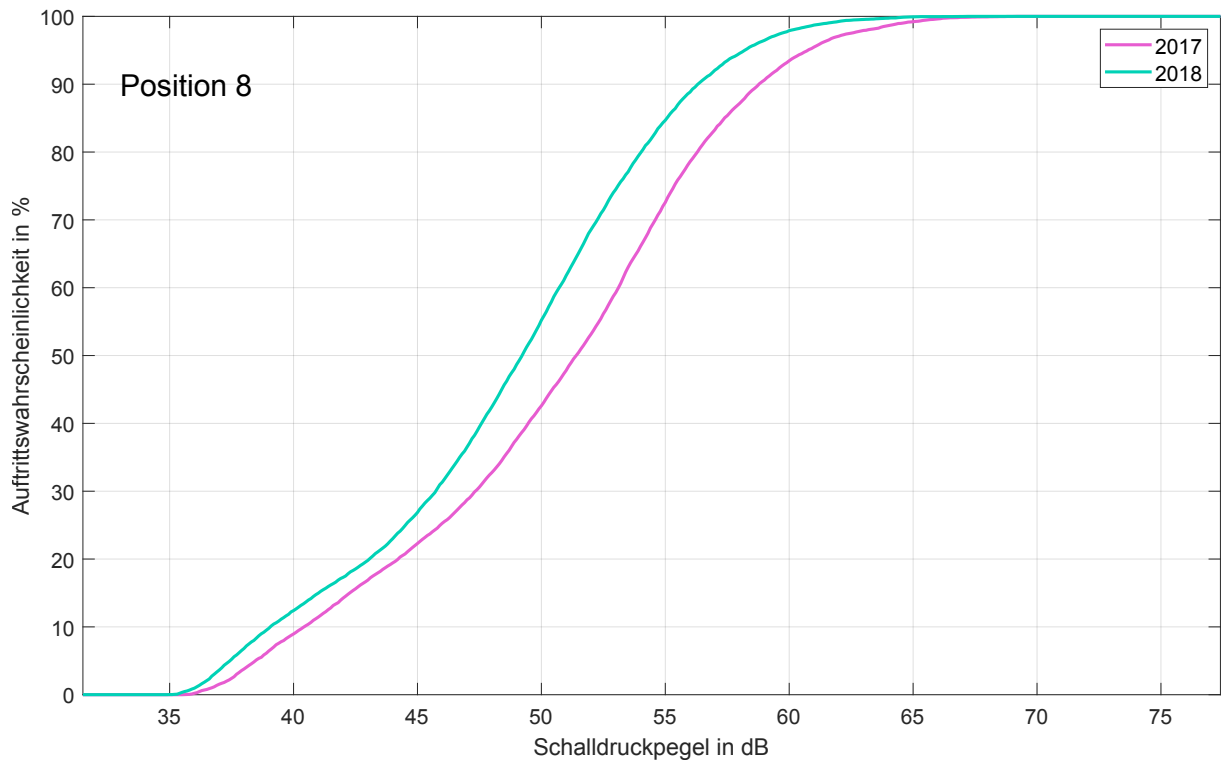


Abbildung 3.11: Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 8).

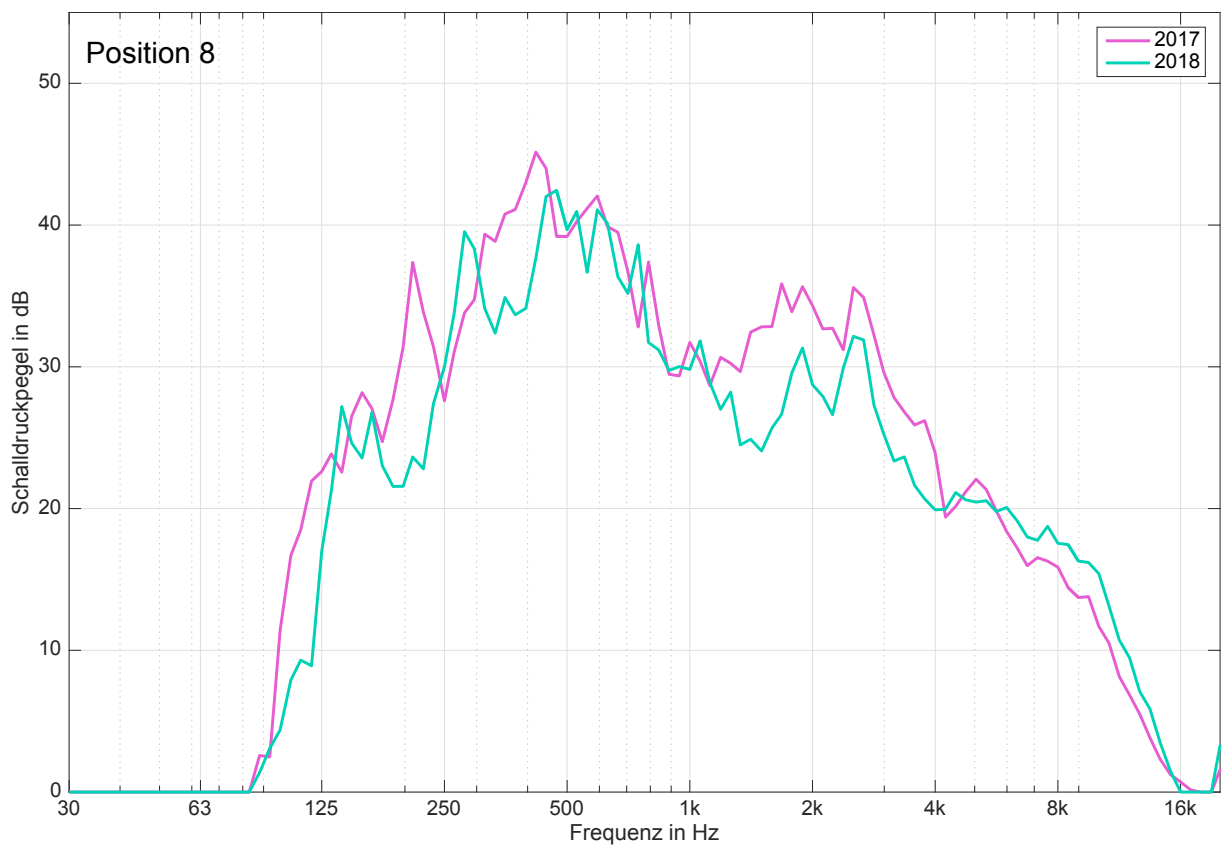


Abbildung 3.12: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz. (Aufnahmeposition 8)

relativ konstant. Im tieffrequenten lässt sich anhand dieser Daten kein klares Einwirken der verbauten Absorber im gesamten Raum erkennen (vgl. Anhang 6.4).

3.6 Ausblick

Das in Abschnitt 3.4 beschriebene Vergleichstool bietet in der vorliegenden Version bereits die Möglichkeit die Akustik eines Raumes qualitativ und ortsabhängig zu erfahren. Jedoch müssen für die Benutzung geeignete Audiodaten vorhanden sein. Es muss vor und nach der Sanierung eine Tonaufnahme bei Benutzung des Raumes erfolgen (z.B. während einer Vorlesung) und im Idealfall sind SprecherIn und Anzahl an Personen identisch. Dies stellt einen logistischen Aufwand dar, der in vielen Fällen nicht im Verhältnis zum Nutzen stehen könnte.

Um diesem Problem vorzubeugen, können mithilfe von Impulsantworten die Audio-Dateien vom Programm erzeugt werden. Hierfür werden zunächst kurze beispielhafte Tonaufnahmen benötigt die programmintern gespeichert sind. Der Anwender stellt dann die Impulsantworten der Messung dem Programm zur Verfügung. Diese Impulsantworten werden von jeder handelsüblichen Messsoftware im Rahmen einer Nachhallzeitmessung generiert. Das Vergleichstool faltet dann die gespeicherten Tonaufnahmen mit den Impulsantworten für jede Messung und Position. Danach kann das Programm genau so wie die vorliegende Version benutzt werden.

Mit diesem Vorgehen verringert sich der Aufwand enorm, da die Nachhallzeitmessungen vor und nach der Sanierung in der Regel bei einer Sanierung durchgeführt werden und somit die benötigten Daten bereits vorhanden sind. So könnte sich diese neue Version als nützliches Werkzeug in der Lehre erweisen, indem Raumakustik für Studenten erfahrbar gemacht wird. Zum Beispiel durch den hörbaren Vergleich von Gütemaßen wie Deutlichkeitsmaß oder Bassverhältnis.

4

Optimierung der raumakustischen Maßnahme im Hs i14

Der Hörsaal i14 der TU Graz (Inffeldgasse 18, 8010 Graz) wurde durch die Firma GU bautech GmbH im Jahr 2017 saniert. Die durchgeführte Sanierungsmaßnahme lässt sich im Vergleich zu Kantenabsorberrn als herkömmlich bezeichnen. Verbaut wurden Paneele aus porösem Absorbermaterial, welche auf Wandflächen angebracht wurden, um Frequenzen im mittleren und hohen Frequenzbereich zu bedämpfen. Die Auswahl und Anzahl der Absorber gründete allerdings auf einer Fehleinschätzung der Ausgangssituation, woraus eine suboptimale Nachhallzeit im sanierten Raum resultiert [HETZ, KORDESCH, 2017]. Ziel war es nun, durch Verändern der Anzahl und Position der Absorber die Nachhallzeit im Raum zu optimieren.

4.1 Ausgangssituation im Hörsaal

Der Hörsaal i14 wird hauptsächlich für Seminare, Übungen und kleinere Vorlesungen genutzt. Voll besetzt fasst der Raum 36 Hörer auf 72,25 m². Im Jahr 2017 wurde der Raum im Auftrag der Abteilung Gebäude und Technik der TU Graz von der Firma GU bautech saniert. Die Maßnahme beinhaltete 10 Wandpaneele der Firma Wekustik mit insgesamt 21,6 m² Absorberfläche. Die Paneele sind bis auf die Farbe des Vlies identisch, die Abmessungen sind Abbildung 4.4(a) zu entnehmen. Zusätzlich ist eine 30 cm abgehängte Akustikdecke verbaut. Der Raum befindet sich im Untergeschoss und weist einseitig eine Fensterreihe ab einer Höhe von ca. 2,8 m auf.



Abbildung 4.1: Hörsaal nach der Sanierung durch die Firma GU Bautech

Die Nachhallzeit ist Abbildung 4.3 zu entnehmen. Auffällig ist die sehr hohe Nachhallzeit im niedrigen Frequenzbereich im Vergleich zu den mittleren und hohen Frequenzen bezogen auf die Soll-Nachhallzeit von $T_{soll} = 0,75s$. Subjektiv klingt der Raum vor allen Dingen sehr trocken.

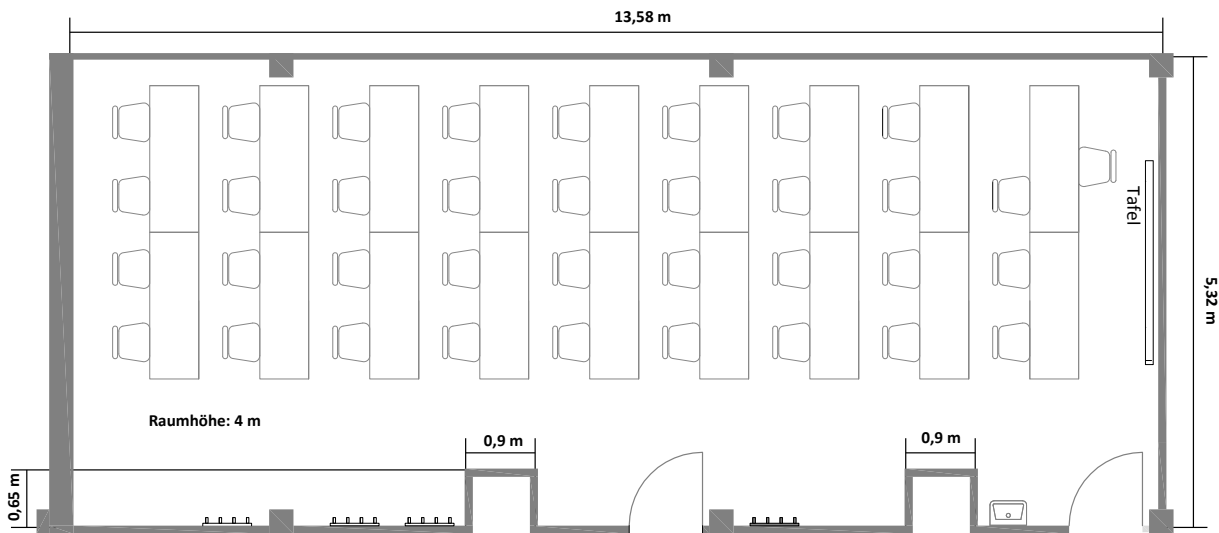


Abbildung 4.2: Grundriss des Hörsaal i14

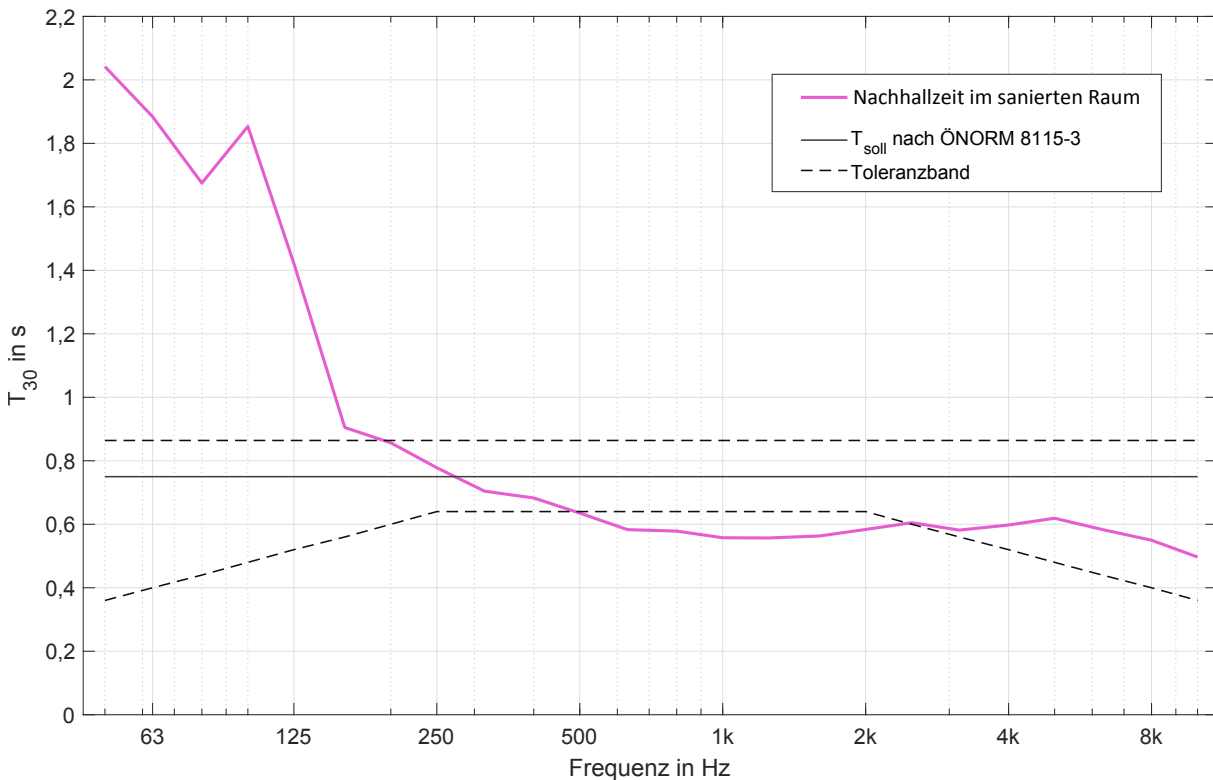
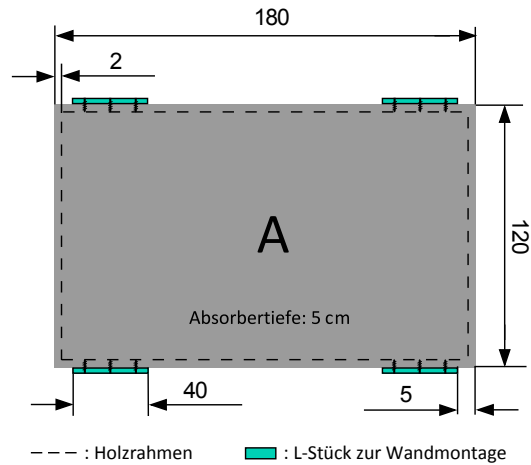


Abbildung 4.3: Nachhallzeit im Hörsaal i14 nach der Sanierung durch Firma GU Bautech

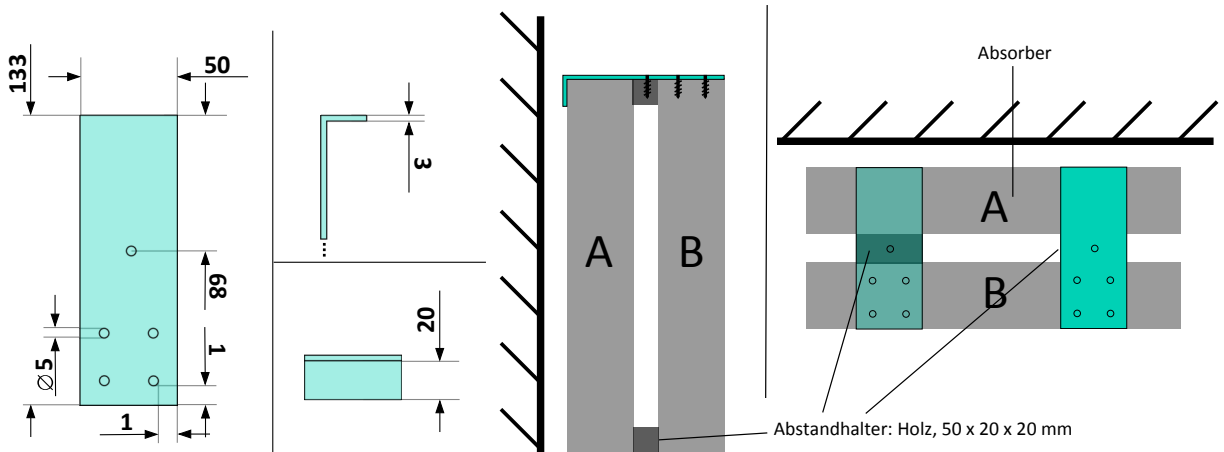
4.2 Erarbeiten einer Optimierung

Abbildung 4.3 zeigt, dass sich ab etwa 500 Hz bis 3 kHz die Nachhallzeit unterhalb des Toleranzbands (vgl. [ÖNORM B 8115-3]) befindet. Um dem entgegenzuwirken, können Absorberpaneele aus dem Raum entfernt werden, umso die Nachhallzeit in diesem Frequenzbereich näher an T_{soll} zu bringen. Die auffälligste Problematik besteht jedoch in der stark erhöhten Nachhallzeit unter 500 Hz. Eine mögliche Lösung stellt die Verwendung von stärkeren Absorberpaneelen dar. Erhöht man die Tiefe eines porösen Absorbers steigt der Absorptionsgrad für tiefe Frequenzen an, da die Dicke des Absorbers vergrößert wird und er somit für Schall mit größerer Wellenlänge wirk-

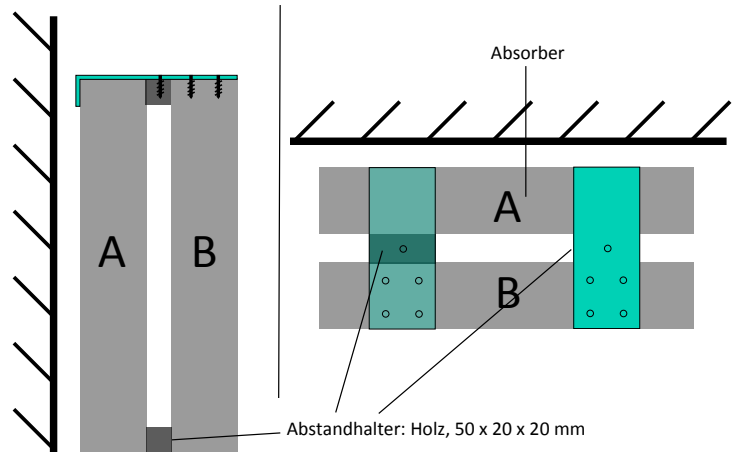
sam ist. Abbildung 2.2 (S. 12) zeigt beispielsweise den Absorptionsgrad von Mineralwolle (eines porösen Absorbermaterials) mit einer Dicke von 50 mm bzw. 100 mm. Der höhere Absorptionsgrad bei Verdopplung der Materialstärke bezogen auf tiefe Frequenzen ist deutlich zu erkennen. Ziel war es aber, nur unter Verwendung der vorhandenen Paneele die gegebenen Probleme zu minimieren.



(a) Abmessungen der Absorberpaneele und Wandmontage (in cm).



(b) Zeichnung des L-Stücks zur Aufdopplung der Paneele (in mm).



(c) Schema für die Aufdopplung der Paneele.

Abbildung 4.4: Zeichnung und Montageschema zur Aufdopplung der Paneele mit L-Stück (**A**: An der Wand montiertes Paneel, **B**: Aufgehängtes Paneel).

Da zur Anhebung der Nachhallzeit bei mittleren und hohen Frequenzen Paneele von der Wand entfernt werden mussten, war es möglich diese anderweitig zu verwenden. Anstatt tiefere Absorberpaneele zu verbauen, wurden die überschüssigen Absorber vor bestehende Absorber gehängt (im Weiteren als „Aufdoppeln“ beschrieben). Um den Vorgang möglichst simpel zu gestalten wurden Winkel aus Aluminium angefertigt (vgl. Abb. 4.4(b)). Diese wurden am äußeren Absorber befestigt, welcher dann an den an der Wand montierten Absorber gehängt werden konnte. Abbildung 4.4(c) zeigt eine schematische Darstellung der Aufhängung und Abbildung 4.8 (S. 38) die aufgedoppelten Absorber während der Nachhallzeitmessung.

4.3 Messung der Nachhallzeit

Nachhallzeitmessung Hsi14

Datum, Uhrzeit	03.06.2018, 10:00 - 15:00 Uhr
Anwesende Personen	Stefan Ziesemer, Benedikt Peters
Raummaße	13,58 x 5,32 x 4 m
Raumvolumen	288,98 m ³
Temperatur	22,0 °C
Luftfeuchtigkeit	66,4%

Tabelle 4.1: Kenndaten der Nachhallzeitmessung

4.3.1 Messaufbau

Abbildung 4.5 zeigt den schematischen Aufbau der Messvorrichtung. Die genauen Gerätebezeichnungen sind dem Geräteverzeichnis zu entnehmen (vgl. Tab. 7.2). Das Messsignal wurde von der Software *Room EQ Wizard* generiert und über das USB-Interface und den Verstärker an den omnidirektionalen Messlautsprecher weitergegeben. Die Antwort des Raumes auf die Anregung wurde vom Messmikrofon aufgenommen und über das USB-Interface an die Messsoftware zurückgeführt.

Die Dauer des Messsignals betrug insgesamt 43,7 s und bestand aus zwei logarithmischen Sweeps von 40 Hz bis 10 kHz bei einer Samplefrequenz von 48 kHz. Aus der Antwort des Raumes auf dieses Signal berechnet die Software die Impulsantwort und in Folge die Nachhallzeit. In dieser Arbeit wird die Nachhallzeit ausschließlich als T_{30} in Sekunden angegeben.

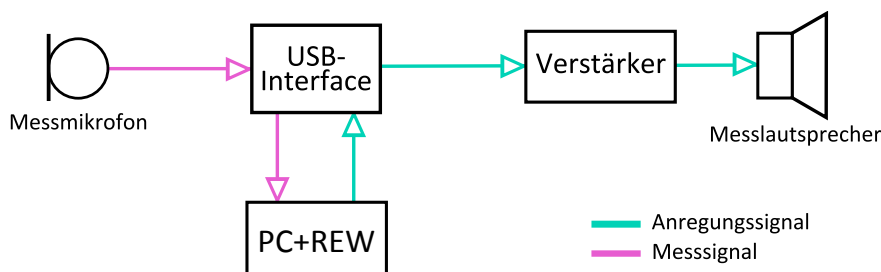


Abbildung 4.5: Blockdiagramm des Messaufbaus

Insgesamt wurden pro Messung eine Quellen- und sechs Messpositionen verwendet. Die Positionen folgen der Empfehlung der Ö-Norm 8115-3 (vgl. [ÖNORM B 8115-3]) und blieben konstant über alle durchgeführten Messungen (vgl. Abb. 4.6).



Abbildung 4.6: Quell- und Messpositionen der Nachhallzeitmessung

4.3.2 Absorberpositionierungen

Insgesamt wurden fünf Nachhallzeitmessungen durchgeführt. Für jede dieser Messungen wurde die Anzahl bzw. Position der Absorberpaneele verändert. Abbildung 4.7 zeigt die Absorberpositionierungen für die Messungen 1-4. Für die Messung 5 wurden alle Paneele aus dem Raum entfernt (vgl. Abb. 4.9).

Messung 1 entspricht der Ausgangssituation nach der Sanierung des Raumes. Für Messung 2 wurden 3 Absorberpaneele von der Wand entfernt und verwendet um die Absorber im hinteren Bereich des Raumes aufzudoppeln. Bei Messung 3 waren nur 5 Paneele an den Wänden montiert, für Messung 4 wurden diese 5 Paneele zusätzlich aufgedoppelt.

Die Messungen 1 und 5 dienen hauptsächlich dem Vergleich zwischen der Situation vor und nach der Sanierung bzw. zum Bestätigen der Verbesserung durch die Veränderung der Anzahl und Position der Absorber. Die Positionierungen für Messung 2 und 4 wurden als zwei Optionen für eine mögliche, bleibende Optimierung gewählt. Die Positionierung für Messung 3 diente dem Vergleich zwischen aufgedoppelten (Messung 4) und nicht aufgedoppelten Paneelen.

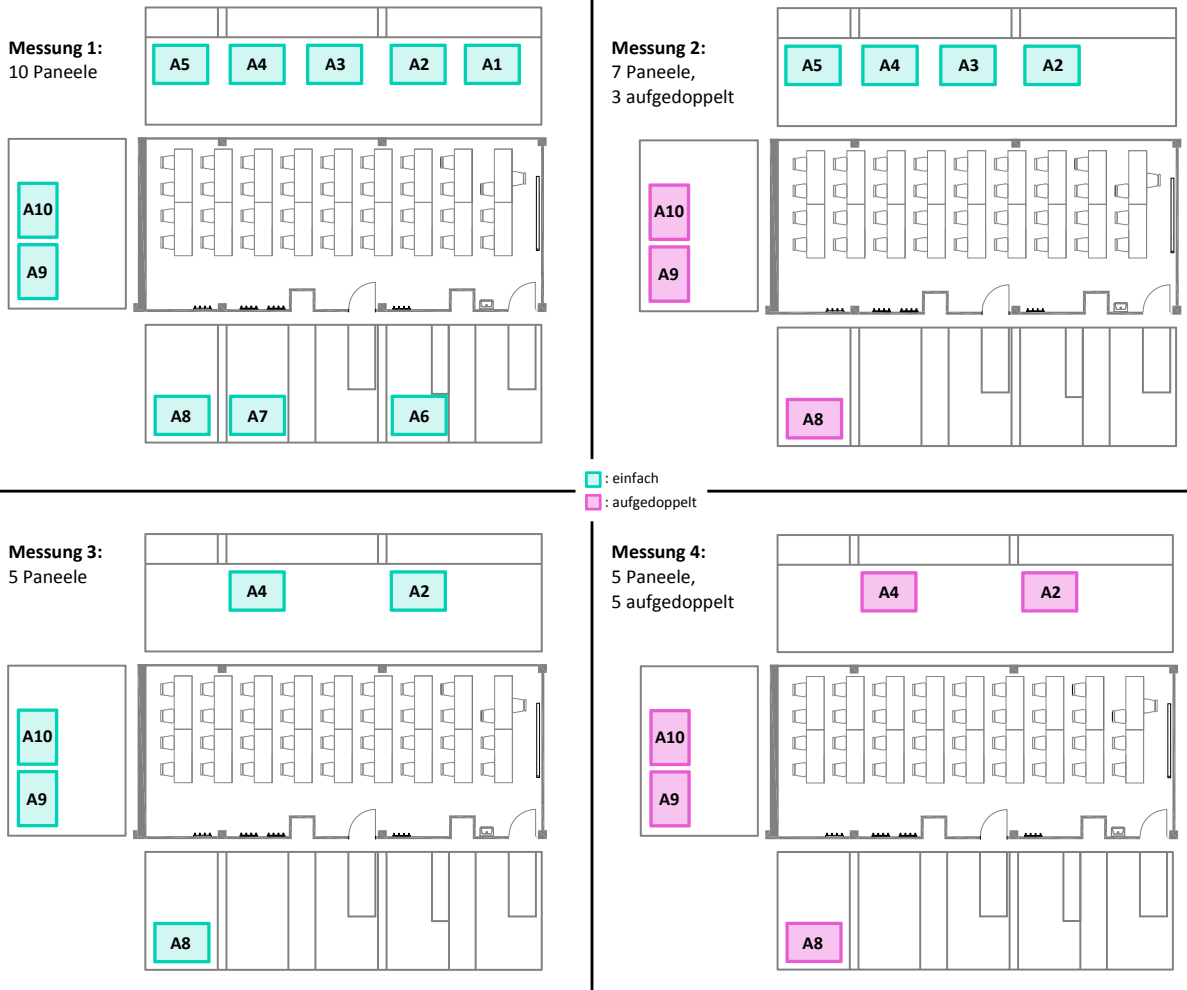


Abbildung 4.7: Absorberpositionierungen der Messungen 1-4, Messung 5 wurde ohne Paneele im Raum durchgeführt.



Abbildung 4.8: Absorberpositionierung 4 mit doppelten Absorbern



Abbildung 4.9: Absorberpositionierung 5, keine Absorberpaneele im Raum

4.4 Auswertung

Abbildung 4.10 zeigt die Nachhallzeiten der Messungen 1, 2, 4 und 5, gemittelt über alle Messpositionen. Zu erkennen ist, dass sich die Nachhallzeit durch Entfernen von Absorbern bezogen auf mittlere und hohe Frequenzen, wie erwartet, vergrößert hat. In Anbetracht des Toleranzbands zeigt Messung 4 das beste Ergebnis, da sich die Nachhallzeit über den größten Frequenzbereich innerhalb des Bands befindet. Bei den tieferen Frequenzen ist ersichtlich, dass unter 150 Hz Messung 2 und 4 eine niedrige Nachhallzeit als Messung 1 aufweisen.

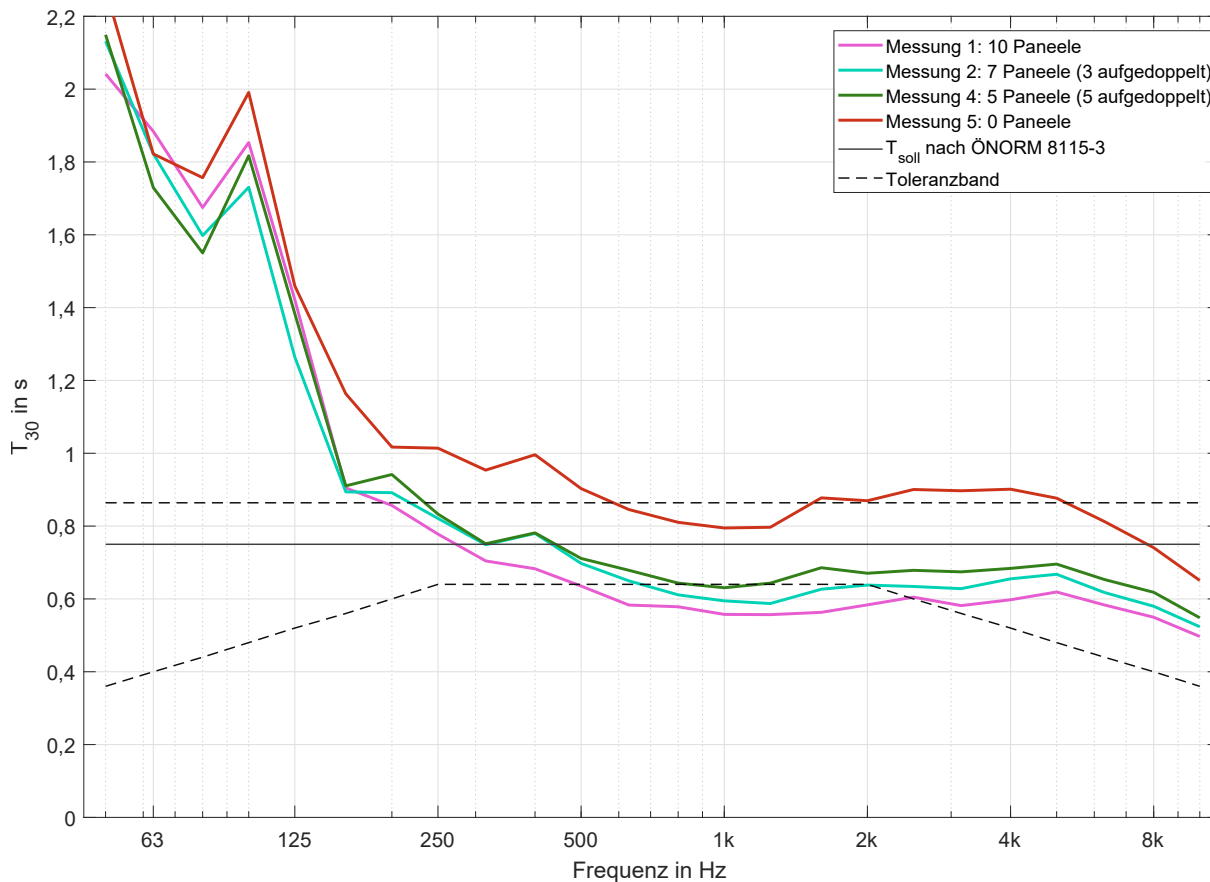


Abbildung 4.10: Vergleich der Nachhallzeiten bei Absorptionen 1, 2, 4 und 5

Abbildung 4.11 zeigt die Nachhallzeiten der Messungen 3 und 4 im Vergleich. Über etwa 1 kHz sind die Nachhallzeiten fast identisch. Darunter steigt Messung 3 stärker an. Darin zeigt sich die Wirksamkeit der aufgedoppelten Absorberpaneele. Die maximale Differenz beträgt lediglich 0,05 Sekunden.

In allen Messungen ist ein deutlicher Anstieg bei 100 Hz zu erkennen. Was zunächst für die Auswirkungen der Raummode zwischen Boden und Decke, welche aufgrund der konstanten Kapselhöhe auf alle Messpositionen einwirkt, gehalten wurde, handelt es sich tatsächlich um einen Ausreißer in den Messdaten, der in allen Messungen vorkommt. Beispielhaft zeigt Abbildung 4.12 alle Messdaten der Messung 4 in einem Boxplot. Der gut zu erkennende Ausreißer bei 100 Hz ist das Messergebnis der Messposition 1. Auch in allen anderen Messungen ist diese Messposition für den hohen Wert bei 100 Hz verantwortlich (vgl. Anhang 6.5). Außerdem zeigt die Abbildung den Anstieg der Standardabweichung zu den tiefen Frequenzen hin. Für diesen Anstieg ist die frequenzabhängige Raummodendichte verantwortlich (vgl. Abb. 2.4, S. 13). Zu tieferen Frequenzen hin hat die Messposition einen immer größeren Einfluss auf die gemessene Nachhallzeit.

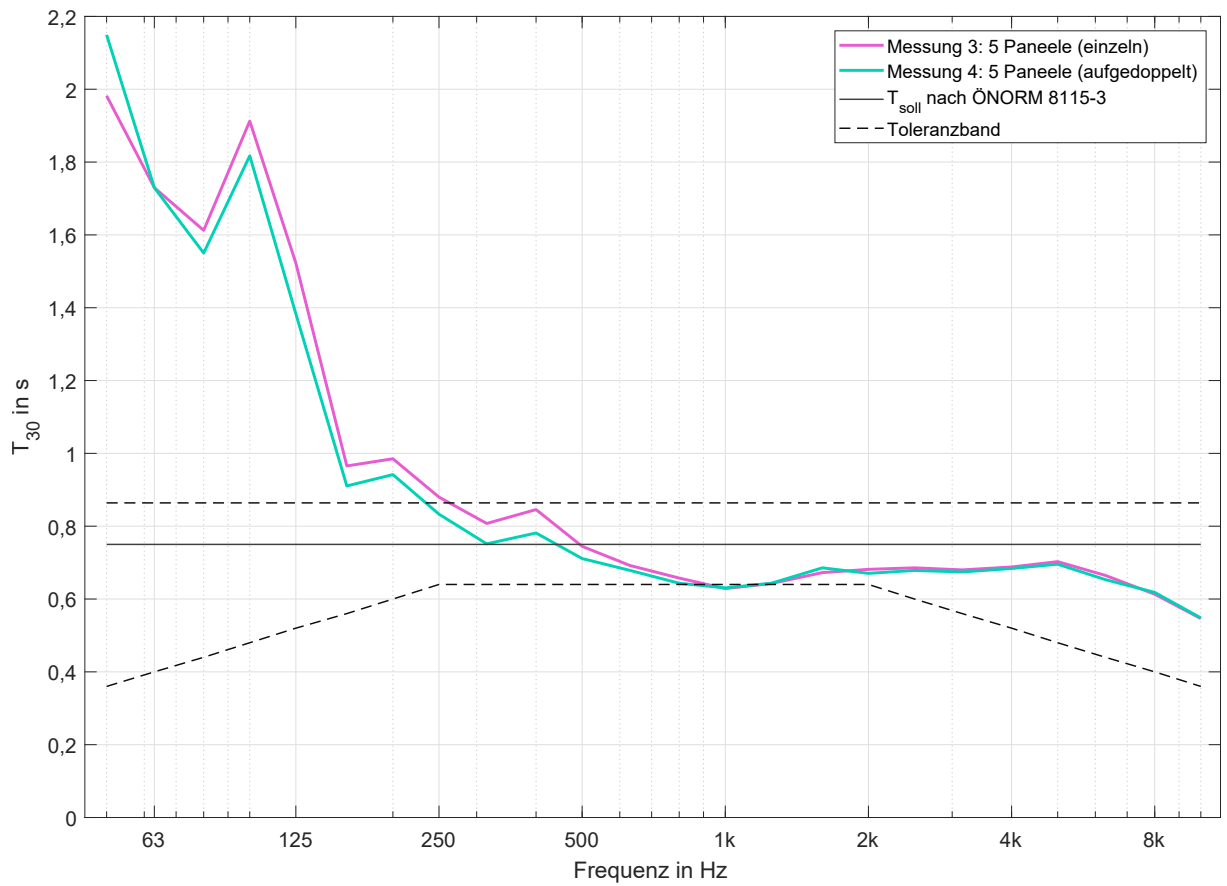


Abbildung 4.11: Vergleich der Nachhallzeit mit und ohne aufgedoppelten Absorberpaneelen

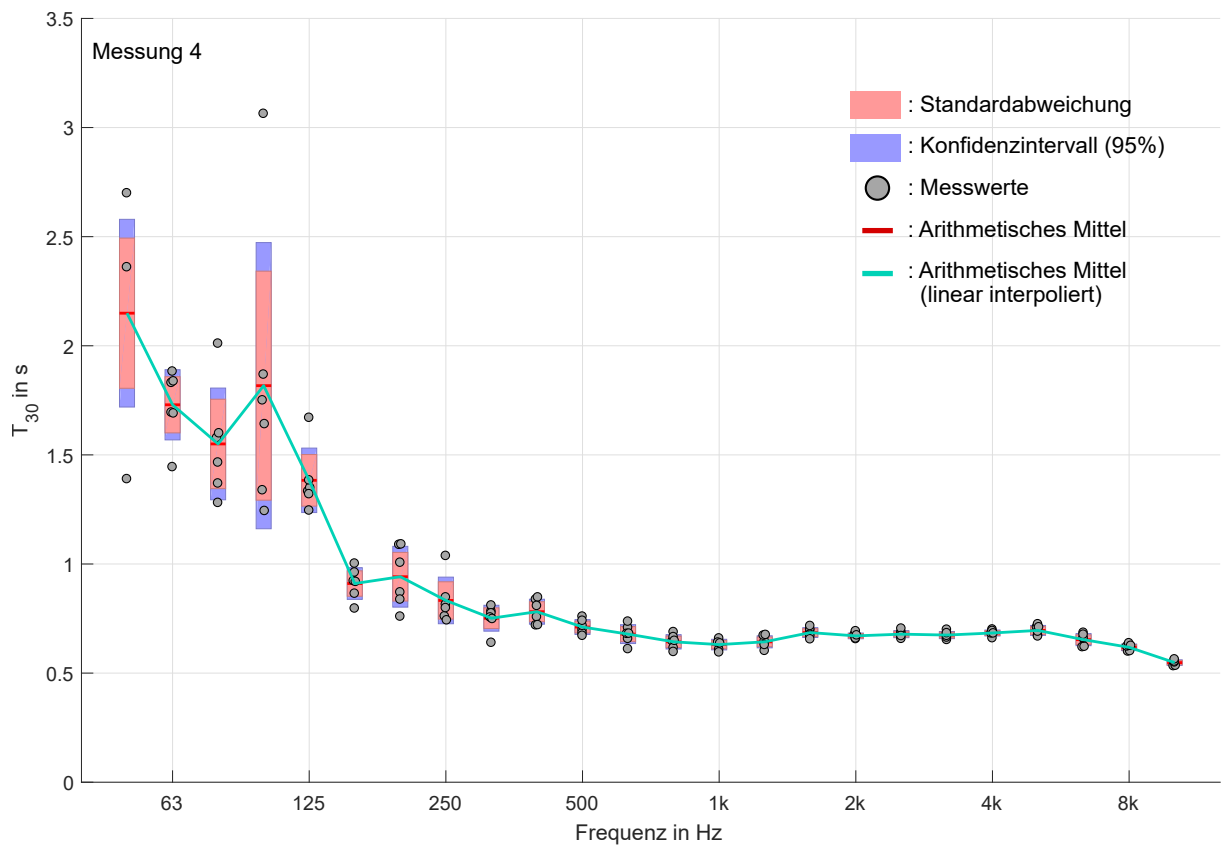


Abbildung 4.12: Boxplot der Nachhallzeitmessung 4

4.4.1 Bass Ratio in Abhängigkeit der Messpositionen

Das Bassverhältnis (*BR: Bass Ratio*) gibt das Verhältnis der Nachhallzeiten der 125Hz- und 250Hz-Oktave zur 500Hz- und 1kHz-Oktave an (vgl. Gl. 4.1). Es beschreibt folglich im weiteren Sinne eine Steigung von den mittleren zu den tiefen Frequenzen hin. Als Zielvorgabe gibt Adelman-Larsen in „Rock and Pop Venues: Acoustic and Architectural Design“ ein Bassverhältnis $BR < 1$ an und schreibt:

„Halls with a low RT at low frequencies are considered the best [...] Reverberant low-frequency sound has a tendency to partially mask direct sound (both at low and mid frequency), and hereby the core message of the music, the beat and the text, is lost“ (vgl. [ADELMAN-LARSEN, 2014]).

Abbildung 4.13 stellt die Bassverhältnisse der Messungen 1, 2, 4 und 5 in Abhängigkeit von der Entfernung der Messposition zur Tafel dar. Kein Wert unterschreitet ein Bassverhältnis von 1,3. Über die ganze Raumlänge hinweg besitzt Messung 1 das größte Bassverhältnis. Im Mittel sinkt das Bassverhältnis bei Entfernen von Absorberpaneelen. Betrachtet man Abbildung 4.10 erkennt man, dass genau im Bereich zwischen der 125 Hz und 250 Hz Oktave die Nachhallzeit stark zunimmt. Da die Absorberpaneele unter 250 Hz anscheinend keine Wirkung zeigen, vergrößert eine höhere Anzahl von Paneelen diese Steigung und somit zugleich das Bassverhältnis.

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1kHz}} \quad (4.1)$$

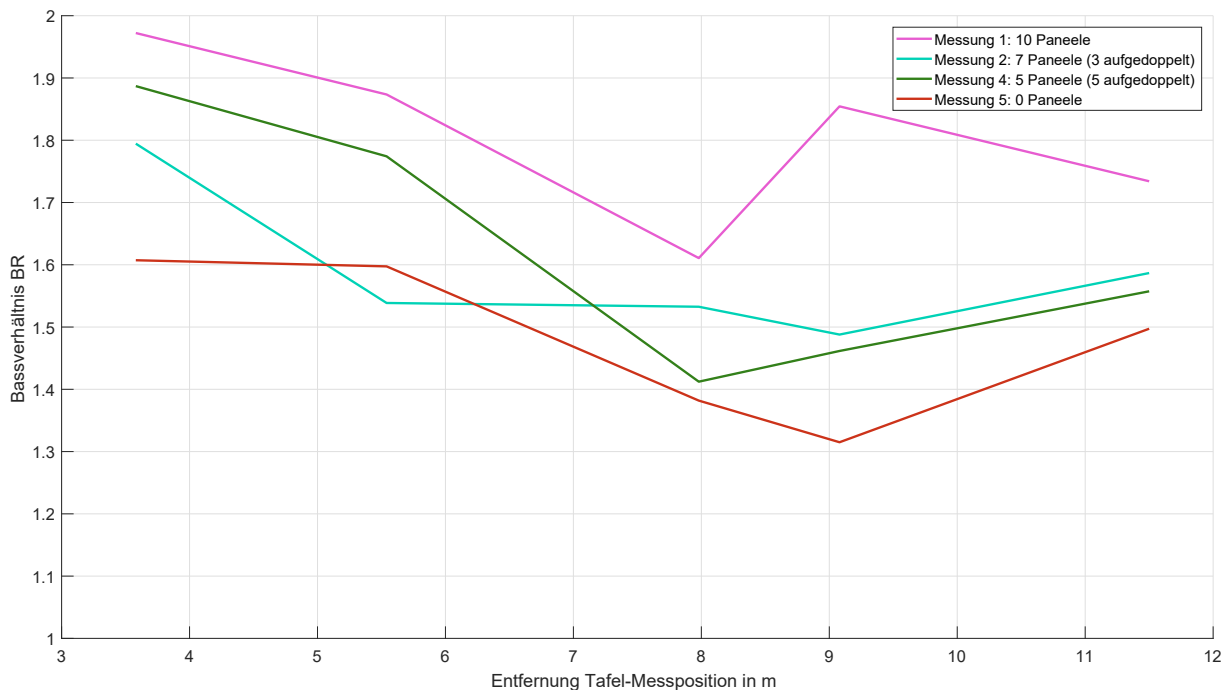


Abbildung 4.13: Vergleich der Bassverhältnisse in Abhängigkeit der Entfernung zur Tafel für Absorberpositionen 1, 2, 4 und 5

4.4.2 Zusammenfassung

Von allen vermessenen Absorberpositionierungen eignet sich Variante 4 (vgl. Abb. 4.10) am besten. Für diese Konstellation befindet sich die Nachhallzeit über den größten Frequenzbereich

innerhalb des Toleranzbands der Ö-Norm (vgl. [ÖNORM B 8115-3]). Mit den verbauten Absorbern lässt sich der enorme Anstieg zu den tiefen Frequenzen hin allerdings nicht bereinigen. Zwar konnte durch die Aufdoppelung der Absorber eine kleine Verbesserung erzielt werden, das Problem ist in den Messdaten jedoch unabhängig von der Absorberpositionierung deutlich zu erkennen (vgl. Abb. 4.10). Auch anhand des Bassverhältnisses (vgl. Abb. 4.13) lässt sich zeigen, dass ohne eine neue raumakustische Maßnahme, die Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen hin stark zunimmt. In Anbetracht der gelungenen Sanierung des Hörsaals i15 mittels Kantenabsorbern (vgl. Abb. 3.3), kann auch für den Hörsaal i14 eine solche Maßnahme empfohlen werden. Bezüglich der großen Standardabweichungen bei den Nachhallzeitmessungen (vgl. Anhang 6.5), wäre es bei folgenden Messungen sicherlich interessant einen alternativen Mittelwert zum arithmetischen Mittel zu untersuchen, um so möglicherweise ein aussagekräftigeres Ergebnis zu erzeugen.

5

Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt richtete sich der Fokus dieser Arbeit auf die Anwendung des Kantenabsorbers als Teil einer raumakustischen Sanierung. Durch die Sichtung verschiedener Publikationen konnten Daten über Sanierungen mittels Kantenabsorber erhoben werden, welche anschließend für eine Optimierung der Sabine'schen Nachhallzeitformel in Bezug auf die Wirkungsweise dieses Absorbers verwendet werden konnte (vgl. Kapitel 2). Grundlage dieser Erhebung war auch die Sanierung des Hörsaals i15, welche durch die Auswertung zweier Vorlesungsaufnahmen und der Entwicklung eines Vergleichstools akustisch erfahrbar gemacht werden konnte (vgl. Kapitel 3). Als Vergleich wurde die Sanierung des Hörsaals i14 herangezogen. Die verbauten, herkömmlichen Absorber wurden in ihrer Anzahl und Position variiert, um zu versuchen die Akustik des Raumes zu verbessern. Die Problematik im tieffrequenten Bereich blieb jedoch bestehen (vgl. Kapitel 4). Schon zu Beginn der Arbeit, also bei dem Erheben der Kenndaten bereits abgeschlossener Sanierungen, wurde deutlich, dass nur durch ausführliche Dokumentation und deren Bereitstellung die Wirksamkeit des Absorbertyps „Kantenabsorber“ hinreichend beschrieben werden kann. Die Qualität der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Berechnungsmethode basiert auf der Anzahl und der Genauigkeit der zu Grunde liegenden Stichproben. Durch weitere Verbesserung dieser Methode könnten Kantenabsorber in Zukunft besser in den Planungsprozess mit einbezogen werden. Die Raumakustik im Hörsaal i15 wurde durch die Sanierung mittels Kantenabsorber hörbar verbessert, und auch die empirisch erhobenen Daten von Prof. Fuchs zeigen die Wirksamkeit dieses Konzepts. Betrachtet man das Ergebnis der Sanierung des Hörsaals i14 und die Variationen, die in dieser Arbeit beschrieben wurden zeigt sich, dass ohne das Hinzufügen eines anderen Absorbertyps die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen nicht zu bedämpfen ist (vgl. Abschnitt 4.4). Genau für diese Problematik stellen Kantenabsorber eine simple und günstige Lösung dar. Das Konzept bietet sich vor allen Dingen für kleine und mittelgroße Räume an und könnte vielfach in öffentlichen Einrichtungen und Firmen zur Anwendung kommen, um so durch eine verbesserte Akustik den Alltag vieler Menschen angenehmer zu gestalten.

6.1 Raumdaten zur Absorptionsgradberechnung

Die Tabellen 6.1 und 6.2 zeigen alle gesammelten Daten, die für die Berechnungen in Kapitel 2 verwendet werden.

Quelle	Volumen V in m^3	Fläche S in m^2	Kantenlänge L in m	L_F in m	$L_{K,ges.}$ in m	B in m	T in m
14.1.5*	291,6	24,3	27	0	27	0,4	0,5
14.1.7*	151,2	17,6	32,2	0	32,2	0,5	0,047
14.2.6*	150	19,6	28	x	x	x	x
14.2.7*	191,66	8,75	25	x	x	x	x
14.3.2*	258,72	51 51	x	51	0,5	0,5	
14.3.5*	192,36	23,56	31	x	31	0,53	0,23
14.4.3*	205	32,4	36	x	x	x	x
14.4.4*	95,94	22,5	25	0	25	0,4	0,5
Hs i15**	213,63	21,6	21,46	3,26	18,2	0,42	0,65
Studio***	65,15	3,36	10,17	0	10,17	0,32	0,50

Tabelle 6.1: Kenndaten der mit Kantenabsorberrn sanierten Räume; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].

Quelle	63	125	250	500	1k	2k	4k
14.1.5*	2,9	1,7	2,4	2,4	2,3	2,2	1,6
	1,2	1,1	1,3	1,4	1,4	1,5	1,25
14.1.7*	1,15	1,06	0,92	0,81	0,67	0,57	0,59
	0,75	0,72	0,64	0,7	0,61	0,54	0,5
14.2.6*	x	1,8	1,3	0,95	0,72	0,61	0,6
	x	0,73	0,74	0,62	0,54	0,49	0,46
14.2.7*	2,6	2,4	2,3	2,18	2	1,84	1,54
	1,19	1,23	1,4	1,55	1,53	1,39	1,17
14.3.2*	x	3,2	3,5	2,8	3,1	3	2,2
	x	1,2	1,4	1,2	1,25	1,25	1
14.3.5*	x	1,4	1,32	1,05	1,05	1,05	0,95
	x	0,71	0,65	0,6	0,65	0,62	0,58

14.4.3*	1,2	1,5	1,6	1,65	1,59	1,38	1,23
	0,98	1	1,08	1,09	1,08	1,07	0,9
14.4.4*	1,6	2,5	1,25	0,7	0,3	0,3	0,25
	0,3	0,35	0,4	0,4	0,3	0,2	0,25
Hs i15**	1,5	1,24	1,15	1,06	0,92	0,91	0,86
	1,06	0,7	0,75	0,74	0,67	0,71	0,7
Studio***	1,73	1,66	1,56	1,47	1,66	1,43	1,08
	0,82	0,99	1,13	1,07	1,04	0,9	0,87

Tabelle 6.2: Nachhallzeiten der Räume vor (grün) und nach (magenta) der Sanierung; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].

6.2 Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten

Die Abbildungen 6.1 bis 6.6 zeigen in 6 Oktavbändern die Varianz der berechneten Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit der Koeffizienten β und γ . Die Berechnung ist in Kapitel 2.3 beschrieben.

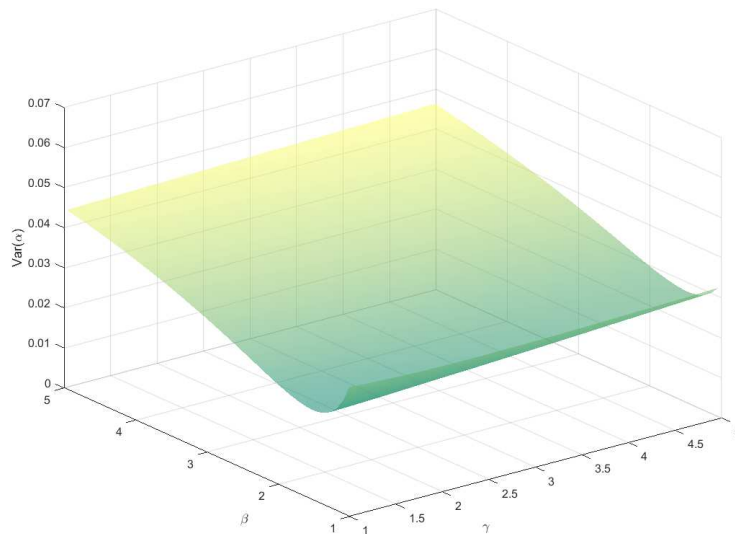


Abbildung 6.1: Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 125 Hz

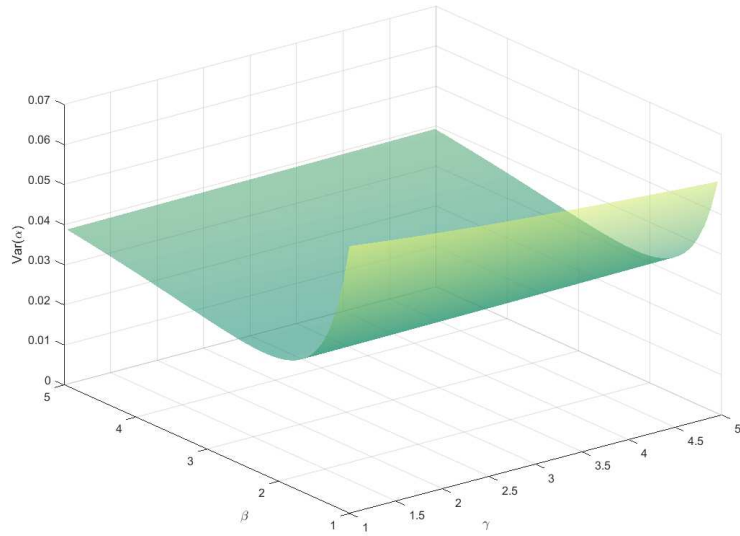


Abbildung 6.2: Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 250 Hz

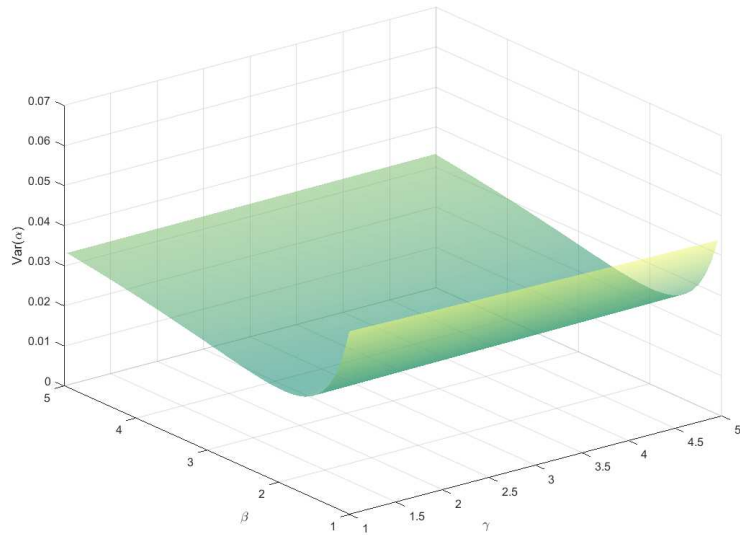


Abbildung 6.3: Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 500 Hz

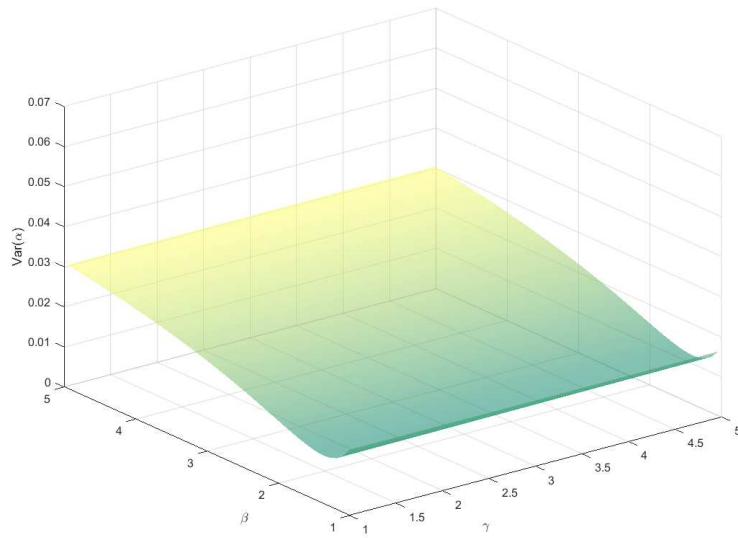


Abbildung 6.4: Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 1 kHz Hz

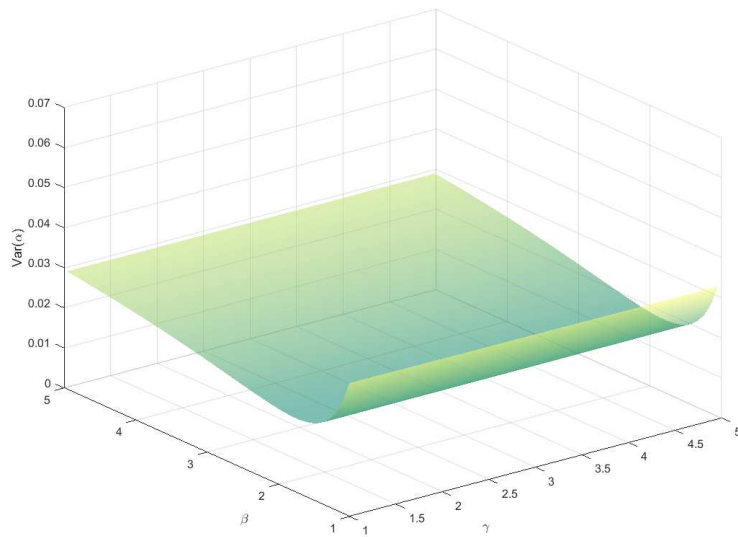


Abbildung 6.5: Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 2 kHz Hz

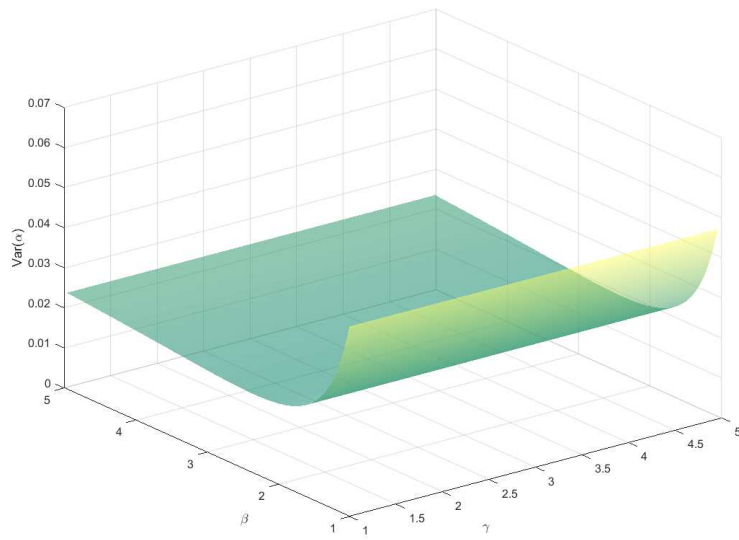


Abbildung 6.6: Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 4 kHz Hz

6.3 Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln

Die Abbildungen 6.7 bis 6.14 zeigen die kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln während der Vorlesungsaufnahme im Hörsaal i15 für alle Aufnahmepositionen (vgl. Kapitel 3.2 und 3.5).

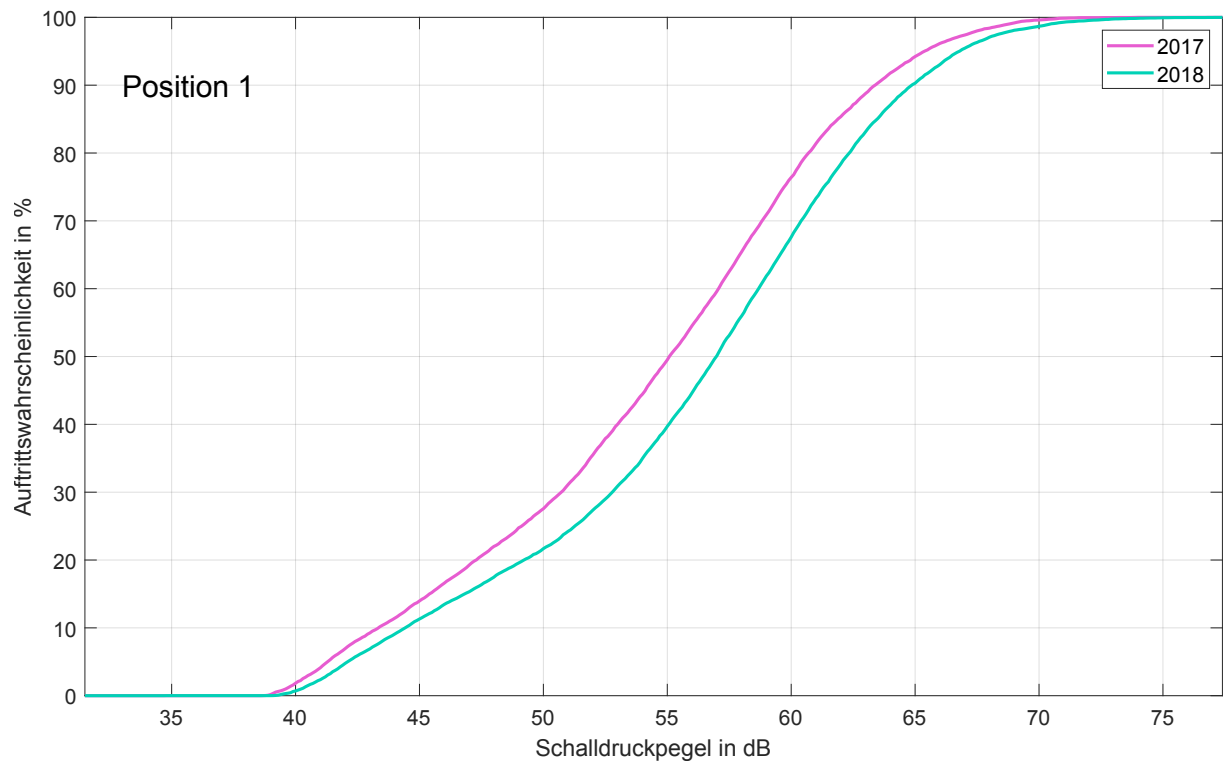


Abbildung 6.7: Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 8).

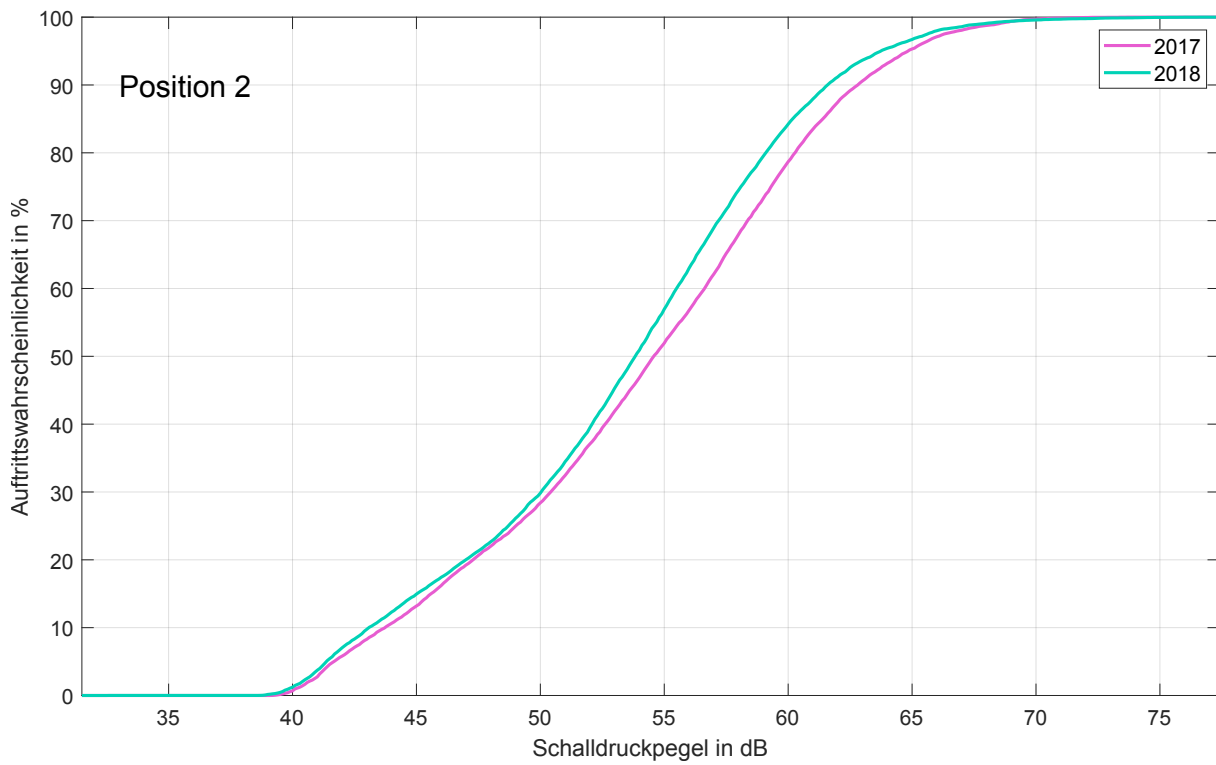


Abbildung 6.8: Kumulative Summe der Aufttrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 2).

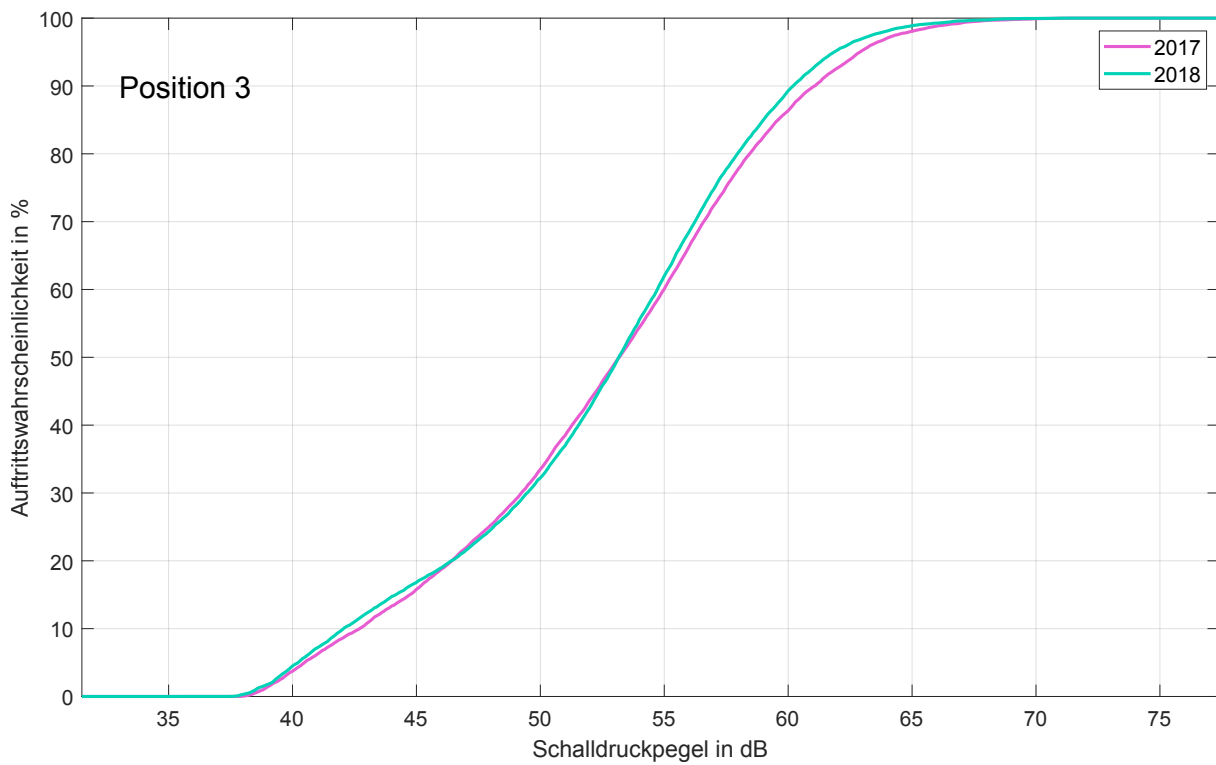


Abbildung 6.9: Kumulative Summe der Aufttrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 3).

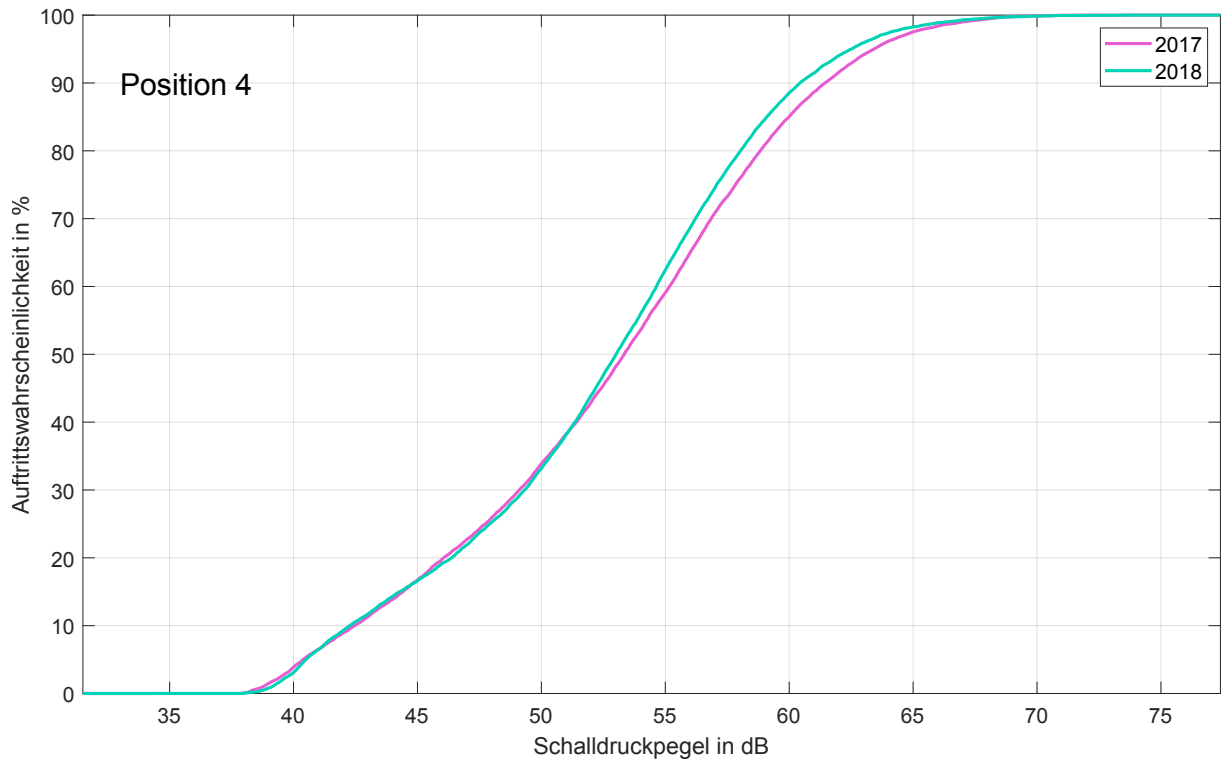


Abbildung 6.10: Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 4).

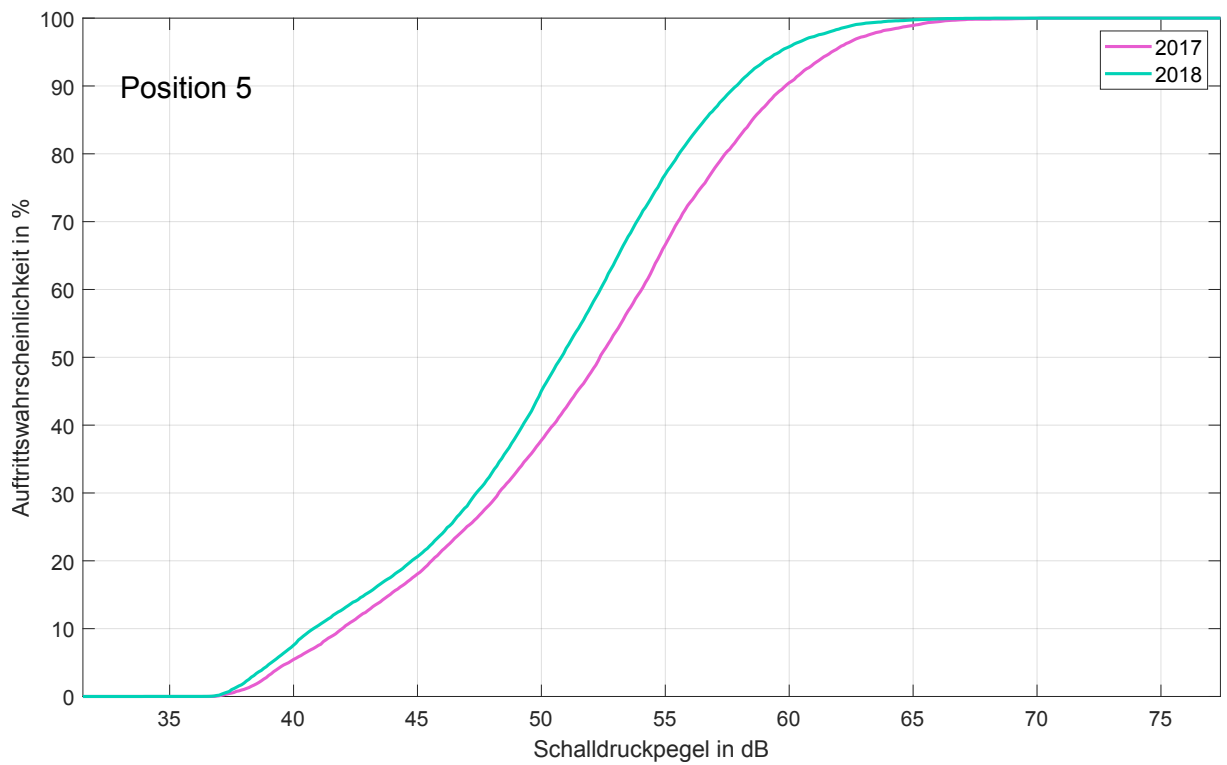


Abbildung 6.11: Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 5).

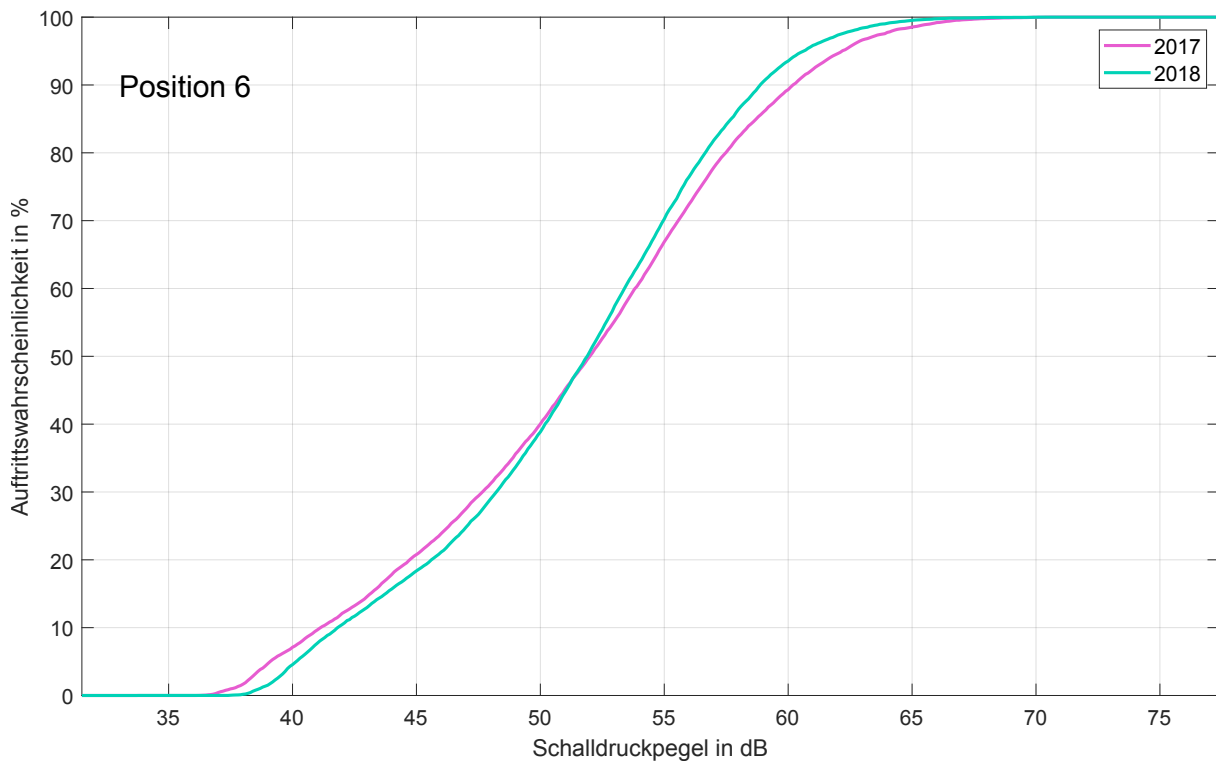


Abbildung 6.12: Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 6).

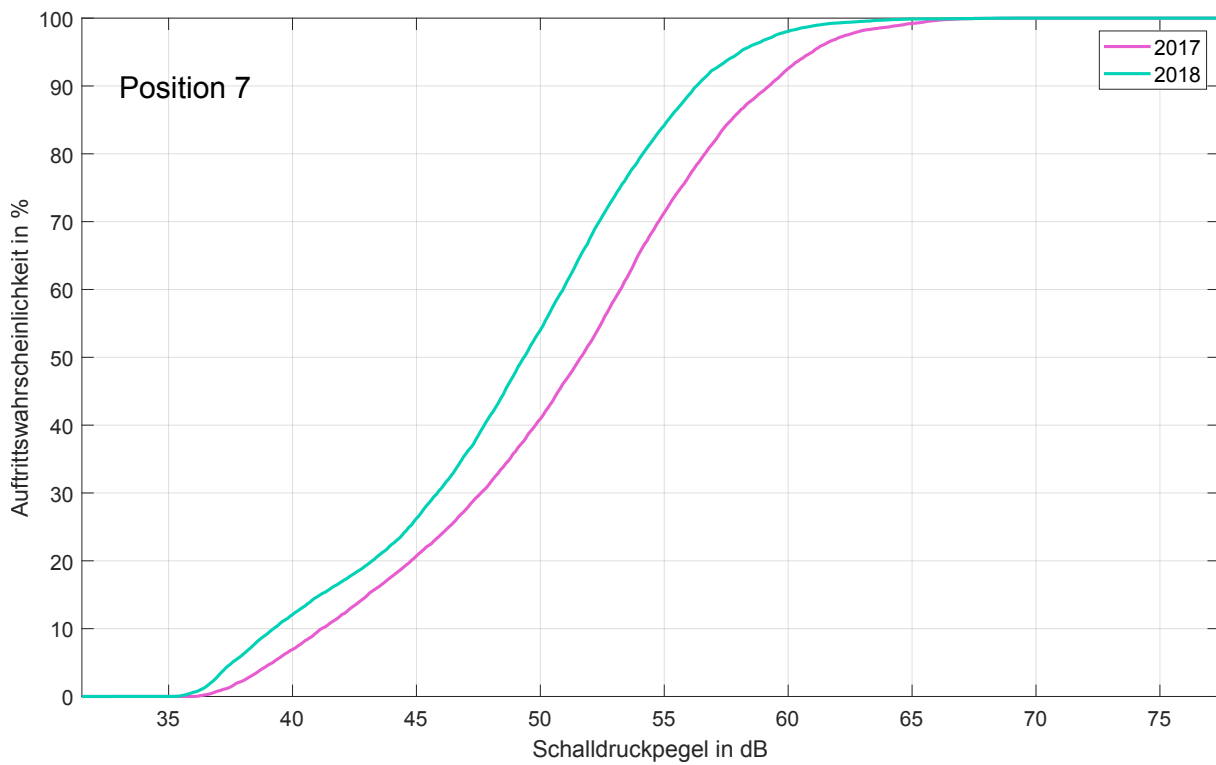


Abbildung 6.13: Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 7).

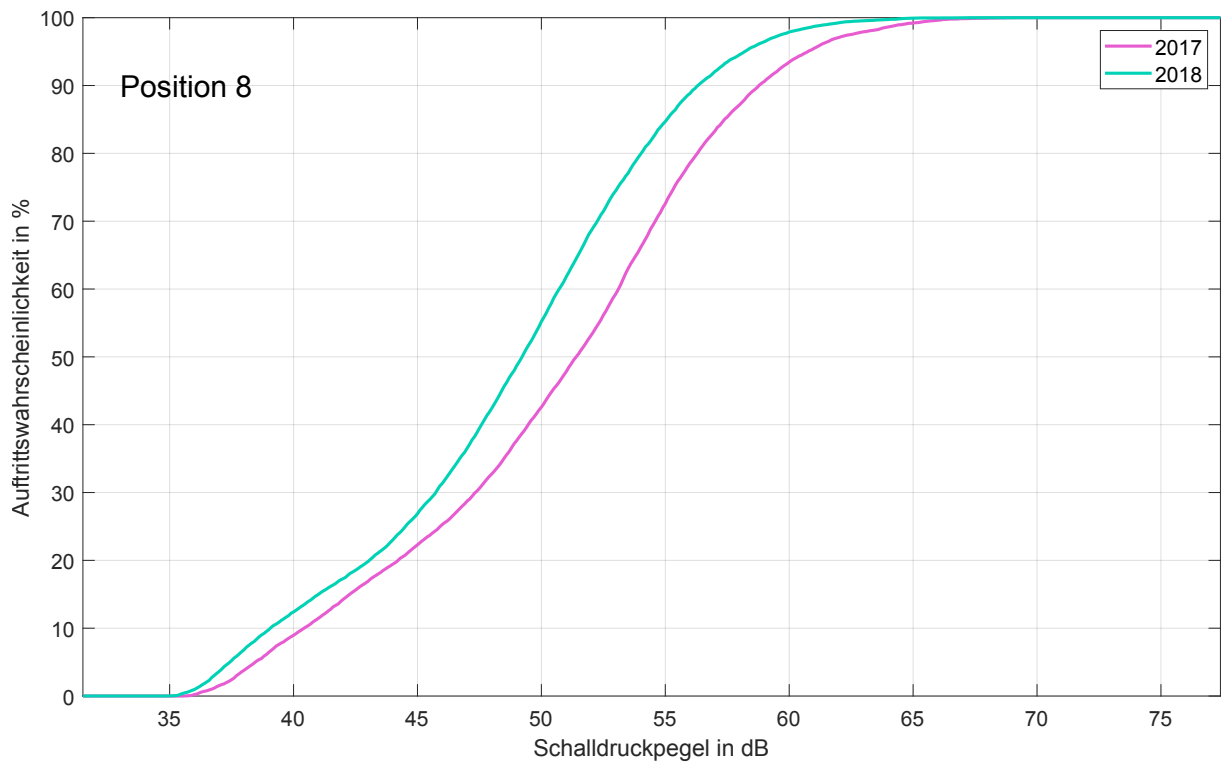


Abbildung 6.14: Kumulative Summe der Auftrettswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 8).

6.4 Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz

Die Abbildungen 6.15 bis 6.22 zeigen die Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz während der Vorlesungsaufnahme im Hörsaal i15 für alle Aufnahmepositionen (vgl. Kapitel 3.2 und 3.5).

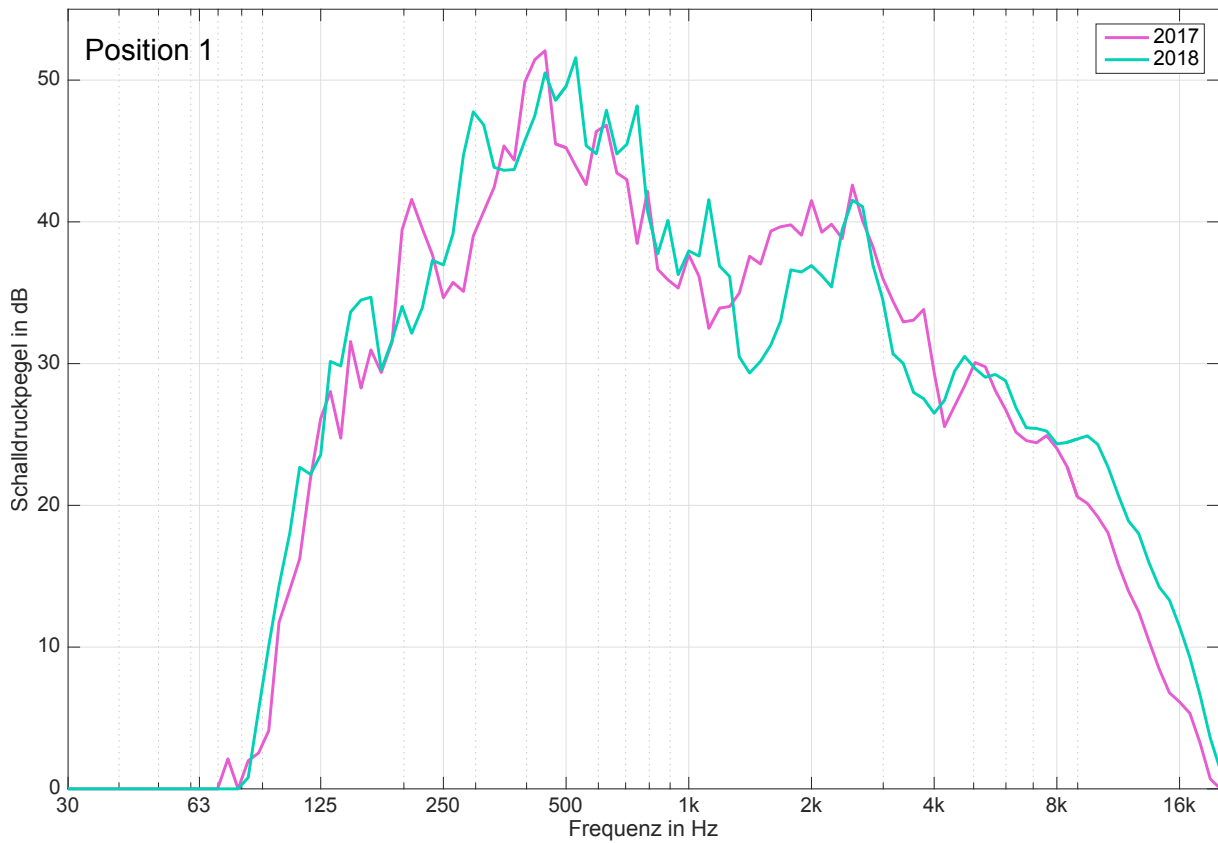


Abbildung 6.15: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 1)

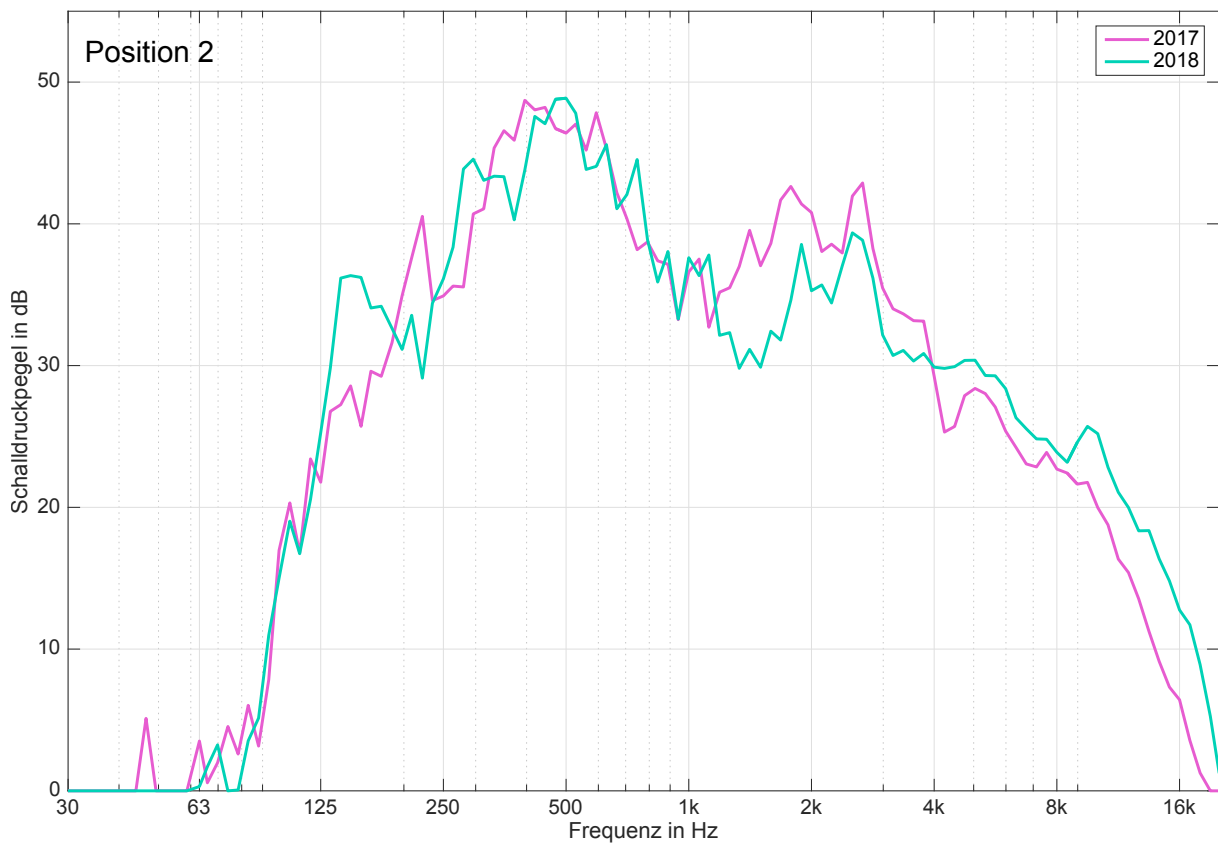


Abbildung 6.16: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 2)

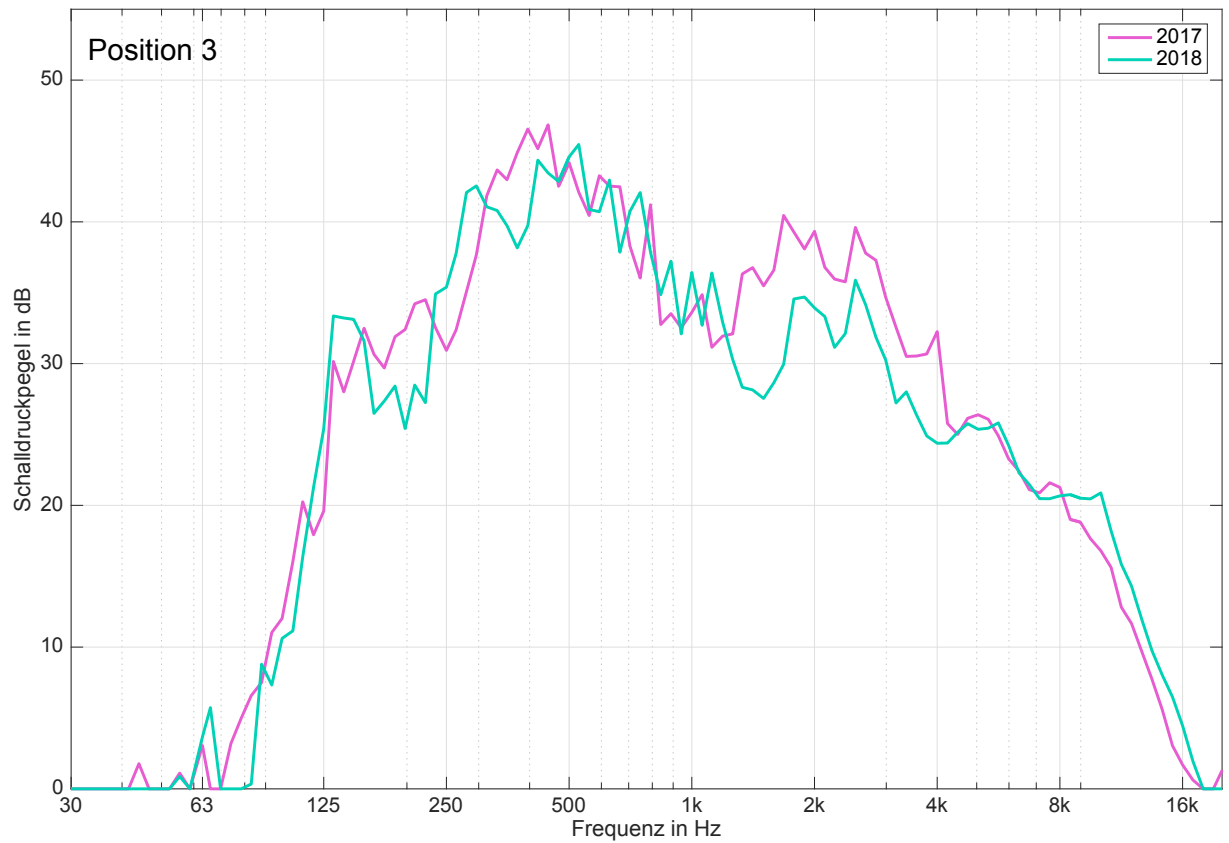


Abbildung 6.17: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 3)

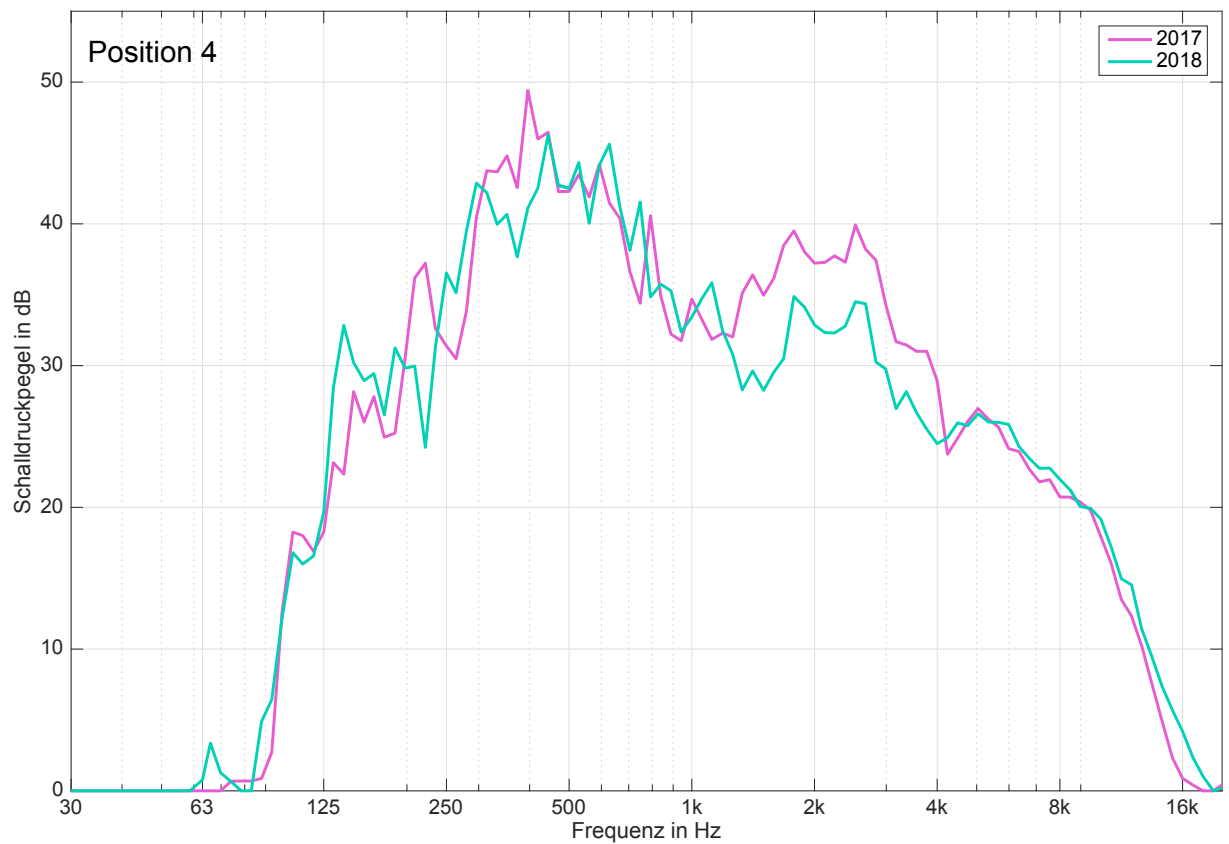


Abbildung 6.18: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 4)

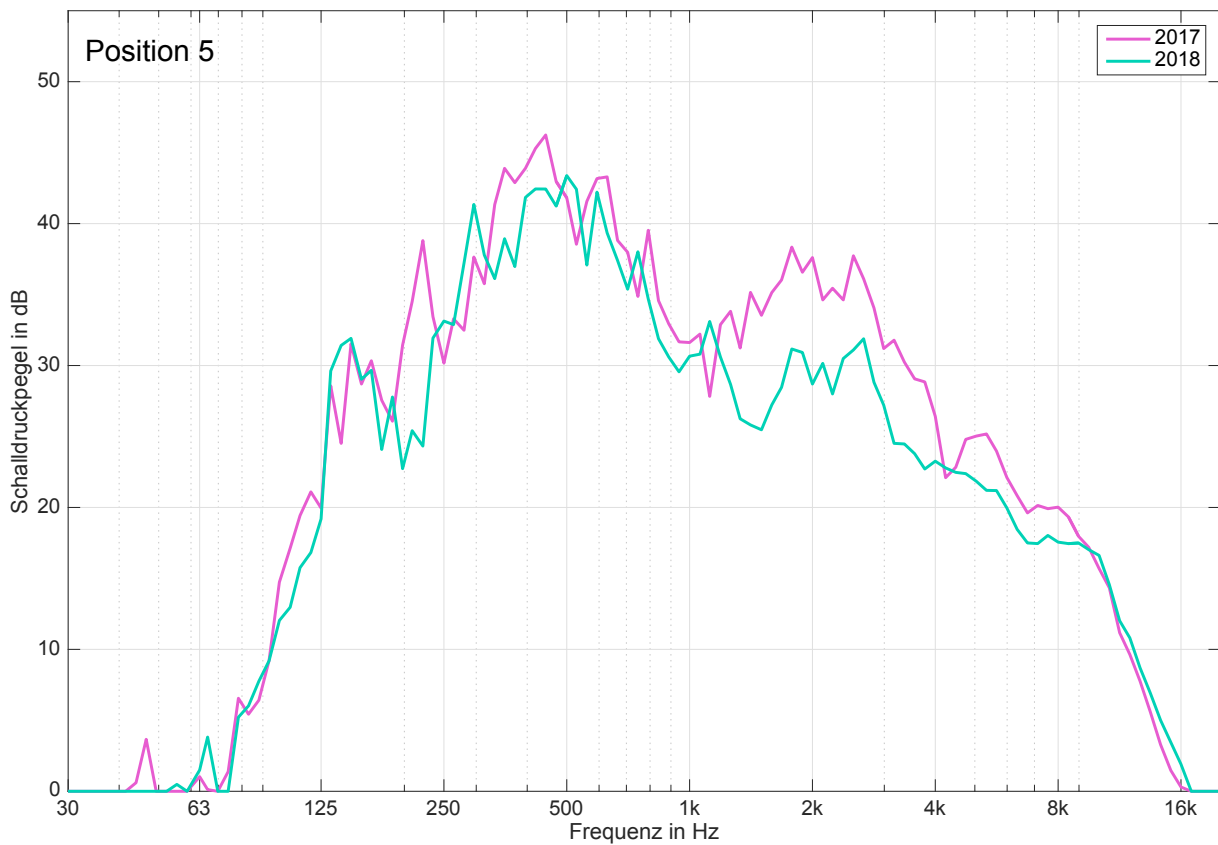


Abbildung 6.19: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 5)

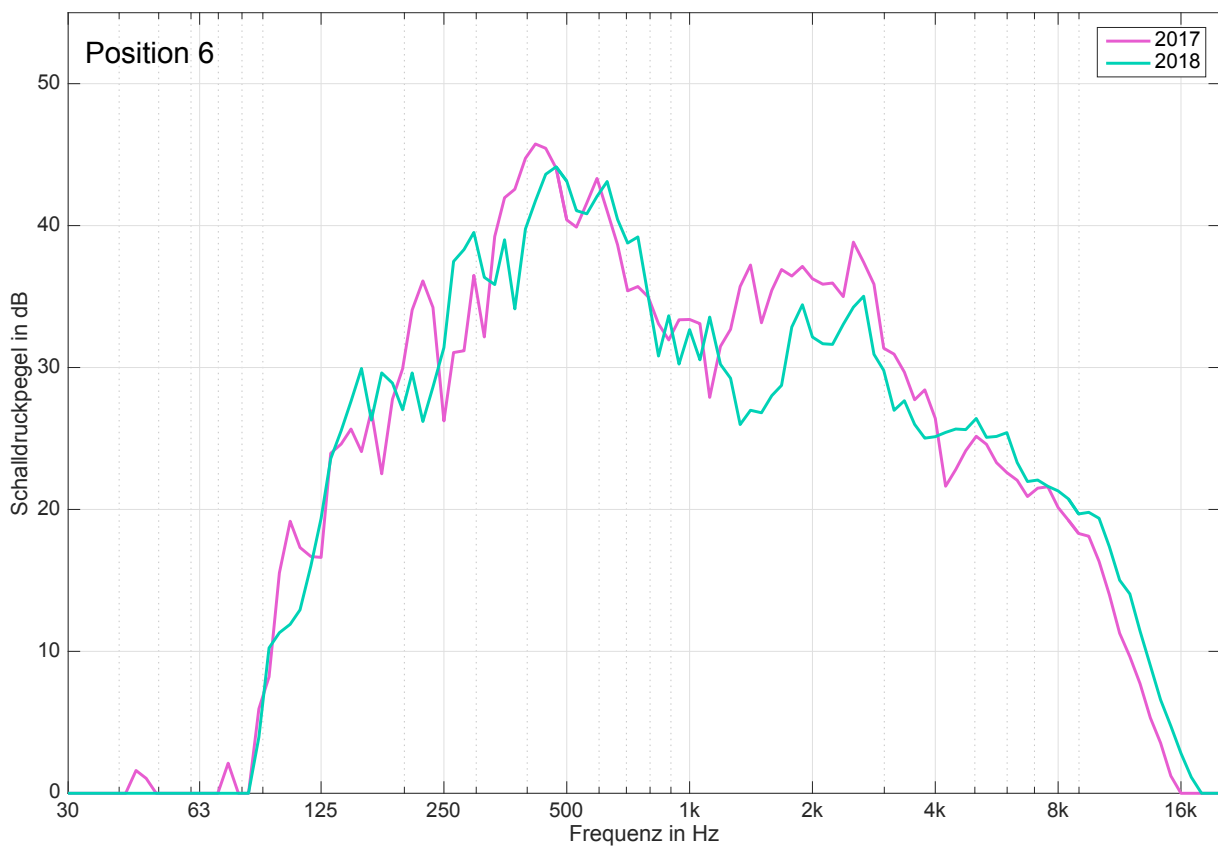


Abbildung 6.20: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 6)

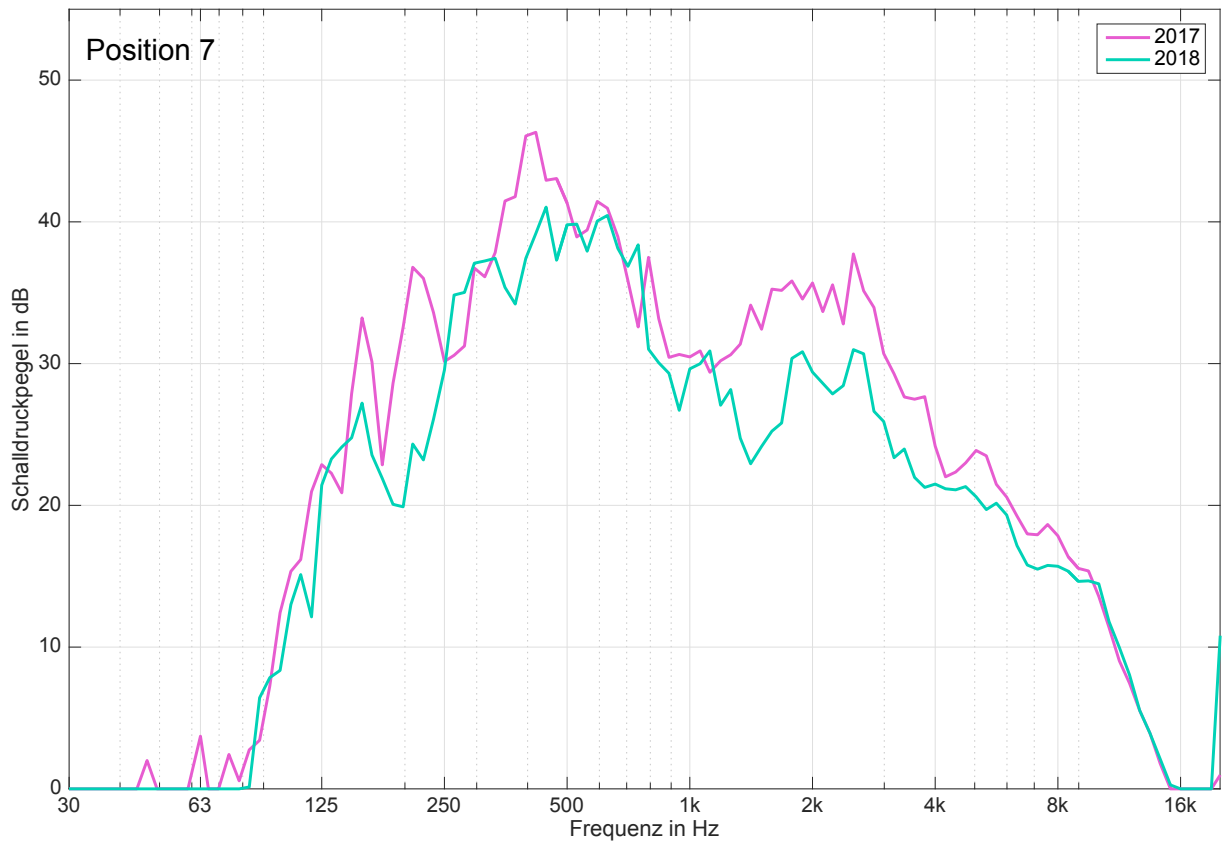


Abbildung 6.21: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 7)

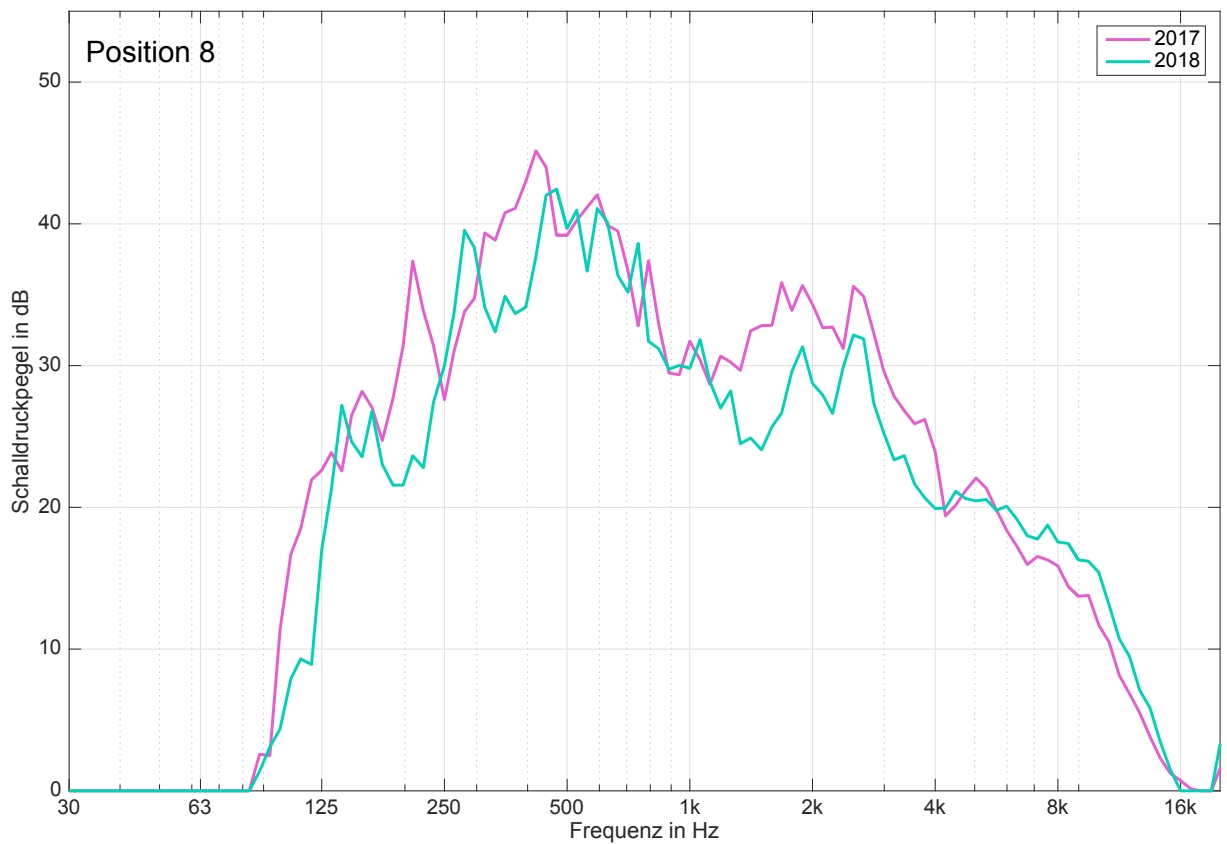


Abbildung 6.22: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 8)

6.5 Boxplots der Nachhallzeitmessungen

Die Abbildungen 6.23 bis 6.27 zeigen alle Messdaten der Nachhallzeitmessung im Hörsaal i14 in Boxplot-Grafiken (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4).

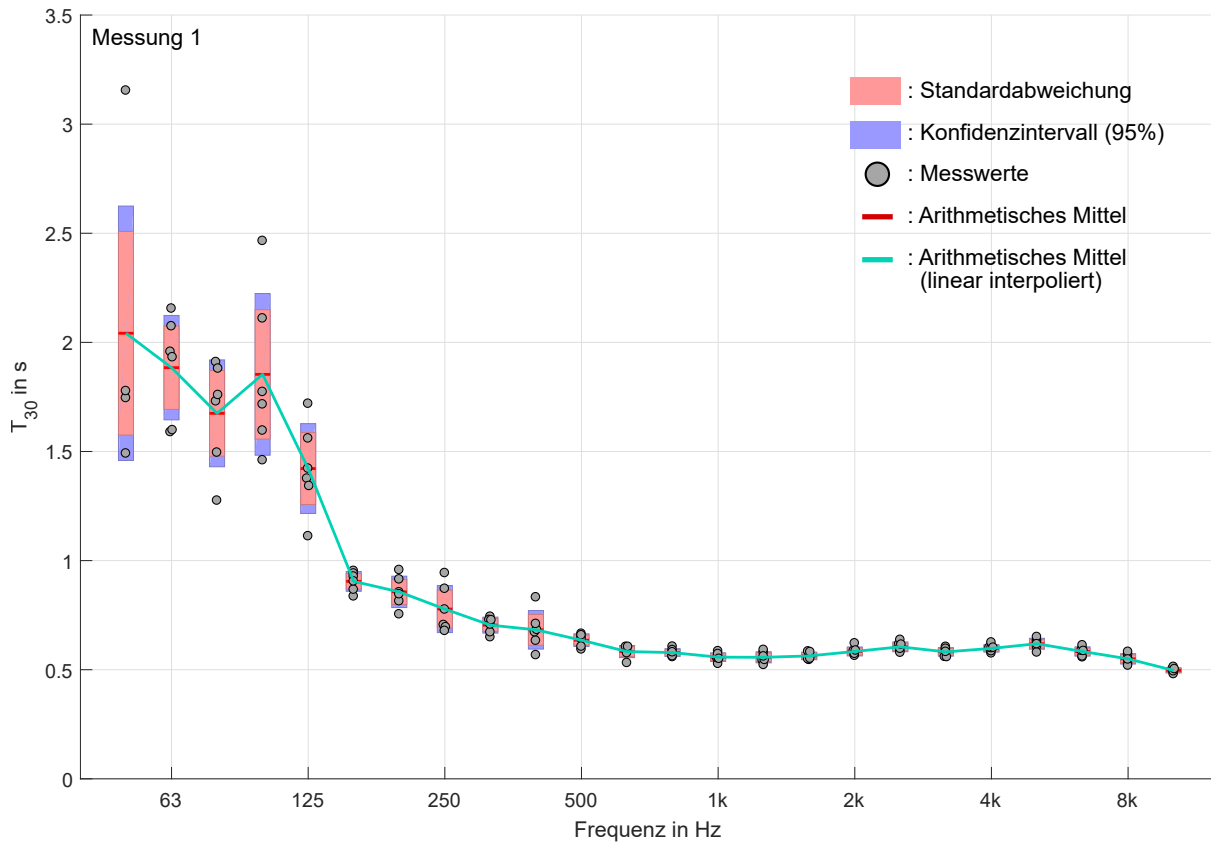


Abbildung 6.23: Boxplot der Nachhallzeitmessung 1

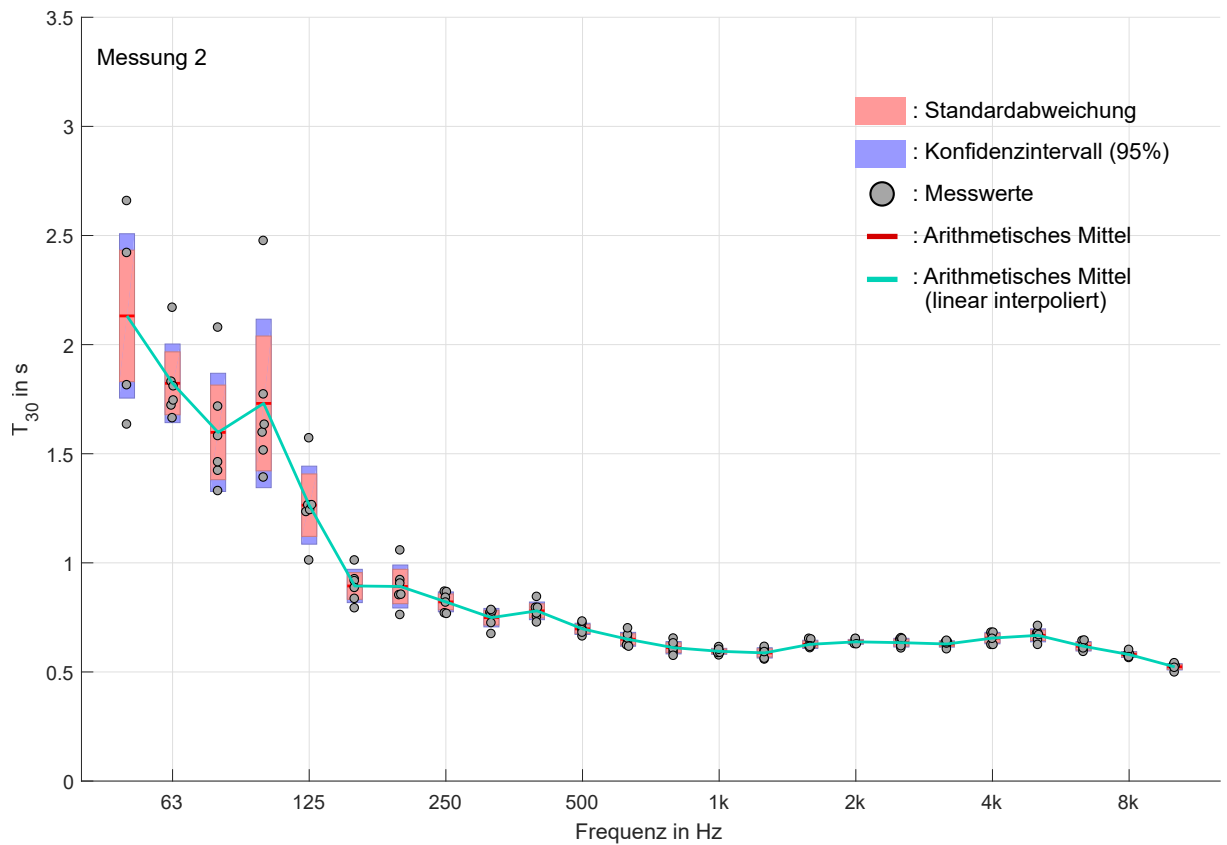


Abbildung 6.24: Boxplot der Nachhallzeitmessung 2

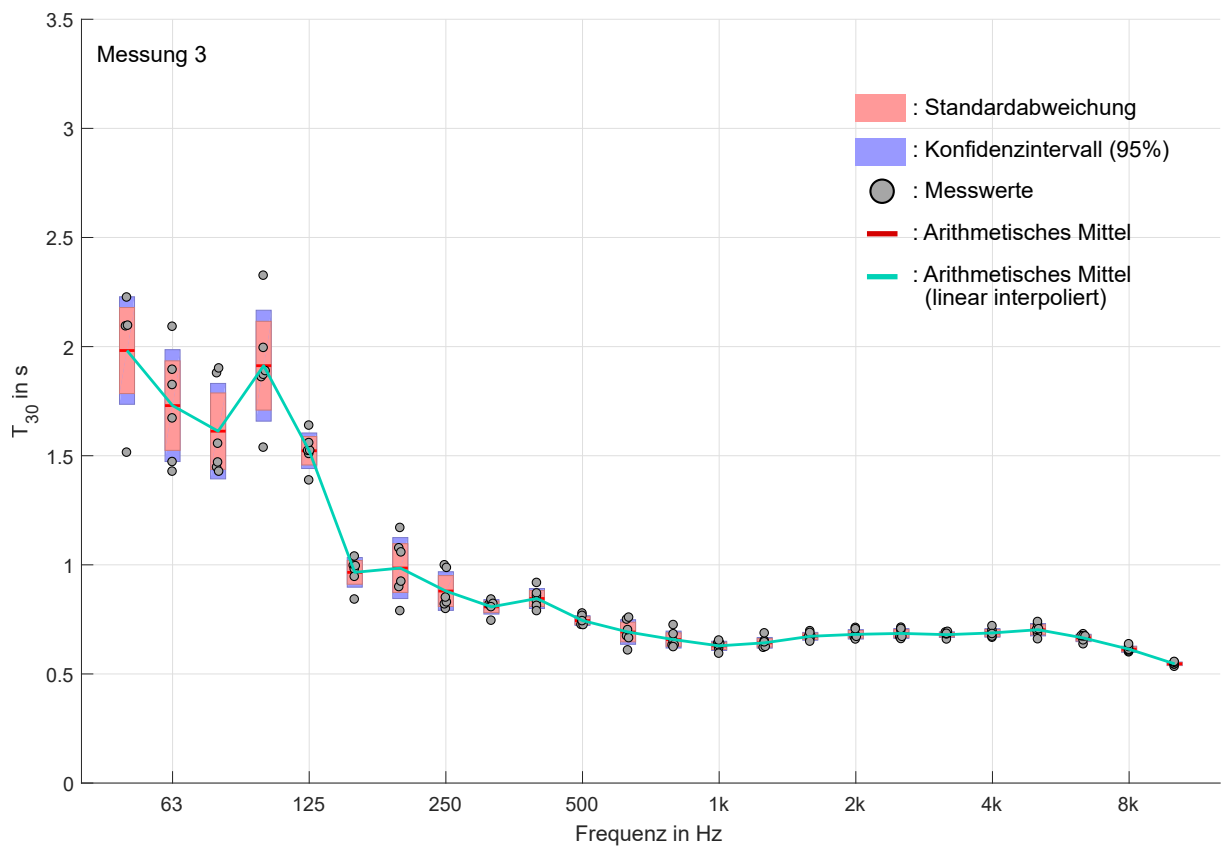


Abbildung 6.25: Boxplot der Nachhallzeitmessung 3

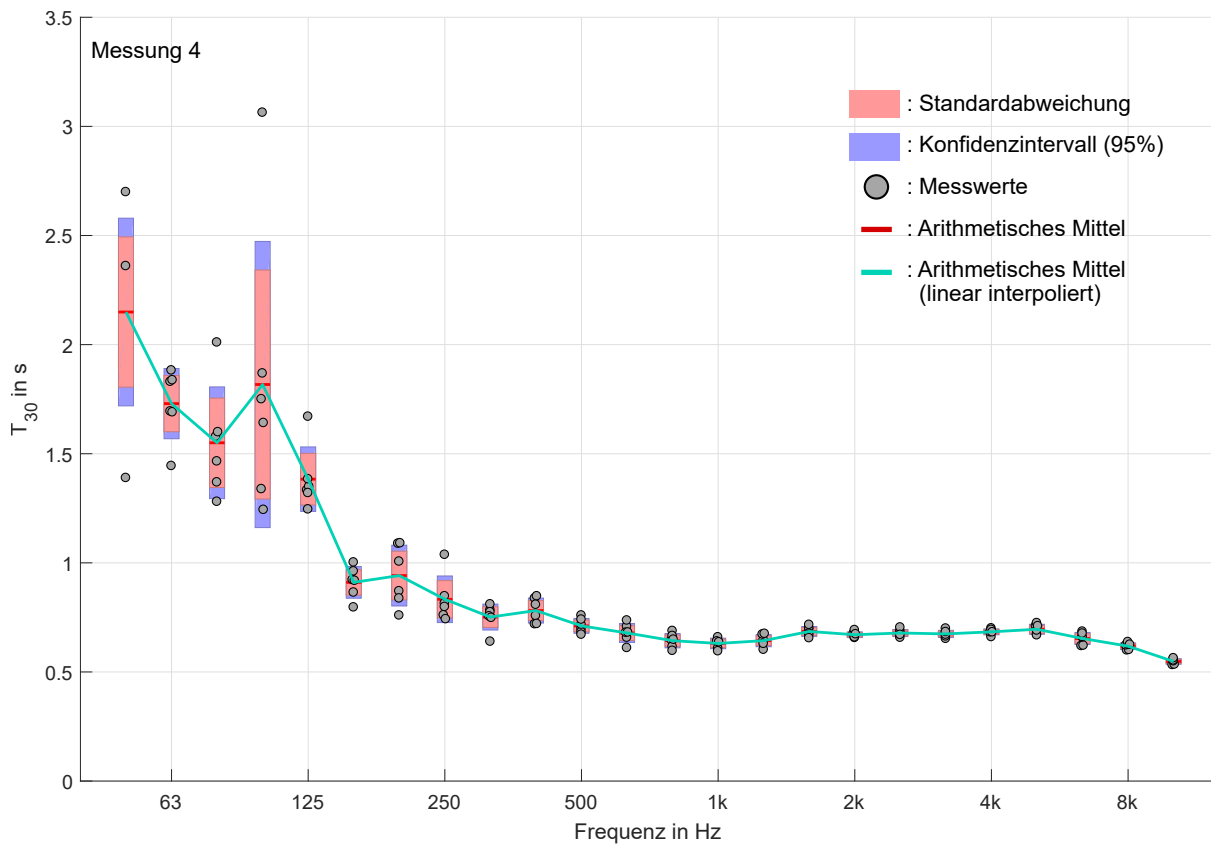


Abbildung 6.26: Boxplot der Nachhallzeitmessung 4

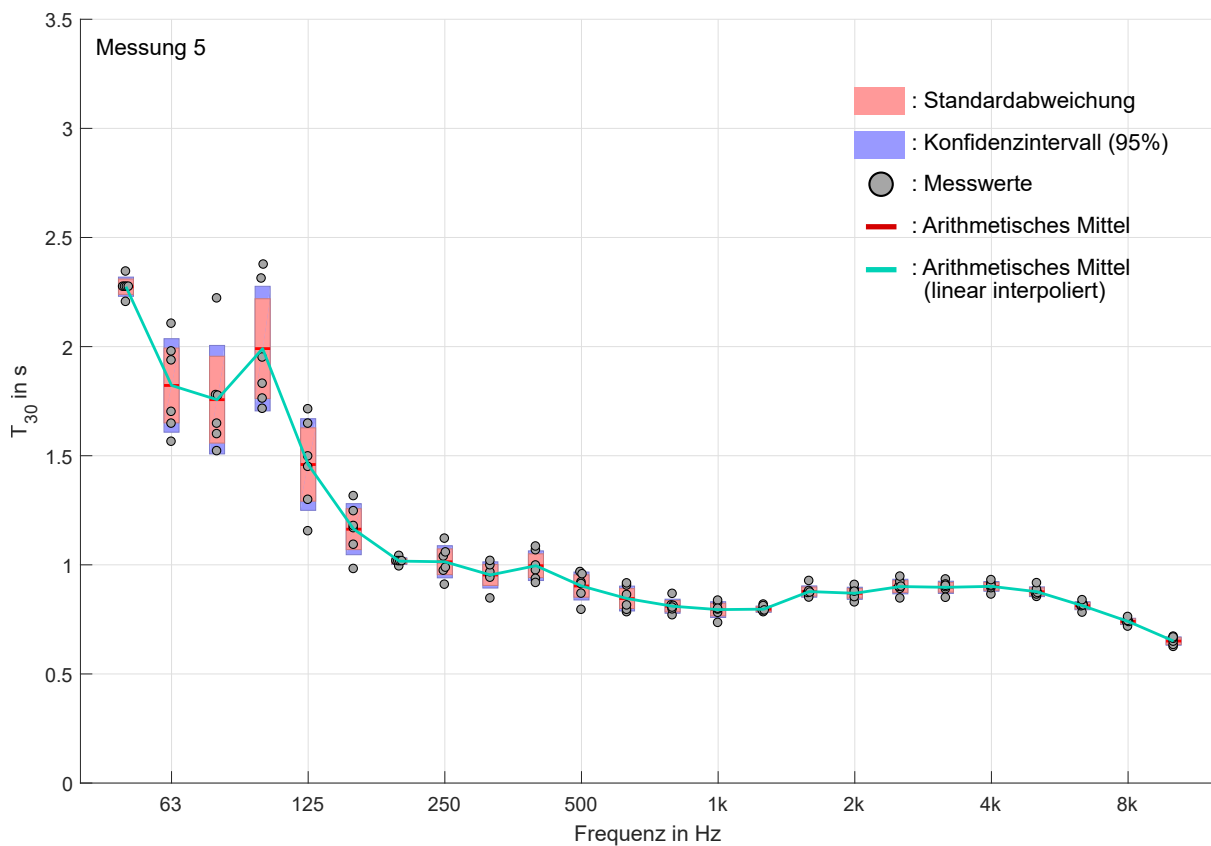


Abbildung 6.27: Boxplot der Nachhallzeitmessung 5

Geräteverzeichnis

Gerät	Hersteller	Produktname	Anzahl
Mikrofon	AKG	C480 inkl. CK26-ULS	8
Mikrofonvorverstärker/AD-Umsetzer:	RME	OctaMic II	1
USB-Interface	RME	Babyface Pro	1
PC	Lenovo	Thinkpad T500	1
Digital Audio Workstation	Cockos Incorporated	Reaper 5.8	1
Mikrofonkalibrator	Brüel und Kjær	Typ 4231	1

Tabelle 7.1: Geräteverzeichnis der Aufnahme im Hörsaal i15

Gerät	Hersteller	Produktname	Anzahl
Messlautsprecher	Norsonic	Nor276	1
Verstärker	Norsonic	Nor280	1
Messmikrofon	NTi Audio	M2211 (S/No. 5321)	1
USB-Interface	RME	Babyface Pro	1
PC	Lenovo	Thinkpad T500	1
Messsoftware	John Mulcahy	Room EQ Wizard 5.18	1
Mikrofonkalibrator	Brüel und Kjær	Typ 4231	1
Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmesser:	testo	610	1

Tabelle 7.2: Geräteverzeichnis der Nachhallzeitmessung im Hörsaal i14

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiele für installierte Kantenabsorber, vgl. [FUCHS, 2017]	11
2.2	Absorptionsgrade von Mineralwolle im Messrohr, vgl. [ZIESEMER, 2016].	12
2.3	Absorptionsgrad von Kantenabsorbern in Abhängigkeit von der Frequenz, bezogen auf $S_A = 2,59m^2$, a leer (<i>dünn durchgezogen</i>), b $d_a = 160mm$ (<i>gepunktet</i>), c $320mm$ (<i>gestrichelt</i>), d $500mm$ (<i>dick durchgezogen</i>), vgl. [FUCHS, 2017].	12
2.4	Schalldruckpegelverteilung im Raum, vgl. [ZICKMANTEL, 2008].	13
2.5	Absorptionsgrade nach Sabine von verschiedenen mit Kantenabsorbern; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].	14
2.6	Markierte Bereiche des Kantenabsorbers.	16
2.7	Varianz der Absorptionsgrade in Abhängigkeit der Koeffizienten (250 Hz).	18
2.8	Absorptionsgrade der Kantenabsorber nach Sabine; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].	18
2.9	Absorptionsgrade der Kantenabsorber mittels optimierter Formel; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].	19
2.10	Vergleich der Varianzen der Absorptionsgrade	19
2.11	Links: poröser Absorber im Schnelleinimum bei tiefer Frequenz. Rechts: Absorber im Schnellemaximum bei tiefer Frequenz (lang strichliert), bei einer Entfernung von der Wand von $\frac{\lambda}{4}$	20
2.12	Schalldruckpegelverteilung im Raum, links: die 3-1-1 Mode bei 77,5 Hz und rechts: die 4-2-2 Mode bei 138,7 Hz im Seminarraum HF01092 (Inffeldgasse 12), Abmessungen L x B x H: 10,8 x 6,24 x 3,15 m. Strichlierte Markierungen: Vermutete Schnellemaxima, beispielhaft in einer Raumkante.	21
3.1	Hörsaal Hs i15 vor der Sanierung.	23
3.2	Hörsaal Hs i15 nach der Sanierung.	24
3.3	Nachhallzeiten vor und nach Sanierung [HETZ, KORDESCH, 2017].	24
3.4	Grundriss des Hörsaal i15 nach der Sanierung.	25
3.5	Blockdiagramm des Aufbaus für die Vorlesungsaufnahme.	25
3.6	Aufnahmepositionen während der Vorlesung	26
3.7	Struktur des Ordners „RA-Vergleich“	27
3.8	Benutzeroberfläche des Vergleichstools (Betriebssystem Windows 10).	28
3.9	Beispiel für eine ausgefüllte config-Datei.	29
3.10	Benutzeroberfläche des Vergleichstools im Edit-Mode (Betriebssystem Windows 7).	30
3.11	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 8).	31
3.12	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz. (Aufnahmeposition 8)	31
4.1	Hörsaal nach der Sanierung durch die Firma GU Bautech	33
4.2	Grundriss des Hörsaal i14	34
4.3	Nachhallzeit im Hörsaal i14 nach der Sanierung durch Firma GU Bautech	34
4.4	Zeichnung und Montageschema zur Aufdopplung der Paneele mit L-Stück (A: An der Wand montiertes Paneel, B: Aufgehängtes Paneel).	35
4.5	Blockdiagramm des Messaufbaus	36
4.6	Quell- und Messpositionen der Nachhallzeitmessung	37
4.7	Absorberpositionierungen der Messungen 1-4, Messung 5 wurde ohne Paneele im Raum durchgeführt.	38
4.8	Absorberpositionierung 4 mit doppelten Absorbern	38
4.9	Absorberpositionierung 5, keine Absorberpaneele im Raum	39

4.10	Vergleich der Nachhallzeiten bei Absorpositionen 1, 2, 4 und 5	40
4.11	Vergleich der Nachhallzeit mit und ohne aufgedoppelten Absorberpaneelen	41
4.12	Boxplot der Nachhallzeitmessung 4	41
4.13	Vergleich der Bassverhältnisse in Abhängigkeit der Entfernung zur Tafel für Absorberpositionen 1, 2, 4 und 5	42
6.1	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 125 Hz	47
6.2	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 250 Hz	48
6.3	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 500 Hz	48
6.4	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 1 kHz Hz	49
6.5	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 2 kHz Hz	49
6.6	Varianz in Abhängigkeit der Koeffizienten bei 4 kHz Hz	50
6.7	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 8).	51
6.8	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 2).	52
6.9	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 3).	52
6.10	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 4).	53
6.11	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 5).	53
6.12	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 6).	54
6.13	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 7).	54
6.14	Kumulative Summe der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schalldruckpegeln vor und nach der Sanierung (Aufnahmeposition 8).	55
6.15	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 1)	56
6.16	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 2)	56
6.17	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 3)	57
6.18	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 4)	57
6.19	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 5)	58
6.20	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 6)	58
6.21	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 7)	59
6.22	Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz (Position 8)	59
6.23	Boxplot der Nachhallzeitmessung 1	60
6.24	Boxplot der Nachhallzeitmessung 2	61
6.25	Boxplot der Nachhallzeitmessung 3	61
6.26	Boxplot der Nachhallzeitmessung 4	62
6.27	Boxplot der Nachhallzeitmessung 5	62

Tabellenverzeichnis

2.1	Berechnete Koeffizienten	17
4.1	Kenndaten der Nachhallzeitmessung	36
6.1	Kenndaten der mit Kantenabsorbieren sanierten Räume; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].	46
6.2	Nachhallzeiten der Räume vor (grün) und nach (magenta) der Sanierung; *vgl. [FUCHS, 2017], ** vgl. [HETZ, KORDESCH, 2017], ***vgl. [STEFFEK, 2018].	47
7.1	Geräteverzeichnis der Aufnahme im Hörsaal i15	63
7.2	Geräteverzeichnis der Nachhallzeitmessung im Hörsaal i14	63

Literaturverzeichnis

- [ÖNORM B 8115-3] „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 3: Raumakustik“, 01.11.2005.
- [HETZ, KORDESCH, 2017] „Planung und Evaluierung von Kantenabsorbern“, September 2017.
- [LUDWIG, 2015] „Analyse der akustischen Kommunikation in Klassenräumen im realen Unterrichtsbetrieb“, Juni 2015.
- [LUDWIG, 2014] „Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb“, September 2014.
- [ÖNORM S 5004] „Messung von Schallimmissionen. Österreichisches Normungsinstitut“, 1985.
- [STEFFEK, 2018] „Raumakustische Planung eines Abhörzimmers und eines Produktionsstudios“, 2018.
- [FUCHS, 2017] „Raum-Akustik und Lärm-Minderung“, 2017.
- [ZIESEMER, 2016] „Entwurf und Bau einer variablen Akustik“, 2016.
- [ZICKMANTEL, 2008] „Vorteile modularer Akustiksysteme im Zusammenspiel mit modernen Bautrends, Abstract 0708“, 2008.
- [BALINT, 2017] „Gedanken zu Absorptionsgraden sowie Kantenabsorbern“, 2017.
- [ADELMAN-LARSEN, 2014] „Rock and Pop Venues: Acoustic and Architectural Design“, 2017.