
MASTERARBEIT

MESSUNG UND BERECHNUNG VON KANTENABSORBERN

Entwicklung einer Berechnungsmethode für Kantenabsorber
mittels Optimierungsverfahren

durchgeführt am
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
Technische Universität Graz

von
Christoph Santer, BSc
Matrikelnummer 01131350

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

Graz, März 2021

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.

Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

(Unterschrift)

Danksagung

Mein Dank gilt allen, die an der Entstehung dieser Arbeit beteiligt waren. Vielen Dank an meinen Kollegen Daniel Reisinger für die tolle Zusammenarbeit und die entspannte Arbeitssituation an den vielen Messtagen. Ebenso möchte ich Vincent Ederle für die Zusammenarbeit danken. Meinem Betreuer Gerhard Graber möchte ich ganz besonders für die Betreuung und Ermöglichung dieser Arbeit danken.

Der Firma *Knauf* möchte ich herzlich für die Bereitstellung der Mineralwolle danken. Danke auch an das Team am Institut für Bauphysik, das uns während den Messungen im Hallraum tatkräftig unterstützt hat.

Bei Herrn Franz Pernkopf und Herrn Christian Knoll möchte ich mich für die Hilfeleistung bei Fragen zur Optimierung bedanken. Herrn Bengt-Inge Dalenbäck gebührt Dank für den regen Austausch zur Simulation.

Mein größter Dank gebührt aber meinen Eltern, die mich Zeit meines Studiums immer unterstützt und gefördert haben.

Abstract

This thesis examines the functionality of the **edge absorber**. This type of absorber is mounted in edges and damps mainly low frequencies, which has been empirically proved in the past and is impressively shown one more time with the acoustic renovation of a lecture hall. Therefore the edge absorber is commonly known as a *bass trap*. Due to the fact that there is no calculation methodology to calculate the impact of the absorber in advance, it has so far been rarely used for room acoustic developments.

The aim of this work is to find a method to calculate the efficiency of the absorber. Therefore, modular edge absorbers were developed and measurements in various rooms were conducted. The analysis of the measurement data shows that the mode-structure of the room has a significant impact on the low-frequency absorption. A noteworthy interaction between the modes of a room and the absorption of the absorber occurred, so that the effect of the edge absorber could be described as a mode-break.

Based on the collected measurement data, an existing estimation tool (*Edge Absorber Calculation Tool, EACT1*) will be improved by applying optimization algorithms (*OPT1*). Structuring on that, a new optimization-tool (*OPT2*) is developed, which is designed for the optimization process and to reduce the error of the estimation. A new calculation-programm (*EACT2*), which uses the results of the optimization tool *OPT2*, opens up the possibility for an improved estimation of the absorber's efficiency. Finally, the accuracy and the usability of the new calculation tool (*EACT2*) is reviewed by measured results and an acoustic simulation of a acoustically renovated lecture hall using the edge absorber.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das akustische Verhalten des **Kantenabsorbers** untersucht. Dieser einfach zu realisierende Absorber wird in Raumkanten montiert und weist eine gute Absorptionswirkung bei tiefen Frequenzen auf, die empirisch schon umfangreich belegt wurde und anhand der akustischen Sanierung eines Hörsaals ein weiteres mal eindrucksvoll belegt werden konnte. Er ist daher auch weitläufig als *Bassfalle* bekannt. Aufgrund eines fehlenden einfachen Berechnungsmodells für Kantenabsorber kommen diese in der raumakustischen Planung allerdings relativ selten zum Einsatz.

Ziel der Arbeit ist es, ein Berechnungsmodell zu schaffen, mit dem die Wirkung des Kantenabsorbers berechnet werden kann. Dazu wird ein modularer Kantenabsorber entwickelt, mit dem eine umfangreiche Messkampagne in einem Hallraum und mehreren Seminarräumen durchgeführt wird. Die Analyse der Messdaten ergibt, dass die Modenstruktur des Raumes einen wesentlichen Einfluss auf die tieffrequente Absorptionswirkung des Kantenabsorbers hat. Es tritt eine starke Wechselwirkung von Raummoden und Absorptionsverhalten auf, sodass die Wirkung des Kantenabsorbers als eine Art Modenbremse beschrieben werden kann.

Anhand der gesammelten Messdaten wird ein bereits bestehendes Abschätzungstool (*Edge Absorber Calculation Tool, EACT1*) mittels Optimierungsalgorithmen (*OPT1*) deutlich verbessert. Aufbauend darauf wird eine neue Optimierungsumgebung (*OPT2*) entwickelt, um den Fehler der Abschätzung weiter zu verringern. Die Ergebnisse von *OPT2* werden für ein neues *Edge Absorber Calculation Tool (EACT2)* genutzt, das eine deutlich verbesserte Abschätzung der Wirkung des Kantenabsorbers möglich macht. Die Genauigkeit und Verwendbarkeit der Ergebnisse des *EACT2* wird anhand der akustischen Sanierung eines Hörsaals mit Kantenabsorbern durch Vorher- und Nachhermessung sowie einer akustischen Simulation evaluiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Der Kantenabsorber und sein Absorptionsverhalten	11
1.2	Motivation und Aufgabenstellung	13
1.3	Kapitelübersicht	14
2	Akustische Sanierung des Hörsaals FSI2 mittels Kantenabsorber	15
2.1	Einbau der Kantenabsorber	15
2.2	Messung	17
2.3	Ergebnis	18
2.3.1	Vergleich der Messergebnisse	19
2.4	Zusammenfassung	22
3	Auswertung und Analyse der Messkampagne und Zusammenfassung der Erkenntnisse	23
3.1	Zu berücksichtigende Eigenschaften des Kantenabsorbers	23
3.1.1	Dimensionierung der Kantenabsorber	23
3.1.2	Verwendete Materialien und Aufbau des Kantenabsorbers	24
3.1.3	Anbringung der Kantenabsorber an verschiedenen Raumkanten	25
3.2	Gemessener Parameter: Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber	26
3.3	Nachhallzeitmessung bei tiefen Frequenzen	27
3.4	Akustische Eigenschaften der Räume und verwendete Setups für die Optimierung	28
3.4.1	Hallraum	28
3.4.2	BRG Kepler	30
3.4.3	Hörsaal FSI1	31
3.4.4	Hörsaal FSI2	33
3.4.5	Hörsaal i14	34
3.5	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse	37
4	Optimierung des „edge absorber calculation tool“ - OPT1	39
4.1	Funktionsweise des EACT1	39
4.2	Grundlagen der verwendeten Optimierung	42
4.3	Optimierung des EACT1 - OPT1	43
4.4	Ergebnis der Optimierung des EACT1	46
4.4.1	Optimierung des EACT1 mit Beschränkung der Konstanten	47
4.4.2	Optimierung des EACT1 ohne Beschränkung der Konstanten	50
4.4.3	Erkenntnisse aus OPT1	52
5	Optimierung mit neuen Features - OPT2	53
5.1	Aufbau der Optimierung	53
5.2	Konstruieren der Features	54
5.2.1	Feature 1 bis 3: Anzahl der Moden	54
5.2.2	Feature 4 und 5: Abstand der Moden	54
5.2.3	Kombinationen der Features	56
5.3	Verwendete Algorithmen	56
5.3.1	lsqlin	56
5.3.2	lsqnonneg	57
5.4	Probleme	57
5.5	Ergebnisse der OPT2	57
5.5.1	Beschränkung der Auswertung auf die maßgeblichen Frequenzbereiche	59

5.5.2	Optimierung ohne Hallraum	60
5.6	Zusammenfassung	62
6	Gegenüberstellung der Ergebnisse	63
6.1	Hallraum	63
6.2	Klassenraum BRG Kepler	65
6.3	Hörsaal FSI1	66
6.4	Hörsaal FSI2	67
6.5	Hörsaal i14	68
6.6	Zusammenfassung	69
7	Neues Tool zur Berechnung der Kantenabsorber und Simulation	71
7.1	Neues Tool zur Abschätzung - <i>EACT2</i>	71
7.2	Simulation mit CATT-Acoustic	73
7.2.1	Aufgaben- und Problemstellungen	73
7.2.2	Planung	75
7.2.3	Ergebnisse	77
7.3	Simulation mit den berechneten <i>EACT2</i> -Werten für den FSI2	79
7.4	Zusammenfassung	82
8	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	83
8.1	Zusammenfassung und Fazit	83
8.2	Ausblick	84
A	Anhang Messung FSI2	91
B	Anhang Simulation	93

1

Einleitung

In dieser Masterarbeit, welche als Teamarbeit mit Herrn Daniel Reisinger entstand, ist das erklärte Ziel die Eigenschaften des Kantenabsorbers besser zu erforschen und zu verstehen. Daniel Reisinger hat in seiner Masterarbeit dazu bereits wichtige Erkenntnisse geliefert. Diese Arbeit gilt als Basis für die weiteren, folgenden Analysen des Kantenabsorbers. [Rei19]

Es gibt eine Vielzahl von Beispielen, wo der Kantenabsorber ausgezeichnet funktioniert und dadurch die Raumakustik erheblich verbessert werden konnte. Professor *H. V. Fuchs* hat vor allem in für Bildung und Lehre genutzten Räumen zahlreiche raumakustische Optimierungen mit Kantenabsorbern durchgeführt und gezeigt, dass diese eindrucksvolle Verbesserungen erreichen können.¹

Um die notwendigen Messdaten für diese Arbeit generieren zu können, wurden Kantenabsorber produziert. Die genaue Dokumentation über die Planung und Erzeugung dieser mobilen Absorber findet sich in [Rei19]. Eine kurze Zusammenfassung folgt im folgenden Kapitel. Im Frühjahr 2019 wurden mit den Kantenabsorbern in verschiedenen Räumen Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse Grundlage für diese Arbeit sind.

1.1 Der Kantenabsorber und sein Absorptionsverhalten

Der Kantenabsorber ist ein modernes und innovatives Mittel zur raumakustischen Sanierung von akustisch problematischen Räumen und vor allem im tieffrequenten Bereich sehr gut wirksam. In Räumen, die für Sprache und Unterricht genutzt werden, wird er gerne verwendet, um besonders die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich stark zu reduzieren. In vielen Räumen steigt die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen stark an und verschlechtert damit die Sprachverständlichkeit. [Ree07, Fuc18]

Dabei stellt der Kantenabsorber eine kostengünstige, platzsparende und mitunter unauffällige Lösung für akustische Probleme dar. Durch den Einbau in Trockenbauweise kann er schnell und einfach in bestehenden Räume nachgerüstet werden. Zumeist besteht das System aus zwei Platten, wobei eine der beiden perforiert ist. Diese werden rechtwinklig in Raumkanten und -ecken montiert. Der dadurch entstehende Hohlraum wird mit absorbierendem Material ausgefüllt. Viele Fallbeispiele und auch die Auswertung der Messergebnisse für diese Arbeit haben gezeigt, dass der Kantenabsorber im tieffrequenten Bereich seine maximalen Absorptionswerte erreicht, ehe seine Wirkung zu sehr tiefen Frequenzen hin abnimmt. In Abhängigkeit von der Dimension des Kantenabsorbers kann eine untere Grenzfrequenz definiert werden (siehe Kapitel 3.1.1), ab welcher die Absorptionswirkung abnimmt. Oberhalb der Schröderfrequenz eines Raumes wirkt der Kantenabsorber auf Grund des diffusen Schallfeldes wie ein gewöhnlicher poröser Absorber. Durch dieses charakteristische Absorptionsverhalten, das zwischen diesen beiden Grenzfrequenzen (untere Grenzfrequenz, Schröderfrequenz) auftritt, kann der Kantenabsorber als breitbandige „Modenbremse“ bezeichnet werden. (siehe auch [Rei19], Kapitel 5.2.2) Durch Variation der

¹ Einige Arbeiten von Herrn Fuchs sind in dieser Arbeit angeführt. Viele weitere sind unter <http://www.casa-acustica.de> abrufbar.

Dimensionierung des Absorbers kann folglich die untere Grenzfrequenz und damit auch der Wirkungsbereich als „Modenbremse“ verändert werden. Die poröse Absorptionswirkung oberhalb der Schröderfrequenz bleibt dabei weitestgehend unverändert. [FLX12, FL13, Fuc13, Fuc17]

Für diese Arbeit wurde ein Kantenabsorbersystem konzipiert, welches für mobile Messungen in mehreren Räumen verwendet wurde. Durch Messungen im Impedanzrohr wurden der optimale Aufbau und die notwendige Stärke der Elemente ermittelt. Anschließend wurden Kantenabsorberelemente auf Basis der Messungen konzipiert und gebaut. Gefertigt wurde der Absorber aus 15 mm dicken, mehrschichtigen Birkensperrholzplatten. 1 und 1,5 m lange Stücke mit einer Breite von 40 cm wurden zugeschnitten, jeweils zwei Platten selber Länge rechtwinklig zusammengesetzt und eine der Platten zu 20 % perforiert (Abbildung 1.1(a)). Gefüllt wurde der Holzverbau mit gebundener Glaswolle der Firma *KNAUF Insulation*, welche eine längenspezifische Strömungsresistanz Ξ von $\geq 5 \frac{\text{kPa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$ aufweist. Zum einfacheren Transport wurden Säcke aus Baumwollstoff (*Molino*) angefertigt, die mit dem Absorptionsmaterial gefüllt wurden (Abbildung 1.1(b)).



(a) Leerer Kantenabsorber.

(b) Einbaufertiger Kantenabsorber.

Abbildung 1.1: Kurzes Modul des verwendeten Kantenabsorbers.

Insgesamt wurden 16 lange (1,5 m) und 9 kurze (1 m) Elemente gefertigt. Werden diese Elemente nun in einer Kante aufgestellt, entsteht ein Kantenabsorber mit einer Dimension von 40 x 40 cm. Durch diese modulare Bauweise konnten Messungen in verschiedenen Räumen mit unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt werden.

Bei der Berechnung der Raumakustik wird der Fokus oft auf den Frequenzbereich zwischen 500 und 2000 Hz gelegt. Dabei wird die ansteigende Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin oftmals akzeptiert bzw. als nicht störend abgetan. Obwohl die *ÖNORM B 8115-3* für den gesamten Frequenzbereich (63 bis 2000 Hz) eine maximale Abweichung von der geforderten Nachhallzeit

in Räumen für Sprache von $\pm 20\%$ vorsieht, wird diese Abweichung in der Realität im tieffrequenten Bereich oftmals überschritten. Die Nachhallzeitmessungen in den für diese Arbeit verwendeten Räumen demonstrieren diese Tatsache eindrucksvoll. In [Rei19] wird im Kapitel 2.4 genau zusammengefasst, warum die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich eine bedeutende Rolle für den akustischen Gesamteindruck hat und bei akustischen Überlegungen nicht vernachlässigt werden darf. Die Eigenschaften des menschlichen Gehörs und Maskierungseffekte sind maßgeblich, dass sich die Wahrnehmung von höheren Frequenzen verschlechtert, wenn im tieffrequenten Bereich zu viel Energie vorhanden ist.

Bei der akustischen Gestaltung von Räumlichkeiten, die zur Nutzung für Rock- und Pop-Konzerte gedacht sind, stellte sich heraus, dass ein Bassverhältnis kleiner 1 durchaus erwünscht ist. *Adelman-Larsen* untersuchte dazu unzählige Räume, welche für elektroakustisch verstärkte Konzerte genutzt werden. Er fand heraus, dass die von Künstlern und Technikern gut befundenen Räume, einen linearen Nachhallzeitverlauf und keinen Anstieg der Nachhallzeit zu den Tiefen hin aufweisen. Für klassische Konzerthäuser üblich ist ein Anstieg der Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen hin, der bei der Planung berücksichtigt wird. [ALTG10]

1.2 Motivation und Aufgabenstellung

Durch den Einbau des Kantenabsorbers in zahlreichen Räumen wurde seine akustische Wirkung bereits vielfach bewiesen. Viele empirische Daten wurden gesammelt, die Wirkungsweise aber noch nicht ausreichend erforscht. Eine Berechnungsmethode für den sinnvollen Einsatz von Kantenabsorbern konnte bis dato noch nicht entwickelt werden. Daher werden Kantenabsorber nur selten eingesetzt, da ihre Auswirkungen auf eine akustische Verbesserung von Räumen vor Baubeginn nicht nachgewiesen werden kann. In dieser Arbeit soll nun versucht werden, Möglichkeiten und Wege zu finden eine Berechnung während der Planungsphase möglich zu machen.

Zu Beginn soll dazu ein erstes Abschätzungstool, das im Zuge der Arbeit von Daniel Reisinger entstanden ist, verbessert werden [Rei19]. Aus den Daten der Messkampagne und der Auswertung von Modenbildern wurde dabei der Versuch unternommen, einen Zusammenhang zwischen der Ausgangssituation und der Wirkung des Kantenabsorbers herzustellen. Diese ersten Versuche lieferten vorerst vielversprechende Ergebnisse, die gezeigt haben, dass die Analyse der Moden äußerst wichtig ist, um auf die Wirkung des Kantenabsorbers schließen zu können.

Mittels Optimierungsalgorithmen sollen die verwendeten Parameter in dieser Arbeit weiter verfeinert und das Ergebnis verbessert werden. Außerdem soll dieses Optimierungsverfahren als Grundlage für ein neues Berechnungstool dienen, für welches bessere Eingangsparameter gefunden werden sollen, damit die Absorptionswirkung genauer vorhergesagt werden kann. Abschließend soll durch eine Simulation der Einsatz des Kantenabsorbers anhand der berechneten Absorption evaluiert werden.

Abschließend soll ein Fallbeispiel die Genauigkeit von Berechnung und Simulation überprüfen. Messdaten, die in Kapitel 2 präsentiert werden, werden dem Ergebnis, das durch das neue Berechnungstool und anschließende Simulation für den betreffenden Raum ermittelt wurde, gegenübergestellt. Wünschenswert wäre eine maximale Abweichung vom gemessenen Wert, die prozentuell innerhalb der Grenzen des von der *ÖNORM B 8115-3* [ÖN05] vorgegebenen Toleranzbereiches für Sprache und Musikproberäume liegt. In Abbildung 1.2 erkennt man, dass dieser Toleranzbereich etwa $\pm 20\%$ vom errechneten optimalen Wert der Nachhallzeit beträgt.

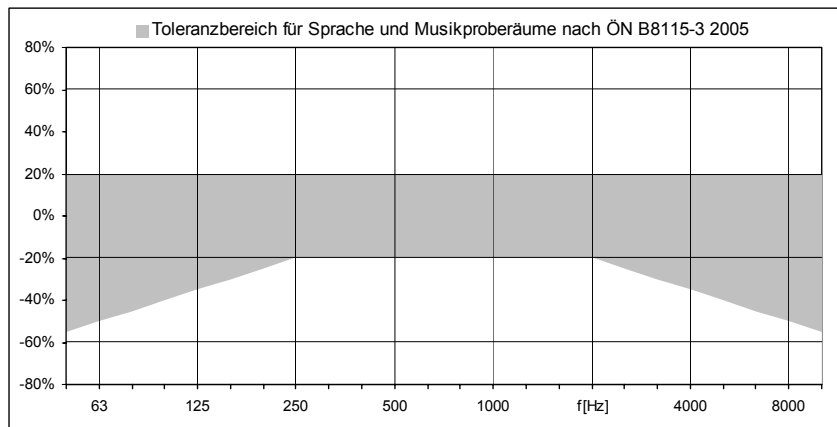


Abbildung 1.2: Toleranzbereich der Nachhallzeit für Sprache und Musikproberäume nach ÖNORM B 8115-3.

1.3 Kapitelübersicht

In Kapitel 1 wird eine kurze Einleitung in die Thematik gegeben und Umstände und Ziel dieser Arbeit beschrieben. Im 2. Kapitel findet sich die Dokumentation des Einbaus der Kantenabsorber im Hörsaal FSI2. Analysen und Auswertungen der Messungen mit dem Kantenabsorber werden in Kapitel 3 besprochen. Des weiteren werden in diesem Kapitel Eigenschaften besprochen, die bei der Dimensionierung des Kantenabsorbers wichtig sind.

Das von Daniel Reisinger entwickelte *Edge Absorber Calculation Tool (EACT1)* wird im 4. Kapitel erklärt und anschließend mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen (*OPT1*) weiterentwickelt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden für die Entwicklung eines neuen, verbesserten Optimierungstools (*OPT2*) verwendet, welches im folgenden Kapitel 5 beschrieben wird. Die Ergebnisse aller Optimierungsversuche werden im 6. Kapitel gegenübergestellt und verglichen.

In Kapitel 7 wird das neue Tool *EACT2* zur Abschätzung der Wirkung des Kantenabsorbers vorgestellt, das das beste Ergebnis aus *OPT2* nutzt. Außerdem wird in diesem Kapitel ein Weg skizziert, wie ein Kantenabsorber in einer üblichen raumakustischen Simulation integriert werden kann. Dazu werden mit dem *EACT2* Absorptionsgrade für den Hörsaal FSI2 berechnet und für die Simulation verwendet. Dieses Simulationsergebnis wird abschließend mit dem Messergebnis für den Hörsaal FSI2 aus Kapitel 2 verglichen. Die Abweichung zwischen den beiden Ergebnissen lässt Rückschlüsse über die Verwendbarkeit und die Genauigkeit der mit *EACT2* berechneten Absorptionsgrade für Kantenabsorber zu.

Abschließend wird in Kapitel 8 ein Fazit dieser Arbeit und ein Ausblick für zukünftige Aufgabenstellungen gegeben.

2

Akustische Sanierung des Hörsaals FSI2 mittels Kantenabsorber

2.1 Einbau der Kantenabsorber

Im Zuge einer Bachelorarbeit an der TU Graz wurde in den Hörsälen am Campus Inffeld eine akustische Bestandsaufnahme durchgeführt [FHS19]. Dabei wurde festgestellt, dass viele Hörsäle eine schlechte Akustik aufweisen und saniert werden sollten. Daher wurden die Kantenabsorber, die für die Messungen zu dieser Arbeit gebaut und verwendet wurden, im Anschluss an die Messkampagne zur akustischen Optimierung eines Hörsaals verwendet.

Anhand der Ergebnisse der Bachelorarbeit fiel die Wahl auf den Hörsaal FSI2, der sich im *Frank Stronach Institute* in der Inffeldgasse 11 befindet. Dieser Hörsaal weist mitunter die schlechtesten, akustischen Voraussetzungen aller Hörsäle auf (vgl. [FHS19]). Der Einsatz von Kantenabsorbern zur Sanierung scheint in diesem Raum die beste Lösung zu sein, da die Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen hin stark ansteigt, während sie im höheren Frequenzbereich teilweise innerhalb der Toleranzgrenze der Norm liegt (siehe Abbildung 2.1). Zusätzlich erwies sich die Größe des Hörsaals als optimal, da die Länge der geeigneten Kanten an der Decke des Raumes mit den verfügbaren Längen an Kantenabsorbern ausgekleidet werden konnte. In diesem Hörsaal wurden im März 2019 Messungen mit den Kantenabsorbermodulen durchgeführt, ehe der endültige, fixe Einbau im September desselben Jahres erfolgte. Es sollte daher ein Vergleich zwischen den beiden Messungen erfolgen.

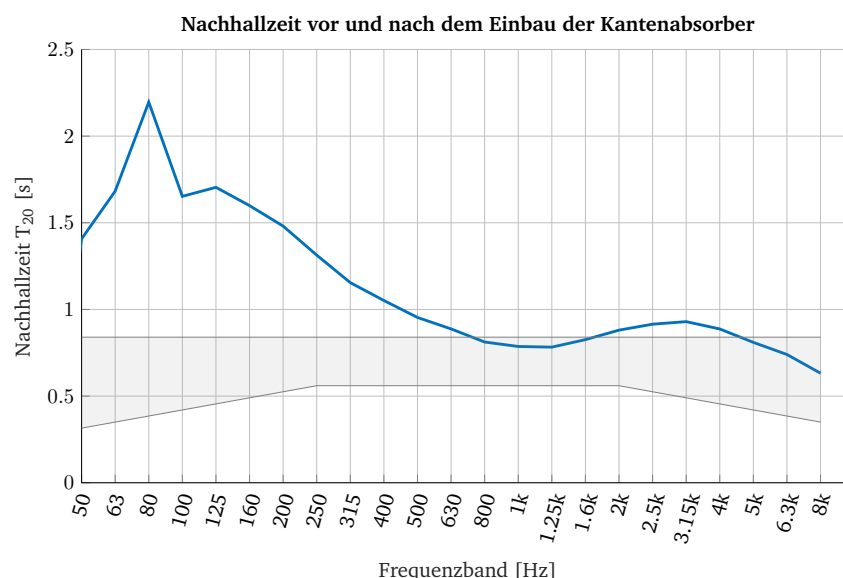


Abbildung 2.1: Nachhallzeitverlauf im FSI2. Grauer Bereich kennzeichnet den Bereich idealer Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3.

Für den fixen Einbau des Kantenabsorbers wurden die Holzelemente überarbeitet. Dabei wurden Beschädigungen entfernt, die Oberflächen abgeschliffen und anschließend weiß lackiert. Das Absorptionsmaterial blieb unverändert in den angefertigten Stoffsäcken und wurde hinter den Holzelementen an der Decke des Hörsaals montiert. Es wurde versucht, alle verfügbaren Elemente im Raum zu verbauen. Ein 60 x 60 cm großer Decken-Unterzug, der sich quer durch den Raum zieht, vergrößerte die Länge an verwendbaren Kanten zur Modendämpfung (siehe Abbildung 2.3). Dadurch konnten nahezu alle verfügbaren Kantenabsorberelemente verbaut werden (siehe Abbildung 2.2).

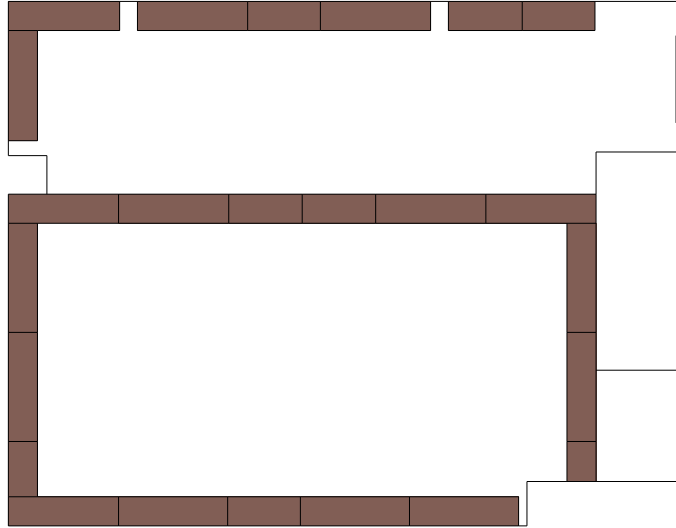


Abbildung 2.2: Skizze der Kantenabsorber, angebracht an der Decke im Hörsaal FSI2.

Insgesamt wurden 16 lange (1,5 m) und 8 kurze (1 m) Elemente Kantenabsorber zur Sanierung verwendet, wobei 2 kurze etwas gekürzt wurden. Es wurden als knapp 31 Laufmeter Kantenabsorber an der Decke verbaut. In Abbildung 2.3 sind einige Fotos der verbauten Kantenabsorber abgebildet.



(a) Einbau Kantenabsorber an hinterer Wand.



(b) Einbau Kantenabsorber im Bereich der Tafel.



(c) Panoramaaufnahme des HS FSI2. Blaue Pfeile markieren Bereiche mit Kantenabsorbern.

Abbildung 2.3: Fotos vom Einbau der Kantenabsorber im Hörsaal FSI2.

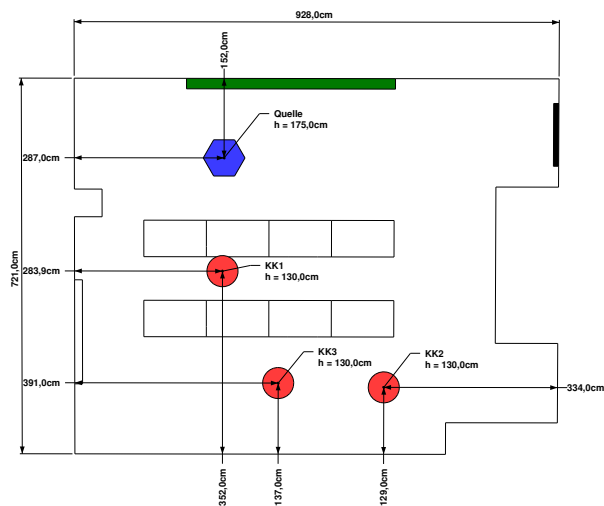
2.2 Messung

Um den Einbau und die daraus resultierende Verbesserung der Raumakustik genau dokumentieren zu können, wurden eine Vorher- und eine Nachher-Messung durchgeführt. Die Messung vor dem Einbau fand am 9. September 2019 statt. Nachdem die Kantenabsorber verbaut waren, wurde am 1. Oktober 2019 eine weitere Messung durchgeführt. Der genaue Aufbau und die Details der Messung befinden sich im Anhang A.

Darüber hinaus wurden Aufnahmen mit einem Kunstkopf erstellt, um die Verbesserung auch direkt hörbar zu machen.² Dazu wurde eine Sprache wiedergebende Signalquelle im Bereich des Sprecherpults positioniert. Die Signale wurden jeweils leise und anschließend laut wiedergegeben.

Das so erzeugte Signal wurde vom Kunstkopf an 3 Positionen im Hörsaal wieder aufgenommen, wobei der Kunstkopf in ca. 1,3 m Höhe (Höhe der Ohren in sitzender Position) aufgestellt wurde. Ein Plan dieser Aufstellung findet sich in Abbildung 2.4(a).

² Die Aufnahmen können unter dem Link <https://cloud.tugraz.at/index.php/s/KMkMfXfMNWkknC9> angehört werden. Diese entstanden in Zusammenarbeit mit Vincent Ederle vom SPSC.



(a) Aufstellungsplan.



(b) Foto der Aufnahmesituation.

Abbildung 2.4: Aufnahme mit Kunstkopf.

2.3 Ergebnis

Der in Abbildung 2.5 dargestellte Unterschied der Nachhallzeit vor bzw. nach dem Einbau der Kantenabsorber demonstriert in sehr eindrucksvoller Weise die Wirksamkeit dieses Absorbertyps.

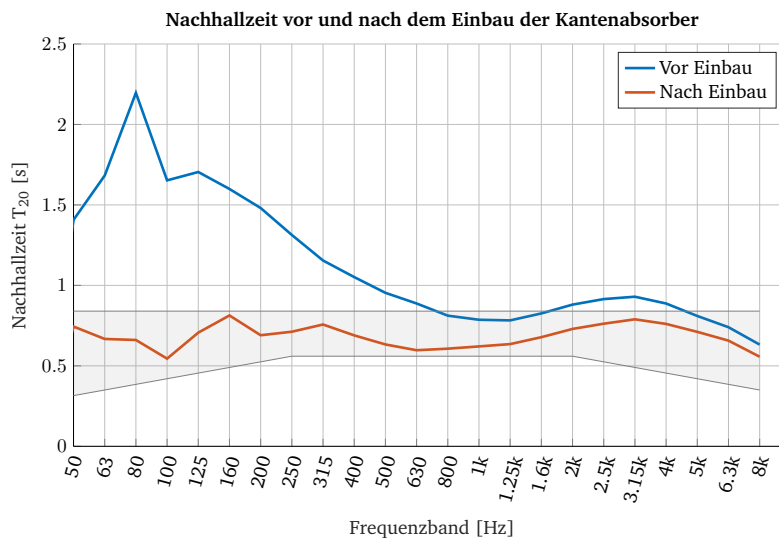


Abbildung 2.5: Nachhallzeit vor und nach dem Einbau im FS12. Grauer Bereich kennzeichnet den Bereich idealer Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3.

Während die Dämpfung der Nachhallzeit über 500 Hz eher moderat ausfällt, wirkt der Kantenabsorber darunter sehr stark. Der starke Anstieg der Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen hin, welcher vor dem Einbau für eine unangenehme Raumakustik sorgte, wird zur Gänze bedämpft. Das Resultat ist eine über den gesamten Frequenzbereich annähernd gleichbleibende Nachhallzeit, die bei 160 Hz mit 0,81 s ein Maximum bzw. bei 100 Hz mit 0,54 s ein Minimum aufweist. Diese beiden Extremwerte liegen recht eng beieinander, was die Wirksamkeit des Kantenabsorbers widerspiegelt. Moden in der 100-Hz-Terz können auf Grund der Verteilung des Absorbers besser als Moden in der 160-Hz-Terz bedämpft werden. (Im Zuge dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass Moden in der 160-Hz-Terz durch Aufstellung des Kantenabsorbers in Höhenkanten besser

bedämpft werden können. Ähnliche Raumhöhen scheinen diesen Umstand zu begründen.) Generell ist das Ergebnis aber sehr zufriedenstellend, da die Nachhallzeit im Mittel auf ca. 0,7 s verkürzt wurde. Da die Messung im unbesetzten Zustand stattfand, ist mit einer weiteren Dämpfung durch das Auditorium zu rechnen.

Die deutliche Verbesserung der Nachhallzeit spiegelt sich auch im Ergebnis für den STI-Wert wieder. Dieser gibt Aufschluss über die Sprachverständlichkeit im Raum, welche für einen Hörsaal von enormer Bedeutung ist. Der Wert konnte von 0,61 auf 0,70 gesteigert werden. In Abbildung 2.6 wird der STI frequenzabhängig dargestellt und zeigt, dass die Verbesserung vor allem in den tiefen Frequenzen stark ausfällt.

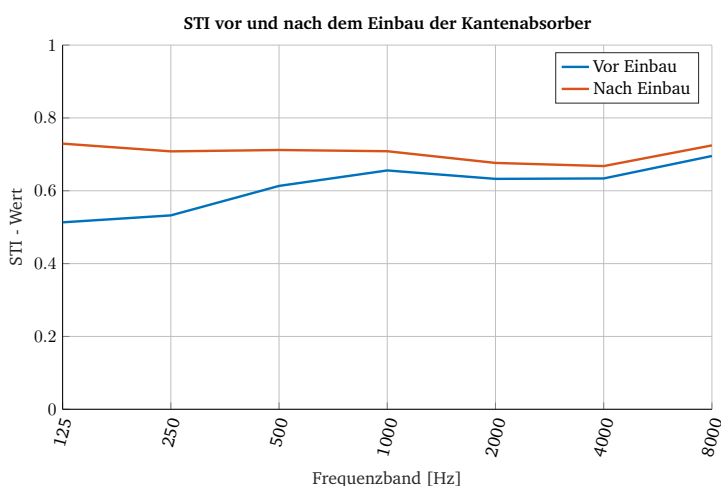


Abbildung 2.6: STI vor und nach dem Einbau im FSI2

In Tabelle 2.1 werden die gesammelten Ergebnisse der Messungen noch einmal numerisch dargestellt.

Ergebnisse vor dem Einbau																			
Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
Nachhallzeit [s]	1.41	1.68	2.20	1.65	1.70	1.60	1.48	1.31	1.15	1.05	0.95	0.89	0.81	0.79	0.78	0.83	0.88	0.91	0.93
STI	-	-	-	-	0.51	-	-	0.53	-	-	0.61	-	-	0.66	-	-	0.63	-	-

Ergebnisse nach dem Einbau																			
Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
Nachhallzeit [s]	0.74	0.67	0.66	0.54	0.71	0.81	0.69	0.71	0.76	0.69	0.63	0.60	0.61	0.62	0.64	0.68	0.73	0.76	0.79
STI	-	-	-	-	0.73	-	-	0.71	-	-	0.71	-	-	0.71	-	-	0.68	-	-
α	1.05	1.50	1.76	2.05	1.37	1.00	1.28	1.07	0.75	0.83	0.88	0.91	0.69	0.56	0.49	0.44	0.40	0.37	0.34
AT [m ²]	25.97	37.23	43.72	50.74	33.96	24.82	31.77	26.50	18.68	20.57	21.79	22.47	17.16	13.89	12.13	10.87	9.80	9.27	8.32
AT pro Lfm [m ² /Lfm]	0.87	1.24	1.46	1.69	1.13	0.83	1.06	0.88	0.62	0.69	0.73	0.75	0.57	0.46	0.40	0.36	0.33	0.31	0.28

Tabelle 2.1: Resultate der Messung im FSI2

2.3.1 Vergleich der Messergebnisse

In Hörsaal FSI2 wurden, wie bereits am Beginn dieses Kapitels erwähnt, Messungen mit den mobilen Modulen des Kantenabsorbers im März 2019 durchgeführt. Der Aufbau des Kantenabsorbers fand dabei am Boden statt. Es drängt sich daher die Frage auf, wie sich das Verhalten des Kantenabsorbers durch die Montage an der Raumdecke im Vergleich dazu verhält. Ein direkter Vergleich war leider nicht möglich, da sich die Anordnungen der Elemente bei den Messungen im Frühjahr von der fixen Montage im Herbst doch deutlich unterscheiden. Die Anzahl der verwendeten Module und die grundsätzliche Verteilung dieser ist aber ähnlich, weshalb ein Vergleich dennoch angebracht erscheint. Die Messanordnungen KAG2 und KAGT3 können zum

Vergleich herangezogen werden.³ Die Anzahl der verwendeten Elemente kommt der Anzahl der verbauten Module nahe.



Abbildung 2.7: Pläne der beiden Messsetups im FS12.

Der Aufbau KAG2 (Abbildung 2.7(a)) besteht aus einem Gürtel mit 16 großen und 4 kleinen Elementen. Für diesen mobilen Aufbau wurden folglich 28, für den späteren fixen Einbau knapp 31 Laufmeter Kantenabsorber verwendet. In Summe wurden also knapp 3 m weniger Kantenabsorber eingebracht. Die Anordnung ist in vielen Bereichen gleich wie bei der Festinstallation. Setup KAGT3 (Abbildung 2.7(b)) unterscheidet sich von KAG2 nur durch einen zusätzlichen Turm in einer vertikalen Raumkante, der aus einem großen und einem kurzen Element besteht. Dadurch werden die fehlenden 3 m aus KAG2 fast gänzlich kompensiert. Es wurden ungefähr gleich viele Laufmeter an Kantenabsorbern wie für den fixen Einbau verwendet. Der Unterschied besteht einzig in der Anbringung des Turms an einer vertikalen Kante. An dieser Kante werden durch die vertikale Ausrichtung und Länge andere Moden bedämpft als bei Kanten am Boden. Daher ist ein leicht abweichendes Ergebnis zu erwarten.

In Abbildung 2.8 ist die gemessene Nachhallzeit im FS12 für die drei Setups dargestellt. Man erkennt, dass sich die beiden mobilen Setups kaum voneinander unterscheiden. KAGT3 wirkt nur marginal besser und weist in manchen Terzbändern des Bassbereiches eine geringere Nachhallzeit auf. Der Unterschied zwischen dem fixen Einbau an der Decke und den Aufbauten im Zuge der mobilen Messungen am Boden ist jedoch sehr deutlich zu erkennen. Das Ergebnis zeigt, dass der Kantenabsorber an der Decke besser wirkt. Reflexionen hochfrequenter Schallenergie, die durch die Positionierung der Schallquellen über der glatten Oberflächen der Tische verursacht werden, können an der Decke besser absorbiert werden und verursachen eine bessere Absorptionswirkung im mittleren und hohen Frequenzspektrum. Auf Grund der Wellenlänge im tieffrequenten Bereich, werden die Wellen um die Tische gebeugt und weniger reflektiert. Daher spielt die Positionierung des Kantenabsorbers auf diesen Frequenzbereich eine untergeordnete Rolle. Auch die Positionierung des Subwoofers am Boden hat daher keinen bzw. nur sehr geringen Einfluss auf das Messergebnis. Man erkennt, dass die fixe Montage eine deutliche Verbesserung der Wirkung im Bassbereich mit sich bringt. Es kann jedoch kein direkter Vergleich zwischen der Montage an der Decke bzw. am Boden gezogen werden.

Auffallend ist auch das 160 Hz-Terzband. In diesem Frequenzband wirkt das Setup KAGT3 besser und reduziert die Nachhallzeit deutlicher. Dieser Umstand lässt sich auf den zusätzlichen Turm

³ Die Bezeichnungen KAG2 und KAGT3 stehen für die Messung mit Kantenabsorbern (KA), die in einem Gürtel am Boden (G) oder in einer Höhenkante als Turm (T) angeordnet wurden. An der letzten Stelle folgt eine durchgehende Nummerierung.

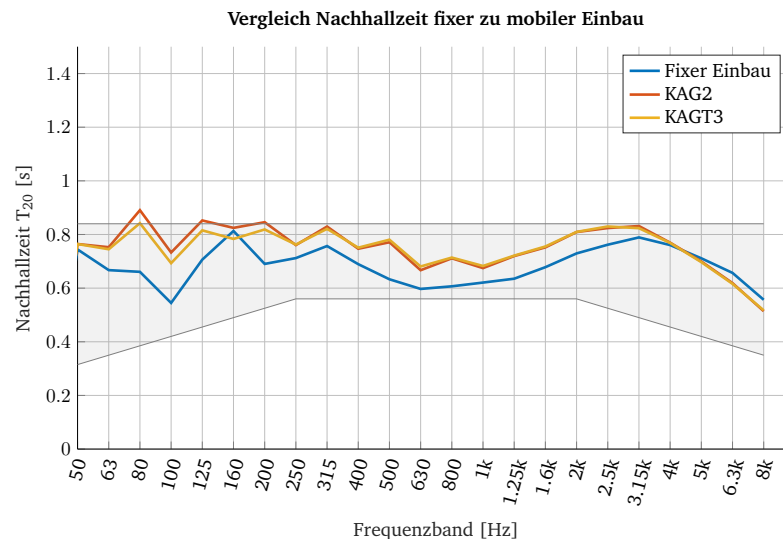


Abbildung 2.8: Vergleich der Nachhallzeit des fixen Einbaus im Vergleich zu den beiden Setups der mobilen Messung. Grauer Bereich kennzeichnet den Bereich idealer Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3.

in der vertikalen Raumkante zurückführen. In dieser Raumkante bilden sich eine oder mehrere Moden im 160 Hz-Terzband stark aus, die vom Kantenabsorberrturm bedämpft werden können.

Die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter gibt unabhängig von der Anzahl verwendeter Module Auskunft über die Wirksamkeit des Kantenabsorbers. Das Ergebnis liefert auf Grund der nahezu gleichen Anzahl der verwendeten Module ein ähnliches Bild (Abbildung 2.9), wie dies schon bei der Auswertung der Nachhallzeit zu sehen ist. Bei 100 Hz liefern alle drei Setups ein Absorptionsmaximum. Beim fixen Einbau ist das Maximum am stärksten ausgeprägt.

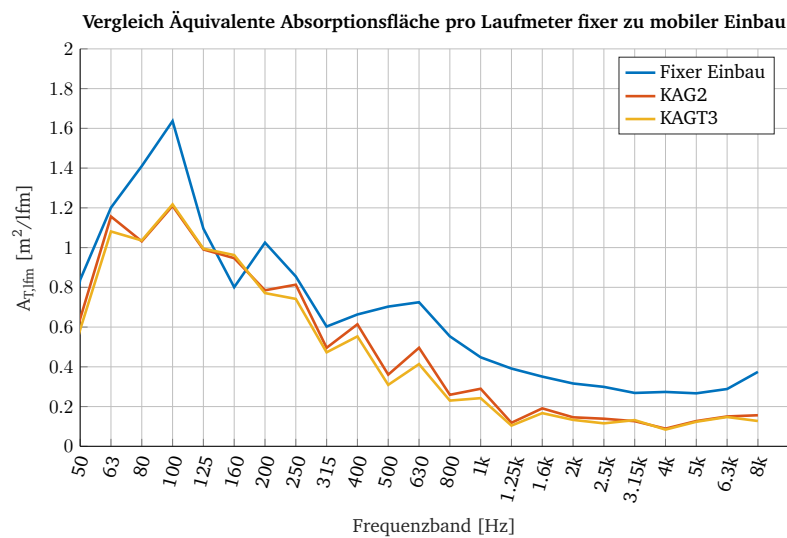


Abbildung 2.9: Vergleich der äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber des fixen Einbaus im Vergleich zu den beiden Setups der mobilen Messung.

Nachhallzeit in [s]

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k
Fixer Einbau	0.74	0.67	0.66	0.54	0.71	0.81	0.69	0.71	0.76	0.69	0.63	0.60	0.61	0.62	0.64	0.68	0.73	0.76	0.79	0.76	0.71	0.66	0.56
KAG2	0.76	0.75	0.89	0.73	0.85	0.82	0.85	0.76	0.83	0.75	0.77	0.67	0.71	0.67	0.72	0.75	0.81	0.82	0.83	0.77	0.70	0.62	0.51
KAGT3	0.76	0.74	0.84	0.69	0.82	0.78	0.82	0.76	0.82	0.75	0.78	0.68	0.71	0.68	0.72	0.76	0.81	0.83	0.82	0.77	0.70	0.62	0.52

Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter in [m^2/fm]

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k
Fixer Einbau	0.87	1.24	1.46	1.69	1.13	0.83	1.06	0.88	0.62	0.69	0.73	0.75	0.57	0.46	0.40	0.36	0.33	0.31	0.28	0.28	0.28	0.30	0.39
KAG2	0.64	1.16	1.03	1.21	0.99	0.95	0.79	0.81	0.50	0.61	0.36	0.50	0.26	0.29	0.12	0.19	0.15	0.14	0.13	0.09	0.13	0.15	0.16
KAGT3	0.59	1.08	1.04	1.22	0.99	0.96	0.77	0.74	0.47	0.55	0.31	0.41	0.23	0.24	0.10	0.17	0.13	0.12	0.13	0.08	0.12	0.15	0.13

Tabelle 2.2: Resultate der Messung im FSI2

2.4 Zusammenfassung

Die Sanierung des FSI2 demonstriert die eindrucksvolle Wirkungsweise des Kantenabsorbers. Die Nachhallzeit erfüllt nach dieser Maßnahme für den gesamten Frequenzbereich die Anforderungen der *ÖNORM B 8115-3* und liegt im Toleranzbereich von $\pm 20\%$ der optimalen Nachhallzeit für Sprache und Musikproberäume. Ein Vergleich der beiden durchgeführten Messungen zeigt, dass durch fixen Einbau die Absorption noch deutlich gegenüber den mobilen Aufbauten gesteigert werden kann. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur Messergebnisse mobiler Messungen als Grundlage herangezogen werden, muss diese Steigerung der Wirkung bei einer fixen Montage zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Messergebnisse aus diesem Kapitel werden am Ende dieser Arbeit in Kapitel 7.3 verwendet, um die Genauigkeit von Berechnung und Simulation zu evaluieren.

3

Auswertung und Analyse der Messkampagne und Zusammenfassung der Erkenntnisse

Um den Kantenabsorber und seine akustische Wirkung zu verstehen, sind viele Aspekte in Betracht zu ziehen, die die Wirkung beeinflussen. Während der zahlreichen Messungen im Hallraum und den Messungen in verschiedenen Lehrräumen wurden viele Erkenntnisse gewonnen, die bei der Planung zukünftiger Projekte helfen können. Daher werden im folgenden Kapitel Aufbau, Dimensionierung und Positionierung des Kantenabsorbers und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Wirkweise untersucht. Eine genaue Analyse der raumakustischen Ausgangssituation in den für die Messkampagne verwendeten Räumen ist für die Auswertung der später folgenden Optimierung von Vorteil.

3.1 Zu berücksichtigende Eigenschaften des Kantenabsorbers

Es sei auf einige Eigenschaften des Kantenabsorbers hingewiesen, deren Einflüsse für die Planung eines raumakustischen Sanierungskonzeptes von enormer Bedeutung sind.

3.1.1 Dimensionierung der Kantenabsorber

Die Dimensionierung des Kantenabsorbers spielt eine äußerst wichtige Rolle für die Wirkung als Modenbremse im tieffrequenten Bereich. Durch die Vergrößerung der Dimension wird die Wirkung des Absorbers in der Frequenz nach unten erweitert (vgl. [Rei19, Kap. 2.3 und 6.2]). Ab einem gewissen Punkt im Frequenzspektrum nimmt die Wirkung des Kantenabsorbers zu sehr tiefen Frequenzen hin aber ab. Daher wurde in [Rei19] eine empirische Formel zur Berechnung einer unteren Grenzfrequenz präsentiert (Formel 3.1).

$$f_{uG,KA} = \frac{c}{d_K \cdot 8} \quad (3.1)$$

d_K ist die Länge der Diagonale des Kantenabsorberquerschnitts in m und bestimmt diese untere Grenzfrequenz.⁴

Eine Vergrößerung der Dimension muss also nicht unbedingt auf beide Kantenlängen angewendet werden, um die Absorption nach unten zu erweitern bzw. die untere Grenzfrequenz nach unten zu verschieben. In Abbildung 3.1, welche aus [Bau20, S. 730] entnommen wurde, ist zu erkennen, dass ein Kantenabsorber mit $400 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ($d_K = 1077 \text{ mm}$, $f_{uG,KA} = 39,46 \text{ Hz}$) und ein Kantenabsorber mit $200 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ($d_K = 1020 \text{ mm}$, $f_{uG,KA} = 41,67 \text{ Hz}$) ein ähnlich stark ausgeprägtes Maximum zu 63 Hz hin entwickeln (vgl. [Rei19, Kap. 5.3]). Die Diagonallänge beider Absorber unterscheidet sich nur um 57 mm , wodurch sich die beiden

⁴ Nach Fertigstellung dieser Arbeit wurde eine neue Methode zur Bestimmung der Grenzfrequenzen über die Waterhouse-Theorie in [KGW21] vorgestellt.

unteren Grenzfrequenzen nur um 2 Hz unterscheiden. Die Absorptionswirkung bei 125 Hz ist allerdings beim $400\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ Kantenabsorber größer, weil die 400 mm Seite diese Terz besser bedämpfen kann als die 200 mm Seite.

Zu erklären sind diese Effekte durch die Modenverteilung im Raum (vgl. [Rei19, S. 71]). Die beiden langen Diagonalen mit über 1000 mm können Schnellexima tieferer Moden bedämpfen und dadurch die Absorptionswirkung zu tieferen Frequenzen hin erweitern. Durch dieses Erkenntnis kann die Grenzfrequenz des Kantenabsorbers bestimmt und damit die Wirkung der Kantenabsorber für die Anforderung des Raumes abgestimmt werden. Die Dimensionierung muss danach ausgerichtet sein, in welchem Frequenzbereich die Absorption benötigt wird. Je tiefer der Kantenabsorber wirken soll, desto größer die Dimension. Dabei spielt auch die räumliche Positionierung des Kantenabsorbers eine entscheidende Rolle, wie in Kapitel 3.1.3 erläutert wird.

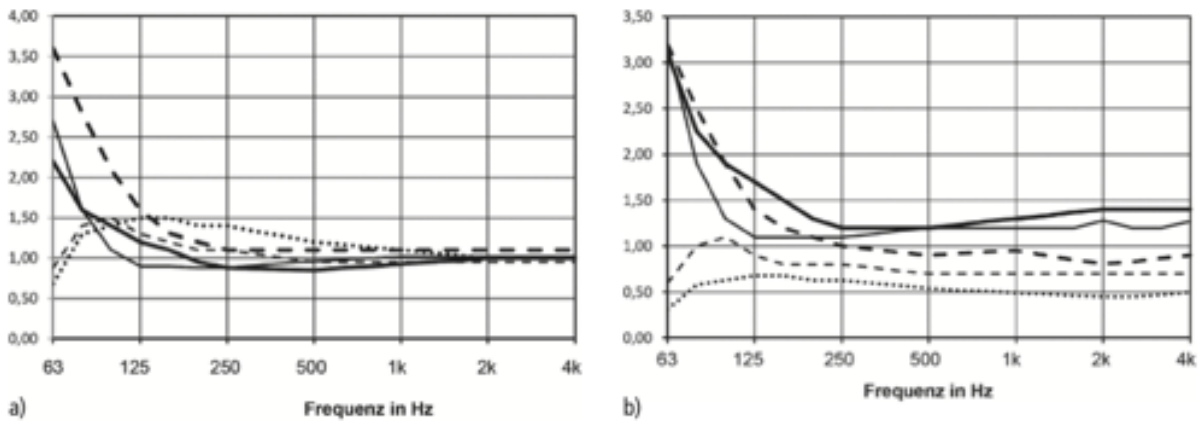


Abbildung 3.1: a) Absorptionsgrad α bezogen auf die gesamte Oberfläche bzw. b) Absorptionsfläche A in m^2 bezogen auf die Kantenlänge in m/m^2 von Kantenabsorbern mit verschiedenen Querschnitten; dicke Linie: $400\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$; dünne Linie: $200\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$; dick strichliert: $400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$; dünn strichliert: $200\text{ mm} \times 500\text{ mm}$; punktiert: $200\text{ mm} \times 250\text{ mm}$

Für die Messungen und die sich daraus ergebenden Erkenntnisse in dieser Arbeit wurden ausschließlich Kantenabsorber der Dimension $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ verwendet. Diese Dimension weist eine untere Grenzfrequenz von 75,13 Hz nach Formel 3.1 auf.

Die charakteristische Bandbreite, für welche der Kantenabsorber als breitbandige „Modenbremse“ wirkt, wird im Frequenzspektrum nach oben hin durch die Schröderfrequenz (Formel 3.2) begrenzt (vgl. [Kut17, S. 67]).

$$f_{\text{Schröder}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (3.2)$$

Diese obere Grenzfrequenz wird durch die Änderung der Dimension nicht beeinflusst, da sie nur von den Raumeigenschaften abhängt.

3.1.2 Verwendete Materialien und Aufbau des Kantenabsorbers

In [Rei19, Kap. 4] wird mittels Impedanzrohrmessung eine genaue Analyse des Absorptionsmaterials und der Schichtung des Materials durchgeführt. Diese Messungen brachten wichtige Erkenntnisse, wie sich die Wahl und Platzierung des Materials im Absorber bzw. die Perforationsdichte der Platte auf die Wirkung auswirken.

Bei Verwendung unterschiedlicher Materialien ist folglich eine Änderung der Wirksamkeit zu erwarten. Beim Vergleich verschiedener Messergebnisse von Räumen, die mit Kantenabsorbern ausgestattet wurden, ist folglich darauf zu achten, wie diese materialtechnisch ausgeführt sind.

In dieser Arbeit werden nur Kantenabsorber berücksichtigt, die aus 15 mm Birkenspertholzplatten mit einer einseitigen Perforation von 20 % gefertigt und mit porösem Absorptionsmaterial mit einem längenspezifischen Strömungswiderstand von $\geq 5 \frac{kPa \cdot s}{m^2}$ in einem Stoffsack ausgefüllt sind. [Rei19, Kap. 3.2]

3.1.3 Anbringung der Kantenabsorber an verschiedenen Raumkanten

Die Anbringung des Kantenabsorbers an verschiedenen Kanten eines Raumes (Längs-, Breiten- oder Höhenkante) wirkt sich auf das Absorptionsverhalten stark aus. Da sich an den verschiedenen Kanten auf Grund ihrer Länge unterschiedliche Moden ausbreiten, kann das Absorptionsverhalten mitunter stark variieren (vgl. [Rei19, S. 71]). So wurde im Zuge der Messungen erkannt, dass die Aufstellung der Kantenabsorber in verschiedenen Raumrichtungen Absorptionsmaxima in unterschiedlichen Frequenzbereichen hervorruft.

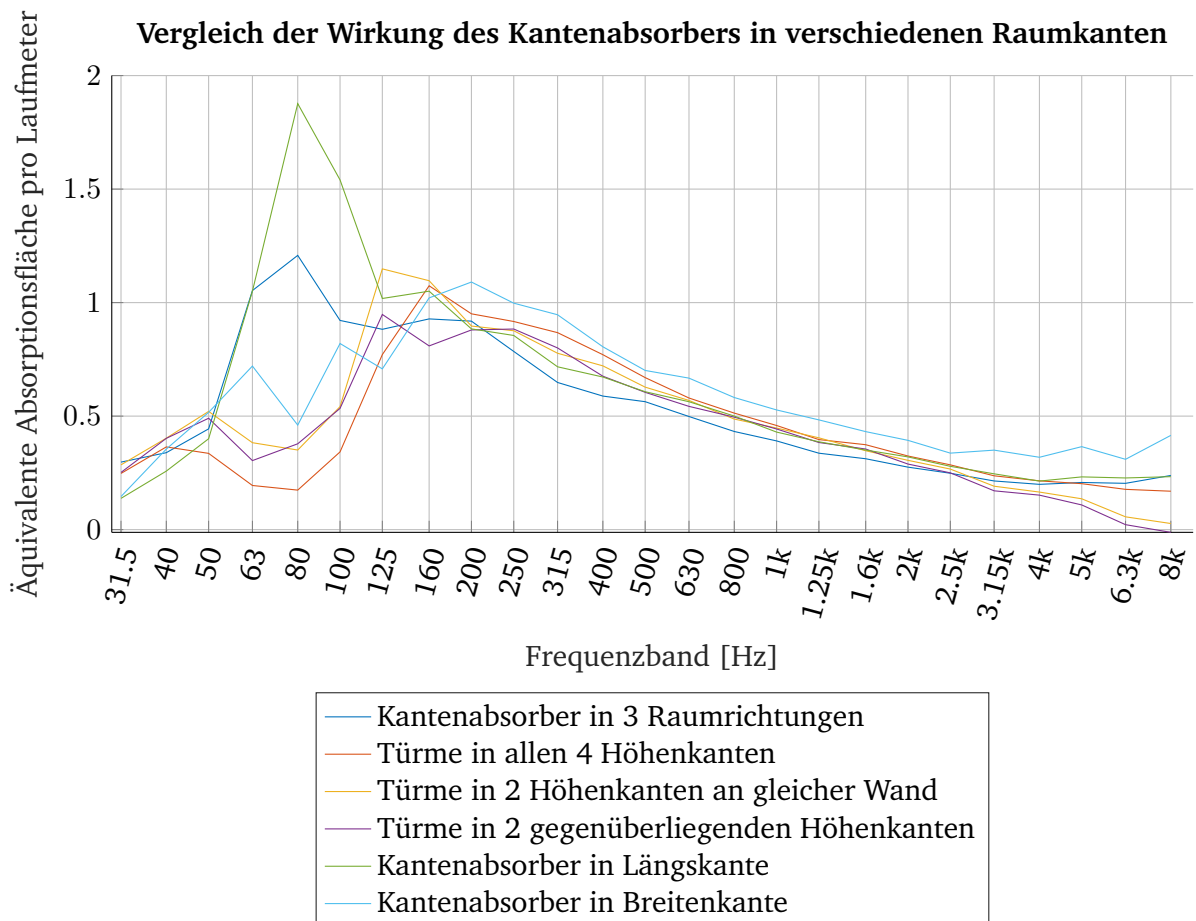


Abbildung 3.2: Vergleich der Wirkung des Kantenabsorbers bei Aufstellungen in verschiedenen Kanten im Hallraum (Länge 8,35 m, Breite 5,99 m, Höhe 4,90 m).

In Abbildung 3.2 werden Aufstellungen des Kantenabsorbers (40 × 40 cm) in verschiedenen Raumkanten im Hallraum (Länge 8,35 m, Breite 5,99 m, Höhe 4,90 m) ausgewertet. Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Setups unterhalb von 200 Hz doch sehr unterschiedlich wirken. Die Aufstellung in der Längskante bewirkt ein Maximum der Absorption bei 80 Hz, das auf

eine axiale Mode 4. Ordnung zurückzuführen ist. Die Turmaufstellung beginnt erst bei höheren Terzen zu wirken, da diese Raumkante deutlich kürzer ist als die Längskante. Für eine möglichst hohe Absorption im tieffrequenten Bereich ist daher das Anbringen der Kantenabsorber an der längsten Raumkante ratsam.

Weiters sei hier auf die Schwierigkeiten der Auswertung der Messergebnisse mittels äquivalenter Absorptionsfläche pro Laufmeter hingewiesen, welche in Kapitel 3.2 genauer erläutert wird.

3.2 Gemessener Parameter: Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber

Bei den Messungen mit den Kantenabsorbern in den verschiedenen Räumen konnte auf Grund der Geometrie und der räumlichen Situation nicht immer die gleiche Anzahl an Elementen verwendet werden. Daher variiert die Anzahl der verwendeten Kantenabsorbermodule von Raum zu Raum. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist daher nicht möglich, weshalb eine Normierung gefunden werden musste.

Die Sabinesche Nachhallzeitformel bildet die Grundlage für die Berechnung vieler akustischer Eigenschaften, wie z.B. Absorptionsgrad oder äquivalente Absorptionsfläche. Durch die Messung der Nachhallzeit im leeren Raum und nach Einbringung des akustischen Materials kann die äquivalente Absorptionsfläche des eingebrachten Absorbers berechnet werden.

$$A = 0.161 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{nach}} - \frac{1}{T_{vor}} \right) \quad (3.3)$$

Das Ergebnis der Berechnung in Formel 3.3 hängt aber direkt mit der Anzahl an verwendeten Kantenabsorbermodulen und der damit verbundenen Wirkung zusammen. Daher wird die Absorptionsfläche pro Laufmeter berechnet, um so einen von der Anzahl an Elementen unabhängigen Wert errechnen zu können.

$$A/lfm = \frac{0.161 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{nach}} - \frac{1}{T_{vor}} \right)}{lfm} \quad (3.4)$$

Die Normierung muss aber auch in Frage gestellt werden, da sie das Ergebnis stark verändern kann. Kann eine Mode entlang der Längskante gut bedämpft werden, wird der Wert für die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter in diesem Terzband recht hoch ausfallen. Werden anschließend zusätzlich Kantenabsorbermodule z.B. in einer Höhenkante eingebracht, die in einem anderen Frequenzbereich gut wirken, wird durch die erhöhte Laufmeteranzahl der Wert im Terzband, der durch die Bedämpfung der Längskante verursacht wird, reduziert. Man muss bei der Auswertung von Messergebnissen also darauf achten, wie die Kantenabsorbermodule im Raum verteilt sind und wie viele Laufmeter verwendet wurden.

In den folgenden Kapiteln werden daher nur Kantenabsorberaufstellungen untersucht, die sich in ihrer Konfiguration ähnlich sind. Es wird versucht Setups zu verwenden, die ungefähr gleich viel Laufmeter Kantenabsorber beinhalten und sich auch in der Positionierung der Elemente in den einzelnen Raumkanten ähnlich sind.

3.4 Akustische Eigenschaften der Räume und verwendete Setups für die Optimierung

Für die Optimierung stehen Messergebnisse aus 5 Räumen zur Verfügung. Kriterium für die Verwendung der Messung war, dass möglichst alle bzw. ein Maximum an Kantenabsorberelementen verwendet wurden und dass diese in allen Raumkanten verteilt sind. Diese Eigenschaft erfüllen folgende 5 Setups:

- KAG4 im Hallraum der Bauphysik der TU Graz
- KAGT4 in einem Klassenraum des BRG Kepler
- KAGT3 im Hörsaal FSI2 im Frank Stronach Institute der TU Graz
- KAG6 im Hörsaal FSI1 im selben Gebäude
- KAGT2 im Hörsaal i14 in der Inffeldgasse 18

In den folgenden Kapiteln werden die Räume bezüglich ihrer akustischen Eigenschaften untersucht. Diese sollen in Verbindung zu den Kantenabsorber-Setups, welche für die spätere Optimierung verwendet werden, gebracht werden. Es wird dabei auf Größe und Geometrie der Räume Bezug genommen und versucht, die Wirkung des Kantenabsorbers besser zu verstehen. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Ausgangsnachhallzeit, die den Absorptionsgradverlauf und die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber stark beeinflusst. In Räumen mit langer Nachhallzeit ist eine stärkere Reduktion dieser notwendig, um die gleiche äquivalente Absorptionsfläche zu erreichen, wie in Räumen mit kurzer Ausgangsnachhallzeit (siehe Formel 3.3 in Kapitel 3.2).

3.4.1 Hallraum

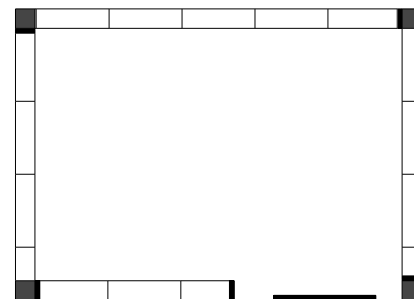
Im Hallraum der Bauphysik der TU Graz wurde die Mehrheit der Messungen mit dem Kantenabsorber durchgeführt. Es bleibt bei diesen Messungen die Frage offen, inwieweit die Messungen das Gesamtergebnis verfälschen. Denn bei der Bestimmung des Absorptionsgrades eines Materials im Hallraum ist diese nur oberhalb einer unteren Grenzfrequenz zulässig und das zu untersuchende Material muss einen Mindestabstand zu den Begrenzungsflächen einhalten [Sin20, S. 444]. Dies beruht aber auf der Tatsache, dass sich unter der Grenzfrequenz starke Moden ausbilden, die das Ergebnis beeinflussen und für gewöhnlich bei der Bestimmung des Absorptionsgrades nicht berücksichtigt werden sollen. Doch für die Untersuchung des Kantenabsorbers spielen diese Moden eine wesentliche Rolle. Jedoch bleibt zu hinterfragen, wie sich die spezielle Struktur des Hallraums auswirkt und sich dadurch die Messergebnisse von denen gewöhnlicher Räume unterscheiden.

Verwendet wird für die folgenden Optimierungen das Setup KAG4.⁵ Dieses besteht aus einem Gürtel am Boden mit 13 großen und 3 kleinen Kantenabsorberelementen (Abbildung 3.4). Zusätzlich stehen 4 Türme in den vier Raumecken, wobei ein Turm aus einem großen und einem kleinen Element besteht. Insgesamt werden 32,5 Laufmeter Kantenabsorber mit einer akustisch wirksamen Oberfläche von $26,43 \text{ m}^2$ für dieses Setup verwendet. 22,5 Laufmeter wurden in den Längs- und Breitenkanten des Raumes am Boden verbaut. Die übrigen 10 in den Höhenkanten als Türme.

⁵ Die Benennung der Setups erfolgte immer beginnend mit KA für Kantenabsorber, dem Aufbau, also G für Gürtel und einer fortlaufenden Nummerierung für jeden Messraum. Bei dieser Messung passierte allerdings ein kleiner Fehler. Das Setup müsste KAGT4 heißen, da ein Gürtel und 4 Türme eingebaut wurden. Da auch im BRG Kepler das Setup KAGT4 verwendet wird, wurde KAG4 beibehalten, um Verwechslungen vorzubeugen.

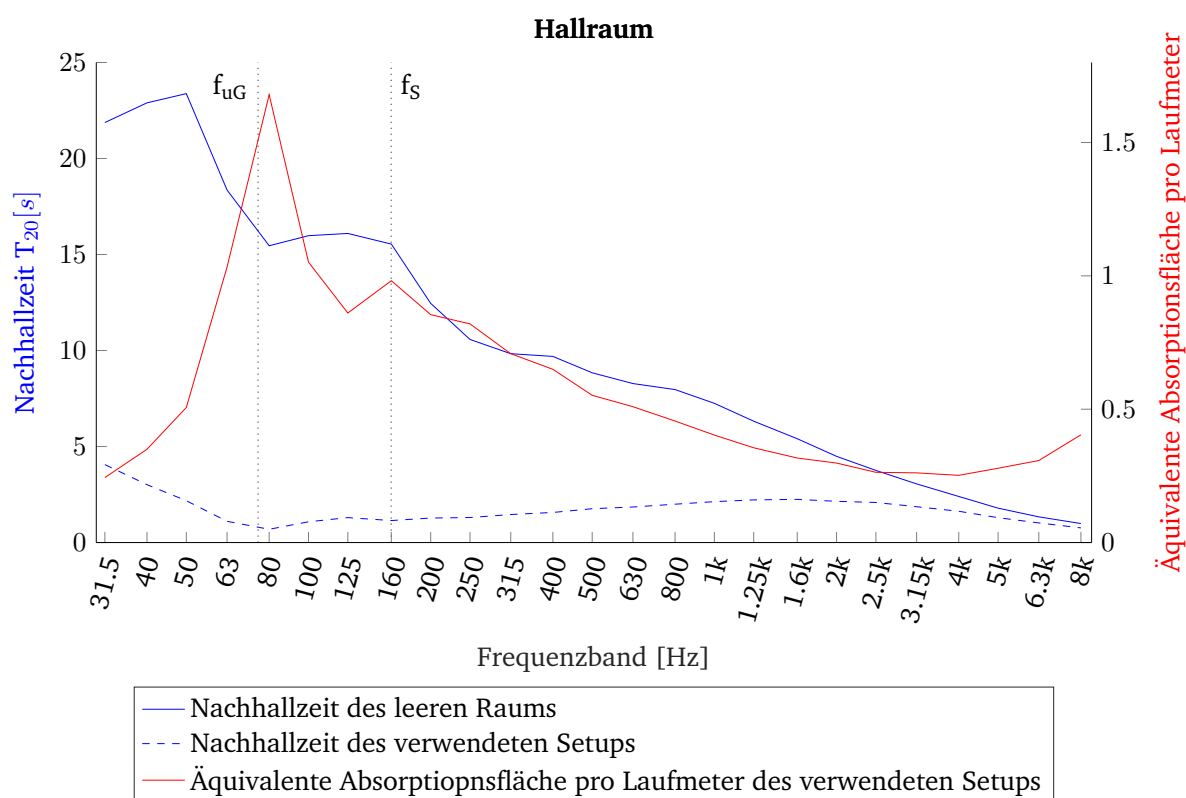


(a) Aufstellung.



(b) Plan.

Abbildung 3.4: KAG4 im Hallraum der TU Graz.

Abbildung 3.5: Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hallraum.

Die in Abbildung 3.5 dargestellte Nachhallzeit des leeren Hallraums zeigt die extremen Nachhallzeiten vor allem im tiefen Frequenzbereich. Durch den Einsatz des Kantenabsorbers als Setup KAG4 wird die Nachhallzeit über den gesamten Frequenzbereich unter 5 s reduziert. Die starke Wirkung im tieffrequenten Bereich ist hier deutlich zu erkennen.

Man erkennt ein Absorptionsmaximum in der 80-Hz-Terz, welches auf die Geometrie des Raumes zurückzuführen ist. Die längste Abmessung des Raumes beträgt 8,35 m, welche der Wellenlänge einer Mode 2. Ordnung mit 40 Hz entspricht. Die untere Grenzfrequenz des Kantenabsorbers mit $40 \times 40 \text{ cm}$ liegt bei 75 Hz, weshalb diese Mode nicht bedämpft werden kann. Bei ca. 81 Hz befindet sich also eine axiale Mode 4. Ordnung, die gut vom Kantenabsorber bedämpft werden kann. Betrachtet man die Anzahl der Moden in Tabelle 3.1, so erkennt man außerdem, dass sich in dieser Terz auch tangentielle Moden häufen.

Das Ergebnis für die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter befindet sich in der Größen-

ordnung der Ergebnisse der übrigen Messungen. Daher ist davon auszugehen, dass sich der Hallraum nicht unähnlich den übrigen Messumgebungen verhält.

	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
Axiale Moden	1	0	2	1	0	3	2	2	3	5	4	7	9	8
Tangentiale Moden	0	0	0	2	3	3	8	13	17	35	54	84	143	220
Oblique Moden	0	0	0	0	1	2	4	11	24	52	114	236	487	1005
Gesamt	1	0	2	3	4	8	14	26	44	92	172	327	639	1233

Tabelle 3.1: Anzahl der Moden pro Terzband im Hallraum.

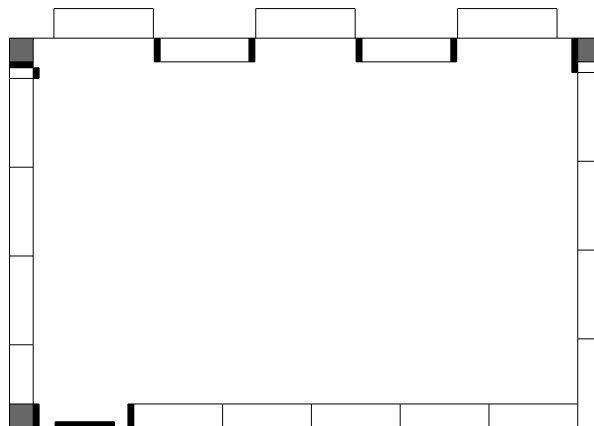
3.4.2 BRG Kepler

Im BRG Kepler fanden Messungen in einem Klassenraum statt. Fensterseitig liegt dieser Raum direkt an der Keplerstraße. Daher ist er stark betroffen vom tieffrequenten Dröhnen vorbeifahrender PKW bzw. ganz besonders von schweren LKW. Der Kantenabsorber könnte in diesem Raum dazu beitragen, dieses Dröhnen zu minimieren. Auch der Grundgeräuschpegel im Raum ist durch die Straße höher. Darum war es leider nicht möglich, eine Nachhallzeit für das 31.5- und 40-Hz-Terzband zu messen, da keine ausreichend große SNR generiert werden konnte.

KAGT4 besteht aus 14 großen und einem kleinen Element an allen vier Raumseiten verteilt. Dazu kommen 3 Türme in Raumecken, wobei ein Turm aus einem großen und 2 kleinen Elementen besteht (Abbildung 3.6). Die Oberfläche beträgt $24,24 \text{ m}^2$ bei einer Gesamtlänge von 32,5 Laufmetern, 22 davon in der horizontalen Achse am Boden und 10,5 Laufmeter vertikal in den Höhenkanten.



(a) Aufstellung



(b) Plan

Abbildung 3.6: KAGT4 im Klassenraum des BRG Kepler.

Das Klassenzimmer des BRG Kepler weist einen interessanten Verlauf der Nachhallzeit auf. Der Anstieg der Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen hin ist exemplarisch für viele Unterrichtsräume und kann durch den Einsatz des Kantenabsorbers gut korrigiert werden. Auffallend hingegen ist der Anstieg der Nachhallzeit zwischen 500 Hz und 2 Hz. Dieser Altbau wurde einer akustischen Sanierung unterzogen, die im Zuge einer Bachelorarbeit an der TU Graz konzipiert und begleitet wurde [FW15]. Dabei wurde eine abgehängte Akustikdecke eingebaut. Diese ist für das Minimum der Nachhallzeit zwischen 300 und 600 Hz verantwortlich.

Das eingebrachte Kantenabsorbersetup KAGT4 kann die Nachhallzeit im tiefen und mittleren Frequenzbereich teilweise stark reduzieren, ehe die Wirkung zu den hohen Frequenzen nachlässt und nur eine geringe Reduktion der Nachhallzeit erreicht werden kann. Dieser Raum zeigt,

dass der Kantenabsorber alleine nicht immer das gewünschte Ergebnis über den gesamten Frequenzbereich erzielen kann. Im Fall einer akustischen Sanierung wäre eine weitere Methode zur Reduktion der Nachhallzeit über 500 Hz anzustreben, um die Nachhallzeit für den gesamten Frequenzbereich niedrig zu halten. Eine gewisse akustische Grundbedämpfung des Raumes zusätzlich zum Einbau von Kantenabsorbern erweist sich als günstig.

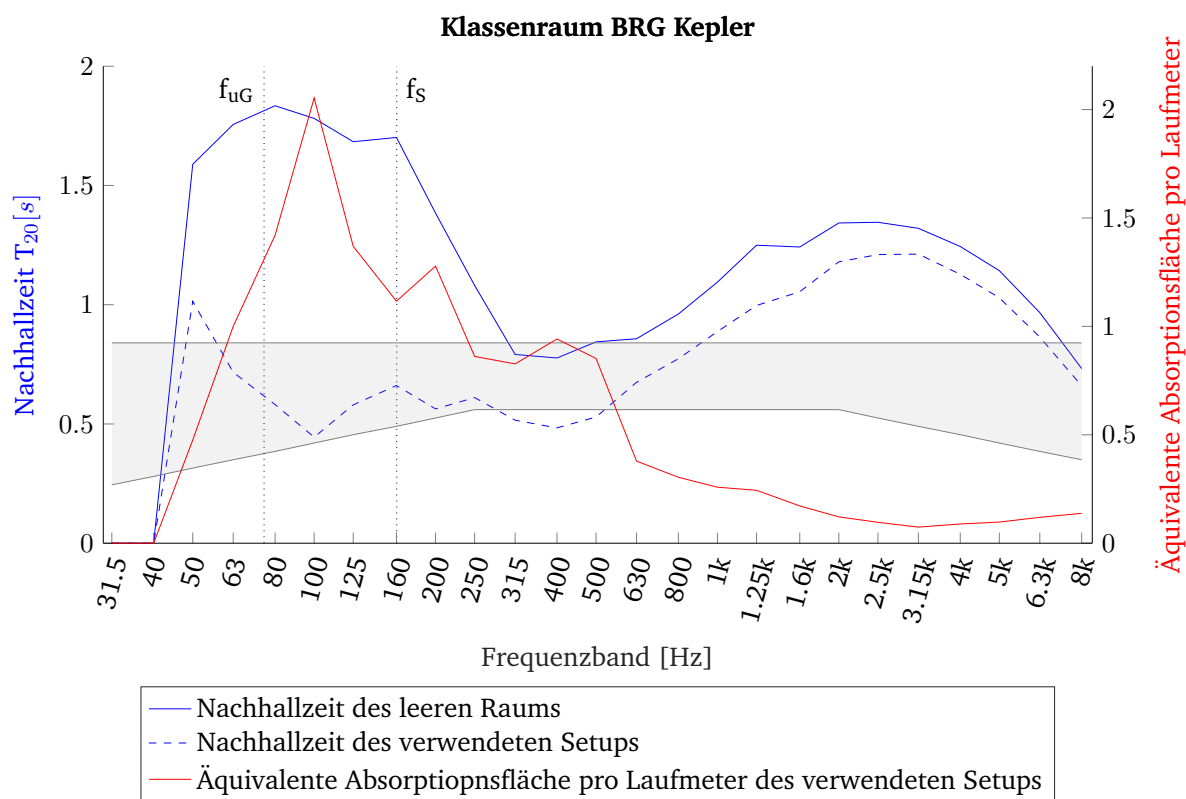


Abbildung 3.7: Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Klassenraum des BRG Kepler.

Das Maximum der Wirkung liegt hier in der 100-Hz-Terz. Man erkennt in Tabelle 3.2, dass sich die tangentialen Moden in dieser Terz häufen. Beim Aufbau der Kantenabsorberelemente in diesem Raum konnten nur die Breitenkanten vollständig belegt werden. Die Breite des Raumes beträgt 6,58 m, die der Länge der Welle einer Mode 2. Ordnung bei ca. 52 Hz (tiefer als untere Grenzfrequenz) entspricht. Eine axiale Mode 4. Ordnung befindet sich also in der Breitenkante bei 104 Hz, welche gut bedämpft wird und daher mitunter das Maximum der Absorption in der 100-Hz-Terz verursacht.

	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
Axiale Moden	0	1	1	0	3	1	2	3	4	3	5	8	8	6
Tangentiale Moden	0	0	1	1	3	5	6	14	22	32	58	95	147	181
Oblique Moden	0	0	0	0	0	2	5	10	22	52	112	230	483	892
Gesamt	0	1	2	1	6	8	13	27	48	87	175	333	638	1079

Tabelle 3.2: Anzahl der Moden pro Terzband im Klassenraum des BRG Kepler.

3.4.3 Hörsaal FSI1

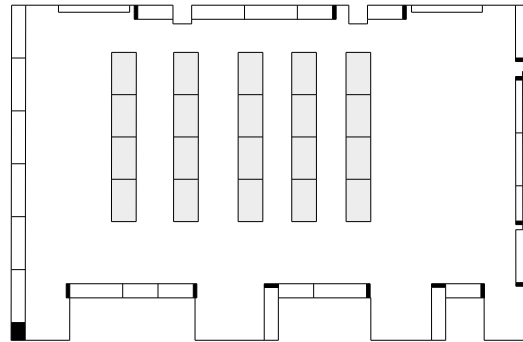
Der FSI1 ist der größte der 5 untersuchten Räume (128 m^2). Mit einer knapp doppelt so großen Grundfläche wie die restlichen Räume weist er einen Nachhallzeitverlauf auf, der für den Einsatz

des Kantenabsorbers ebenfalls perfekt erscheint. Jedoch ist die Nachhallzeit generell sehr lang, vor allem auch in den zumeist akustisch wichtig erachteten Terzbändern zwischen 500 und 4 kHz. Die Nachhallzeit von über 3 s bei 80 Hz ist für einen Unterrichtsraum katastrophal.

Auf Grund seiner verschachtelten Grundform war es nicht möglich die Längsseite durchgehend mit Kantenabsorbern zu bestücken, weshalb wiederum nur die beiden Breitenkanten nahezu vollständig ausgekleidet werden konnten. Im Hörsaal FS11 wurde ein Gürtel mit 16 großen und 8 kleinen Elementen im Raum realisiert. Die akustisch wirksame Oberfläche beträgt $27,52 \text{ m}^2$ bei insgesamt 32 verwendeten Laufmetern. Dieses Setup ist das einzige, bei dem keine Höhenkante verbaut wurde.



(a) Aufstellung.



(b) Plan.

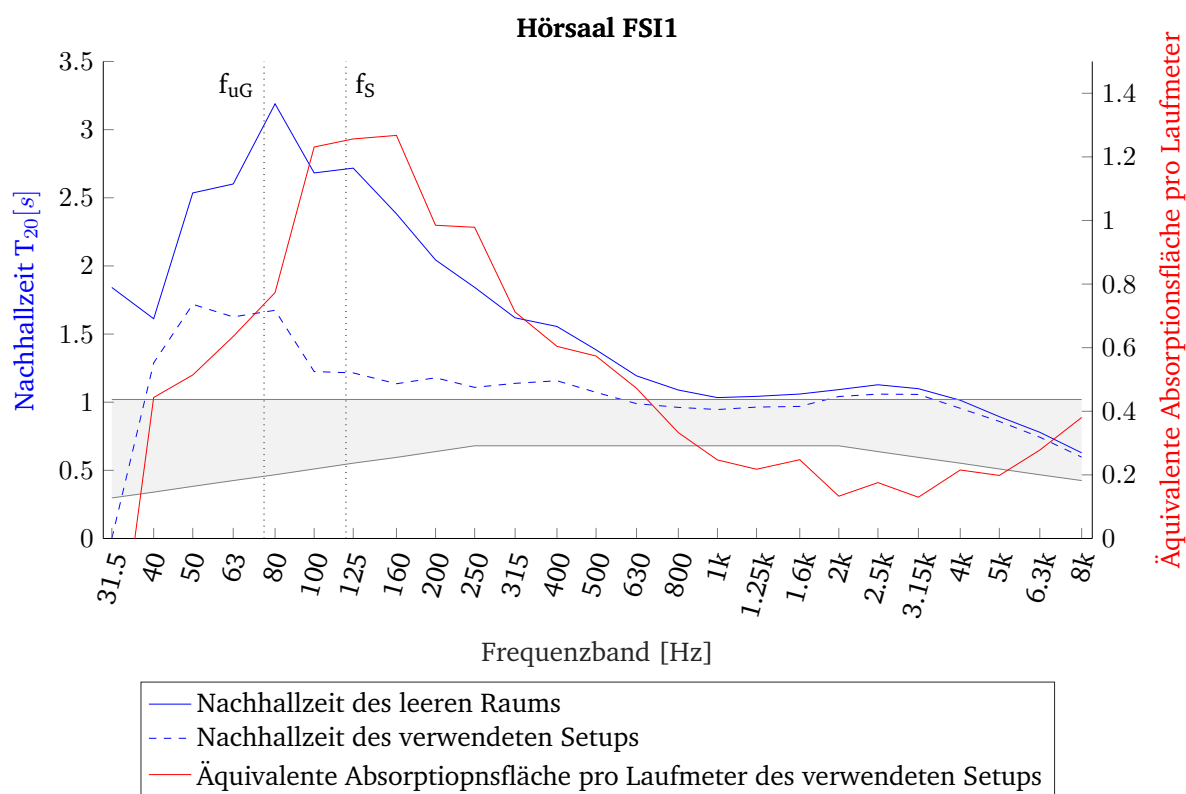
Abbildung 3.8: KAG6 im Hörsaal FS11.

Die Wirkung des Kantenabsorbers ist auch in diesem großen Raum sehr eindrucksvoll.⁶ Die Nachhallzeit kann deutlich (um knapp 1,5 s) reduziert werden. Dennoch reichen die 32 Laufmeter, die für den Messaufbau verwendet wurden, nicht aus, um ein zufriedenstellendes, die Norm erfüllendes Ergebnis zu erreichen. Gerade unterhalb der 100-Hz-Terz steigt die Nachhallzeit noch immer an und ist zu lang. Durch die Größe des Raumes entwickeln sich unter 100 Hz deutlich mehr Moden als in den anderen Räumen (Tabelle 3.3). Das Maximum der Absorption liegt zwischen 100 und 160 Hz und ist damit für diesen Raum etwas zu hoch. Diesem Umstand könnten größer dimensionierte Kantenabsorber entgegen wirken. Das Wirkungsmaximum des Absorbers kann so nach unten verschoben werden. Einen weiteren negativen Einfluss auf die Absorption der tieffrequenten Moden hat die nicht vollständig mit Kantenabsorbern ausgekleidete Längsseite. Bei einer Montage an der Decke des Raumes wäre diese Kante unbedingt vollständig mit Kantenabsorbern auszustatten.

	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
Axiale Moden	1	1	0	2	2	0	3	3	3	5	6	6	9	7
Tangentiale Moden	0	0	1	1	4	4	9	14	23	39	61	96	159	220
Oblique Moden	0	0	0	0	1	2	6	13	27	61	125	269	557	1080
Gesamt	1	1	1	3	7	6	18	30	53	105	192	371	725	1307

Tabelle 3.3: Anzahl der Moden pro Terzband im Hörsaal FS11.

⁶ Die Messung der Nachhallzeit bei 31,5 Hz lieferte für das eingebrachte Setup leider kein verwertbares Ergebnis. Deshalb ist der Vergleich der Nachhallzeiten erst ab 40 Hz möglich.

Abbildung 3.9: Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hörsaal FSI1.

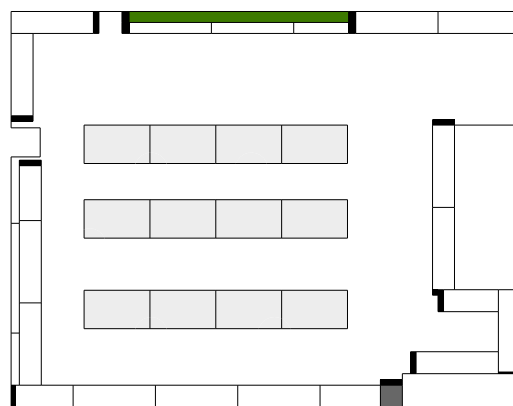
3.4.4 Hörsaal FSI2

Ebenfalls ausgezeichnet für die akustische Sanierung mittels Kantenabsorber geeignet ist der Hörsaal FSI2. In diesem Raum ist die Nachhallzeit generell niedriger als im FSI1, da der Raum genau halb so groß ist. Es kann durch den Einbau des Kantenabsorbers ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden, wie Abbildung 3.11 bzw. Kapitel 2 zeigt.

Das KAGT3-Setup besteht aus einem Gürtel mit 16 großen und 4 kleinen Elementen und einem Turm in einer Ecke, bestehend aus einem großen und einem kurzen Element. Folglich wurden 30,5 Laufmeter Kantenabsorber mit einer Oberfläche von $25,44 \text{ m}^2$ verwendet.



(a) Aufstellung.



(b) Plan.

Abbildung 3.10: KAGT3 im Hörsaal FSI2.

Die längste Seite des Raumes konnte auf 9,28 m gut mit Kantenabsorbern belegt werden. Dies wirkt sich sichlich positiv auf das Absorptionsverhalten in den tiefen Terzen aus (Abbildung 3.11). Im Vergleich zu den anderen Räumen treten zwischen 80 und 160 Hz in diesem Raum die meisten Moden auf. Es zeigt sich in allen Räumen, dass der Kantenabsorber der verwendeten Dimension in diesem Frequenzbereich sein Maximum an Absorption erreicht. Während die Maxima im Hallraum, BRG Kepler und i14 eher schmal ausgeprägt sind, fallen sie im FSI2 breiterbandiger aus. Dies ist auf die dichtere Modenstruktur zwischen 80 und 160 Hz zurückzuführen.

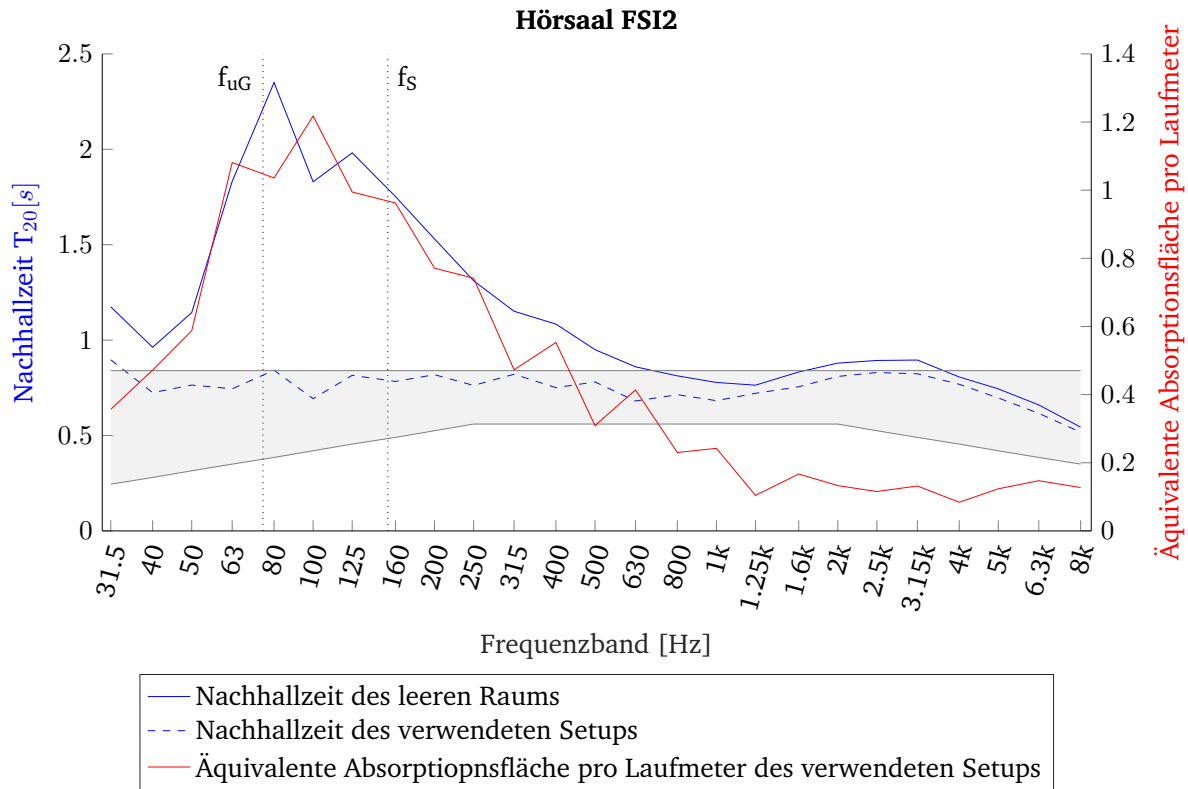


Abbildung 3.11: Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hörsaal FSI2.

	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
Axiale Moden	1	1	1	2	2	2	3	4	5	6	8	5	6	3
Tangentiale Moden	1	0	1	4	7	7	15	28	42	66	114	149	180	156
Oblique Moden	0	0	0	0	2	6	11	30	61	127	279	547	912	1286
Gesamt	2	1	2	6	11	15	29	62	108	199	401	701	1098	1445

Tabelle 3.4: Anzahl der Moden pro Terzband im Hörsaal FSI2.

3.4.5 Hörsaal i14

Der Hörsaal i14 stellt einen Sonderfall in der Messserie dar, da der Raum bereits akustisch saniert wurde und für viele Terzen eine deutlich kürzere Nachhallzeit gegenüber den anderen 4 Räumen aufweist. In Abbildung 3.12 sind akustische Wandelemente zu erkennen.

Die Wirkung der Elemente ist aus der Nachhallzeitkurve in Abbildung 3.14 deutlich zu erkennen. In den mittleren und hohen Terzen wurde die Nachhallzeit mit dieser Maßnahme deutlich unter 1 s gebracht. In den Tiefen steigt jedoch die Nachhallzeit deutlich an und erreicht Werte von über 2 s.



Abbildung 3.12: Hörsaal i14 an der TU Graz. An den Wänden wurden akustische Wandelemente angebracht.

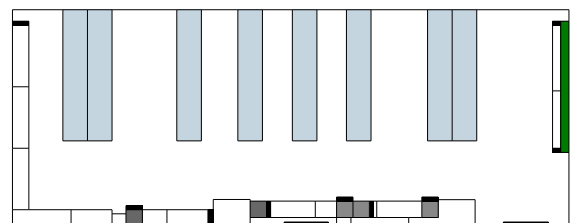
Der angrenzende Hörsaal i15 wurde bei dieser Sanierung mit Kantenabsorbern optimiert. Es ist also direkt möglich die beiden Räume zu vergleichen. Die Ergebnisse der beiden Sanierungskonzepte wurden in [HK17] zusammengefasst.

Auf Grund der durch die Sanierung geschaffenen akustischen Verhältnisse ist der Hörsaal i14 für den Einsatz des Kantenabsorber ebenfalls bestens geeignet. Interessant ist die Frage, wie stark die Bedämpfung der hohen Terzen durch den Kantensabsorber ausfällt, da diese bereits durch die Wandelemente bedämpft werden.

Das verwendete Setup KAGT2 besteht aus einem Gürtel am Boden, der in 3 Raumseiten verteilt ist und sich aus 9 großen und 3 kleinen Teilen zusammenfügt. Zusätzlich wurden 5 Türme mit je einem großen und einem kleinen Element aufgestellt. Es ergibt sich so eine Oberfläche von $24,80 \text{ m}^2$ bei 29 Laufmetern. Auffallend ist hierbei, dass nur 16,5 Laufmeter in der horizontalen Ebene eingebracht (kleinster Wert aller Messungen im Vergleich) bzw. 12,5 Laufmeter in Höhenkanten (größter Wert) aufgestellt wurden.



(a) Aufstellung.



(b) Plan.

Abbildung 3.13: KAGT2 im Hörsaal i14.

Man erkennt aus dem Verlauf der äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter in Abbildung 3.14, dass die Absorption der mittleren und hohen Frequenzen höher ausfällt als in den übrigen Räumen, obwohl die Ausgangsnachhallzeit in diesem Frequenzbereich zum Teil deutlich niedriger ist als in den Vergleichsräumen. (Es ist dabei auch zu beachten, dass der Hörsaal i14 der

zweitgrößte Raum in diesem Vergleich ist.) Interessant ist auch das auffallende Absorptionsmaximum bei 160 Hz. Es scheint, dass eine oder mehrere sich in vertikaler Richtung ausbreitende Moden in diesem Raum besonders gut absorbiert werden können. Schon bei den Messungen im Hallraum, bei welchen nur Türme aufgestellt wurden, wurde ein Absorptionsmaximum in dieser Terz erkannt.

Die Nachhallzeit unter 125 Hz bleibt in diesem Raum mit diesem Setup allerdings weiterhin unzufriedenstellend. Da die langen Kanten des Raumes nicht durchgehend mit Kantenabsorbent ausgekleidet werden können, fehlt ein wichtiger Teil für die Reduktion der Nachhallzeit unter 125 Hz. Die Montage an der Decke könnte hier eine Verbesserung erwirken. Außerdem sei hier ebenfalls auf die Dimensionierung des Kantenabsorbers (Kapitel 3.1.1) hingewiesen. Diese müsste für den optimalen Einsatz in diesem Raum vergrößert werden, um die tiefen Frequenzen besser zu bedämpfen.

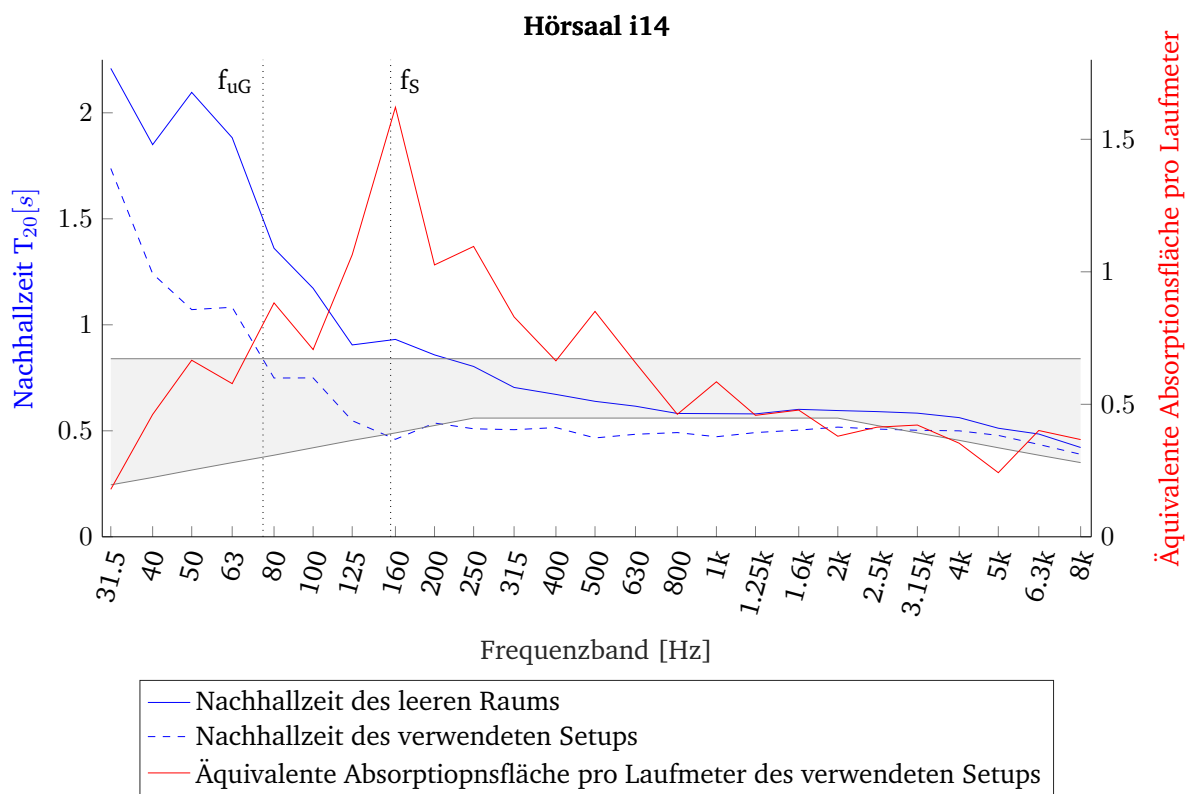


Abbildung 3.14: Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hörsaal i14.

	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
Axiale Moden	0	1	1	1	2	2	1	4	5	3	6	7	3	5
Tangentiale Moden	0	0	1	1	3	6	6	18	21	39	62	99	113	142
Oblique Moden	0	0	0	0	0	3	5	11	25	57	118	247	442	712
Gesamt	0	1	2	2	5	11	12	33	51	99	186	353	558	859

Tabelle 3.5: Anzahl der Moden pro Terzband im Hörsaal i14.

3.5 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

Bei der Planung einer akustischen Sanierung mit dem Kantenabsorber sollten möglichst viele Eigenschaften des Raumes und des Absorbers berücksichtigt werden. Anhand der Nachhallzeit des zu sanierenden Raumes kann erkannt werden, bis zu welcher Frequenz der Kantenabsorber wirken sollte. Die gewünschte untere Grenzfrequenz bestimmt die Dimensionierung des Kantenabsorbers. Außerdem kann die Verteilung des Absorbers maßgeblich das Absorptionsverhalten beeinflussen. Durch eine durchgängige Montage an der längsten Seite des Raumes kann ein Maximum an Absorption in der tiefsten möglichen Terz erreicht werden (abhängig von der Dimensionierung des Absorbers). Die Montage an kürzeren Raumseiten, wie z.B. der Höhenkante, bewirkt ein Maximum an Absorption in einer höheren Terz. Dabei spielt der Aufbau und das verwendete akustisch wirksame Material eine wichtige Rolle.

In Tabelle 3.6 sind die wichtigsten Parameter der Setups noch einmal zusammengefasst.

Raum	Messung	Grundfläche	Volumen	KA in Längskante	KA in Höhenkante	KA Gesamt	Akustische Oberfläche
		m^2	m^3	lfm	lfm	lfm	m^2
Hallraum	KAG4	50	245	22,5	10	32,5	26,43
Klassenraum BRG Kepler	KAGT4	66	243	22	10,5	32,5	24,24
Hörsaal FSI1	KAG6	128	550	32	0	32	27,52
Hörsaal FSI2	KAGT3	62	257	28	2,5	30,5	25,44
Hörsaal i14	KAGT2	76	265	16,5	12,5	29	24,8

Tabelle 3.6: Spezifikation der Räume für die Optimierung.

Die Auswahl an Räumen, die im folgenden für die weiteren Untersuchungen herangezogen werden, zeigt ein weites Spektrum an Ausgangssituationen in Lehrräumen. Eine Klasse in einem Altbau, ein großer und ein kleiner akustisch unsanierter Hörsaal und ein sanierter Hörsaal mittlerer Größe. Der Hallraum stellt in dieser Auswahl als spezieller Messraum eine Ausnahme dar. Seine Wirkung auf das Ergebnis muss aufgrund seiner extrem langen Nachhallzeit hinterfragt werden, was in Kapitel 5.5.2 auch getan wird. Im Klassenraum des BRG Kepler wurden die höchsten Absorptionswerte aller 5 Räume erreicht. In der 100-Hz-Terz wird eine äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter von etwa $2 m^2$ erreicht. Auffallend ist, dass der Kantenabsorber im bereits akustisch sanierten Hörsaal i14 über das gesamte Frequenzspektrum, bezugnehmend auf die normierte äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter, offensichtlich besser wirkt, wobei absolut gesehen die Nachhallzeit in diesem Raum weniger stark verringert wird. Da die Nachhallzeit vorab kürzer war als bei den Vergleichsräumen, kann durch eine absolut gesehen kleinere Reduktion der Nachhallzeit eine größere äquivalente Absorptionsfläche erreicht werden.

Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel müssen bei den Auswertungen der Ergebnisse in den folgenden Kapiteln immer berücksichtigt werden.

4

Optimierung des „edge absorber calculation tool“ - *OPT1*

Im Zuge der Messungen mit dem Kantenabsorber in verschiedenen Räumen wurde eine Vielzahl an Datensätzen generiert, welche als Grundlage zur Berechnung der Eigenschaften des Kantenabsorbers dienen. In der Masterarbeit von Daniel Reisinger [Rei19] wird in [Kapitel 6] versucht, mittels eines selbstgenerierten *MATLAB*-Tools die Wirksamkeit des Kantenabsorbers abzuschätzen. Dazu wurden, basierend auf Geometrie und den damit einhergehenden Modeeigenschaften der untersuchten Räume (vorgestellt in Kapitel 3.4), verschiedene Gewichte definiert, die einen Absorptionsgrad α ermitteln sollten. Die Anwendung trägt den Namen *edge absorber calculation tool*, kurz *EACT*.⁷

Die Herangehensweise an dieses Tool gestaltete sich sehr pragmatisch. Die Konstanten (in [Rei19] Gewichtungsfaktoren genannt) α , β , γ , ax_weight und σ , welche die berechneten Eigenschaften des Raumes in Relation zueinander setzen, wurden so lange verändert, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis für alle Räume erreicht wurde, welches das gemessene Absorptionsverhalten des Kantenabsorbers in den einzelnen Räumen bestmöglich widerspiegelt. Diese Methode bietet natürlich nur eine grobe Abschätzung der Eigenschaften des Kantenabsorbers, da die Konstanten nur abgeschätzt wurden. Eine Automatisierung zur Bestimmung der Konstanten wird also benötigt, um dem Ergebnis mehr Aussagekraft zu verleihen. Durch Optimierungsalgorithmen soll versucht werden, die berechneten an die gemessenen Ergebnisse immer weiter anzupassen. Dazu werden die Konstanten dieses Gleichungssystems so lange verändert, bis die Differenz zwischen Messung und Berechnung möglichst klein wird.

Ziel dieser Optimierung ist es, wichtige Parameter und Raumeigenschaften für die Berechnung der Wirkungsweise des Kantenabsorbers zu erkennen und Erfahrungen zu sammeln, die bei der Erstellung eines neuen Optimierungstools (*OPT2*) hilfreich sein könnten. (siehe Kapitel 5)

4.1 Funktionsweise des *EACT1*

Für die Realisierung der Optimierung ist ein genaues Verständnis des *EACT1* notwendig. Daher wird im folgenden Abschnitt der Aufbau und die Funktionsweise des Tools genau erläutert. Prinzipiell versucht das Tool die Raumeigenschaften mit dem gemessenen, akustischen Verhalten des Kantenabsorbers über die bereits genannten Konstanten α , β , γ , ax_weight und σ in Verbindung zu bringen, um bei zukünftigen Planungen die Wirksamkeit vorab berechnen zu können.

Aus den Messergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass die Wirksamkeit des Kantenabsorbers zu sehr tiefen Frequenzen hin abnimmt. Dies ist auf die geometrische Dimensionierung des Kantenabsorbers zurückzuführen, wie in Kapitel 3.1.1 bereits erläutert wurde. Die in [Rei19] präsentierte Formel zur Berechnung einer unteren Grenzfrequenz ist auch im *EACT1* implementiert (Formel 4.1).

⁷ Da im Zuge dieser Arbeit ein neues Tool entwickelt werden soll (Kapitel 7) wird das *EACT* von Daniel Reisinger als *EACT1* bezeichnet und das folgende neue Tool als *EACT2*.

$$f_{uG,KA} = \frac{c}{d_K \cdot 8} \quad (4.1)$$

d_K ist die Länge der Diagonale des Kantenabsorberquerschnitts, welche für die untere Grenzfrequenz maßgeblich ist.

Weiters stellt sich die Frage, bis zu welcher Frequenz der Kantenabsorber als Modenbremse funktioniert, ehe das Modenbild so dicht wird, dass von geometrischer Raumakustik ausgegangen werden muss. Hier wird eine Formel verwendet, die nur vom Raumvolumen abhängt. [Wei08, S. 281]

$$f_s = \frac{1000}{\sqrt[3]{V}} \quad (4.2)$$

Diese obere Grenzfrequenz wird mit zunehmender Größe des Raumes immer kleiner.

Beide angeführten Frequenzen werden in den folgenden Kapiteln als Grenzwerte für die Optimierung herangezogen. Es soll dadurch abgeklärt werden, ob der Kantenabsorber in den angeführten Grenzen besser berechnet werden kann, da seine Wirkung in diesem Frequenzbereich gut auf die Modenstruktur zurückgeführt werden kann.

Das Tool beruht auf der Berechnung und Auswertung der Moden eines Raumes, da diese maßgeblich für die Funktionsweise des Kantenabsorbers sind. Da die Modenbilder eines Raumes mit steigender architektonischer Komplexität immer aufwendiger zu berechnen sind (FEM-Simulation), beschränkt sich das Tool auf einfache Räume mit rechteckigem Grundriss, ohne weitere Einbauten. Aus den Maßen für Länge, Breite und Höhe des Raumes können so die Modenfrequenzen berechnet werden. In der Arbeit von [Rei19] werden axiale Moden bis zur 9. Ordnung, sowie tangentielle Moden bis zur 5. Ordnung berechnet. Überlegungen lassen darauf schließen, dass schräge/oblique Moden eher von untergeordneter Bedeutung sind, da sie keine so stark ausgeprägten Schnellexima erzeugen. Deshalb wurden sie in die Berechnung nicht mit einbezogen.

Um eine Aussage über die Wirksamkeit des Kantenabsorbers treffen zu können, werden 2 Gewichtungsklassen festgelegt. Die erste wird als geometrisches Gewicht bezeichnet und setzt sich wiederum aus 2 verschiedenen Gewichten zusammen:

- Modenfrequenzzuordnungsgewicht: Dieses gewichtet die Moden anhand der Abmessung der Raumkante, an der sie auftreten. Axiale Moden werden außerdem mit der Konstante α ($= 3,5$), tangentielle mit den Konstanten β ($= 0,5$) und γ ($= 0,9$) gewichtet.
- Axiales Gewicht: Axiale Moden werden abhängig von ihrer Frequenz gewichtet. Durch die Wahl der Konstante $ax_weight = 1$ und der Division durch die Frequenz der Mode entsteht so eine umgekehrte Proportionalität zur Frequenz. Dieses Gewicht nimmt mit steigender Frequenz also ab.

Addiert man das Modenfrequenzzuordnungsgewicht und das axiale Gewicht jeder Mode, erhält man das gesamte geometrische Gewicht.

Moden, die im Frequenzspektrum eng nebeneinander liegen, werden durch die zweite Gewichtsklasse gewichtet, die als Frequenzgruppengewicht bezeichnet wird. Es wird von einer Mode aus gezählt, wie viele weitere Moden sich im Abstand eines Vierteltons befinden. Das dazu notwendige Vierteltonintervall wird für jedes Terzband, ausgehend von der Mittenfrequenz, berechnet.

Damit wird für jede einzelne Mode ermittelt, wie viele weitere Moden sich im Vierteltonintervall befinden.

Anschließend werden für beide Gewichtungsklassen (geometrisches Gewicht und Frequenzgruppengewicht) pro Terzband der Mittelwert aus allen Gewichten gebildet, wobei das Frequenzgruppengewicht noch zusätzlich mit der Konstante σ gewichtet wird. Danach werden beide Gewichtsklassen addiert.

Da die Modendichte und damit auch das Frequenzgruppengewicht mit zunehmender Frequenz stark steigt, wird ab der 160 Hz Terz eine Skalierung vorgenommen. Diese basiert auf Erkenntnissen aus der Analyse der Messdaten, wonach die Wirkung des Kantenabsorbers ab ca. 160 Hz kontinuierlich abnimmt. Es wird folglich eine Art Tiefpassfilter eingeführt, der dem Anstieg der Gewichte mit steigender Frequenz entgegenwirkt.

Im Flowchart in Abbildung 4.1 werden die Berechnungsschritte für das geometrische Gewicht zum besseren Verständnis noch einmal grafisch dargestellt.



Abbildung 4.1: Geometrisches Gewicht.

Auch die Berechnung des Frequenzgruppengewichtes wird in Abbildung 4.2 grafisch verdeutlicht. Beide Gewichte addiert ergeben am Ende das gesamte Gewicht eines Terzbandes.

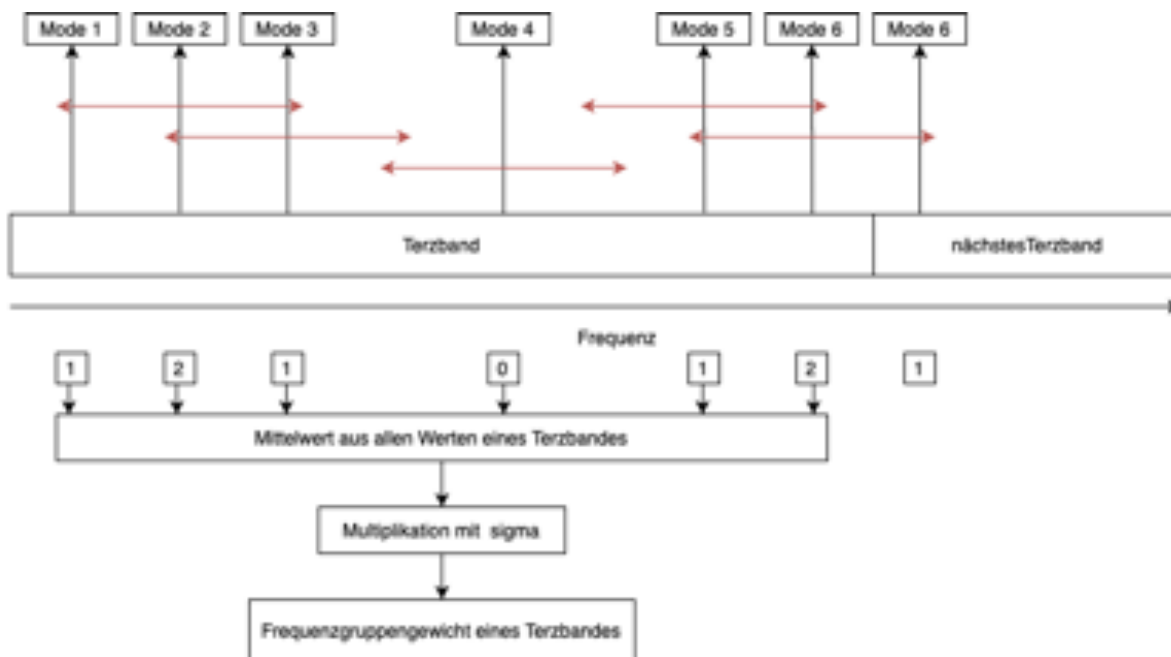


Abbildung 4.2: Frequenzgruppengewicht.

Mit dem genauen Verständnis für die Funktionsweise des *EACT1* kann nun eine Optimierungsumgebung (*OPT1*) geschaffen werden, die durch Veränderung der Gewichte einen Zusammenhang zwischen akustischen Eigenschaften des Raumes und gemessenen Absorptionswerten herstellt.

4.2 Grundlagen der verwendeten Optimierung

Eine Optimierungsaufgabe ist dazu gedacht, für eine Problemstellung durch minimalen Aufwand den maximalen Output zu errechnen. So werden in der Industrie zahlreiche Prozesse und Vorgänge optimiert, um möglichst wirtschaftlich zu arbeiten. Auch in den Naturwissenschaften finden sich zahlreiche Anwendungen, für welche ein Minimum oder Maximum gefunden werden soll. [Ben10]

Die Herausforderung in dieser Arbeit besteht darin, aus errechneten Werten durch Adaptierung von Konstanten ein Ergebnis zu erhalten, das einem gemessenen Wert möglichst nahe kommt. Diese spezielle Form der Optimierung wird Ausgleichsrechnung genannt. Die Ausgleichsrechnung wird prinzipiell der Approximationstheorie zugeordnet, steht aber in enger Beziehung zur Optimierungstheorie. [Ben03]

Die Fehler-Approximation wird durch die Funktion der kleinsten Quadrate realisiert. Dabei wird der Fehler, der zwischen Berechnung und Messung besteht, quadriert und anschließend minimiert. Die Minimierung erfolgt durch die Adaption der Konstanten, welche so lange geändert werden, bis der Fehler möglichst klein wird.

Die eigentliche Optimierung übernimmt der *solve*-Algorithmus, der in *Matlab* implementiert ist und *fmincon* zu Lösung des Problems verwendet [Onl20e]. Der *solve*-Algorithmus löst das vorgegebene Gleichungssystem anhand der Konstanten. *fmincon* gibt dabei vor, dass der Optimie-

rungoutput zu minimieren ist, so dass ein möglichst geringer Fehler übrig bleibt. Dazu werden die Konstanten bei jedem Optimierungsdurchgang adaptiert.

Wichtige Begriffe im Zusammenhang mit der Optimierung:

- **constraints:** Als *Constraints* werden die Beschränkungen für die Optimierung bezeichnet.
- **resnorm:** Das Bestimmtheitsmaß ist eine Kennzahl zur Beurteilung der Anpassungsgüte einer Regression. Es gibt an, wie gut die Messwerte zu einem Modell passen.⁸

$$\text{resnorm} = (C \cdot x - d)^2 \quad (4.3)$$

(Die Matrix C beinhaltet die Eingangswerte (Raumeigenschaften), die mit dem Optimierungs-Vektor x (Konstanten) multipliziert werden, um das gewünschte Ergebnis d (Gemessene Absorptionswerte) zu erhalten.)

- **residual:** Das *Residuum* ist die Abweichung vom gewünschten Ergebnis.⁹

$$\text{residual} = d - C \cdot x \quad (4.4)$$

4.3 Optimierung des EACT1 - OPT1

Ziel der Optimierung *OPT1* ist es, die Konstanten so zu berechnen, dass die Multiplikation mit den errechneten Eigenschaften des Raumes zu den Ergebnissen der Messung führt. Die Konstanten (α , β , γ , ax_weight und σ) sollen also so lange optimiert werden, bis das errechnete Gewicht aus Kapitel 4.1 mit dem Ergebnis der Messung möglichst exakt übereinstimmt (vgl. Abbildung 4.3).



Abbildung 4.3: Schema der Optimierung.

⁸ weitere Details dazu unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Bestimmtheitsma\T1\ss](https://de.wikipedia.org/wiki/Bestimmtheitsma%5BT1%5Dss)

⁹ weitere Details dazu unter [https://de.wikipedia.org/wiki/Residuum_\(numerische_Mathematik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Residuum_(numerische_Mathematik))

Als Messergebnis wird die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber verwendet. (siehe Kapitel 3.2)

Zu Beginn wurden einige Adaptierungen bzw. Verbesserungen am Tool vorgenommen. In Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass die Berechnung des geometrischen Gewichtes der tangentialen Moden immer von β und γ abhängt. Es erfolgt immer eine Multiplikation mit β und eine Division durch γ . Daher wird eine neue Konstante β_neu eingeführt, welche β und γ vereint und ersetzt.

$$\beta_neu = \frac{\beta}{\gamma} = \frac{0,5}{0,9} = 0,5556 \quad (4.5)$$

Durch diese Zusammenfassung von 2 Konstanten verringert sich die Anzahl auf 4. Obwohl die Konstante β_neu später durch den Algorithmus optimiert werden soll, ist ihr numerischer Wert von Interesse, da dieser als Startwert der Optimierung dient.

Das Tool berechnet immer alle Gewichte vom 20 Hz- bis zum 315 Hz-Terzband. Bei den Messungen war es aber nur möglich bis zur 31,5 Hz-Terz ein Ergebnis zu generieren. Daher werden die Berechnungen zu Beginn immer auf diese unterste Grenze beschränkt. Es ist aber generell fraglich, wie die speziellen Eigenschaften des Kantenabsorbers, vor allem im tieffrequenten Bereich, durch nur vier Konstanten beschrieben werden können, die für alle Terzbänder unverändert bleiben. Außerdem stellt sich die Frage, wie gut die Messergebnisse in den tiefen Terzbändern sind, da sich die Messung der Nachhallzeit in diesem Bereich als schwierig erweist. Der Einfluss der Wirkung des Kantenabsorbers in Bereichen mit hoher Modendichte auf die Optimierung ist eine Frage, die genauer untersucht werden sollte. Die berechneten Grenzfrequenzen beschränken daher die Berechnung auf bestimmte Terzbänder. Wie in 4.1 beschrieben, wird die untere Grenzfrequenz von den Abmessungen des Kantenabsorbers und die obere vom Volumen des jeweiligen Raumes bestimmt. Diese Überlegungen haben dazu geführt, die Optimierung mit verschiedenen Setups durchzuführen.

Die Überlegung, dass 4 gleichbleibende Konstanten die Eigenschaften des Kantenabsorbers über mehrere Terzbänder hinweg nur schlecht repräsentieren können, führt zu einer ersten Iterationsstufe der Optimierung. Es wurde der Ablauf so konzipiert, dass zu Beginn ein Satz Konstanten für alle Terzbänder berechnet wurde und in einem zweiten Schritt die Konstanten für jedes Terzband neu optimiert wurden. Der Rechenaufwand für das zweite Setup stieg stark an, da für jedes Terzband eine Optimierung durchgeführt wurde.

Wie weit die obere Grenzfrequenz eine Auswirkung auf die Qualität der Konstanten hat, wurde durch Teilung der beiden Setups in jeweils 2 neue Konfigurationen untersucht. Die Berechnung wurde einmal von der oberen Grenzfrequenz beschränkt und einmal nicht. So wurden insgesamt 4 Setups für die Optimierung konzipiert. Hier sei jedoch erwähnt, dass die Beschränkung der Berechnung der oberen Grenzfrequenz nur für die Optimierung über alle Terzbänder einen Unterschied darstellt. Bei der Optimierung pro Terzband wird nur die Anzahl an Optimierungsdurchläufen weniger, das Ergebnis der berechneten Terzbänder verändert sich aber nicht. Dennoch ist von Interesse, wie sich die Terzbänder oberhalb der Grenzfrequenz verhalten. Weiters stellte sich auch die Frage, wie sich die Terzbänder unter der unteren Grenzfrequenz verhalten. Daher wurde eine Optimierung für alle Terzbänder bzw. eine ab der unteren Grenzfrequenz erstellt.

Durch eine Erhöhung der Ordnung für die Berechnung der Moden wurde eine daraus resultierende Wirkung auf das Ergebnis untersucht. Die Ordnung wurde von 9 auf 20 für axiale und von 5 auf 10 für tangentielle Moden erhöht. Dadurch fließen mehr Moden in die Berechnung ein und verändern damit das Ergebnis der Optimierung. Insgesamt entstehen 16 verschiedene Optimierungsssetups, welche in Abbildung 4.4 genau dargestellt sind.

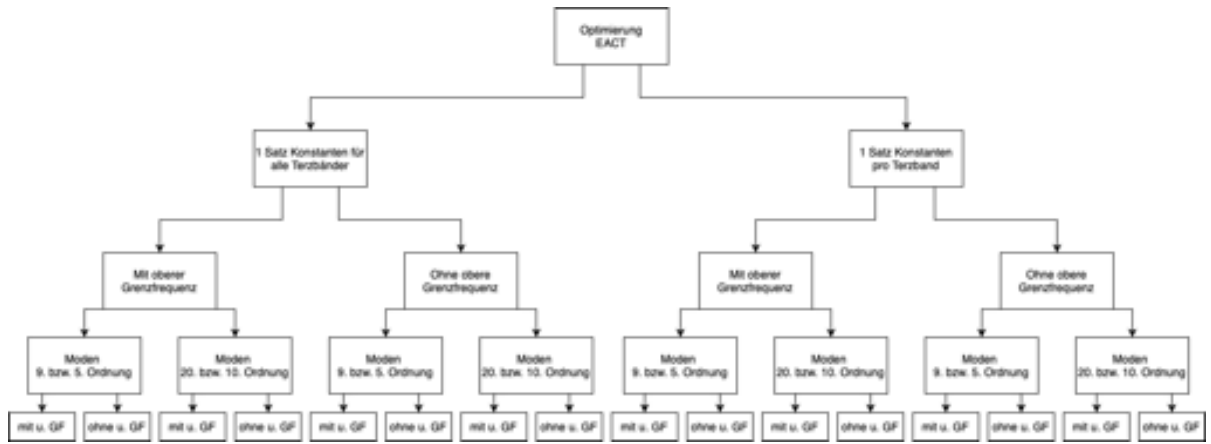


Abbildung 4.4: Aufteilung der verschiedenen Optimierungssetups.

Die Realisierung der *OPT1* erfolgt mit *MATLAB*, mit welchem auch schon das *EACT1* erstellt wurde. Ziel ist es nun, mittels eines Algorithmus die eben errechnete Differenz zwischen Messwert und berechnetem Wert möglichst klein werden zu lassen. Ist dies der Fall, sind die berechneten Gewichte und die gemessene äquivalente Absorptionfläche pro Laufmeter gleich groß. Dies wird durch die Änderung der Konstanten erreicht. Es wurde um das bestehende *EACT1* eine neue Struktur angelegt, um die Optimierung realisieren zu können. Dies beinhaltet den Aufruf aller Daten, die Optimierung und die anschließende Speicherung der Ergebnisse.

Für die eigentliche Optimierung muss in *MATLAB* ein Optimierungsproblem definiert werden (Befehl *optimproblem*). Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Differenz zwischen dem berechneten und gemessenen Wert. Daher wird diese Differenz als „*Objective*“ definiert. Die „*Objective function*“ ist ein Scalar. Des weiteren müssen nun noch ein oder mehrere *Constraints*, also Beschränkungen, angegeben werden. Die Beschränkungen beziehen sich wiederum auf die errechnete Differenz. Ziel der Optimierung soll es sein, dass die Differenz kleiner als ein bestimmter Wert wird.

Die *OPT1* soll nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate funktionieren. In Formel 4.6 ist die Berechnung des „Mean-Squared-Error“ dargestellt.

$$MSE = \frac{1}{i} \cdot \sum_{i=1}^i (t(i) - a(i))^2 \quad (4.6)$$

i stellt die Anzahl der Datenpunkte dar, $t(i)$ den gemessenen Wert und $a(i)$ den berechneten. Die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Wert muss also quadriert und gemittelt werden, ehe sie als *Objective* für die Lösung der Optimierung verwendet wird. Bei der Optimierung über alle Terzbänder wird pro Raum 1 Differenz errechnet und die Differenzen der Räume gemittelt. Werden die Konstanten pro Terzband berechnet, so erfolgt die Mittelung über die Differenzen der Räume für das zu optimierende Terzband. Die *Objective function* für die Optimierung pro Terzband beinhaltet also die quadrierte, gemittelte Differenz aus 5 Räumen ($i = 5$). Bei der Optimierung über alle Terzbänder erfolgt die Mittelung zusätzlich über alle Terzbänder. So wird bei der Optimierung über alle Terzbänder von der 31,5 *Hz*-Terz bis zur 315 *Hz*-Terz eine Mittelung aus 55 quadrierten Differenzen errechnet und der Optimierung zugeführt ($i = 55$).

Die Werte der Konstanten sollen einen gewissen Bereich nicht überschreiten, weshalb Grenzen definiert werden. Negative Ergebnisse sollen vermieden werden, weshalb die untere Grenze für alle Konstanten bei 0 liegt. Die oberen Grenzen werden individuell gesetzt:

- $\alpha = 5$
- $\beta_{\text{neu}} = 3$
- $\text{ax_weight} = 2$
- $\sigma = 1$

Es wird ein Startwert für jede Konstante gewählt, von welchem aus die Optimierung beginnt. Diese entsprechen den Ergebnissen aus der Arbeit von [Rei19]:

- $\alpha = 3.5$
- $\beta_{\text{neu}} = 0.5556$
- $\text{ax_weight} = 1$
- $\sigma = 0.2$

Die Beschränkung der Konstanten und ihr Startwert wurden auf Grund der Tatsache gewählt, dass die Ergebnisse vom Original-Tool verbessert werden sollten. Daher sollten sich die Werte der Konstanten in der Größenordnung der ursprünglichen Ergebnisse bewegen. Ob dies aber auch zu einem guten Ergebnis führt, wurde mit einer zweiten Runde an Optimierungen überprüft, bei welcher die Optimierungen ohne Beschränkung bzw. sehr großen Grenzwerten für die Konstanten durchgeführt wurden. Konkret wurden die Grenzwerte für alle Konstanten auf 100 erhöht.

Die Optimierung wird mit dem Befehl *solve* gestartet und versucht, das zuvor definierte Problem zu lösen [Onl20e]. Da dieses Problem als *optimproblem* definiert wurde, wird es von *solve* als Optimierungsproblem erkannt, dessen Ziel die Minimierung der Differenz ist [Onl20d]. Dabei kommt die Funktion *fmincon* zum Einsatz, welche per Definition immer das Minimum eines Problems findet. Dieser Algorithmus kann prinzipiell auch nichtlineare Funktionen lösen, weshalb er zur Gruppe der „nonlinear programming solver“ gehört. In diesem konkreten Fall liegen aber nur lineare Funktionen vor bzw. wird nur ein Skalar optimiert. Der Algorithmus versucht nur durch die Veränderung der Konstanten die Differenz zu minimieren. Die genauen Berechnungsschritte, die vom *EACT1* durchgeführt werden, sind in diesem Fall für die Optimierung nicht von Belangen. Der Algorithmus verwendet nur die berechnete Differenz/Fehlabstschätzung zur Minimierung des Fehlers [Onl20a].

4.4 Ergebnis der Optimierung des EACT1

Da eine Darstellung aller Ergebnisse in dieser Arbeit zu ausführlich geworden wäre, finden sich diese in einem separaten Dokument, das als Anhang zu dieser Arbeit in digitaler Form vorliegt. In diesem digitalen Anhang sind die Ergebnisse graphisch und numerisch für alle durchgeführten Optimierungen und Räume dargestellt. Viele der im folgenden beschriebenen Erkenntnisse beruhen auf der Analyse der Grafiken im digitalen Anhang und können nur im Zusammenhang mit diesen nachvollzogen werden. Die Auswertung der Optimierungsergebnisse erfolgt durch die neue Berechnung der Gewichte mit den zuvor optimierten Konstanten des *EACT1*. Durch die Gegenüberstellung mit der gemessenen Äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter wird so die Abweichung vom Sollwert erkennbar und der Optimierungsfehler deutlich.

4.4.1 Optimierung des EACT1 mit Beschränkung der Konstanten

Zu Beginn sei nochmals erwähnt, dass das Ziel dieser ersten Optimierung (*OPT1*) nicht unbedingt das Erreichen perfekter Ergebnisse war, sondern es eher darum ging, Muster zu erkennen und Erkenntnisse zu gewinnen, die für die Erstellung einer neuen Optimierungsumgebung (*OPT2*) dienlich sind. Diese Tatsache wird sofort deutlich, wenn man die Ergebnisse auswertet. Dazu werden die Differenz zwischen berechnetem Gewicht und gemessener äquivalenter Absorptionsfläche pro Laufmeter für jedes Terzband und jeden Raum einer Optimierung berechnet. Diese Werte werden anschließend statistisch ausgewertet, wobei nur der Betrag der Differenz verwendet wird, um eine rein positive statistische Auswertung zu erhalten. Dadurch ist die Vergleichbarkeit besser gegeben, jedoch müssen die einzelnen Grafiken im digitalen Anhang analysiert werden, um zu erkennen, ob die *OPT1* die gemessenen Ergebnisse eher unter- oder überschätzt. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Zur Benennung der Optimierungen in den folgenden Grafiken sei angeführt:

- *1W* = 1 Satz Konstanten für alle Terzbänder. *WpTB* = Berechnung der Konstanten für jedes Terzband.
- *mGF* bzw. *oGF*: Mit oder ohne obere Grenzfrequenz. Mit = Berechnung bis zur GF. Ohne = bis 315 Hz.
- *9 und 5* bzw. *20 und 10*: Ordnungen der Modenberechnung.
- *0* bzw. *0.4*: Untere Grenzfrequenz. Bei 0 = Berechnung bis 31,5 Hz. Bei 0,4 wird die untere Grenzfrequenz mit 0,4 m Seitenlänge des Kantenabsorbers berechnet und zur Optimierung werden nur die darüberliegenden Terzen herangezogen. (80-Hz-Terz)

Es sei erwähnt, dass die Anzahl der Terzbänder, die in dieser Auswertung Beachtung finden, stark variiert. Für die Optimierungen ohne obere Grenzfrequenz (Benennung mit *oGF*) und ohne Begrenzung durch eine untere Terzfrequenz¹⁰ werden so von der 31,5-Hz-Terzband bis zum 315-Hz-Terzband insgesamt 11 Terzbänder berechnet. Bei 5 Räumen liegen der statistischen Auswertung damit 55 Werte zu Grunde. Im umgekehrten Extremfall mit oberer (*oGF*) und unterer Grenzfrequenz (0.4 am Ende der Bezeichnung der Optimierung) werden nur 3 (im FSI2 auf Grund der Größe nur 2) Terzbänder zur Optimierung verwendet. Daher fließen auch nur 14 Ergebnisse in die Auswertung ein.

Die einzelnen Boxplots zeigen den Median (roter Strich), die 25ste bzw. 75ste Perzentile (untere und obere Grenze der Box) und den kleinsten bzw. größten Wert an (strichlierte Linie). Ausreißer werden als rote Kreuze dargestellt. Es lassen sich einige Schlüsse aus dieser Grafik ziehen:

- Die besten Ergebnisse werden bei Optimierungen pro Terzband ohne untere Grenzfrequenz erreicht.
- Untere Grenzfrequenz: Bei Optimierungen, die einen Mittelwert aus allen Terzbändern und Räumen bilden, wirkt sich eine Begrenzung der Terzbänder durch die untere Grenzfrequenz positiv aus. (Weniger Terzbänder führen zu einem besseren Ergebnis.) Bei Optimierungen pro Terzband ist insgesamt gesehen eine Verschlechterung bei Verwendung der Grenzfrequenz festzustellen. Man erkennt daraus, dass die Terzbänder unterhalb der

¹⁰ Die untere Grenzfrequenz des Kantenabsorbers wird durch die Dimension des Bauteils bestimmt. Durch die Angabe der Dimension (0.4 m in dieser Arbeit) wird eine untere Grenzfrequenz berechnet und die Optimierung nur oberhalb dieser durchgeführt. Wird keine Dimension angegeben wird ab 31,5-Hz-Terz optimiert. Ersichtlich ist dies in der Grafik am Ende der Optimierungsbezeichnungen. Endet diese mit 0 wurde keine untere Grenzfrequenz berechnet, andernfalls schon.

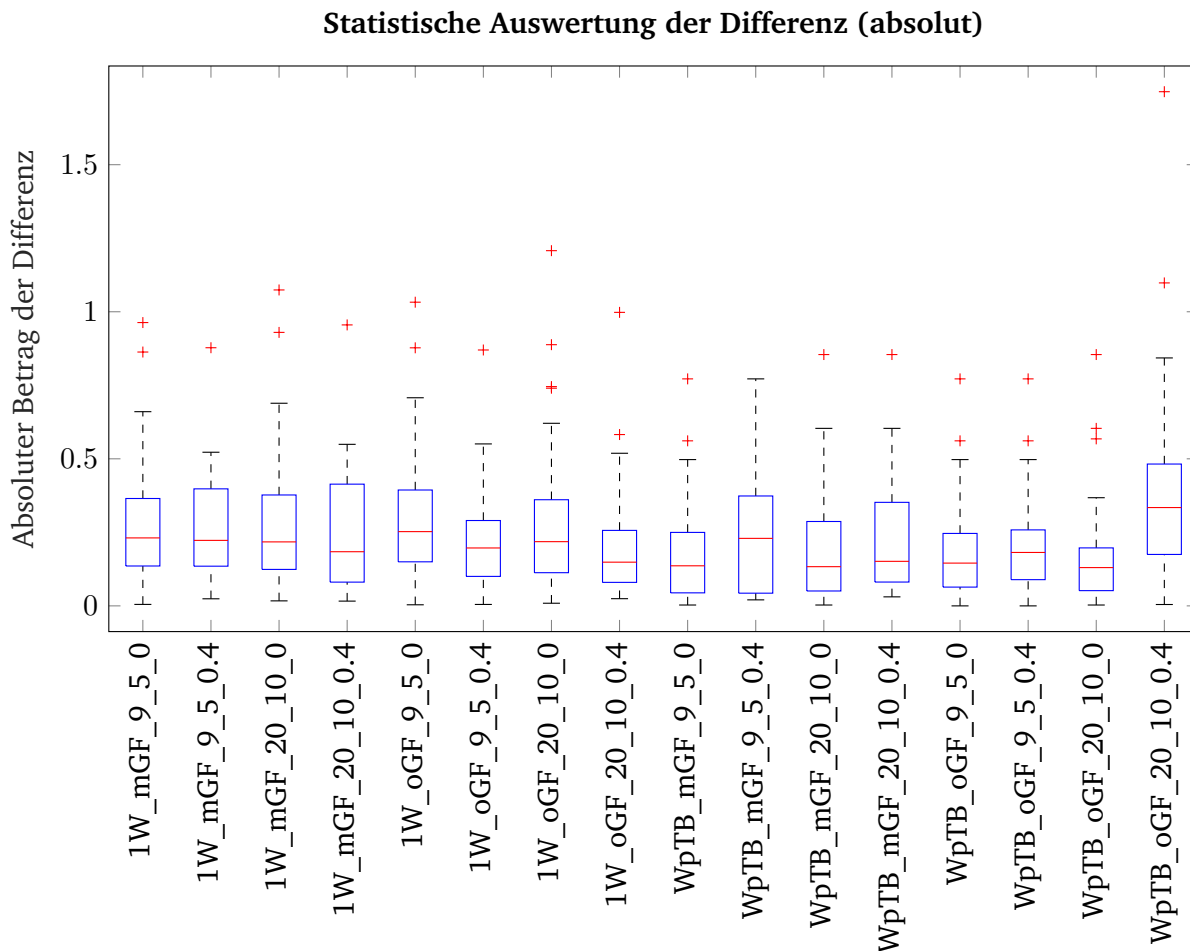


Abbildung 4.5: Statistische Auswertung der Differenz der Optimierungen des EACT1 mit Beschränkung der Konstanten.

Grenzfrequenz gut einzeln optimiert werden können. Die Abweichungen zur Messung sind kleiner als bei höher liegenden Terzbändern. Bei einer Optimierung über alle Frequenzen verhalten sich die tiefer liegenden Terzen umgekehrt. Der Fehler ist größer als bei den über der Grenzfrequenz liegenden Terzen. Sie wirken sich damit negativ auf das Ergebnis der Optimierung aus.

- Obere Grenzfrequenz: Die obere Grenzfrequenz wirkt sich negativ auf das Ergebnis aus, sowohl bei Optimierungen über alle Terzen, als auch bei Optimierungen pro Terzband. In diesem Frequenzbereich über der oberen Grenzfrequenz beginnt der Kantenabsorber seine Eigenschaft als Modenbremse zu verlieren. Er wirkt immer stärker als poröser Absorber. Die Absorptionswirkung in den verschiedenen Räumen wird mit zunehmender Frequenz sehr ähnlich, die Optimierung wird dadurch einfacher.
- Die Erhöhung der Modenordnung wirkt sich unterschiedlich aus. Der Median der Auswertung wird zumeist gesenkt, während Ausreiser und Extremwerte eher ansteigen.

Die statistische Auswertung für den absoluten Fehler ist allerdings nur bedingt sinnvoll, da sich die Messwerte der äquivalenten Absorptionsfläche stark verändern und die Differenz auf das Messergebnis bezogen werden sollte. Daher werden die Ergebnisse normiert dargestellt, um sie besser vergleichen zu können. In Abbildung 4.6 findet sich daher die statistische Auswertung des prozentuellen Fehlers. In den folgenden Auswertungen wird auch nur mehr die normierte, prozentuelle Fehlerquote dargestellt.

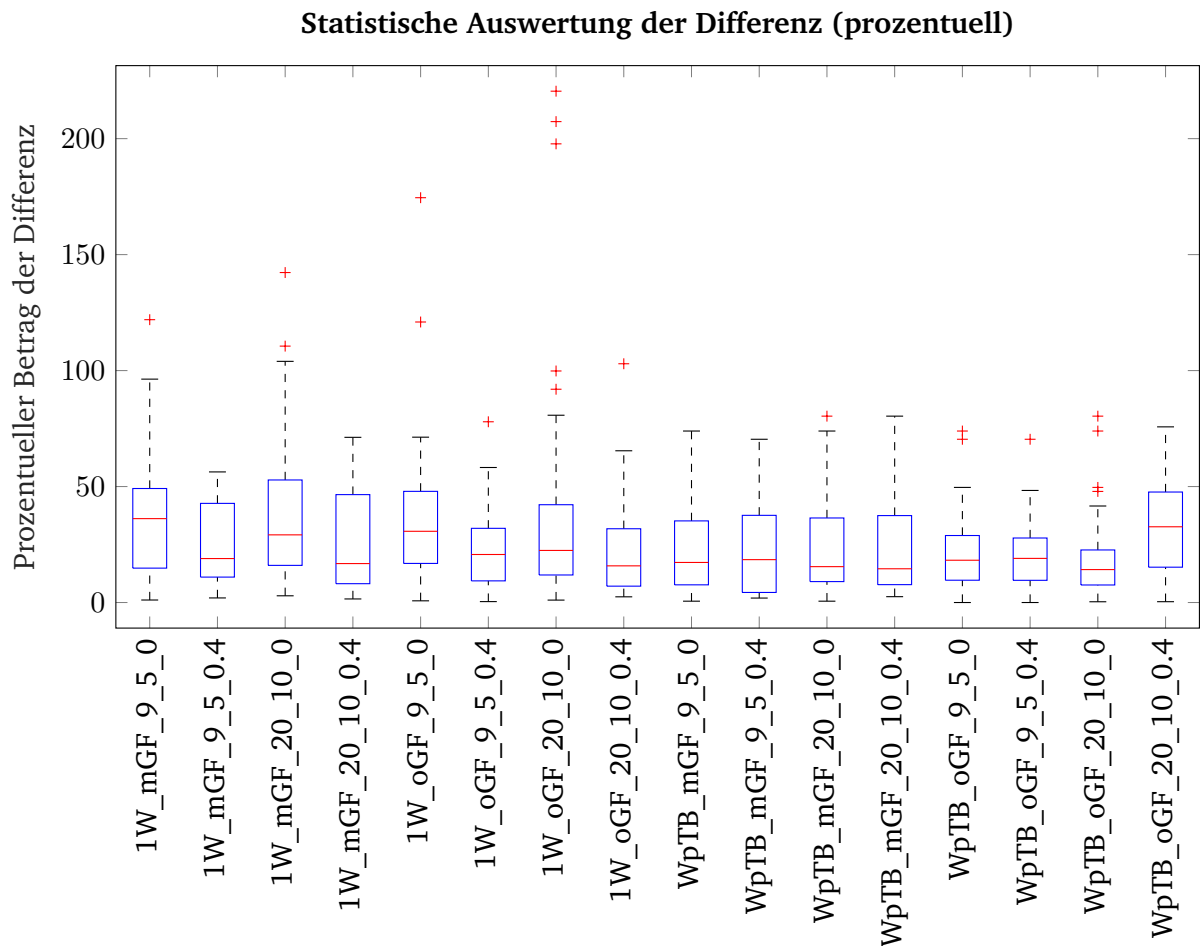


Abbildung 4.6: Statistische Auswertung der Differenz der Optimierungen des EACT1 mit Beschränkung der Konstanten normiert in Prozent.

Diese Auswertung zeigt, dass sich der zuvor erkannte Effekt der guten Optimierbarkeit der tiefen Frequenzen bei Optimierung pro Terzband stark verringert, während bei der Auswertung der absoluten Ergebnisse (Abb. 4.5) die Optimierungen pro Terzband bis 31,5 Hz (Optimierungen mit 0 am Ende des Namens) deutlich bessere Ergebnisse liefert. Dieser Vorteil wird durch die prozentuelle Auswertung nahezu ausgeglichen. Der Wert der äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter ist in den tiefen Frequenzbereichen unterhalb der Grenzfrequenz wesentlich geringer, als im Bereich zwischen den Grenzfrequenzen, in welchem der Kantenabsorber sein Maximum erreicht. Dementsprechend kleiner ist der Fehler absolut gesehen und wird erst nach der Normierung deutlicher. Die Begrenzung der Optimierung durch die untere Grenzfrequenz ist bei einer Optimierung pro Terzband also nicht von Nöten, da die Terzen darunter gut optimiert werden können. Weitere Erkenntnisse der Auswertung in absoluten Zahlen bleiben aber auch nach der Normierung aufrecht.

Aus Abbildung 4.6 ist zu erkennen, dass die Optimierungen pro Terzband ohne obere Grenzfrequenz (*WpTB_oGF*) die besten Ergebnisse liefern. Der Median der Optimierungen mit oberer Grenzfrequenz ist ähnlich gut, aber die Streuung ist bei diesen Optimierungen größer (*WpTB_mGF*). Auffallend gut verhalten sich auch die Optimierungen über alle Terzbänder mit unterer aber ohne oberer Grenzfrequenz (*1W_oGF_9_5_0.4* und *1W_oGF_20_10_0.4*). Festzuhalten ist, dass Optimierungen für jedes Terzband bessere Ergebnisse liefern und dass die Begrenzungen bei diesen Optimierungen eine untergeordnete Rolle spielen. Jedoch ist ganz klar zu erwähnen, dass der Fehler zwischen 20 % und 50 % betragen kann. Weiters stellt die Opti-

mierung $WpTB_oGF_20_10_0.4$ einen Ausreißer in der Reihe der Optimierungen dar, der auf die statistische Auswertung zurückzuführen ist.

Die vielleicht wichtigste Betrachtung erfolgte bisher noch nicht: das Verhalten der Konstanten. Hierbei sei wieder auf den digitalen Anhang verwiesen, in dem die optimierten Konstanten für alle Optimierungsansätze dargestellt sind. Die optimierten Werte der Konstanten variieren mitunter sehr deutlich, wie in Tabelle 4.1 bereits zu sehen, im digitalen Anhang aber noch viel deutlicher ersichtlich wird.

Optimierung	Frequenz	alpha	beta_neu	ax_weight	sigma
1W_oGF_9_5_0.4	-	3.0099	1.6676	1.9871	0.023779
1W_oGF_20_10_0.4	-	4.5666	1.3388	1.9998	2.6905e-08
WpTB_oGF_9_5_0	31.5	4.716902e-05	0.2816109	1.999621	0.5001767
	40	0.9889463	0.4907358	1.999237	0.0004159829
	50	1.648047	0.7552681	0.01986122	3.066083e-05
	63	1.630744	1.237972	1.998622	1.088214e-05
	80	0.5640721	1.908275	1.999647	1.837801e-07
	100	1.061749e-05	2.246323	0.0006008942	3.094218e-06
	125	4.999978	1.241198	1.999675	0.05349437
	160	7.264441e-05	2.313072	0.01007751	3.078894e-06
	200	1.168579	1.762925	1.98781	0.02988382
	250	3.125136	1.502121	1.996748	0.07743093
	315	3.284692	1.606059	1.997112	0.5295484
WpTB_oGF_20_10_0	31.5	1.790266e-05	0.2816117	1.999889	0.4479862
	40	0.988967	0.490836	1.999962	8.9772e-05
	50	1.648044	0.7552682	0.01992536	3.066087e-05
	63	1.630744	1.237972	1.998622	1.088211e-05
	80	4.999927	1.243765	1.998366	2.408822e-06
	100	2.046003e-05	2.043139	1.999713	1.280247e-07
	125	2.396438	1.234193	0.05999899	0.06701744
	160	4.999192	1.537919	0.01560961	2.369671e-06
	200	3.121987	1.366577	1.90469	3.029945e-06
	250	4.999788	1.16897	1.984339	1.794524e-06
	315	0.0006321354	1.298089	0.0761956	9.265672e-06

Tabelle 4.1: Die optimierten Konstanten der besten Optimierungen des EACT1.

Es lassen sich daher keine neuen Erkenntnisse ziehen, die das Verhalten der Konstanten einschränken oder spezifizieren würden. Innerhalb der gegebenen Grenzen spannen die einzelnen Konstanten einen großen Wertebereich auf. Deutlich erkennbar an der Konstante α , die für die 4 Optimierungen in 4.1 Werte zwischen $1.06 \cdot 10^{-5}$ und 5 annimmt. Ähnlich verhalten sich auch alle anderen Konstanten. Daher liegt es nahe, die Optimierungen ein weiteres Mal ohne die Beschränkung der Konstanten vorzunehmen.

4.4.2 Optimierung des EACT1 ohne Beschränkung der Konstanten

Die Beschränkung der Konstanten wurde für alle auf 100 geändert, was de facto der Entfernung der Beschränkungen entspricht. Die untere Grenze von 0 blieb aber bestehen, um negative Werte zu vermeiden.

In Abbildung 4.7 sind die Ergebnisse der erneut durchgeführten Optimierungen statistisch ausgewertet.

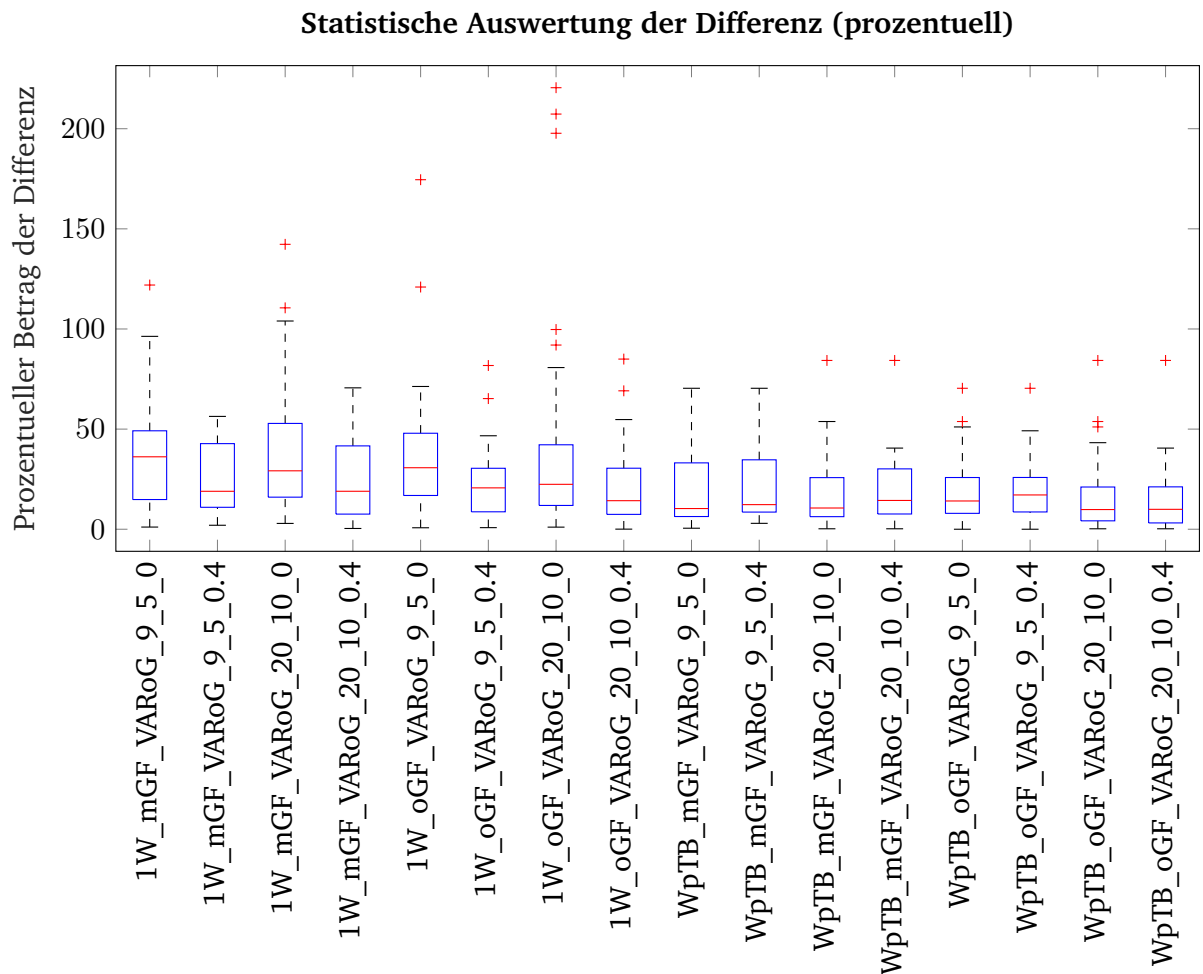


Abbildung 4.7: Statistische Auswertung der Differenz der Optimierungen des EACT1 ohne Beschränkung der Konstanten normiert in Prozent.

Der Wegfall der Beschränkungen bringt tendenziell eine leichte Verbesserung der Ergebnisse, jedoch ist diese so gering, dass sie anhand der Grafik 4.7 im Vergleich zu 4.6 kaum auszumachen ist.

Auffallend sind jedoch die starken Veränderungen der Konstanten. Diese nehmen sogar den zuvor als äußerst hoch erachteten Extremwert von 100 an (vgl. `ax_weight` in Tabelle 4.2). Starke Schwankung und teilweise sehr große Werte der Konstanten lassen die Optimierung ohne (bzw. mit sehr hoher) Beschränkung als unpraktikabel erscheinen. Es macht folglich durchaus Sinn, für die *OPT1* den Bereich der Konstanten, wie in Kapitel 4.4.1, klar einzugrenzen.

Optimierung	Frequenz	alpha	beta_neu	ax_weight	sigma
1W_oGF_9_5_0.4	-	2.0122	1.506	66.8716	0.04819
1W_oGF_20_10_0.4	-	1.5731	1.4286	99.9976	1.849e-07
WpTB_oGF_9_5_0	31.5	5.1849e-06	0.2570099	3.546432	2.576917
	40	6.441912e-05	0.4573578	20.31357	4.078947e-06
	50	1.647828	0.7552668	0.02411029	3.066308e-05
	63	7.570282e-05	1.221308	50.16776	1.093194e-05
	80	0.1729087	1.52893	94.86882	2.790996e-06
	100	4.246881e-05	2.246283	0.002404358	1.237636e-05
	125	8.428197	8.901412e-06	99.99953	0.1995965
	160	1.816351e-05	2.313106	0.002533034	7.697466e-07
	200	0.001685632	1.703783	99.99732	0.02840814
	250	1.739189	1.362178	99.99613	0.0913253
	315	1.755437	1.422261	99.9949	0.5741828
WpTB_oGF_20_10_0	31.5	5.18497e-06	0.2570099	3.546429	2.607211
	40	6.45465e-05	0.4573572	20.31366	4.060557e-06
	50	1.647813	0.7552703	0.02414223	3.066317e-05
	63	7.57034e-05	1.221307	50.16786	1.093187e-05
	80	9.857108	0.1748319	99.99927	3.699144e-07
	100	5.616916e-05	1.785092	99.99779	8.141504e-07
	125	2.396677	1.234158	0.06283875	0.06701898
	160	18.17831	0.6410204	0.00254442	3.773977e-07
	200	2.150245	1.347647	99.97208	5.768516e-07
	250	15.51834	0.3082777	99.91812	2.237044e-06
	315	0.0006322123	1.298087	0.07931486	9.26515e-06

Tabelle 4.2: Die optimierten Konstanten der besten Optimierungen des EACT1 ohne Beschränkung der Konstanten.

4.4.3 Erkenntnisse aus OPT1

Die Ergebnisse der Optimierung des EACT1 sollten dazu dienen, Erkenntnisse für die Erstellung einer neuen Optimierungsumgebung (OPT2) zu gewinnen. So ist festzuhalten, dass eine Optimierung pro Terzband sicher ratsamer ist als die Mittelung über alle Terzen. Die Ordnung der Moden sollte möglichst hoch gewählt werden, da durch eine genauere Auswertung der Modenstruktur ein besseres Ergebnis erzielt werden kann. Nachdem die Grenzfrequenzen auf die Optimierung pro Terzband keinen direkten Einfluss haben, kann eine Optimierung über alle Terzbänder vorgenommen werden. Jedoch ist bei der Auswertung darauf zu achten, in welchen Frequenzbereichen die Fehler auftreten. Der Fokus sollte auf dem Bereich zwischen den Grenzfrequenzen liegen, da in in diesem der Kantenabsorber sein Wirkungsmaximum aufweist.

Das EACT1 wurde nicht für eine Optimierung konzipiert, weshalb die Struktur des Tools nur unzufriedenstellend für den Optimierungsvorgang adaptiert werden konnte. Im folgenden Kapitel soll mit OPT2 eine Umgebung geschaffen werden, die auf den Optimierungsvorgang abgestimmt ist und die Erkenntnisse aus diesem Kapitel beinhaltet.

5

Optimierung mit neuen Features - *OPT2*

Die Ergebnisse aus *OPT1* liefern erste Erkenntnisse für die Konzeption einer weiteren, neu strukturierten Optimierung. Diese soll, anders als das *EACT1*, gänzlich auf den Optimierungsprozess ausgelegt werden, in der Art und Weise der Berechnung dem *EACT1* aber ähneln.

Wünschenswert wäre es ein Tool zu gestalten, das Konstanten errechnet, mit denen die Eigenschaften des Kantenabsorbers vorab berechnet werden können. Dazu muss das Modenbild eines Raumes analysiert und in Verbindung mit den gemessenen Absorptionswerten des Kantenabsorbers gebracht werden. Die gemessenen Daten bleiben dieselben wie schon zuvor verwendet. Auch die folgende Berechnung bleibt von der Methode her unverändert. Die Raummoden werden am Modell einfacher Quaderräume errechnet, die den Maßen der realen Räume entsprechen. Da einige Berechnungsschritte unverändert bleiben, können Code-Teile des *EACT1* übernommen werden.

Die Ergebnisse der Optimierung hängen sehr stark von der Qualität der Eingangsparameter ab. Diese werden in einem ersten Schritt definiert bzw. berechnet. Es werden aus den Modenberechnungen der Räume möglichst aussagekräftige, sogenannte Features generiert. Diese Feature-Vektoren sollen den Zusammenhang zwischen den Raummoden und dem Absorptionsverhalten des Kantenabsorbers herstellen.

5.1 Aufbau der Optimierung

Das Tool unterteilt sich in zwei wesentliche Bereiche:

- **Berechnung der Features:** Aus den Raummaßen bzw. daraus resultierenden Modenberechnungen werden Feature-Vektoren erstellt, die als Grundlage für die Optimierung dienen.
- **Optimierung:** Anhand der Feature-Vektoren und der Sollwerte erfolgt die Optimierung.

Der mathematische Aufbau der Optimierung stellt eine Matrizen-Multiplikation dar. Optimiert wird anhand eines linearen Gleichungssystems.

$$\text{Features} \times \text{Konstanten} = \text{Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter} \quad (5.1)$$

Die errechneten Feature-Vektoren werden zu einer Matrix zusammengefasst und mit einem Konstanten-Vektor multipliziert. Der Konstanten-Vektor wird vom Optimierungsalgorithmus so lange verändert, bis ein Gleichgewicht mit möglichst kleinem Restfehler hergestellt ist.

In unserem Fall liegen Messergebnisse aus 5 Räumen vor und es soll für jedes Terzband eine Optimierung durchgeführt werden. Für jedes Terzband ist ein Gleichungssystem gegeben, bei welchem auf der rechten Seite ein 5×1 - Vektor steht, der die Messergebnisse der Räume für das zu optimierende Terzband enthält. Die Größe der linken Seite des Gleichungssystems wird

von der Anzahl der Features bestimmt. Sollte nur 1 Feature berechnet werden, so wird ein 5×1 - Feature-Vektor mit einem Skalar als Konstante multipliziert. Bei mehreren Features wird eine Feature-Matrix mit einem Konstanten-Vektor multipliziert, wie in der Formel 5.2 dargestellt. (Zur Erklärung: $f_1 r_1$ steht für den Wert den Feature 1 im 1. Raum liefert usw.)

$$\begin{bmatrix} f_1 r_1 & f_2 r_1 & f_3 r_1 & \cdots \\ f_1 r_2 & f_2 r_2 & f_3 r_2 & \cdots \\ f_1 r_3 & f_2 r_3 & f_3 r_3 & \cdots \\ f_1 r_4 & f_2 r_4 & f_3 r_4 & \cdots \\ f_1 r_5 & f_2 r_5 & f_3 r_5 & \cdots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} const1 \\ const2 \\ const3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ATlfm_{r1} \\ ATlfm_{r2} \\ ATlfm_{r3} \\ ATlfm_{r4} \\ ATlfm_{r5} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Die Anzahl der verwendeten Features ist variabel und kann sehr schnell und einfach verändert werden, um verschiedene Kombinationen von Features auszuprobieren. Dies wird auch in den folgenden Kapiteln Anwendung finden.

5.2 Konstruieren der Features

Als Features werden die Eingangsvektoren der Optimierung bezeichnet. Diese sind ausschlaggebend für die Qualität des Ergebnisses. Es ist also von großer Bedeutung, welche Features gewählt und wie diese definiert werden, da sie den Zusammenhang zur Wirkung des Kantenabsorbers herstellen. Die Optimierung sollte im Idealfall nur mehr einen Faktor finden müssen, der den Wert der Features mit den gemessenen Ergebnissen auf gleiche Größe bringt.

5.2.1 Feature 1 bis 3: Anzahl der Moden

Die Wichtigkeit der Moden für die Wirkung des Kantenabsorbers ist im Laufe dieser Arbeit schon mehrmals erwähnt worden. Daher ist es die naheliegendste Überlegung, die Moden direkt als Features zu definieren. Die Moden werden in alle 3 Raumrichtungen bis zur 20. Ordnung berechnet und anschließend nach Art (axial, tangential oder oblique) in Terzbändern sortiert. Man erhält also alle Moden, die in einem Terzband liegen. Diese Anzahl wird direkt als Feature genutzt. Feature 1 gibt die Anzahl der axialen, Feature 2 die Anzahl der tangentialen und Feature 3 die Anzahl der obliquen Moden an.

Die Wirkung des Kantenabsorbers kann vor allem in den unteren Frequenzbereichen, auf Grund isoliert auftretender Moden (Modenfeld noch nicht dicht ausgeprägt), gut beschrieben werden. Daher wurde anhand der Anzahl der Moden pro Terzband eine obere Grenzfrequenz definiert. Diese gibt an, wann eine gewisse Anzahl an Moden pro Terzband erreicht wurde und der Übergang hin zur statischen Raumakustik beginnt.

5.2.2 Feature 4 und 5: Abstand der Moden

Der Abstand den die Moden zueinander haben, soll mittels Features berücksichtigt werden. Zugrunde liegen diesen Features zwei Überlegungen:

- Separierte Moden, also Moden die im Frequenzspektrum weit entfernt von anderen liegen, wirken stärker. Sie beeinflussen das Absorptionsverhalten des Kantenabsorbers mehr als andere Moden, weshalb eine größere Gewichtung notwendig ist.

- Viele Moden in einem sehr kleinen Frequenzbereich beeinflussen sich gegenseitig positiv und führen zu einer Verstärkung der Modenausprägung. Zwei Moden gleicher Frequenz verstärken sich besonders gut, ehe die Wirkung der Verstärkung mit zunehmendem Abstand abnimmt. Eine solche Modenüberlagerung kann vom Kantenabsorber gut absorbiert werden. Darum muss auch dieser Effekt einen stärkeren Einfluss auf die Wirkweise haben.

Es werden also zwei Absorptionsmaxima erwartet, wenn eine einzelne Mode stark separiert von anderen ist, oder viele Moden in einem engen Frequenzbereich auftreten. Es werden daher die Abstände zwischen den Moden gewichtet, um so auf die Beziehung zu ihren „Nachbarmoden“ schließen zu können.

Befindet sich eine Mode innerhalb eines Vierteltonintervalls zur vorangegangenen, tieferen Mode, so wird sie Feature 4 zugeordnet, andernfalls Feature 5. Der Frequenzabstand zwischen den beiden Moden wird durch das Vierteltonintervall des entsprechenden Terzbandes dividiert und damit gewichtet. Abschließend wird aus all diesen Gewichten pro Terzband der Mittelwert gebildet. Ähnlich wird auch für das Feature 5 ein Wert errechnet, wie in Formel 5.3 dargestellt ist.

$$\text{Gewicht} = \frac{\text{Frequenzabstand zwischen den 2 Moden} - \text{Vierteltonintervall}}{\text{Frequenzintervall des Terzbandes} - \text{Vierteltonintervall}} \quad (5.3)$$

Dies bedeutet, dass eine Mode, die genau ein Vierteltonintervall von der vorherigen entfernt ist, mit 0 gewichtet und eine Mode, die genau ein Terzbandintervall entfernt ist, mit 1 gewichtet wird. Umgekehrt verhält es sich bei Feature 4. Haben 2 Moden die gleiche Frequenz werden sie mit 1 gewichtet. Zwei Moden, die genau einen Vierteltonabstand auseinander liegen werden mit 0 gewichtet. (siehe Abbildung 5.1)

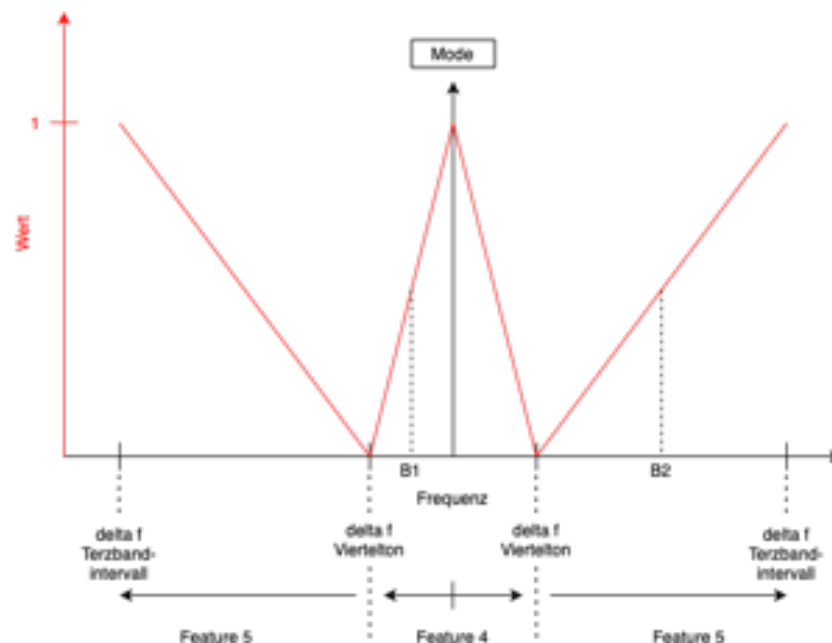


Abbildung 5.1: Grafik zu Feature 4 und 5. Die strichliert angedachten Moden B1 und B2 würden beide den Wert 0,5 bewirken. B1 im Feature 4, B2 im Feature 5.

5.2.3 Kombinationen der Features

Bei der Approximation werden verschiedene Kombinationen von Features ausprobiert, um herauszufinden, welche die besten Ergebnisse liefern. Vier verschiedene Kombinationen werden zusammengestellt.

- Verwendung aller Features.
- Nur jene Features, die die Anzahl der Moden darstellen, also 1, 2 & 3.
- Nur axiale und tangentielle Moden werden berücksichtigt. Diese Kombination ist vom *EACT1* beeinflusst, da bei diesem Tool nur diese beiden Modentypen zur Berechnung verwendet werden. (Feature 1 & 2)
- Jene Features, die den Abständen der Moden ein Gewicht zuordnen, werden verwendet. (Feature 4 & 5)

5.3 Verwendete Algorithmen

Der für die Ausgleichsrechnung am häufigsten verwendete Approximations-Algorithmus basiert auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (englisch „linear least squares“) [Sor12]. Für die Optimierung werden folgende Algorithmen verwendet.

5.3.1 lsqlin

Der *lsqlin*-Algorithmus ist ein von *Matlab* bereitgestellter Algorithmus, der Approximationsaufgaben nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate löst. *lsqlin* steht für „linear least squares“, folglich kann dieser Algorithmus nur zur Lösung linearer Aufgaben verwendet werden. Der Algorithmus wird außerdem über „constraints“ eingeschränkt, wie in Formel 5.4 dargestellt. Es muss eine Bedingung definiert werden, damit der Algorithmus funktioniert. [Onl20b]

$$\min_x \frac{1}{2} \|C \cdot x - d\|_2^2 \quad \text{so, dass} \quad A \cdot x \leq b \quad (5.4)$$

Für die Optimierung wird die Beschränkung gleich der Minimierung gesetzt, also C ist gleich A und d gleich b .¹¹ Dieser Algorithmus kann, wenn keine weiteren Beschränkungen vorliegen, negative Werte für x liefern, was aber nicht erwünscht ist.

Die Features sollen ja durch die Multiplikation mit dem optimierten Faktor auf die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter schließen lassen. Negative Werte mindern den Einfluss gewisser Features auf das Ergebnis. Dies bedeutet, dass dieses Feature nur schlecht die Absorptionseigenschaft des Kantenabsorbers widerspiegelt.

Daher wird mit diesem Algorithmus eine zweite Optimierung realisiert, bei welcher als zusätzliche Bedingung die Werte von x durch eine untere (lb) und obere Grenze (ub) beschränkt werden.

$$\min_x \frac{1}{2} \|C \cdot x - d\|_2^2 \quad \text{so, dass} \quad lb \leq x \leq ub \quad (5.5)$$

¹¹ C , d und x stellen, wie schon in Kapitel 4.2 beschrieben, Eingangsmatrix, Konstantenvektor und Ergebnisvektor dar.

Die obere Grenze wurde mit 2, die untere mit 0 gewählt.

5.3.2 *lsqnonneg*

Der *lsqnonneg*-Algorithmus funktioniert mathematisch gleich wie der *lsqlin*, mit dem Unterschied, dass er keine negativen Werte für x errechnen kann. [Onl20c]

$$\min_x \|C \cdot x - d\|_2^2, \quad \text{mit } x \geq 0 \quad (5.6)$$

Dieser Algorithmus ist optimal für die vorliegende Optimierungsaufgabe.

5.4 Probleme

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Art der Optimierung war zum Zeitpunkt der Messungen in dieser Form noch nicht angedacht. Daher wurde auch nicht versucht, möglichst konsistente Messungen in den verschiedenen Räumen in Hinblick auf die Optimierungen durchzuführen. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, unterscheiden sich die einzelnen Setups der Kantenabsorber doch deutlich voneinander. Sie sind daher nicht optimal für eine Optimierungsaufgabe.

Weiters wurde davon ausgegangen, dass pro Messergebnis (ein Messergebnis pro Raum) ein Feature verwendet werden kann, folglich 5 Features für die Optimierung der 5 Räume gute Ergebnisse liefern würden. Diese Annahme gilt aber nur dann, wenn sichergestellt ist, dass die Features die Messergebnisse gut repräsentieren. Die für die Approximation verwendeten Features waren nur erste Ansätze zur Beschreibung der Wirkung des Kantenabsorbers. Ideal wäre zur Verbesserung der Optimierung die Kombination verschiedener Features gewesen. Dafür hätten aber deutlich mehr als fünf Datensätze zur Verfügung stehen müssen. Die Auswahl der besten Features könnte in diesem Fall auch mittels Algorithmus realisiert werden. Die Generierung weiterer Daten war leider nicht mehr möglich, da die für die Messung verwendeten Kantenabsorber bereits im Hörsaal FSI2 (siehe Kapitel 2) verbaut wurden. Die Optimierung kann daher nur ein erster Versuch sein, Kantenabsorber über diese Methode berechenbar zu machen.

5.5 Ergebnisse der *OPT2*

Zu Beginn der Auswertung sei wieder auf den digitalen Anhang zu dieser Arbeit verwiesen, in welchem alle Ergebnisse detailliert dargestellt sind. In Abbildung 5.2 ist die statistische Auswertung der Ergebnisse dargestellt.

Daraus ist erkennbar, dass nur eine einzige Optimierung ein wirklich gutes Ergebnis liefert. Die Optimierung mit dem *lsqlin* und allen Konstanten zeigt eine sehr kleine Streuung der Ergebnisse, aber auch einige Ausreißer. Die errechneten Konstanten zeigen schnell das Problem dieses Optimierungsergebnisses auf. In jedem Terzband wird die Wirkung mindestens eines Features durch ein negatives Vorzeichen gemindert und so das Ergebnis angepasst. Leider lässt sich daraus kein wirklicher Schluss gewinnen, welches Feature schlecht funktioniert, da alle immer wieder mit negativen Vorzeichen vorkommen. Der Algorithmus sucht sich hier immer den Weg des geringsten Aufwandes und es lässt sich kein systematischer Fehler feststellen. Der *lsqlin* wird daher bei der weiteren Betrachtung der Ergebnisse außer Acht gelassen.

Aus allen drei Optimierungssetups ist ersichtlich, dass sich die Variante, in welcher alle Features verwendet werden am Besten optimieren lässt. Die beiden Varianten *lsqlin* mit Beschränkung der

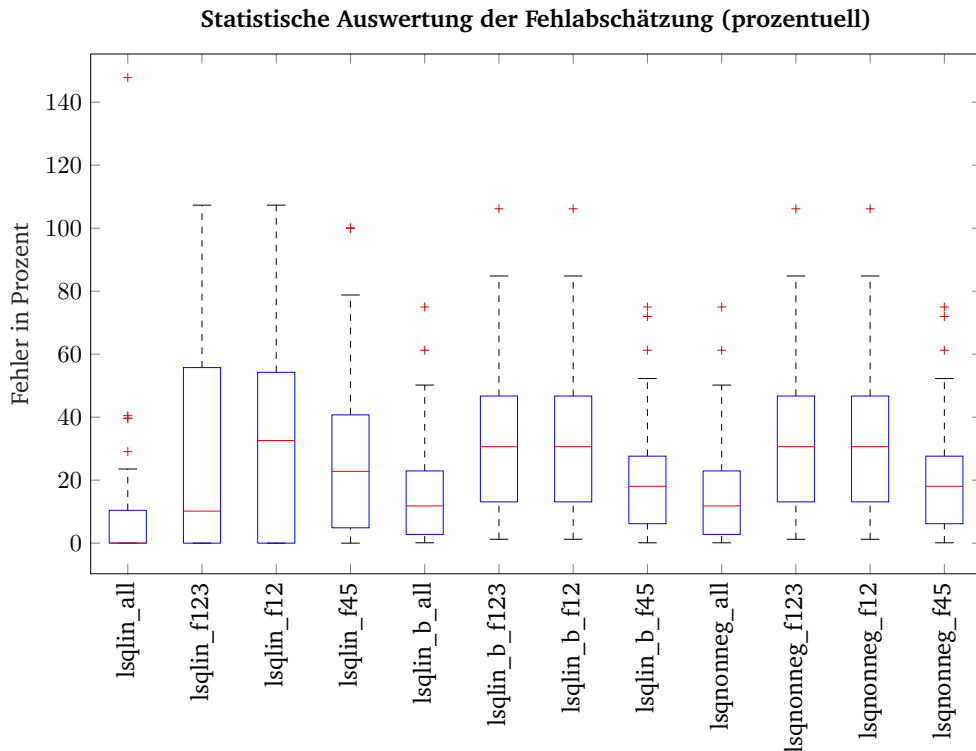


Abbildung 5.2: Statistische Auswertung der Fehlabschätzung in Prozent für die verschiedenen verwendeten Algorithmen.

Konstanten (*lsqlin_b_all*) und *lsqnonneg* (*lsqnonneg_all*) liefern hier sehr ähnlich Ergebnisse. Der Median der Fehler liegt bei diesen beiden bei ca. 10 %, wie in Abbildung 5.2 zu erkennen ist. Damit stellt diese neue Optimierung eine deutliche Verbesserung zu *OPT1* dar.

Die Optimierungen mit den Features 4 und 5 funktionieren bei beiden Algorithmen (*lsqlin_b* und *lsqnonneg*) deutlich besser als die Optimierungen mit den Features 1 bis 3. Eine direkte Verwendung der Anzahl der Moden als Feature scheint also nur begrenzt sinnvoll zu sein. Die Lage der Moden zueinander weist hier einen deutlicheren Zusammenhang mit dem Absorptionsverhalten auf.

Betrachtet man die Konstantenvektoren in Tabelle 5.1 so erkennt man, dass die Konstanten für Feature 4 und 5 für beide gezeigten Konfigurationen an Features (*all* und *f45*) sehr ähnliche und an vielen Positionen idente Werte aufweisen. Das ist ein weiteres Anzeichen dafür, dass die beiden Features mit der gemessenen äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter in Zusammenhang gebracht werden können. Auffallend ist, dass an vielen Stellen, an welchen beim Algorithmus *lsqlin_b* eine 1 steht, beim Algorithmus *lsqlin* bzw. Algorithmus *lsqnonneg* eine 0 steht. Diese Stellen wirken sich nicht auf das Ergebnis der Berechnung aus, da der entsprechende Featurevektor an dieser Stelle keinen Eingangswert (0) liefert. Als Beispiel sei hier das Feature 5 angeführt, welches weit auseinander liegende Moden gewichtet. Ab der 125-Hz-Terz liegen die Moden so dicht beieinander, dass keine Gewichtung mehr stattfindet. Die Verwendung von 1 (anstatt wie erwartet 0) durch den Algorithmus *lsqlin_b* scheint in diesem Fall durch die Wahl der Grenzen ausgelöst worden zu sein.

Bei der Betrachtung des Algorithmus *lsqnonneg* fällt auf, dass sehr viele Werte 0 sind und beim Algorithmus *lsqlin_b* sehr viele äußerst kleine Werte vorkommen. Die Algorithmen lösen durch das Ignorieren bestimmter Eingangswerte (setzen der Konstante auf 0) auf einfachstem Weg das Optimierungsproblem. Dies tritt fast ausschließlich bei den ersten 3 Features auf. Wiederum ein Zeichen dafür, dass die Modenanzahl als Feature nicht für die Optimierung geeignet ist.

Die optimierten Konstanten des Algorithmus *lsqnonneg* weisen alle einen Wert unter 2 auf. Sie sind ident mit den Ergebnissen des Algorithmus *lsqlin_b*. Die beiden Algorithmen unterscheidet nur ihre Begrenzung nach oben hin. Während der *lsqnonneg* keine Begrenzung nach oben hat, können die Konstanten des *lsqlin_b* einen maximalen Wert von 2 annehmen. Dass die Werte beider Algorithmen ident sind, ist nicht selbstverständlich. Dies wird aber später bei der Optimierung ohne Hallraum (Tabelle 5.2) bestätigt.

Algorithmus	Used	Feature	31.5 Hz	40 Hz	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz
lsqlin	all	1	-0.17392	0.13551	-0.019605	0.051027	-0.13034	3.1498	0.063673	-0.26691	-0.28948	0.047719	0.057354
		2	-0.23144	0.055725	0.051948	0.030805	0.081706	-1.4281	0.058112	0.090332	0.11001	0.0097333	-0.020951
		3	0	0	-0.26553	-0.052634	-0.38209	0.73685	-0.0302	-0.02884	-0.032159	-0.0008537	0.0022255
		4	0	-0.14406	1.0761	0.88757	5.6061	7.4713	0.33232	0.57523	-0.27419	-0.25473	2.0708
		5	0.52644	0.33484	-0.60105	1.5934	-13.9673	-80.7327	0	0	0	0	0
	f45	4	0	0.208	0.7193	0.84229	1.0468	0.92486	1.0468	1.0382	0.80447	0.75789	0.4781
		5	-5.7166e-09	0.39292	-0.049444	2.0928	3.8191	11.1932	0	0	0	0	0
		1	1.4959e-16	0.17583	0.087005	0.037089	6.3692e-14	1.2158e-14	0.087311	3.5901e-11	3.5173e-10	0.066181	4.3195e-13
		2	1.5982e-13	0.018163	2.0507e-13	3.843e-13	8.0033e-18	5.8874e-16	0.0024406	0.0031248	7.7877e-10	0.0044274	7.6525e-14
		3	1	1	5.5145e-12	7.8131e-14	7.4386e-18	8.7413e-16	1.8379e-10	5.5568e-11	5.8287e-11	2.8045e-12	4.5814e-12
lsqlin_b	all	4	1	5.5535e-09	0.42562	0.84644	1.6879	1.6183	0.81607	1.14	1.0225	1.0515e-06	0.71806
		5	0.2242	0.36424	0.77566	1.9572	1.1035	5.4037e-10	1	1	1	1	1
	f45	4	1	0.35562	0.83688	0.92027	1.6879	1.6183	1.2984	1.2828	1.0225	0.91854	0.71806
		5	0.2242	0.51959	8.4606e-08	1.9691	1.1035	1.2087e-07	1	1	1	1	1
	lsqnonneg	1	0	0.17583	0.087005	0.037089	0	0	0.087311	0	0	0.066181	0
		2	0	0.018163	0	0	0	0	0.0024406	0.0031248	0	0.0044274	0
		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		4	0	0	0.42562	0.84644	1.6879	1.6183	0.81607	1.14	1.0225	0	0.71806
		5	0.2242	0.36424	0.77566	1.9572	1.1035	0	0	0	0	0	0
	f45	4	0	0.35562	0.83688	0.92027	1.6879	1.6183	1.2984	1.2828	1.0225	0.91854	0.71806
		5	0.2242	0.51959	0	1.9691	1.1035	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5.1: Optimierte Konstantenvektoren der besten Optimierungen.

5.5.1 Beschränkung der Auswertung auf die maßgeblichen Frequenzbereiche

Die Wirkung des Kantenabsorbers ist vor allem in einigen Terzbändern im tiefen Frequenzbereich besonders stark ausgeprägt. Die Vorhersage in diesem Bereich ist daher von besonderem Interesse. Eine Auswertung des Fehlers in diesem Bereich wird in Abbildung 5.3 dargestellt, wobei hier nur die Terzbänder von der 63 bis zur 125-Hz-Terz berücksichtigt wurden.

Im Vergleich zu Abbildung 5.2 erkennt man, dass der Fehler in diesen Terzbändern ähnlich ausfällt. Der Median der Optimierungen mit dem *lsqlin_b* und *lsqnonneg* mit allen Features befindet sich ebenfalls bei etwa 10 %. Die 75. Percentile liegt im Bereich von 20 % Fehler. Die Optimierungsergebnisse verhalten sich bei Betrachtung des gesamten Frequenzbereiches ähnlich.

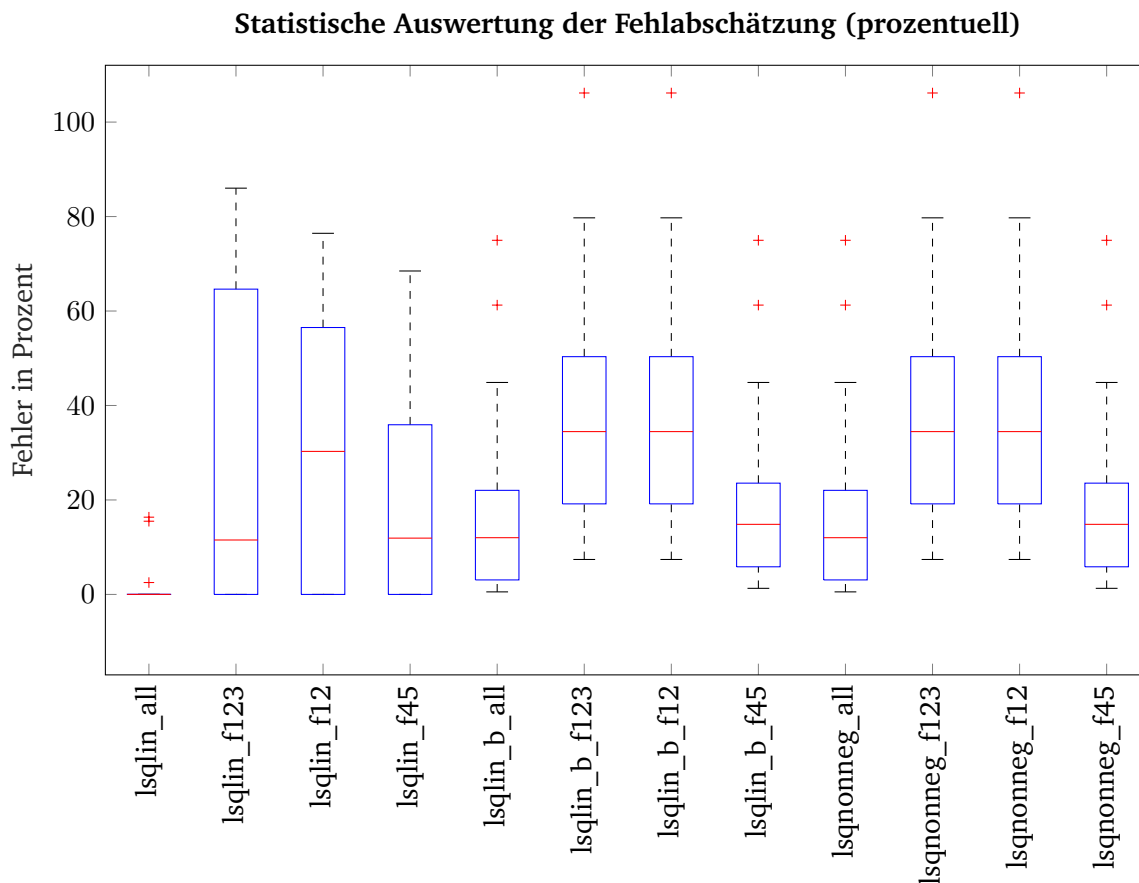


Abbildung 5.3: Statistische Auswertung der Fehlabschätzung in Prozent für die verschiedenen verwendeten Algorithmen im Terzbandbereich von 63 bis 125 Hz.

5.5.2 Optimierung ohne Hallraum

In Kapitel 3.4.1 wurde bereits angemerkt, dass die Messung der Nachhallzeit und die daraus resultierende Bestimmung des Absorptionsgrades unterhalb der Grenzfrequenz kritisch zu betrachten ist. Die Frage ist also, ob die Verwendung der Messung im Hallraum einen negativen Einfluss auf das Ergebnis hat. Aus diesem Grund wurde eine Optimierung durchgeführt, die den Hallraum nicht berücksichtigt und nur 4 Räume verwendet. Daraus folgt die Anwendung von maximal 4 Features. Da aus der Analyse der bisherigen Ergebnisse ersichtlich ist, dass jene Features, welche die Modenanzahl beinhalten, weniger Einfluss haben, wird die Anzahl obliquen Moden, die den geringsten Einfluss auf die Wirkung des Kantenabsorbers hat, nicht für die Optimierung verwendet.

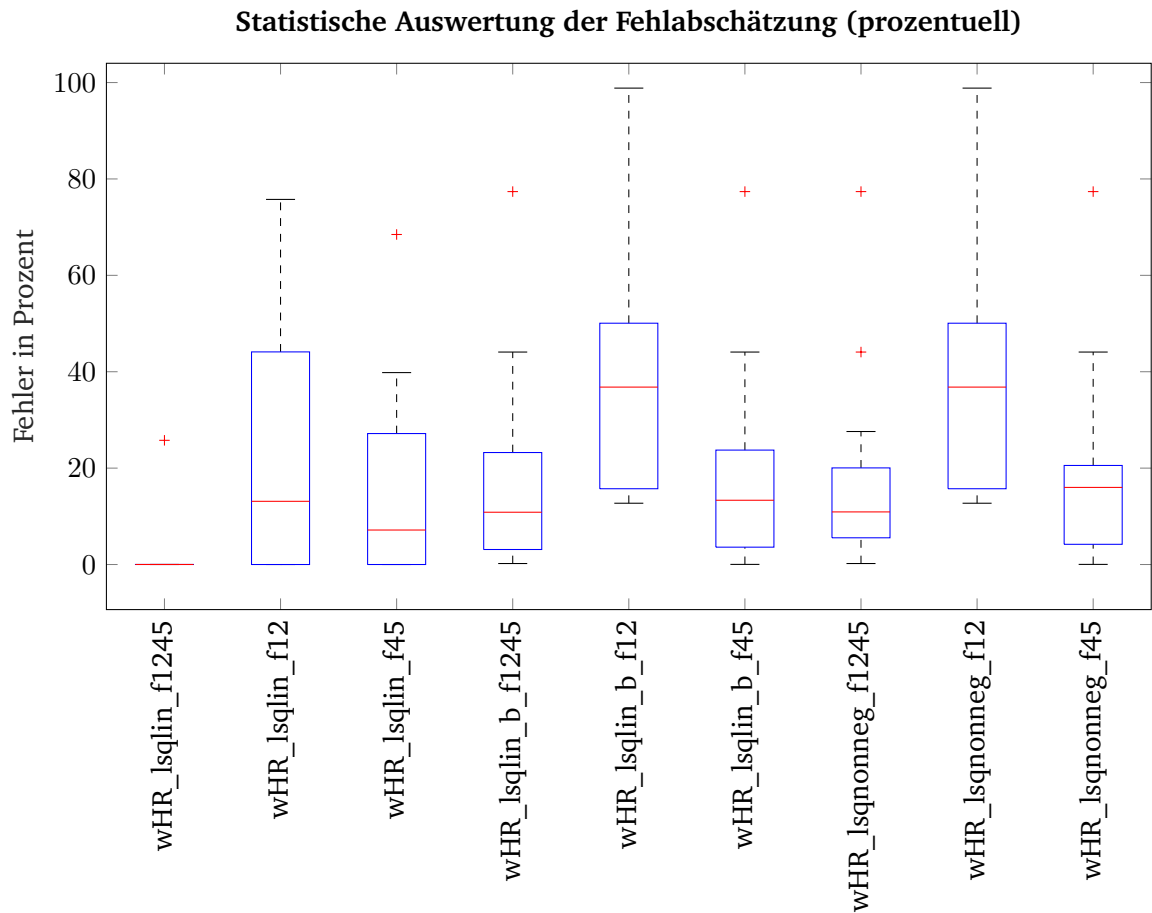


Abbildung 5.4: Statistische Auswertung der Fehlabschätzung in Prozent für die verwendeten Algorithmen ohne Berücksichtigung des Hallraums.

In Abbildung 5.4 wird das statistische Ergebnis dieser Optimierung dargestellt. Es ist eine leichte Verbesserung im Vergleich zu Abbildung 5.2 zu erkennen. Vor allem bei den Optimierungen mit Feature 4 und 5 (*wHR_lsclin_b_f45* und *wHR_lsqnonneg_f45*) ist diese Verbesserung zu erkennen. Die Verbesserung fällt jedoch sehr klein aus. Auch die Konstanten in Tabelle 5.2 verändern sich nur leicht. Der Hallraum kann also zur Optimierung verwendet werden.

Algorithmus	Used	Feature	31.5 Hz	40 Hz	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz
lsclin	f1245	1	-0.35988	0.02567	0.16646	1.0207	0.13937	-1.8153	0.042994	-0.24202	-0.59705	0.06243	-0.06462
		2	0.38959	0.45657	-0.19494	-0.44858	-0.15534	-0.080448	0.0057642	0.024213	0.025353	0.00568	0.00060121
		4	0	-2.8126	2.918	2.5497	3.6347	12.3235	0.86256	1.1672	2.9284	-0.18199	0.96944
		5	-0.038587	-0.082971	-6.0739	3.1273	-7.5891	-39.4817	0	0	0	0	0
		5	0	0.82049	0.62797	0.84229	1.0468	0.92486	1.1703	1.0382	0.80447	0.75789	0.4781
lsclin_b	f1245	1	-1.0561e-09	0.39292	0.66679	2.0928	3.8191	11.1932	0	0	0	0	0
		2	0.39292	0.66679	2.0928	3.8191	11.1932	0	0	0	0	0	0
		4	0	0.82049	0.62797	0.84229	1.0468	0.92486	1.1703	1.0382	0.80447	0.75789	0.4781
		5	0	0.82049	0.62797	0.84229	1.0468	0.92486	1.1703	1.0382	0.80447	0.75789	0.4781
		5	0	0.82049	0.62797	0.84229	1.0468	0.92486	1.1703	1.0382	0.80447	0.75789	0.4781
lsqnonneg	f1245	1	8.3508e-12	0.17158	0.074657	0.033568	8.8324e-11	5.5014e-14	0.041427	1.1342e-13	1.715e-09	0.067917	1.5069e-12
		2	2.2186e-10	0.024457	4.8657e-09	1.1668e-10	1.5268e-13	3.964e-15	8.3767e-10	0.00068642	1.7837e-09	0.0043571	1.5066e-11
		4	1	2.7247e-11	0.40044	0.84807	1.4085	1.6405	1.151	1.3009	1.0537	1.382e-07	0.71831
		5	0.21568	0.38274	1.1249	1.9543	2	1.051e-09	1	1	1	1	1
		5	0.21568	0.38274	1.1249	1.9543	2	1.051e-09	1	1	1	1	1
lsqnonneg	f45	1	0	0.17158	0.074657	0.033568	0	0	0.041427	0	0	0.067917	0
		2	0	0.024457	0	0	0	0	0	0.00068642	0	0.0043571	0
		4	0	0	0.40044	0.84807	1.2217	1.6405	1.151	1.3009	1.0537	0	0.71831
		5	0.21568	0.38274	1.1249	1.9543	5.1743	0	0	0	0	0	0
		5	0.21568	0.38274	1.1249	1.9543	5.1743	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5.2: Optimierte Konstantenvektoren der besten Optimierungen ohne Berücksichtigung des Hallraums.

5.6 Zusammenfassung

Durch *OPT2* konnte eine deutliche Verbesserung gegenüber *OPT1* erreicht werden. Die Fehlabschätzung konnte bei Verwendung aller Features für alle verwendeten Algorithmen im Median an die 20 % Marke herangebracht werden. Die Beschränkung auf maßgebliche Terzbänder als auch die Optimierung ohne Hallraum bringen keine deutliche Verbesserung. Daher werden die durch den *lsqnonneg* optimierten Konstanten bei Verwendung aller Features für die Erstellung des neuen Tools *EACT2* herangezogen.

Um die Verbesserungen, die durch die Optimierungen erreicht wurden, bildlich darzustellen, werden im folgenden Kapitel die gemessenen Werte den mit den optimierten Konstanten berechneten Werten für die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber gegenübergestellt.

6

Gegenüberstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel soll nun ein finaler Vergleich zwischen den Methoden zur Vorhersage über die Wirksamkeit der in dieser Arbeit verwendeten Kantenabsorber gezogen werden. Die Absorptionseigenschaften werden mit den drei verschiedenen Methoden (originales *EACT1*, optimiertes *EACT1* - *OPT1*, neues Optimierungstool *OPT2*) berechnet und verglichen.

Dazu werden jeweils nur die Optimierungsansätze mit den besten Ergebnissen verwendet. Bei der Optimierung des *EACT1* (*OPT1*) sind dies teilweise Optimierungen, welche durch die untere Grenzfrequenz begrenzt sind. Daher errechnen diese erst ab der 80-Hz-Terz ein Ergebnis. Es werden jeweils 2 Optimierungen mit Beschränkung der Konstanten und 2 ohne berechnet. Einmal mit einem Konstantensatz für alle Terzbänder und ein weiteres Mal mit Konstantensätzen für jedes Terzband. Bei allen wurden axiale Moden bis zur 20. und tangential bis zur 10. Ordnung berechnet. Insgesamt werden also 4 Ergebnisse der *OPT1* verglichen:

- 1W_oGF_20_10_0.4 mit beschränkten Konstanten
- WpTB_oGF_20_10_0 mit beschränkten Konstanten
- 1W_oGF_20_10_0.4 ohne Beschränkung der Konstanten
- WpTB_oGF_20_10_0 ohne Beschränkung der Konstanten

Die besten Ergebnisse der neu konzipierten Optimierung *OPT2* liefern die Ansätze, bei welchen alle Features verwendet wurden. Zum abschließenden Vergleich werden 3 Ansätze herangezogen:

- lsqlin mit allen Features
- lsqlin mit Beschränkung der Konstanten und allen Features
- lsqnonneg mit allen Features

Mit der gemessenen äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber und dem Ergebnis des originalen *EACT1* werden für jeden Raum folglich 9 Kurvenverläufe dargestellt.

6.1 Hallraum

Im Hallraum verursacht der Kantenabsorber eine markante Absorptionsspitze bei 80 Hz, wie die rote Kurve in Abbildung 6.1 zeigt. Keine der durchgeführten Optimierungen kann sich diesem Maximum annähern und es entsteht der größte Fehler. Betrachtet man den gesamten Frequenzverlauf, so zeigt sich, dass außerhalb des Bereiches maximaler Absorption die Abschätzung durch die Algorithmen gute Ergebnisse liefert. Auffallend ist sofort, dass die Optimierungen eine deutliche Verbesserung gegenüber den Berechnungen mit dem ursprünglichen *EACT1* liefern.

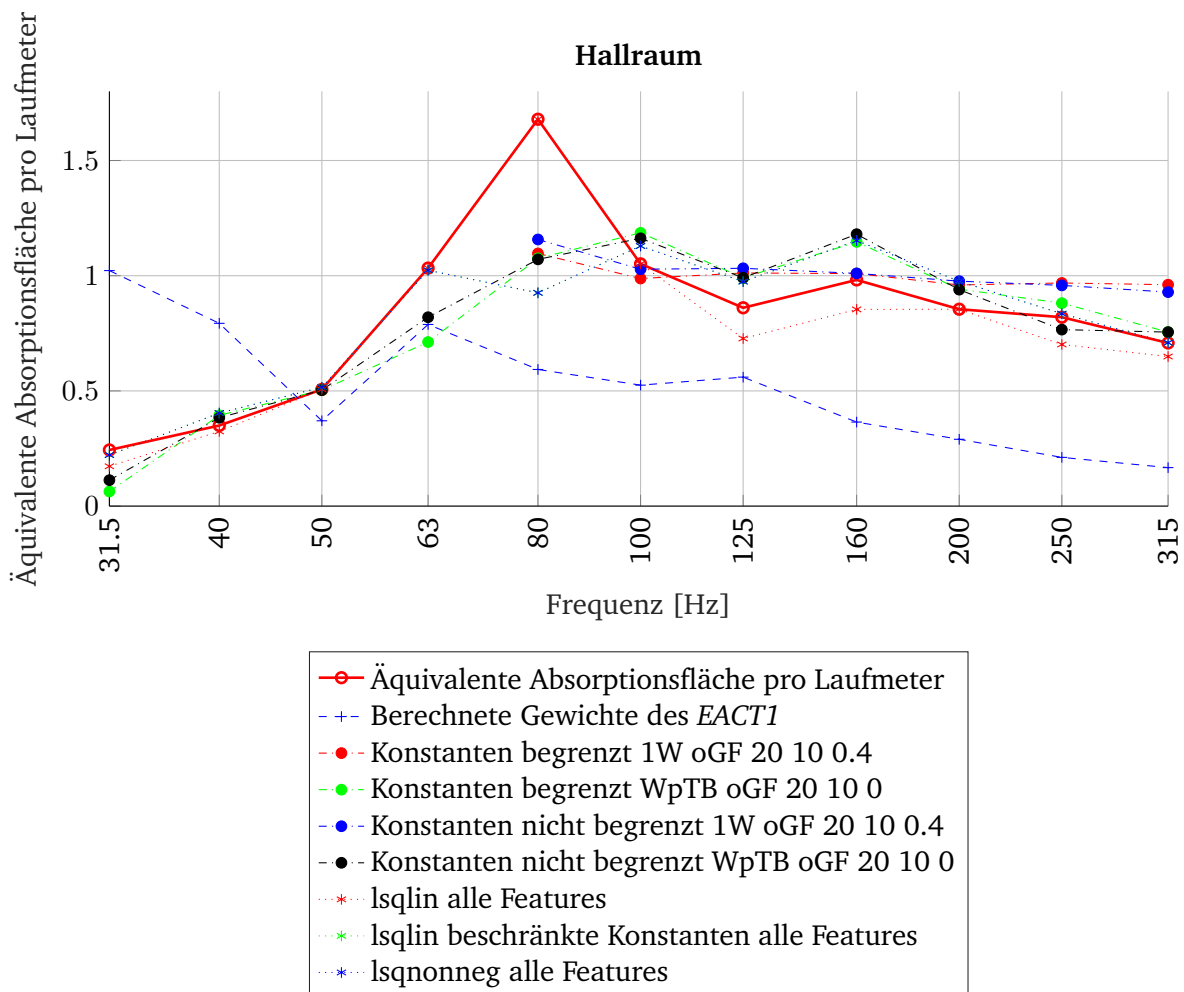


Abbildung 6.1: Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hallraum.

Die grüne Linie des Algorithmus *lsqlin* mit beschränkten Konstanten ist in Abbildung 6.1 gar nicht zu erkennen, weil sie von der blauen Linie des *lsqnonneg* verdeckt wird. Die numerischen Ergebnisse in Tabelle 6.1 zeigen, dass dieser Algorithmus die exakt identen Ergebnisse wie der Algorithmus *lsqnonneg* liefert, wie bereits in Kapitel 5.5 erwähnt wurde.

	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter	0.24365	0.34982	0.50645	1.0331	1.6791	1.0514	0.86075	0.98176	0.85457	0.81985	0.70814
Berechnete Gewichte des <i>EACT1</i>	1.0223	0.79333	0.37037	0.78843	0.59309	0.52511	0.5598	0.36474	0.29003	0.21151	0.16708
Konstanten begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.0966	0.98772	1.0119	1.0092	0.95983	0.96847	0.961
Konstanten begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.0635	0.39397	0.50351	0.71212	1.0756	1.186	0.99083	1.1467	0.94165	0.88093	0.75527
Konstanten nicht begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.1573	1.0281	1.0322	1.0101	0.97641	0.95801	0.92885
Konstanten nicht begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.1126	0.38347	0.50351	0.81981	1.071	1.1624	0.99083	1.1802	0.93951	0.76602	0.75527
<i>lsqlin</i> alle Features	0.17287	0.32418	0.50638	1.033	1.6791	1.0513	0.72736	0.85376	0.85457	0.70157	0.64924
<i>lsqlin</i> beschränkte Konstanten alle Features	0.22176	0.40389	0.51589	1.0235	0.92564	1.1289	0.97443	1.1525	0.97584	0.83517	0.70916
<i>lsqnonneg</i> alle Features	0.22176	0.40389	0.51589	1.0235	0.92564	1.1289	0.97443	1.1525	0.97584	0.83517	0.70916

Tabelle 6.1: Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hallraum.

6.2 Klassenraum BRG Kepler

Die Berechnung der Absorption mit den optimierten Konstanten weist auch in diesem Raum im Bereich der Absorptionsmaxima große Abweichungen zum gemessenen Absorptionsgrad auf. Es sind aus Abbildung 6.2 Maxima bei 100 und 200 Hz zu erkennen. An diesen beiden Terzbändern weichen Messung und Berechnung stark voneinander ab. Nach der Analyse von 2 Räumen ist also festzuhalten, dass die Optimierung den sprunghaften Anstiegen im Absorptionsmaximum nicht folgen kann.

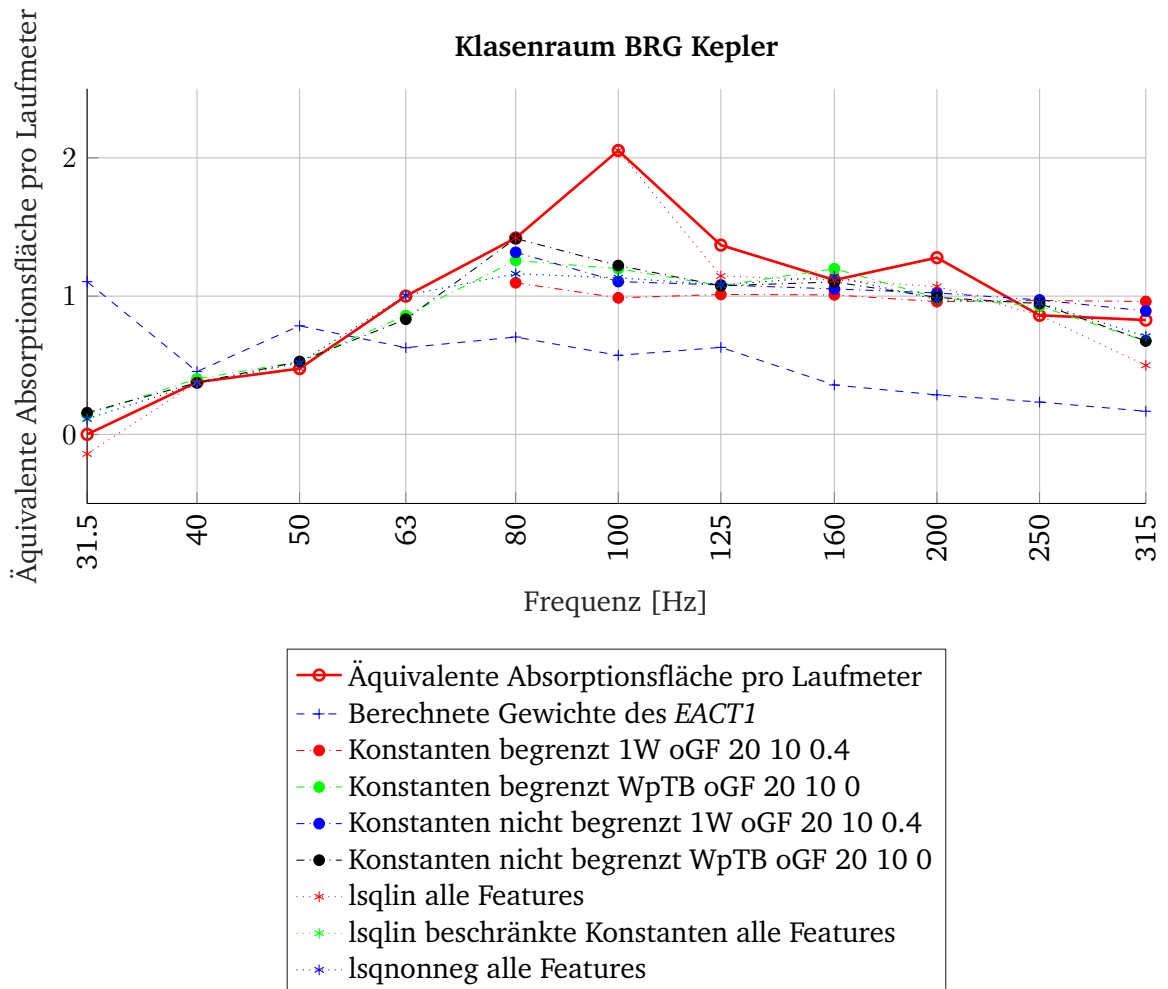


Abbildung 6.2: Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Klassenraum des BRG Kepler.

	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter	0	0.37701	0.47599	1.0002	1.4203	2.0534	1.3691	1.1163	1.2781	0.86139	0.82702
Berechnete Gewichte des <i>EACT1</i>	1.1046	0.4542	0.78522	0.62684	0.70402	0.57133	0.62934	0.35746	0.28519	0.23372	0.16708
Konstanten begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.0966	0.98772	1.0119	1.0092	0.95983	0.96847	0.961
Konstanten begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.14427	0.40129	0.52664	0.85961	1.2576	1.1989	1.0751	1.1987	0.9885	0.92686	0.67569
Konstanten nicht begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.317	1.1054	1.0807	1.0519	1.0231	0.97258	0.89262
Konstanten nicht begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.15676	0.37391	0.52664	0.83292	1.4171	1.2214	1.0751	1.1023	0.99076	0.94603	0.67569
lsqlin alle Features	-0.1416	0.37701	0.47593	1.0001	1.4202	2.0533	1.1452	1.1163	1.0696	0.86139	0.49914
lsqlin beschränkte Konstanten alle Features	0.11233	0.36766	0.51717	1.0056	1.1615	1.1326	1.0818	1.1426	0.97517	0.95005	0.70915
lsqnonneg alle Features	0.11233	0.36766	0.51717	1.0056	1.1615	1.1326	1.0818	1.1426	0.97517	0.95005	0.70915

Tabelle 6.2: Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Klassenraum des BRG Kepler.

6.3 Hörsaal FS11

Der Absorptionsverlauf im *FS11* bildet keine extremen Spitzen aus. Dadurch kann die Kurve etwas besser errechnet werden. Dennoch ergeben sich im Bereich zwischen 80 und 100 Hz starke Abweichungen vom gemessenen Wert, da zu hohe Werte für die Absorption errechnet werden. Speziell bei 80 Hz liegt der Wert der Absorption niedriger als bei den anderen Räumen.

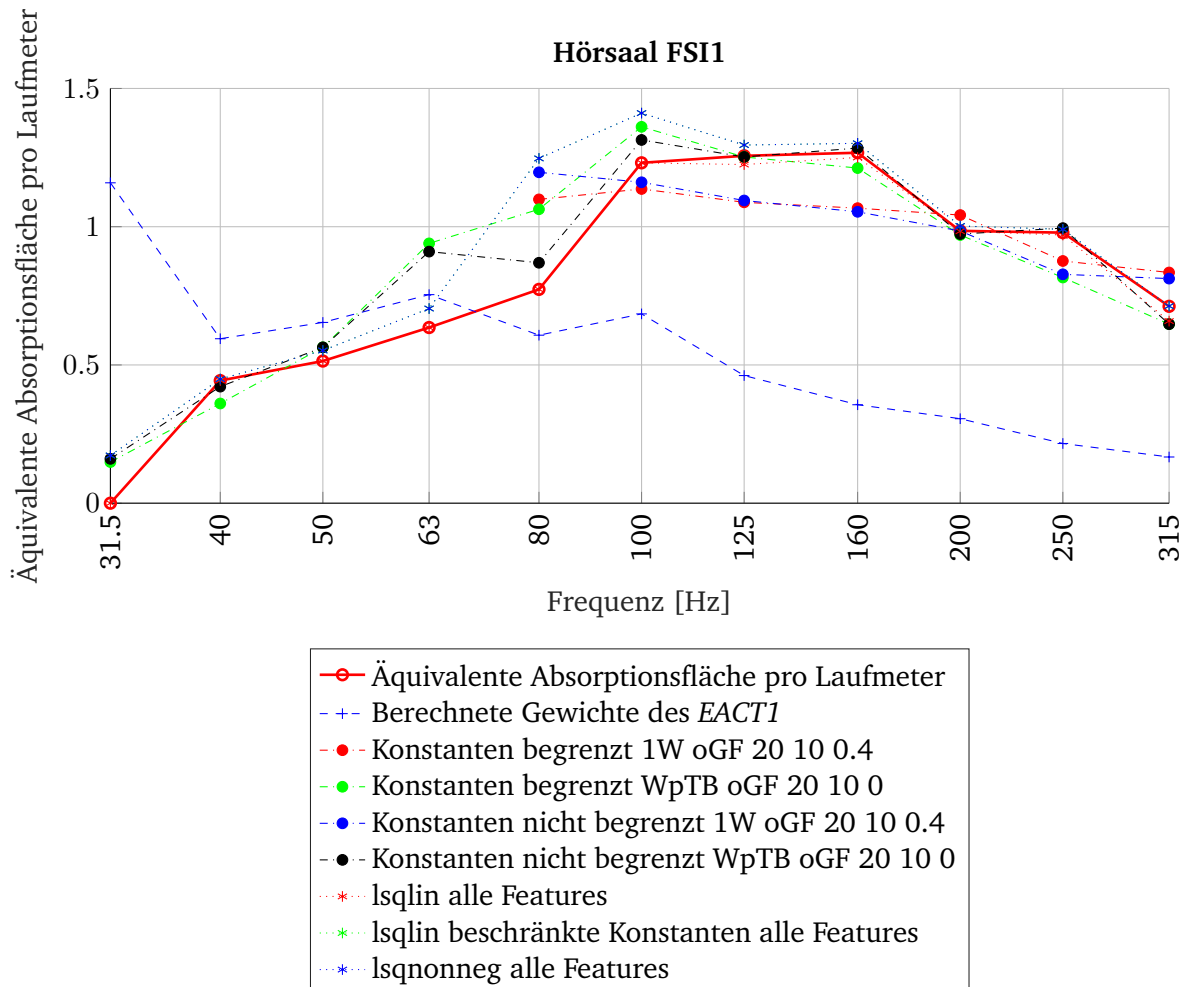


Abbildung 6.3: Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hörsaal FS11.

	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter	0	0.44342	0.51415	0.63535	0.77332	1.2311	1.2565	1.2675	0.98499	0.97854	0.71205
Berechnete Gewichte des <i>EACT1</i>	1.1588	0.59486	0.65378	0.75434	0.60762	0.68467	0.46164	0.35608	0.30559	0.2159	0.16708
Konstanten begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.0988	1.1365	1.0882	1.0671	1.0422	0.87603	0.83439
Konstanten begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.14877	0.36058	0.56374	0.93966	1.0632	1.3612	1.2523	1.2121	0.97	0.8163	0.64761
Konstanten nicht begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.1968	1.1607	1.0948	1.0539	0.98452	0.82776	0.81233
Konstanten nicht begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.16036	0.42159	0.56373	0.90995	0.8696	1.3138	1.2523	1.2844	0.97352	0.99489	0.64761
lsqin alle Features	1.9336e-18	0.44342	0.51409	0.63529	0.77326	1.231	1.2248	1.2505	0.98359	0.97002	0.65858
lsqin beschränkte Konstanten alle Features	0.17263	0.44898	0.55225	0.70405	1.247	1.4109	1.2954	1.3016	1.0025	0.99059	0.71288
lsqnonneg alle Features	0.17263	0.44898	0.55225	0.70405	1.247	1.4109	1.2954	1.3016	1.0025	0.99059	0.71288

Tabelle 6.3: Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hörsaal FS11.

6.4 Hörsaal FSI2

Im Bereich des Absorptionsmaximums, welches hier auch über mehrere Terzbänder länger gestreckt ist, kann die Absorption verhältnismäßig gut berechnet werden. In den Terzen darüber erfolgt jedoch eine Überabschätzung.

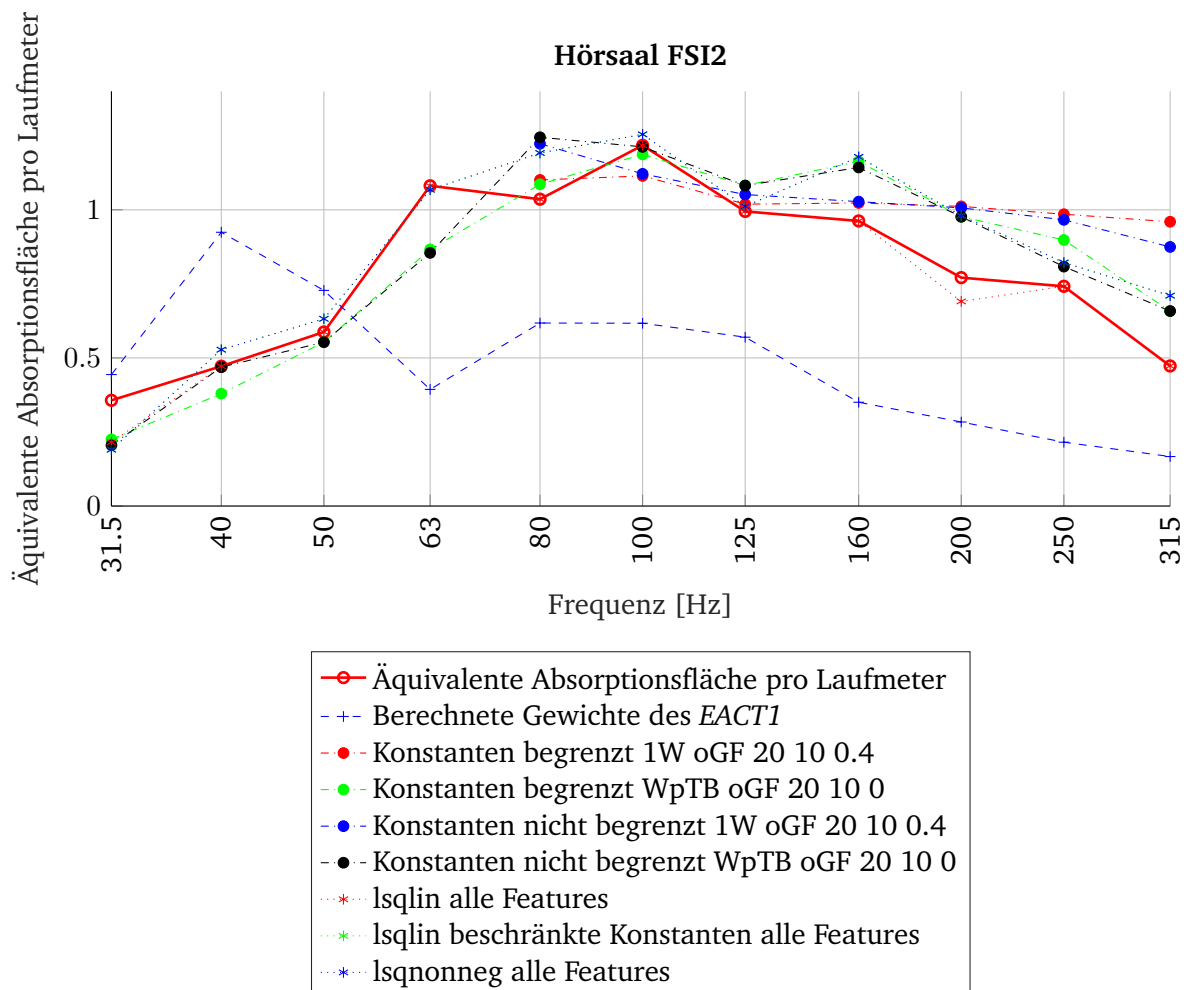


Abbildung 6.4: Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hörsaal FSI2.

	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter	0.35693	0.47198	0.58755	1.0812	1.0358	1.2177	0.99461	0.96239	0.77108	0.74175	0.47288
Berechnete Gewichte des EACT1	0.44385	0.92416	0.72799	0.39374	0.61778	0.61709	0.57001	0.35043	0.28372	0.21554	0.16708
Konstanten begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.1008	1.1144	1.0191	1.023	1.0117	0.98514	0.95969
Konstanten begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.22499	0.37938	0.55325	0.86625	1.0863	1.187	1.082	1.1635	0.9768	0.89822	0.65821
Konstanten nicht begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.223	1.1215	1.0516	1.0276	1.0066	0.96618	0.87468
Konstanten nicht begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.20533	0.46886	0.55325	0.85459	1.245	1.2125	1.082	1.143	0.97642	0.80829	0.65821
lsqlin alle Features	0.21537	0.47198	0.58749	1.0811	1.0358	1.2176	0.99461	0.96239	0.69078	0.74175	0.47288
lsqlin beschränkte Konstanten alle Features	0.19029	0.52781	0.63209	1.0678	1.1919	1.2547	1.0116	1.1786	0.98006	0.82212	0.71022
lsqnonneg alle Features	0.19029	0.52781	0.63209	1.0678	1.1919	1.2547	1.0116	1.1786	0.98006	0.82212	0.71022

Tabelle 6.4: Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hörsaal FSI2.

6.5 Hörsaal i14

Der *i14* weist bei 160 Hz das höchste Absorptionsmaximum im Frequenzspektrum auf. Dieses Maximum wird, wie schon bei den vorangegangenen Räumen, durch die Berechnung unterschätzt. Im Bereich 63 bis 100 Hz fällt die Absorption geringer aus, weshalb die Berechnungen einen zu hohen Wert erreichen.

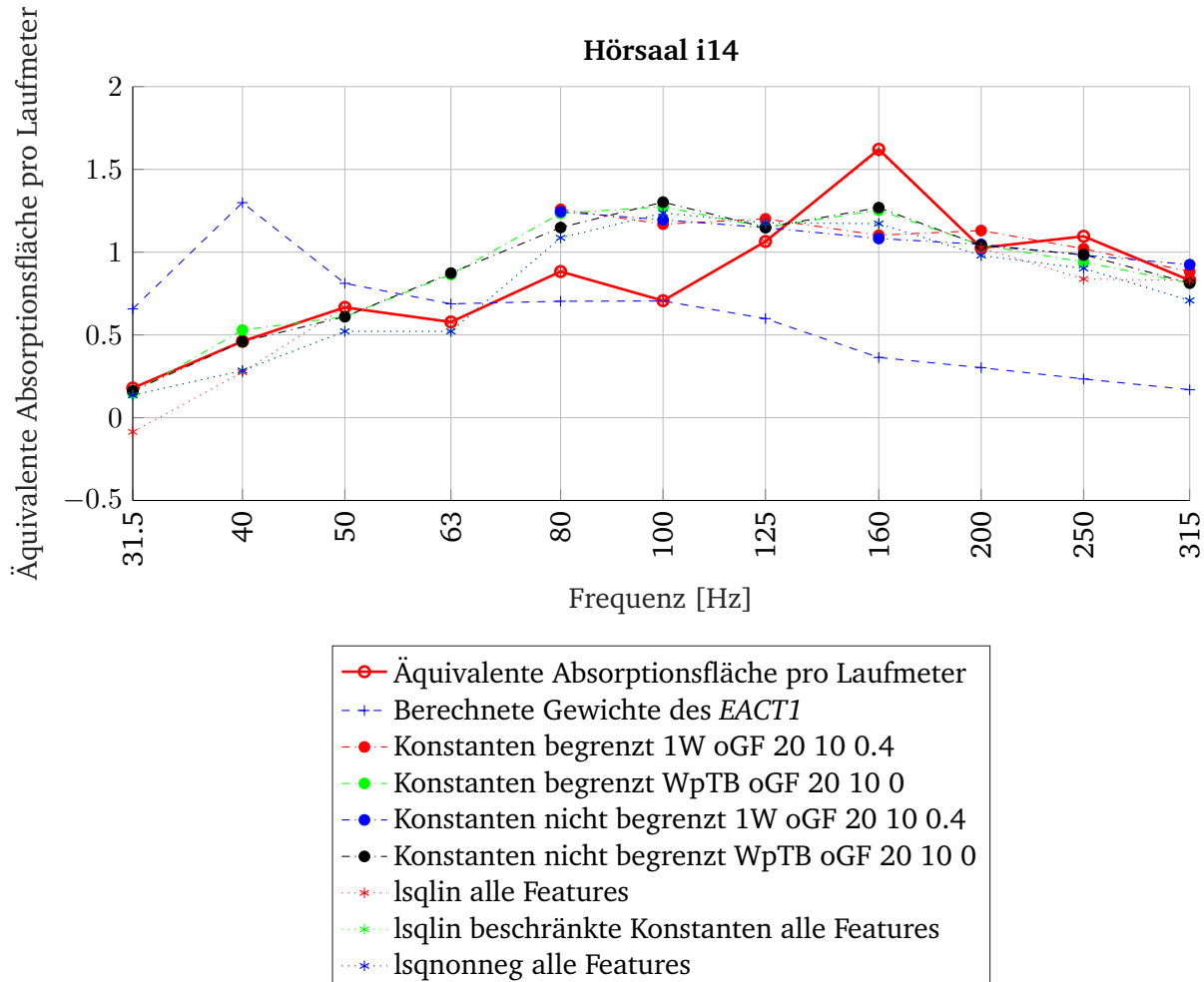


Abbildung 6.5: Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hörsaal i14.

	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter	0.17916	0.46162	0.66631	0.57807	0.8827	0.70663	1.0643	1.6211	1.026	1.0957	0.82977
Berechnete Gewichte des EACT1	0.65719	1.2988	0.81155	0.68784	0.70334	0.70505	0.59849	0.36379	0.30216	0.23408	0.16915
Konstanten begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.2587	1.169	1.2012	1.1022	1.1305	1.0207	0.88249
Konstanten begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.1485	0.52922	0.61032	0.86498	1.2347	1.2745	1.1494	1.2533	1.0431	0.94011	0.81306
Konstanten nicht begrenzt 1W oGF 20 10 0.4	-	-	-	-	1.2438	1.1951	1.1481	1.0825	1.0468	0.9821	0.92427
Konstanten nicht begrenzt WpTB oGF 20 10 0	0.16202	0.45928	0.61032	0.87337	1.1488	1.3022	1.1494	1.2689	1.0399	0.98494	0.81306
lsqin alle Features	-0.085633	0.27469	0.66625	0.57801	0.88264	0.70657	1.0643	1.6084	1.026	0.83775	0.82977
lsqin beschränkte Konstanten alle Features	0.13616	0.28478	0.52189	0.52104	1.0865	1.2364	1.1768	1.1723	0.9797	0.90158	0.70787
lsqnonneg alle Features	0.13616	0.28478	0.52189	0.52104	1.0865	1.2364	1.1768	1.1723	0.9797	0.90158	0.70787

Tabelle 6.5: Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hörsaal i14.

6.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die Optimierungen eine deutliche Verbesserung zu Berechnungen mit dem ursprünglichen *EACT1* darstellen. Während die Berechnungen mit dem *EACT1* die Wirkung des Kantenabsorbers nur erahnen ließ, kann nun die zu erwartende Absorption, speziell mit den durch *OPT2* optimierten Konstanten, gut abgeschätzt werden.

Ein Problem stellen die Maxima dar, die nicht richtig berechnet werden können. Ihre Position im Frequenzspektrum ändert sich von Raum zu Raum. Diese Eigenschaften scheinen die verwendeten Features nur schlecht repräsentieren zu können. Für eine Verbesserung der Ergebnisse sind Verbesserungen an den verwendeten Features zwingend notwendig.

Über alle Terzbänder hinweg liefern die Optimierungen gute Ergebnisse, mit welchen die Wirkung des Absorbers abgeschätzt werden kann. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 beschriebenen Eigenschaften kann damit bereits in der Planungsphase eine gute Abschätzung über die Wirksamkeit von Kantenabsorbern getroffen werden.

Um die Wirkung des Kantenabsorbers für Quaderräume berechnen zu können, wird im folgenden Kapitel ein neues Berechnungstool auf Basis der optimierten Konstanten vorgestellt. Den Abschluss des akustischen Planungsprozesses bildet eine Simulation, durch die mit den errechneten Absorptionswerten für den Kantenabsorber die Verbesserung geplant werden kann.

7

Neues Tool zur Berechnung der Kantenabsorber und Simulation

Ziel dieser Masterarbeit war es, Kantenabsorber für die raumakustische Planung berechenbar zu machen. Im folgenden Kapitel wird zum einen das neue, verbesserte Berechnungstool *EACT2* für den Absorptionsgrad von Kantenabsorbern vorgestellt und zum anderen das Ergebnis von *EACT2* im Rahmen der raumakustischen Sanierung des Hörsaals FSI2 evaluiert.

7.1 Neues Tool zur Abschätzung - *EACT2*

Mit der Berechnungsgrundlage der Features und den Ergebnissen der Optimierung aus Kapitel 5 (*OPT2*) wurde ein neues Tool zur Abschätzung des Absorptionsverhaltens des Kantenabsorbers erstellt, welches als *EACT2* bezeichnet wird. Dieses berechnet anhand der Raumdimensionen Anzahl und Abstand der Moden (Features 1 - 5) und multipliziert diese anschließend mit den Konstanten, welche durch die Optimierung definiert wurden. Die Ergebnisse der Optimierung mit dem Algorithmus *lsqnonneg* haben die beste Übereinstimmung mit den Messdaten ergeben (siehe Kapitel 5.5) und werden für dieses Tool verwendet.

Zur leichteren Eingabe der Daten wurde ein grafisches Benutzerinterface erstellt, welches Ein- und Ausgaben verwaltet. Als Ergebnis liefert das *EACT2* eine zu erwartende äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber für die Terzbänder von 31,5 bis 315 Hz. Für die darüberliegenden Terzbänder wirkt der Kantenabsorber wie ein poröser Absorber und es kann der Absorptionsgrad durch Mittelung von Messergebnissen berechnet werden, wie in Kapitel 7.3 gezeigt wird. Durch die Verwendung von Kantenabsorbern mit den Seitenmaßen von 40 cm und kompletter Befüllung mit Absorptionsmaterial, können die Ergebnisse der Kalkulation auch nur für baugleiche Kantenabsorber verwendet werden. Die Berechnung stellt jedoch nur eine gute Schätzung dar, da die Fehler, die bei der Optimierung erhalten blieben, mit in die Berechnung einfließen.

Ausgegeben wird auf Wunsch außerdem eine weitere Grafik, in welcher alle errechneten Modenfrequenzen dargestellt sind. Diese ermöglicht es, Modenhäufungen auch visuell zu erkennen und Rückschlüsse auf die Absorptionswirkung zu ziehen.

Approximation Tool
for an Edge Absorber with 40 cm side dimensions

Room

Dimensions of room

Length in m

Width in m

Height in m

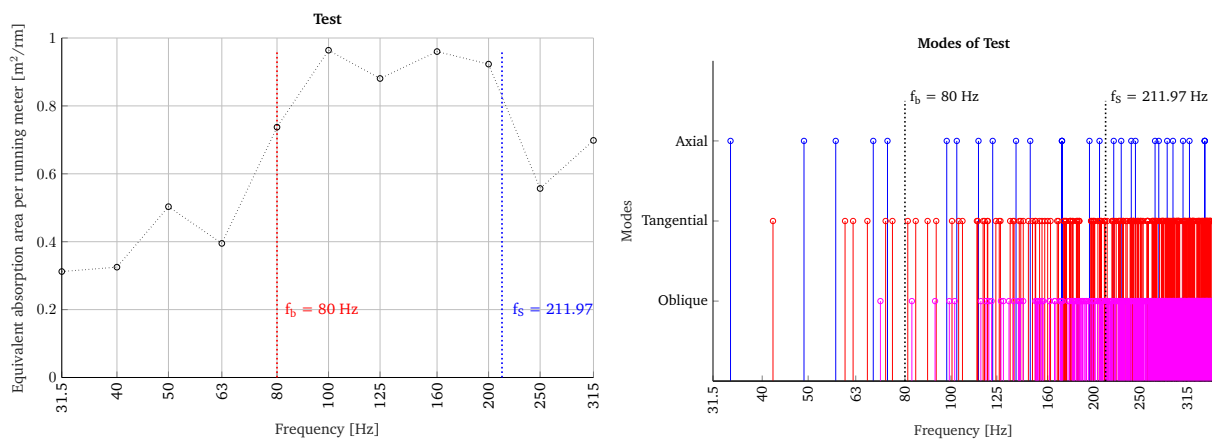
☐ Plot mode structure

Save Output

☐ Latex Plot and Table (requires Matlab2tikz)

Output folder

Abbildung 7.1: Graphical User Interface (GUI) des neuen Tools EACT2 zur Abschätzung der Wirkung des Kantenabsorbers.



(a) Von EACT2 berechnete Äquivalente Absorptionsfläche in Abhängigkeit von der Raummodenverteilung.

(b) Darstellung der Modenfrequenzen.

Abbildung 7.2: Ausgegebene Grafiken bei Berechnung eines Quaderhauses mit den Maßen 7 x 5 x 3 m.

Beide Grafiken, wie auch eine Tabelle mit den errechneten Werten werden bei Auswahl als *tex*-Dateien ausgegeben, zur direkten Verwendung in *Latex*.

7.2 Simulation mit CATT-Acoustic

Die Wirkungsweise und die Genauigkeit der berechneten Absorptionswerte eines Kantenabsorbers soll im folgenden Kapitel 7.3 über eine raumakustische Simulation überprüft werden. Daher wird in diesem Kapitel durch die Vorher- und Nachhermessung im Hörsaal FSI2 aus Kapitel 2 überprüft, ob und wie eine akustische Simulation mit dem Kantenabsorber durchgeführt werden kann und wie groß der Fehler zwischen simulierter und gemessener Nachhallzeit ausfällt. Für die Simulation wird die gängige Simulationsoftware *CATT-Acoustic* verwendet.

7.2.1 Aufgaben- und Problemstellungen

Die raumakustische Simulation des Kantenabsorbers birgt einige Fragen und Probleme in sich, die bei Verwendung einer Simulationssoftware vorab berücksichtigt werden müssen. Für eine aussagekräftige raumakustische Simulation sind (ganz allgemein) einige Eigenschaften zu berücksichtigen:¹²

- Bei der Erstellung des Modelles eines Raumes ist darauf zu achten, dass kleine Details unberücksichtigt bleiben. Eine zu detaillierte Darstellung (kleine Ecken, Flächen, etc.) führt zu Problemen, da das *Ray-tracing* in diesen Bereichen nicht möglich ist. Details können durch die Erhöhung der Diffusität im entsprechenden Bereich berücksichtigt werden. Das Programm-Feature *autoedge* sollte bei kleinen Flächen mit freistehenden Ecken und bei Bereichen mit Impedanz-Fehlanpassung verwendet werden.
- Bei der Planung eines Neubauprojektes können die Absorptionswerte aus verschiedenen Tabellen entnommen werden. Soll eine akustische Sanierung modelliert werden, ist die Ermittlung der Absorption mitunter nicht ganz einfach. Auch in diesem Fall sollte versucht werden, gemessene Absorptionswerte für die verschiedenen Oberflächen aus Tabellen zu entnehmen. Sofern möglich, sollte auch nach Werten für die Diffusität der Materialien gesucht werden. Weicht die Simulation bei Verwendung dieser Werte aber stark von der gemessenen Nachhallzeit ab, muss eine Abschätzung der Absorption erfolgen. Bei diesem Tuning der Absorptionswerte sollte darauf geachtet werden, dass die Werte von den bestimmten Absorptionswerten nicht zu stark abweichen.
- Die Diffusität darf dabei nie außer Acht gelassen werden. Es sollten immer individuelle *Scattering*-Faktoren für Oberflächen und Materialien verwendet werden.
- Inventar und Publikums- bzw. Hörerbereich sollten im Modell ebenfalls Berücksichtigung finden. Bei einem Neubauprojekt sollte der Publikumsbereich als zusätzliche Absorptions- und Diffusitätsquelle immer mit berücksichtigt werden. Wird versucht, eine gemessene Nachhallzeit durch die Simulation zu reproduzieren, um darauf folgend eine Sanierung zu planen (wie im folgenden Simulationsbeispiel), ist der Zustand des Raumes während der Nachhallzeitmessung zu planen. Da Messungen zumeist im leeren Raum stattfinden, ist die Wirkung des Publikums vorerst zu ignorieren. Erst nach der Anpassung des Modells an die Messung bei der Planung neuer akustischer Maßnahmen kann die Wirkung des Publikums ergänzt werden.

Eines der schwerwiegendsten Probleme der Simulation mit *CATT-Acoustic* ist die Tatsache, dass die Berechnungsmethode auf geometrischer Akustik beruht. Dies bedeutet, dass Modenphänomene durch die Simulation nicht berücksichtigt werden können. Erst oberhalb der Schröderfrequenz kann die Simulation Ergebnisse liefern, die der Wirkung in der Realität entsprechen. Für

¹² In diesem Zusammenhang möchte ich dem Entwickler der Software *CATT-Acoustics* Herrn Bengt-Inge Dalenbäck danken, der auf viele Schwierigkeiten hingewiesen hat und wertvolle Unterstützung zu diesem Projekt geliefert hat. Auf der Homepage von *CATT-Acoustics* unter <http://www.catt.se/users.htm> sind viele weitere Instruktionen und Hilfestellungen zur Simulation mit *CATT-Acoustics* abrufbar.

die Simulation des Kantenabsorbers stellt diese Tatsache ein großes Problem dar, da dieser sein Absorptionsmaximum unterhalb der Schröderfrequenz aufweist.¹³ Unterhalb der Schröderfrequenz kann nur eine Abschätzung der Wirkung erfolgen. Hierbei spielt wieder die Größe des Fehlers eine entscheidende Rolle.

Natürlich sind auch Simulationen mit anderen Produkten, die zur Beeinflussung der Raumakustik verwendet werden, erst ab der Schröderfrequenz aussagekräftig. Deshalb ist es von großem Interesse, dass die Simulation vor allem im Bereich über der Schröderfrequenz gute Ergebnisse liefert um konkurrenzfähig zu sein. Durch gute Vorhersagbarkeit der Wirkung ab der Schröderfrequenz bis 4000 Hz (maximal berechenbare Frequenz in *CATT-Acoustic*) kann der Einsatz so geplant werden, dass die Sollwerte einer vorgegebenen, zu erfüllenden Norm in diesem akustisch wichtigen Bereich erreicht werden. Der Fehler muss dazu meist kleiner als +20 % sein. Für den Frequenzbereich darunter ist die zulässige Abweichung vom errechneten Norm-Wert meist größer, da die Wirkung nur schlecht simuliert werden kann. Es wäre also wünschenswert, wenn sich der Fehler der Simulation wie in Abbildung 7.3 verhalten würde.

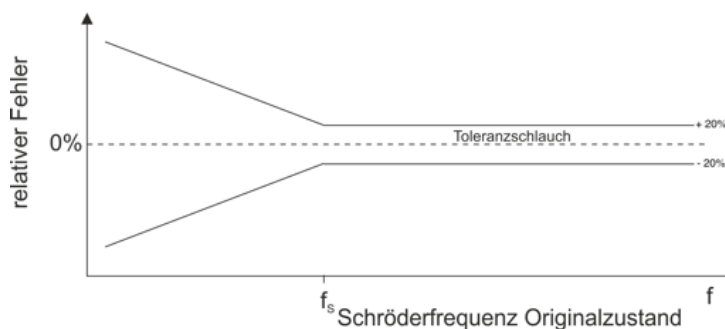


Abbildung 7.3: Schematische, qualitative Darstellung eines Toleranzschlauches für eine zu erfüllende, normgerechte Nachhallzeit.

Nach dem Einbau akustisch wirksamer Elemente sinkt die Schröderfrequenz, da die Nachhallzeit kürzer wird.

$$f_{\text{Schröder}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (7.1)$$

Dadurch sollte sich auch der Bereich, in dem die Simulation bessere Ergebnisse liefern kann, erweitern. Die Aussagekraft kann also zu tiefen Frequenzen hin gesteigert werden, wie in Abbildung 7.4 dargestellt.

Für das Simulationsbeispiel, welches in Kapitel 7.2.2 folgt, wird wiederum der Hörsaal *FSI2* herangezogen. Dieser weist vor der Sanierung ein Volumen von 256,40 m³ und einen Mittelwert der Nachhallzeit von 1,58 s auf (berechnet aus allen Terzbändern zwischen 50 und 8000 Hz). Dies ergibt eine Schröderfrequenz von 157 Hz. Durch den Einbau des Kantenabsorbers wird das Luftvolumen im Raum auf 250,90 m³ verkleinert und die Nachhallzeit auf 0,70 s im Durchschnitt verkürzt. Somit ergibt sich eine neue Schröderfrequenz von 106 Hz. Die Simulation sollte also zu tieferen Frequenzen hin aussagekräftigere Ergebnisse liefern. Überprüfbar ist dies leider anhand der Simulation nicht, da die Schröderfrequenz sowohl vor als auch nach der Optimierung in der 125-Hz-Oktave liegt. Eine Auflösung in Terzbändern würde hier vielleicht

¹³ Um die Dämpfung der Moden unterhalb der Schröderfrequenz zu berechnen, wäre eine *FEM*-Simulation notwendig. Da die Modellbildung mit der *Finite-Elemente-Methode* allerdings sehr aufwendig und komplex ist, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, da für akustische Planungen und Sanierungen in der Praxis eher keine solche Simulation durchgeführt werden wird.

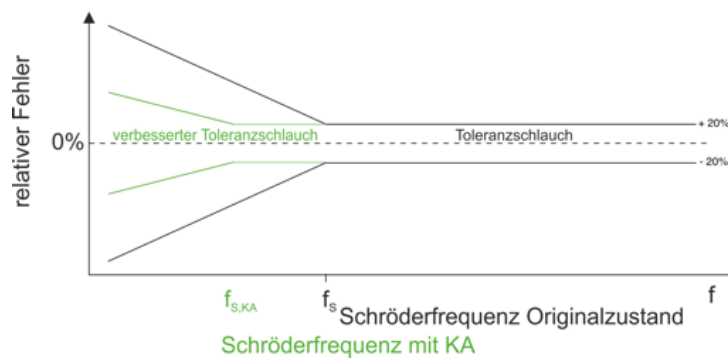


Abbildung 7.4: Verbesserter Toleranzschlauch durch akustische Maßnahme.

einen Unterschied zeigen. Der Fehler müsste sich ab der Terz, in der die Schröderfrequenz liegt, signifikant verschlechtern.

Wie bereits vielfach in dieser Arbeit gezeigt, erreicht der Kantenabsorber im tieffrequenten Bereich Absorptionsgradwerte α von deutlich über 1. Physikalisch können diese Ergebnisse nicht ausschließlich durch geometrische Raumakustik beschrieben werden. Simulationsprogramme basieren aber auf den Formeln geometrischer Akustik und folglich ist der Absorptionsgrad α auf 1 begrenzt. Dennoch muss für die Simulation von Kantenabsorbern ein Weg gefunden werden, um auch Absorptionswerte über 1 bei der Simulation berücksichtigen zu können.

Ein Lösungsansatz wäre hier, den Kantenabsorber für die Simulation zu vergrößern, um eine größere akustisch wirksame Oberfläche zu schaffen. Die Werte für α müssen im selben Verhältnis zur Vergrößerung der Oberfläche verkleinert werden. Erreicht man z.B. einen maximalen Absorptionswert von 1,5 in einem Oktavband, muss die Oberfläche um diesen Faktor vergrößert werden. Dadurch wird der Absorptionswert in diesem Oktavband auf 1 und die übrigen Oktavbänder nach unten skaliert. Wichtig ist dabei, dass der Absorber symmetrisch vergrößert wird, also z.B. von 40 x 40 cm auf 60 x 60 cm. Allerdings bringt diese Methode das Problem mit sich, dass durch die Vergrößerung der Oberfläche auch eine Verminderung des Volumens im Raum stattfindet. Daher bleibt die Frage zu klären, wie gut diese Methode funktioniert. Da mehr als eine Abschätzung der Wirkung des Kantenabsorbers nicht möglich ist, ist zu untersuchen, ob diese Vorgehensweise eine Verbesserung bringt.

7.2.2 Planung

Für die Simulation werden die Ergebnisse der Vorher- und Nachhermessung der Nachhallzeit aus Kapitel 2 verwendet, aus welchen der Absorptionsgrad des Kantenabsorbers berechnet werden kann. Die durchgeführte Sanierung im Hörsaal FSI2 wird in der Simulation nachgebildet und anhand der errechneten Absorptionwerte kann eine zu erwartende Nachhallzeit simuliert werden. Das Simulationsergebnis für die Nachhallzeit kann dann mit der Messung im FSI2 nach dem Einbau der Kantenabsorber gegenübergestellt werden. Die Simulation von Kantenabsorbern kann so auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden.

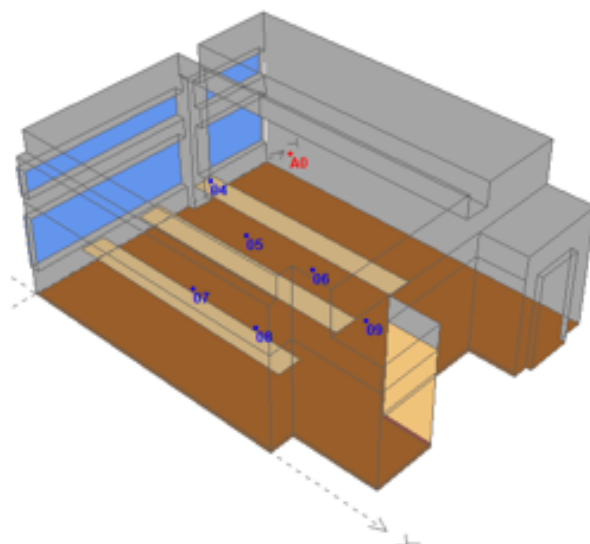


Abbildung 7.5: Modell des FSI2.

Insgesamt wurden 3 Simulationen für dieses Beispiel geplant:

- Das erste Modell wurde ohne den Kantenabsorber geplant. Dieses wurde zur Anpassung der simulierten an die gemessene Nachhallzeit verwendet (kalibrieren des Simulationsmodells durch die Vorhermessung). Die Absorptions- und Streuungswerte der Oberflächen wurden aus Tabellen entnommen. Die Absorptionswerte wurden so lange verändert, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden konnte. Hierbei wurde darauf geachtet, möglichst kleine Änderungen an den bestimmten Absorptionswerten vorzunehmen.
- Im zweiten Modell wurde der Kantenabsorber eingebracht. Er wurde mit der Dimension 40 mal 40 cm (Originalmaß) verbaut. Für die Oktavbänder, in welchen ein Absorptionsgrad von α größer 1 erreicht wurde, wurde der Absorptionsgrad auf 1 begrenzt. Für die Oktavbänder mit kleineren Absorptionswerten wurden die tatsächlich gemessenen Werte eingetragen (siehe Tabelle 7.1).

Frequenz	125	250	500	1000	2000	4000
Gemessenes α	1,37	1,07	0,88	0,56	0,40	0,34
Für Simulation verwendetes α	0,99	0,99	0,88	0,56	0,40	0,34

Tabelle 7.1: Gemessenes und verwendetes α für die Simulation des Kantenabsorbers mit 40 × 40 cm.

- Die abschließende Modellierung beinhaltet einen Kantenabsorber, dessen akustisch wirksame Oberfläche vergrößert wurde (siehe Kapitel 7.2.1). Für ein maximales α von 1,37 bei 125 Hz (tiefstes mögliches Oktavband der Simulation), musste die Oberfläche um den Faktor 1,38 vergrößert werden, um ein α von 0,99 zu erreichen. Das Außenmaß des Kantenabsorbers wurde auf 55,32 mal 55,32 cm vergrößert. Die skalierten Werte für α werden in Tabelle 7.2 dargestellt.

Frequenz	125	250	500	1000	2000	4000
Skaliertes α	0,99	0,77	0,64	0,40	0,29	0,25

Tabelle 7.2: Skaliertes α für die Simulation des Kantenabsorbers mit 55,32 × 55,32 cm.

Durch die Simulation beider Dimensionen kann die Auswirkung der Skalierung in den Oktaven zwischen 500 und 4000 Hz überprüft werden. Die Skalierung sollte für diese Oktaven keine nennenswerte Auswirkung auf die Simulation haben.

7.2.3 Ergebnisse

In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse der drei Simulationen dargestellt. Die Auswertung erfolgte an 6 Positionen im Raum, deren Ergebnisse gemittelt wurden, um so ein Ergebnis für den Raum zu erhalten. Die Positionen entsprechen Mikrofonpositionen bei der Nachhallzeitmessung. Im Anhang B sind die detaillierten Ergebnisse für alle Positionen dargestellt. Die Ergebnisse der ersten Simulation ohne Kantenabsorber zeigen, wie gut die simulierte Nachhallzeit auf die gemessene abgestimmt werden konnte.

Aus den Grafiken im Anhang B bzw. Abbildung 7.6 erkennt man, dass CATT-Acoustic 2 Nachhallzeitkurven errechnet. Die rote Linie, anhand der die Auswertung in Abbildung 7.3 stattfindet, basiert auf der Berechnung anhand eines Energie-Echograms. Die blaue Linie basiert auf der Druck-Impulsantwort und gibt indirekt an, wie gut man sich auf die Simulationsergebnisse im tieffrequenten Bereich verlassen kann. (vgl. <https://www.catt.se/TUCT/TUCToverview.html>) Mit steigendem Abstand zwischen den Verläufen erhöht sich die Unsicherheit des Simulationsergebnisses.

Frequenz		125	250	500	1000	2000	4000
Raum ohne Kantenabsorber	Gemessene T_{20} [s]	1,70	1,31	0,95	0,79	0,88	0,89
	Simulierte T_{20} [s]	1,68	1,31	0,94	0,80	0,87	0,89
	Differenz [s]	-0,02	0,00	-0,01	0,01	-0,01	0,00
	Differenz prozentual	-1 %	0 %	-1 %	1 %	-1 %	0 %
Raum mit Kantenabsorber	Gemessene T_{20} [s]	0,71	0,71	0,63	0,62	0,73	0,76
	Simulierte T_{20} [s]	0,97	0,92	0,85	0,78	0,81	0,78
	Differenz [s]	0,26	0,21	0,22	0,16	0,08	0,02
	Differenz prozentual	36,62 %	29,58 %	34,92 %	25,81 %	10,96 %	2,63 %
Raum mit vergrößertem Kantenabsorber	Gemessene T_{20} [s]	0,71	0,71	0,63	0,62	0,73	0,76
	Simulierte T_{20} [s]	0,89	0,87	0,76	0,69	0,75	0,74
	Differenz [s]	0,18	0,16	0,13	0,07	0,02	-0,02
	Differenz prozentual	25,35 %	22,54 %	20,63 %	11,29 %	2,74 %	-2,63 %

Tabelle 7.3: Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten Simulation bei Energieauswertung.

Für die beiden Simulationen mit dem Kantenabsorber bestätigt sich, was vermutet wurde. Bei Energieauswertung nimmt der Fehler mit steigender Frequenz ab und das Ergebnis wird immer besser. Auffallend ist jedoch, dass der Fehler auch in höheren Terzbändern (500 bis 2000 Hz) bei der Simulation des 40 x 40 cm Kantenabsorbers groß ausfällt, obwohl in diesem Bereich der Absorptionsgrad α kleiner 1 ist. Durch die Skalierung des Kantenabsorbers wird das Ergebnis breitbandig verbessert. Es liefert eine passable Abschätzung.

Die Wirkung wird in der Simulation geringer prognostiziert als sie in Wirklichkeit gemessen wurde. Plant man mit dieser Abschätzung eine akustische Sanierung, ist davon auszugehen, dass der Kantenabsorber die Nachhallzeit real stärker verkürzen wird. Dies gilt vor allem für den tieffrequenten Bereich.

Exemplarisch ist in Abbildung 7.6 der simulierte Kurvenverlauf an Messposition 7 für die vergrößerte Kantenabsorberoberfläche dargestellt. Der große Unterschied zwischen den beiden Kurven im tieffrequenten Bereich lässt erkennen, dass man sich auf die Ergebnisse nur schlecht verlassen kann. Die Berechnung anhand der Druck-Impulsantwort liefert bessere Ergebnisse, weshalb eine 2. Auswertung anhand dieser Kurve erfolgt.

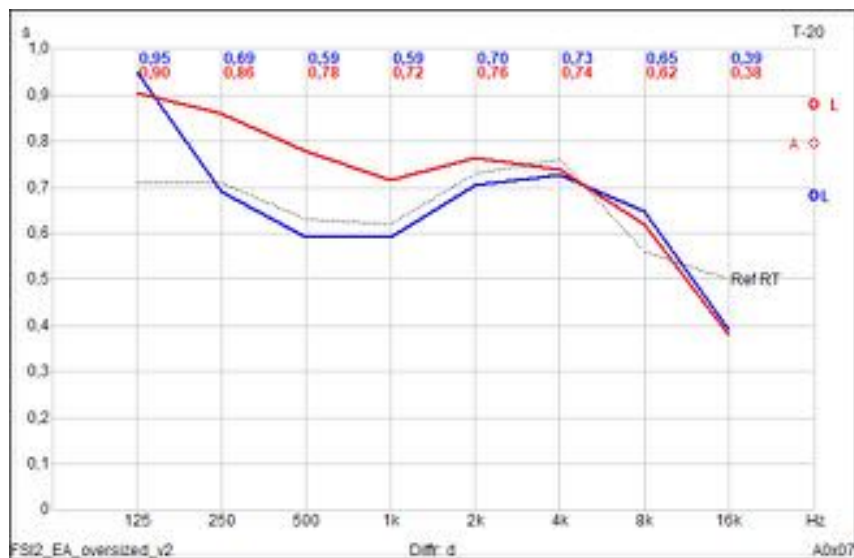


Abbildung 7.6: Vergleich rote und blaue Kurve anhand Messposition 7 bei Simulation mit dem vergrößerten Absorber.

Frequenz		125	250	500	1000	2000	4000
Raum mit Kantenabsorber	Gemessene T_{20} [s]	0,71	0,71	0,63	0,62	0,73	0,76
	Simulierte T_{20} [s]	0,85	0,77	0,67	0,65	0,73	0,77
	Differenz [s]	0,14	0,06	0,04	0,03	0,00	0,01
	Differenz prozentual	19,72 %	8,45 %	6,35 %	4,84 %	0,00 %	1,32 %
Raum mit vergrößertem Kantenabsorber	Gemessene T_{20} [s]	0,71	0,71	0,63	0,62	0,73	0,76
	Simulierte T_{20} [s]	0,81	0,69	0,61	0,60	0,70	0,72
	Differenz [s]	0,10	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04
	Differenz prozentual	14,08 %	-2,82 %	-3,17 %	-3,23 %	-4,11 %	-5,26 %

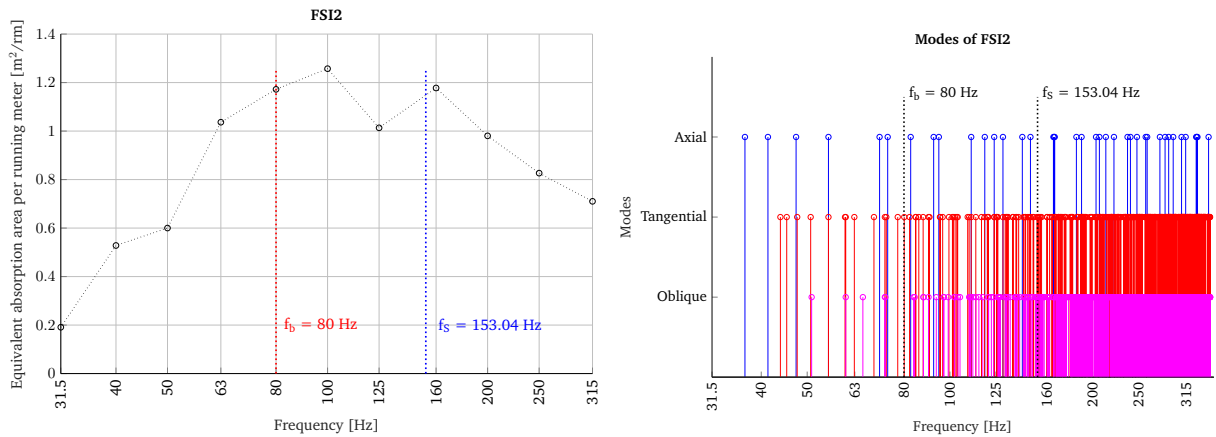
Tabelle 7.4: Ausgewertete Ergebnisse der Simulation berechnet mit der Impulsantwort.

Durch die Berechnung mittels Impulsantwort kann die Qualität der Simulation deutlich verbessert werden. Für die Simulation des vergrößerten Absorbers ergeben sich nun kürzere Nachhallzeiten als zu den im Raum gemessenen Werten. Der Fehler bleibt aber mit etwas über 5 % relativ gering. Eine Ausnahme stellt das 125-Hz-Oktavband dar, bei welchem der Fehler zwar verringert werden kann, jedoch mit 14 % deutlich größer als bei den übrigen Terzbändern bleibt.

7.3 Simulation mit den berechneten EACT2-Werten für den FS12

Es soll nun gezeigt werden, wie präzise die Berechnung der Absorptionswerte durch EACT2 und anschließende Simulation mit den errechneten Werten ist. Der zu erwartende Fehler soll evaluiert werden.

Mit dem EACT2 wird zu Beginn die zu erwartende äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter berechnet (dargestellt in Abbildung 7.7(a)).



(a) Berechneter Verlauf der Äquivalente Absorptionsfläche im FS12.

(b) Darstellung der Modenfrequenzen im FS12.

Abbildung 7.7: Ausgegebene Grafiken bei Berechnung des FS12 als Quaderraum mit den Maßen 9,28 x 7,24 x 4,15 m.

In Abbildung 7.8 wird das Ergebnis der Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter durch EACT2 der nach der Sanierung gemessenen Absorptionsfläche gegenübergestellt. Man erkennt, dass die berechnete Kurve den Extremwerten nicht folgen kann und in diesen Bereichen die größten Abweichungen entstehen (siehe 100 bzw. 106 Hz). In den meisten Terzbändern liegt der Wert, wenn auch nur knapp, innerhalb der 20 % Grenze, welche zu Beginn der Arbeit als wünschenswerte Abschätzungsgenauigkeit angeführt wurde. Für die meisten Terzbänder liegt die errechnete äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter unter der gemessenen.

Basierend auf der Überlegung, dass der Kantenabsorber vor allem im tieffrequenten Bereich sein spezifisches Absorptionsmaximum aufweist, wurden EACT1 und EACT2 nur bis zur 315-Hz-Terz ausgeführt. Für die Simulation müssen daher Absorptionswerte für die Oktaven zwischen 500 und 4000 Hz berechnet werden. Aus den gemessenen Werten für die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter wurde ein Mittelwert für jede Terz errechnet. Aus drei Terzen wurde anschließend ein Mittelwert für jede Oktave errechnet, wie in Tabelle 7.5 zu erkennen ist. Diese Durchschnittswerte für die äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber werden für die Simulation herangezogen.

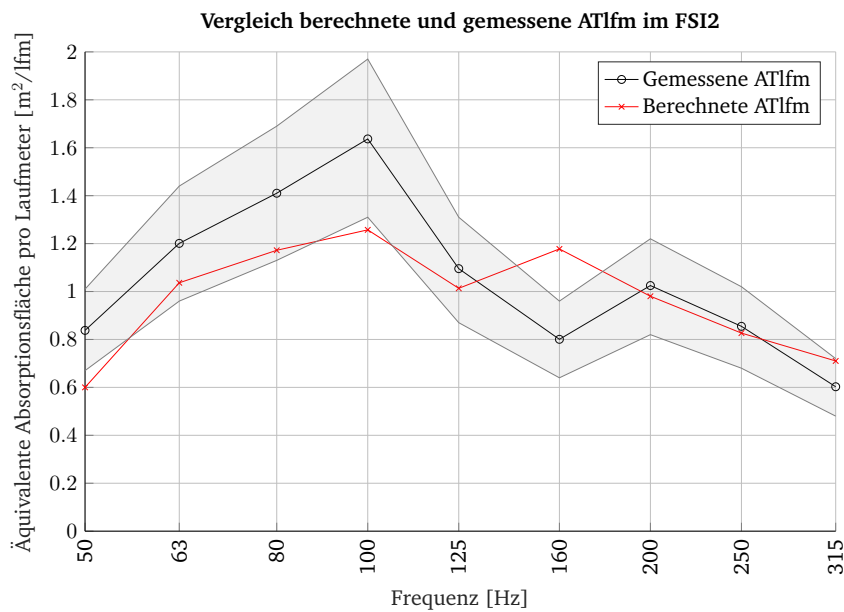


Abbildung 7.8: Vergleich zwischen berechneter und gemessener äquivalenter Absorptionsfläche im FSI2. Grauer Bereich stellt den Bereich von ± 20 Prozent des gemessenen Wertes dar.

Oktavband in Hz	500			1000			2000			4000		
Terzband in Hz	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
ATl _{fm} Hallraum [m^2/lfm]	0,65	0,55	0,51	0,46	0,40	0,36	0,32	0,30	0,26	0,26	0,25	0,28
ATl _{fm} BRG Kepler [m^2/lfm]	0,94	0,85	0,38	0,30	0,26	0,24	0,17	0,12	0,10	0,07	0,09	0,10
ATl _{fm} HS FSI1 [m^2/lfm]	0,60	0,57	0,47	0,33	0,25	0,22	0,25	0,13	0,18	0,13	0,22	0,20
ATl _{fm} HS FSI2 [m^2/lfm]	0,55	0,31	0,41	0,23	0,24	0,10	0,17	0,13	0,12	0,13	0,08	0,12
ATl _{fm} HS i14 [m^2/lfm]	0,66	0,85	0,66	0,46	0,58	0,46	0,48	0,38	0,41	0,42	0,35	0,24
Mittelwert der ATl _{fm} pro Terzband [m^2/lfm]	0,68	0,63	0,49	0,36	0,35	0,28	0,28	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19
Mittelwert der ATl _{fm} pro Oktavband [m^2/lfm]	0,60			0,33			0,23			0,20		

Tabelle 7.5: Äquivalente Absorptionsfläche für 500 bis 4000 Hz berechnet aus Mittelwert der gemessenen Terzbänder.

Auch das Berechnungsergebnis des EACT2 wurde gemittelt, um aus 3 Terzbändern einen Wert pro Oktave zu erhalten (siehe Tabelle 7.6).

Oktavband [Hz]	125			250		
Terzband [Hz]	100	125	160	200	250	315
ATl _{fm} pro Terzband [m^2/lfm]	1,26	1,01	1,18	0,98	0,83	0,71
ATl _{fm} pro Oktavband [m^2/lfm]	1,15			0,84		

Tabelle 7.6: Mit EACT2 berechnete Äquivalente Absorptionsfläche für 125 und 250 Hz berechnet aus Mittelwert der Terzbänder.

Die errechneten Werte für die äquivalente Absorptionfläche pro Laufmeter werden in Tabelle 7.7 umgerechnet. Man erhält für den Kantenabsorber mit 40 x 40 cm Außenabmessung ein maximales α von 1,44 in der 125-Hz-Oktave. Mit der in Kapitel 7.2 verwendeten Skalierung des Kantenabsorbers auf ein Außenmaß von 55,32 x 55,32 cm wird α bei 125 Hz auf 1,04 skaliert. Obwohl dieser Wert noch zu groß für die Eingabe in die Simulation ist, wurde die Simulation ohne weitere Vergrößerung der Abmessung des Kantenabsorbers durchgeführt. In der 125-Hz-Oktave wurde der maximale Wert von 0,99 verwendet. Bei der anschließenden Analyse ist also zu berücksichtigen, dass die Absorptionwirkung in dieser Oktave noch deutlicher ausfallen

würde.

Oktavbänder in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter [m^2/lm]	1,15	0,84	0,60	0,33	0,23	0,20
Gesamte Äquivalente Absorptionsfläche bei 31 Laufmetern [m^2]	35,65	26,04	18,56	10,13	7,26	6,10
α für Kantenabsorber mit 40 x 40 cm	1,44	1,05	0,74	0,41	0,29	0,25
α für Kantenabsorber mit 55,32 x 55,32 cm	1,04	0,76	0,54	0,30	0,21	0,18

Tabelle 7.7: Berechnete Werte für die Simulation.

Die Darstellung der Nachhallzeitverläufe in Abbildung 7.9 zeigt, dass der Fehler vor allem für die Auswertung anhand der Druck-Impulsantwort klein ist. Die Auswertung für das Energie Echo-gramm weist größere Abweichungen auf, welche teilweise auch außerhalb des grauen Bereichs, der eine 20 prozentige Abweichung von der gemessenen Nachhallzeit kennzeichnet, liegen. Zu berücksichtigen ist, dass die Abweichung in der 125-Hz-Terz bei richtiger Skalierung noch verkleinert werden könnte. Es ist außerdem festzuhalten, dass die Absorptionswirkung durch das EACT2 eher unter- als überschätzt wird. Man kann also davon ausgehen, dass der Absorber in Realität besser wirkt als mit der Simulation vorab kalkuliert wurde.¹⁴

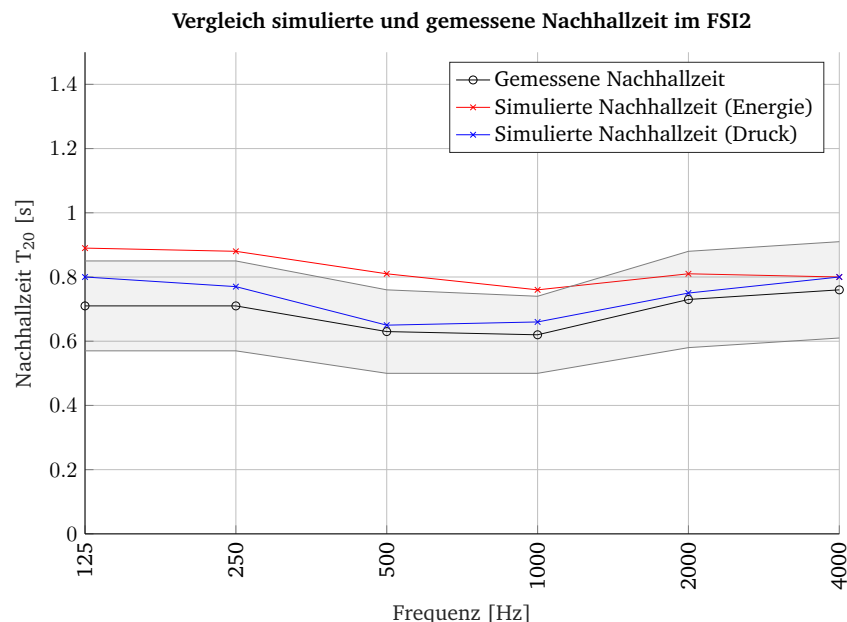


Abbildung 7.9: Vergleich zwischen simulierter und gemessener Nachhallzeit im FS12. Grauer Bereich stellt den Bereich von ± 20 Prozent des gemessenen Wertes dar.

In Tabelle 7.8 ist die maximale prozentuelle Abweichung zu erkennen, welche bei der Auswertung der Druck-Impulsantwort unter 13 % bleibt. Im Durchschnitt liegt die Abweichung deutlich unter 10 %.

¹⁴ Der Nachhallzeitverlauf für alle verwendeten Messpositionen ist in Anhang B im Kapitel „Simulation 4“ dargestellt.

Frequenz		125	250	500	1000	2000	4000
Auswertung Energie-Echogramm	Gemessene T_{20} [s]	0,71	0,71	0,63	0,62	0,73	0,76
	Simulierte T_{20} [s]	0,89	0,88	0,81	0,76	0,81	0,80
	Differenz [s]	0,18	0,17	0,18	0,14	0,08	0,04
	Differenz prozentual	25,35 %	23,94 %	28,57 %	22,58 %	10,96 %	5,26 %
Auswertung Druck-Impulsantwort	Gemessene T_{20} [s]	0,71	0,71	0,63	0,6	0,73	0,76
	Simulierte T_{20} [s]	0,80	0,77	0,65	0,66	0,75	0,80
	Differenz [s]	0,09	0,06	0,02	0,04	0,02	0,04
	Differenz prozentual	12,68 %	8,45 %	3,17 %	6,45 %	2,74 %	5,26 %

Tabelle 7.8: Ausgewertete Ergebnisse der Simulation mit berechneten Absorptionswerten.

7.4 Zusammenfassung

Das EACT2 liefert eine gute Abschätzung des Absorptionsverhaltens für den tieffrequenten Bereich, die durch Vergrößerung der akustisch wirksamen Oberfläche des Kantenabsorbers für eine Simulation verwendet werden kann. Für die Auswertung der Druck-Impulsantwort liefert die Simulation gute Ergebnisse. Dadurch ist eine grobe Abschätzung der Wirksamkeit des Kantenabsorbers mit vertretbarer Genauigkeit gegeben, die jedenfalls eine Verbesserung zur bisherigen Situation darstellt, in der keine Berechnungsmöglichkeiten für Kantenabsorber vorhanden sind.

Der Vergleich zwischen Berechnung und Messung zeigt, wie gut die Abschätzung durchgeführt werden kann. Mit einer maximalen Abweichung von 12 % liegt das Ergebnis deutlich im Toleranzband und erfüllt damit die Ansprüche der Norm. Allerdings sind noch weitere Simulationen durchzuführen, um die Aussagekraft dieses Ergebnisses zu bestätigen.

Da die Absorptionswirkung aber eher kleiner errechnet wird, als sie im realen Einbau ausfällt, stellt die Berechnung ein „worst-case-scenario“ dar. Die reale Nachhallzeit wird eher noch geringer ausfallen, als sie vorab simuliert werden kann.

8

Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

8.1 Zusammenfassung und Fazit

Der Kantenabsorber ist ein einfacher und günstiger Absorbertyp, der in Ecken und Kanten von Räumen montiert wird. Wie in dieser Arbeit generell, vor allem aber am Hörsaal FSI2 gezeigt und in vielen weiteren Arbeiten bereits dargelegt wurde, funktioniert der Kantenabsorber als tieffrequente Modenbremse mit breitbandiger Wirkung hervorragend. Er sollte in Räumen mit ansteigender Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin die erste Wahl zur akustischen Sanierung sein. Die Analyse der akustischen Sanierung im Hörsaal FSI2 in Kapitel 2 demonstriert eindrucksvoll die Wirkungsweise. Die einfache und kostengünstige Herstellung sowie platzsparende Montage an der Decke sind weitere Argumente für den Einsatz.

Bei der Planung einer akustischen Sanierung mit dem Kantenabsorber ist eine genaue Analyse der Räumlichkeiten notwendig. Dabei sollte großer Wert auf eine ordnungsgemäß durchgeführte Messung der Nachhallzeit gelegt werden, da speziell im tieffrequenten Bereich leicht Fehler entstehen können. Durch Vergrößerung der Abmessungen des Kantenabsorbers kann die untere Grenzfrequenz zu tieferen Frequenzen hin verschoben werden. Die Wirkungsbandbreite des Kantenabsorbers wird dadurch ausgeweitet, ohne das Absorptionsverhalten in höheren Frequenzen zu beeinflussen. Eine durchgehende Montage des Kantenabsorbers an der längsten Kante des Raumes ist für maximale Absorption unerlässlich. Durch den Einsatz in weiteren Kanten, wie z.B. Höhenkanten, kann das Absorptionmaximum breitbandiger gestaltet werden.

Das *EACT1*, ein erstes Abschätzungstool zur Wirkung des Kantenabsorbers von Daniel Reisinger (aus [Rei19]), konnte durch die Verwendung von Optimierungsalgorithmen (*OPT1*) deutlich verbessert werden. Außerdem konnten weitere wichtige Erkenntnisse aus dem Optimierungsprozess gewonnen werden: eine separate Optimierung für jedes Terzband und damit optimierte Konstantensätze pro Terzband liefern bessere Ergebnisse als die Optimierung über alle Terzbänder und durch eine Erhöhung der Modenordnung kann das Ergebnis weiter verbessert werden. Jedoch bleibt die Differenz zwischen Messergebnis und Abschätzung der Wirkung groß und liegt deutlich außerhalb des $\pm 20\%$ Toleranzbereiches, der zu Beginn der Arbeit als wünschenswertes Ziel definiert wurde. Durch *OPT2* soll dieser Abschätzungsfehler weiter verringert werden.

Mit der Optimierungsumgebung *OPT2* konnte die Abschätzung deutlich verbessert werden. Durch die Einführung neuer Features (Eingangsdaten, die Raumeigenschaften beinhalten) konnte eine bessere Verbindung zwischen den akustischen Raumeigenschaften und dem gemessenen Absorptionsverhalten des Kantenabsorbers hergestellt werden. Es muss jedoch ganz klar festgehalten werden, dass die vorhandene Datenmenge (Messdaten) zu gering ist. Durch bessere und vor allem mehr Messergebnisse könnten weitere Algorithmen verwendet werden, um die Abschätzung schrittweise weiter zu verbessern. Trotz der geringen Datenmenge konnte der Fehler im Mittel bereits auf unter 20 % gebracht werden.

Die durch *OPT2* berechneten Konstanten, die das Berechnungsergebnis mit der kleinsten Differenz zur gemessenen äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter lieferten, wurden für die Erstellung eines neuen Berechnungstools (*EACT2*) herangezogen. Durch Eingabe der Abmessung

eines beliebigen Raumes, kann die zu erwartende äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber für Absorber der Dimension $40 \times 40 \text{ cm}$ berechnet werden.

Die errechneten Absorptionswerte können für eine akustische Simulation verwendet werden, um akustische Maßnahmen zu planen. Dabei ist ganz klar festzuhalten, dass eine Simulation des Kantenabsorbers mit *CATT-Acoustic* mit zahlreichen Fehlerquellen behaftet ist. Die physikalischen Grundlagen der Software sind für diese Aufgabe nicht geeignet. Eine Abschätzung ist aber möglich und macht auch durchaus Sinn, da die vorhergesagte Wirkung in der Realität stärker ausfällt. Wenn eine maximale Nachhallzeit nicht überschritten, aber durchaus unterschritten werden darf, kann die Planung mit *CATT-Acoustic* erfolgen.

Abschließend wurden anhand der Messergebnisse, die bei der Sanierung des Hörsaals FS12 (Kapitel 2) gesammelt wurden, Berechnung und Simulation des Kantenabsorbers überprüft. Die Fehlabschätzung bleibt dabei deutlich innerhalb des Toleranzbandes von $\pm 20 \%$. Das Ziel, eine Berechnungsgrundlage zu schaffen, wurde also erreicht. Die Wirkung des Kantenabsorbers wird dabei eher unter- als überschätzt. Es ist davon auszugehen, dass der Absorber in Realität eher besser wirkt als er vorab berechnet bzw. simuliert werden kann.

8.2 Ausblick

Eine weitere Verbesserung der Berechnungsmethodik für den Kantenabsorber wäre wünschenswert, um den Kantenabsorber als vielseitig einsetzbaren Absorbertyp am Markt zu etablieren. Dafür unumgänglich erscheint die Generierung weiterer Messdaten. Messkampagnen müssen besser auf das Ziel, eine Berechnungsgrundlage zu schaffen, abgestimmt werden. Unterschiedliche Dimensionierungen, Absorbermaterialien und Aufstellungen sollten dazu untersucht werden. Mit einer entsprechend großen Datenbasis könnte begonnen werden, Raumeigenschaften (Features) und die daraus resultierende Wirkung des Kantenabsorbers besser in Verbindung zu setzen, um wichtige Eigenschaften für eine Planung zu erhalten.

Auch die Ausweitung der Optimierung *OPT2* auf den gesamten, akustisch interessanten Frequenzbereich bis zumindest 4000 Hz wäre nötig, um für akustische Simulationen eine Daten Grundlage zu erhalten.

Um die Wirkung des Kantenabsorbers, welche maßgeblich auf der Dämpfung von Moden beruht, besser simulieren zu können, wäre die Erstellung einer Simulation auf Basis der *Finite-Elemente-Methode* sicherlich zielführend. Es wäre damit eventuell möglich, die Absorptionswirkung verschiedener Dimensionierungen des Kantenabsorbers zu simulieren, ohne diese vorab real bauen und vermessen zu müssen. FEM-Simulationen sind aber weitaus aufwendiger zu erstellen als die für akustische Berechnungen üblichen Simulationsprogramme (*CATT-Acoustic*, *Ease*, ...). Sie sind daher für die alltägliche Anwendung eher unpraktikabel.

Literaturverzeichnis

- [ALTG10] N. W. Adelman-Larsen, E. R. Thompson, and A. C. Gade. Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *Acoustical Society of America*, 127:247 – 255, 2010.
- [Bau20] Bauphysik-Kalender 2020 : [Bau- und Raumakustik], 2020.
- [Ben03] Hans Benker. *Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen : Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung von MATHEMATICA, MAPLE, MATHCAD, MATLAB und EXCEL*. Engineering online library. Springer, 2003.
- [Ben10] Hans Benker. *Ingenieurmathematik kompakt - Problemlösungen mit MATLAB: Einstieg und Nachschlagewerk für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer, 2010.
- [DIN08] Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen, September 2008.
- [FHS19] Clemens Frischmann, Robert Hofer, and Klaus Schiller. Akustische Bestandsaufnahme der TU--Hörsäle Inffeldgasse, Jan 2019. Bachelorarbeit.
- [FL13] H.V. Fuchs and J. Lamprecht. Covered broadband absorbers improving functional acoustics in communication rooms. *Applied Acoustics*, 74:18 – 27, 2013.
- [FLX12] Helmut V. Fuchs, Janna Lamprecht, and Zha Xueqin. Lärmbekämpfung in Bildungsstätten: Kanten-Absorber für besseres Verstehen und Lernen. *Lärmbekämpfung Bd. 6*, 4:190 – 200, 2012.
- [Fuc13] Helmut V. Fuchs. Harte Kante gegen Lärm. *TrockenBau Akustik*, pages 56 – 59, June 2013.
- [Fuc17] Helmut V. Fuchs. Harte Kante für klare Worte. *TrockenBau Akustik*, pages 70 – 73, June 2017.
- [Fuc18] Helmut V. Fuchs. Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume - Teil 2: Bass-Verhältnis und Schallbelastung in kleineren Räumlichkeiten. *Akustik Journal*, 03/18:39 – 51, 2018.
- [FW15] Rüdiger Fasching and Korbinian Wegler. Akustischen Sanierung am Bundesrealgymnasium Kepler, May 2015. Bachelorarbeit.
- [HK17] Sieglinde Hetz and Janina Kordes. Planung und Evaluierung von Kantenabsorbern, Sep 2017. Bachelorarbeit.
- [KGW21] Eric Kurz, Gerhard Graber, and Werner Weselak. Systematische Untersuchungen zur Funktionsweise des Kantenabsorbers als „Modenbremse“. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2021.
- [Kut17] Heinrich Kuttruff. *Room Acoustics*. CRC Press, 2017.
- [ÖN05] ÖNORM B 8115: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik, November 2005.
- [Onl20a] Online. Mathworks documentation of fmincon. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>, 2020. Accessed: 25.03.2020.

- [Onl20b] Online. Mathworks documentation of lsqlin. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsqlin.html>, 2020. Accessed: 15.06.2020.
- [Onl20c] Online. Mathworks documentation of lsqnonneg. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqnonneg.html>, 2020. Accessed: 15.06.2020.
- [Onl20d] Online. Mathworks documentation of optimproblem. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/optimproblem.html>, 2020. Accessed: 25.03.2020.
- [Onl20e] Online. Mathworks documentation of solve. <https://www.mathworks.com/help/symbolic/solve.html>, 2020. Accessed: 25.03.2020.
- [Onl20f] Online. Norsonic product data sheet. <https://www.norsonic.de/schallpegelmesser-detailseite/Nor276.html?file=files/01-norsonic-tippkemper/bilder-content/produkt Datenbank/produkte/Nor276/Datenblatt%20Norsonic%20Schallquellen.pdf>, 2020. Accessed: 30.10.2020.
- [Ree07] Philipp Reents. Einfluss der Nachhallzeit von tiefen Frequenzen auf die Sprachqualität. Master's thesis, Graz University of Technology, Apr 2007.
- [Rei19] Daniel Reisinger. Entwicklung und Messung von Kantenabsorbern. Master's thesis, Graz University of Technology, Oct 2019.
- [Sin20] Gh. Reza Sinambari. Ingenieurakustik : Physikalische Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Übungen, 2020.
- [Sor12] Heinrich Sormann. Numerische Methoden in der Physik, Oct 2012. Skriptum zur Lehrveranstaltung.
- [Wei08] Stefan Weinzierl. Handbuch der Audiotechnik, 2008.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kurzes Modul des verwendeten Kantenabsorbers.	12
1.2	Toleranzbereich der Nachhallzeit für Sprache und Musikproberäume nach ÖNORM B 8115-3. [ÖN05]	14
2.1	Nachhallzeitverlauf im FSI2. Grauer Bereich kennzeichnet den Bereich idealer Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3.	15
2.2	Skizze der Kantenabsorber, angebracht an der Decke im Hörsaal FSI2.	16
2.3	Fotos vom Einbau der Kantenabsorber im Hörsaal FSI2.	17
2.4	Aufnahme mit Kunstkopf.	18
2.5	Nachhallzeit vor und nach dem Einbau im FSI2. Grauer Bereich kennzeichnet den Bereich idealer Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3.	18
2.6	STI vor und nach dem Einbau im FSI2	19
2.7	Pläne der beiden Messsetups im FSI2.	20
2.8	Vergleich der Nachhallzeit des fixen Einbaus im Vergleich zu den beiden Setups der mobilen Messung. Grauer Bereich kennzeichnet den Bereich idealer Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3.	21
2.9	Vergleich der äquivalenten Absorptionsfläche pro Laufmeter Kantenabsorber des fixen Einbaus im Vergleich zu den beiden Setups der mobilen Messung.	21
3.1	a) Absorptionsgrad α bezogen auf die gesamte Oberfläche bzw. b) Absorptionsfläche A in m^2 bezogen auf die Kantenlänge in m/m^2 von Kantenabsorbern mit verschiedenen Querschnitten; dicke Linie: $400\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$; dünne Linie: $200\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$; dick strichliert: $400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$; dünn strichliert: $200\text{ mm} \times 500\text{ mm}$; punktiert: $200\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ [Bau20]	24
3.2	Vergleich der Wirkung des Kantenabsorbers bei Aufstellungen in verschiedenen Kanten im Hallraum (Länge $8,35\text{ m}$, Breite $5,99\text{ m}$, Höhe $4,90\text{ m}$).	25
3.3	Schallleistungspegel des Norsonic Nor276 mit dem Verstärker Nor280 bei pinkem Rauschen. Quelle: [Onl20f]	27
3.4	KAG4 im Hallraum der TU Graz.	29
3.5	Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hallraum.	29
3.6	KAGT4 im Klassenraum des BRG Kepler.	30
3.7	Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Klassenraum des BRG Kepler.	31
3.8	KAG6 im Hörsaal FSI1.	32
3.9	Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hörsaal FSI1.	33
3.10	KAGT3 im Hörsaal FSI2.	33
3.11	Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hörsaal FSI2.	34
3.12	Hörsaal i14 an der TU Graz. An den Wänden wurden akustische Wandelemente angebracht.	35
3.13	KAGT2 im Hörsaal i14.	35
3.14	Nachhallzeit (T_{20}) und äquivalente Absorptionsfläche pro Laufmeter im Hörsaal i14.	36
4.1	Geometrisches Gewicht.	41
4.2	Frequenzgruppengewicht.	42
4.3	Schema der Optimierung.	43
4.4	Aufteilung der verschiedenen Optimierungssetups.	45

4.5	Statistische Auswertung der Differenz der Optimierungen des EACT1 mit Beschränkung der Konstanten.	48
4.6	Statistische Auswertung der Differenz der Optimierungen des EACT1 mit Beschränkung der Konstanten normiert in Prozent.	49
4.7	Statistische Auswertung der Differenz der Optimierungen des EACT1 ohne Beschränkung der Konstanten normiert in Prozent.	51
5.1	Grafik zu Feature 4 und 5.	55
5.2	Statistische Auswertung der Fehlabschätzung in Prozent für die verschiedenen verwendeten Algorithmen.	58
5.3	Statistische Auswertung der Fehlabschätzung in Prozent für die verschiedenen verwendeten Algorithmen im Terzbandbereich von 63 bis 125 Hz.	60
5.4	Statistische Auswertung der Fehlabschätzung in Prozent für die verwendeten Algorithmen ohne Berücksichtigung des Hallraums.	61
6.1	Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hallraum.	64
6.2	Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Klassenraum des BRG Kepler.	65
6.3	Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hörsaal FSI1.	66
6.4	Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hörsaal FSI2.	67
6.5	Ergebnisse der durchgeführten Optimierungen im Hörsaal i14.	68
7.1	Graphical User Interface (GUI) des neuen Tools <i>EACT2</i> zur Abschätzung der Wirkung des Kantenabsorbers.	72
7.2	Ausgegebene Grafiken bei Berechnung eines Quaderraumes mit den Maßen 7 x 5 x 3 m.	72
7.3	Schematische, qualitative Darstellung eines Toleranzschlauches für eine zu erfüllende, normgerechte Nachhallzeit.	74
7.4	Verbesserter Toleranzschlauch durch akustische Maßnahme.	75
7.5	Modell des FSI2.	76
7.6	Vergleich rote und blaue Kurve anhand Messposition 7 bei Simulation mit dem vergrößerten Absorber.	78
7.7	Ausgegebene Grafiken bei Berechnung des FSI2 als Quaderraum mit den Maßen 9,28 x 7,24 x 4,15 m.	79
7.8	Vergleich zwischen berechneter und gemessener äquivalenter Absorptionsfläche im FSI2. Grauer Bereich stellt den Bereich von +- 20 Prozent des gemessenen Wertes dar.	80
7.9	Vergleich zwischen simulierter und gemessener Nachhallzeit im FSI2. Grauer Bereich stellt den Bereich von +- 20 Prozent des gemessenen Wertes dar.	81
A.0.1	Schallquellen.	91
A.0.2	Aufbau des Messsystems im FSI2.	92
A.0.3	Skizze der Mikrofon- bzw. Quellpositionen.	92

Tabellenverzeichnis

2.1	Resultate der Messung im FSI2	19
2.2	Resultate der Messung im FSI2	22
3.1	Anzahl der Moden pro Terzband im Hallraum.	30
3.2	Anzahl der Moden pro Terzband im Klassenraum des BRG Kepler.	31
3.3	Anzahl der Moden pro Terzband im Hörsaal FSI1.	32
3.4	Anzahl der Moden pro Terzband im Hörsaal FSI2.	34
3.5	Anzahl der Moden pro Terzband im Hörsaal i14.	36
3.6	Spezifikation der Räume für die Optimierung.	37
4.1	Die optimierten Konstanten der besten Optimierungen des EACT1.	50
4.2	Die optimierten Konstanten der besten Optimierungen des EACT1 ohne Beschränkung der Konstanten.	52
5.1	Optimierte Konstantenvektoren der besten Optimierungen.	59
5.2	Optimierte Konstantenvektoren der besten Optimierungen ohne Berücksichtigung des Hallraums.	61
6.1	Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hallraum.	64
6.2	Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Klassenraum des BRG Kepler.	65
6.3	Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hörsaal FSI1.	66
6.4	Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hörsaal FSI2.	67
6.5	Numerische Ergebnisse der Optimierungen im Hörsaal i14.	68
7.1	Gemessenes und verwendetes α für die Simulation des Kantenabsorbers mit $40 \times 40 \text{ cm}$.	76
7.2	Skaliertes α für die Simulation des Kantenabsorbers mit $55,32 \times 55,32 \text{ cm}$.	76
7.3	Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten Simulation bei Energieauswertung.	77
7.4	Ausgewertete Ergebnisse der Simulation berechnet mit der Impulsantwort.	78
7.5	Äquivalente Absorptionsfläche für 500 bis 4000 Hz berechnet aus Mittelwert der gemessenen Terzbänder.	80
7.6	Mit EACT2 berechnete Äquivalente Absorptionsfläche für 125 und 250 Hz berechnet aus Mittelwert der Terzbänder.	80
7.7	Berechnete Werte für die Simulation.	81
7.8	Ausgewertete Ergebnisse der Simulation mit berechneten Absorptionswerten.	82



Anhang Messung FSI2

Für die Messungen der Raumimpulsantworten im FSI2 wurde zunächst als Anregungssignal ein exponentieller Sinussweep gewählt. Dieser hatte eine Länge von 20 s, begann mit der Frequenz von 1 Hz und stieg bis 24 kHz an. Somit lief dieser Sweep bis zur Hälfte der von uns verwendeten Samplingfrequenz von 48 kHz.

Da ein möglichst großer Messbereich erreicht werden sollte, kamen als Schallquellen mehrere Systeme zum Einsatz. Neben dem gewöhnlichen Dodekeder-System, das meist alleine für Nachhallzeitmessungen verwendet wird, kam noch ein herkömmliches Beschallungssystem, um sowohl im Bass- als auch im Hochtongbereich eine ausreichend große SNR generieren zu können, zum Einsatz:

- *Norsonic Dodekaeder Nor276* mit dazugehöriger Endstufe *Norsonic Power Amplifier Nor280*
- 4 Mittel- bzw. Hochtongboxen *Lambda Labs CX-1A* im Preset 2 - Crossover Mode mit Lowcut bei 140 Hz (Pegel auf ca. 9 Uhr)
- 1 Subwoofer *Lambda Labs MF-15A* im Preset 3 - Subbass Crossover Mode mit Highcut bei 140 Hz (Pegel auf ca. 11 Uhr)



Abbildung A.0.1: Schallquellen.

Für die Messung im Raum wurde das Messsystem *Pak* der Firma *Müller-BBM* verwendet. Um eine möglichst großflächige Abtastung im Raum zu erreichen wurden 10 Messmikrofone verwendet.

Der Sweep wurde vom PC aus gestartet und über eine externe Soundkarte (*RME Babyface*) an die Schallquellen ausgespielt. Der Sweep wurde direkt an das PAK-System gelegt und triggerte so die Messung, die beim Aktivieren des Sweeps automatisch gestartet wurde. Das Direktsignal und die 10 Mikrofonsignale wurden vom PAK System aufgezeichnet. Die Messdauer betrug



Abbildung A.0.2: Aufbau des Messsystems im FSI2.

25 s. Nach Abschluss der Messung speicherte das PAK-System zuerst die unbearbeiteten 11 Signale, ehe es in einer Arithmetik sofort eine Faltung der einzelnen Mikrofonsignale mit dem Direktsignal durchführte. Die Raumimpulsantwort wurde so automatisch für jede einzelne Mikrofonposition errechnet und abgespeichert. Anhand dieser Raumimpulsantworten fanden die weiteren Auswertungen statt.

Die Messung wurde für 2 unterschiedliche Quellpositionen durchgeführt. Im Plan in Abbildung A.0.3 werden die 2 Quell- und 10 Mikrofonpositionen genau dargestellt.

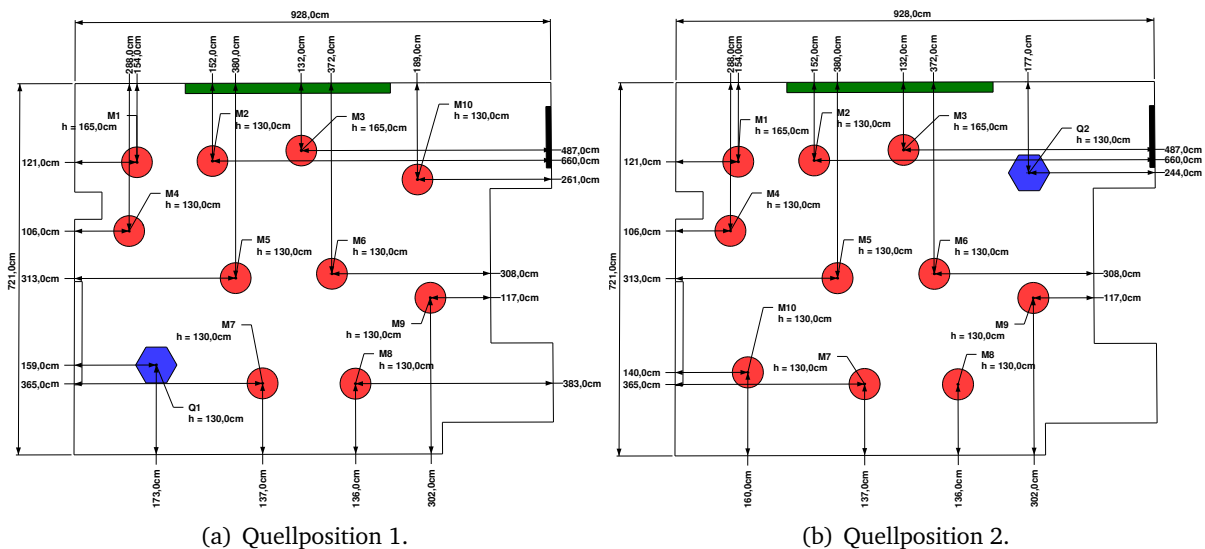


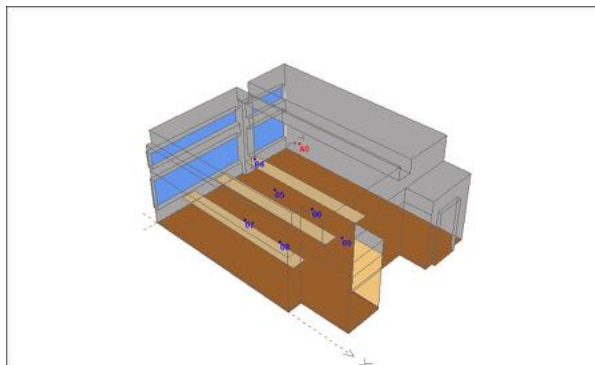
Abbildung A.0.3: Skizze der Mikrofon- bzw. Quellpositionen.

Um weitere Fehler durch äußere Einflüsse zu vermeiden, wurden an jeder Quellposition jeweils 2 Messungen durchgeführt. Für das Ergebnis wurden folglich 4 Messungen gemittelt.

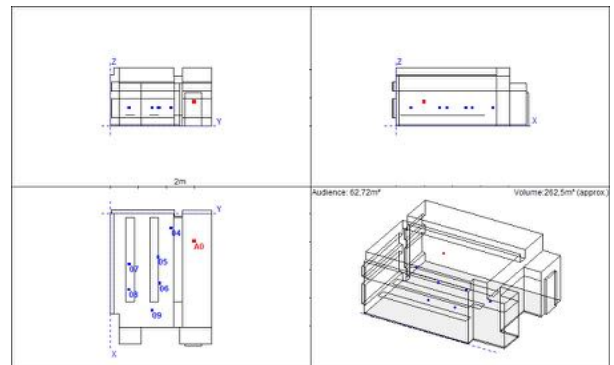
B

Anhang Simulation

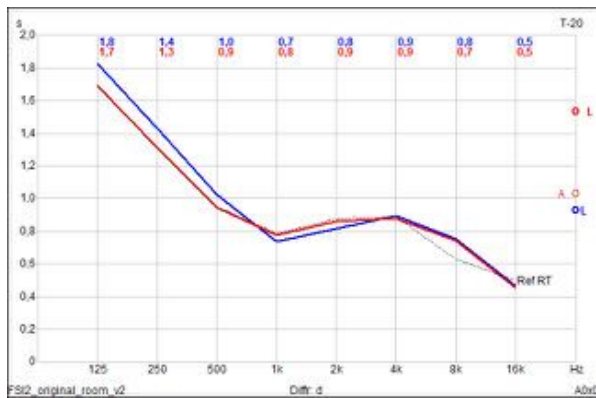
Simulation 1 - Anpassung der Nachhallzeit



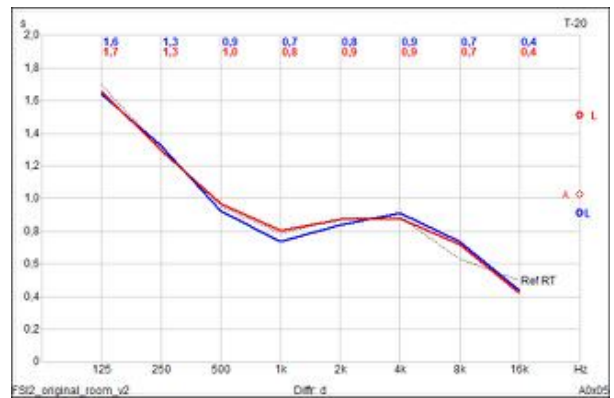
(a) 3D Grafik.



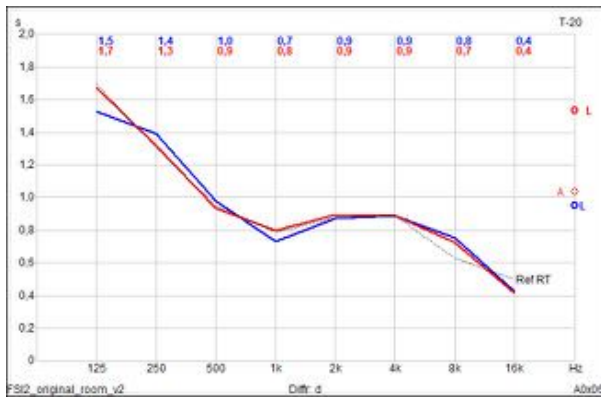
(b) Risse.



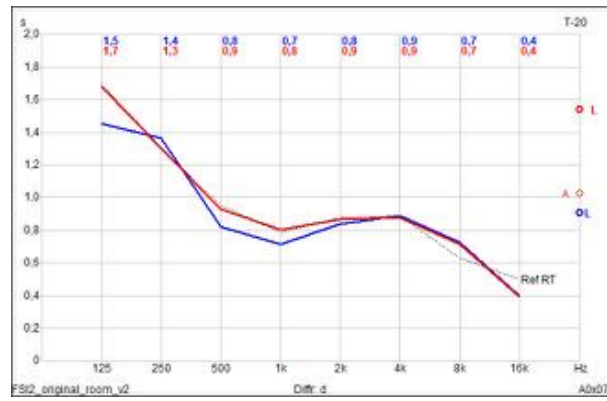
(c) Position 4.



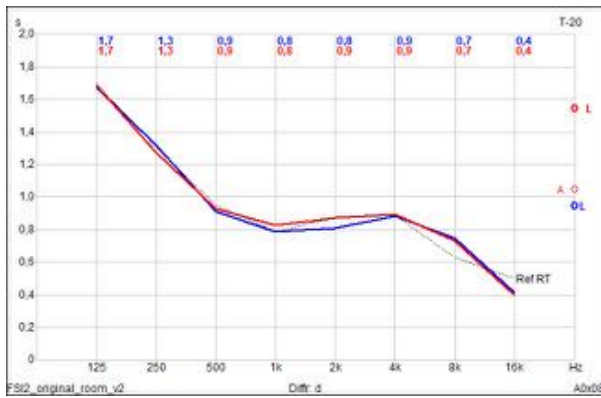
(d) Position 5.



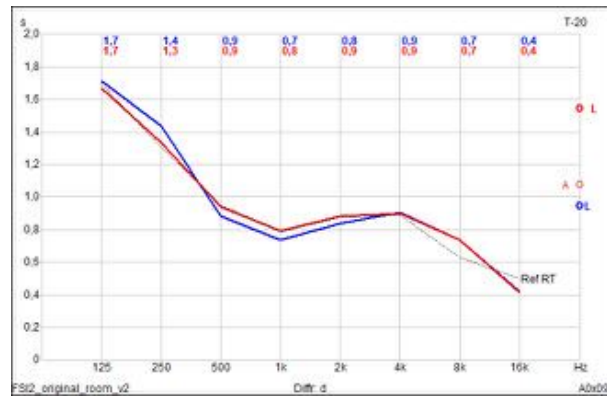
(e) Position 6.



(f) Position 7.

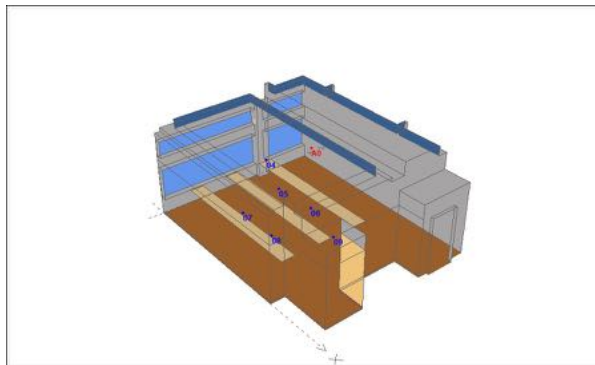


(g) Position 8.

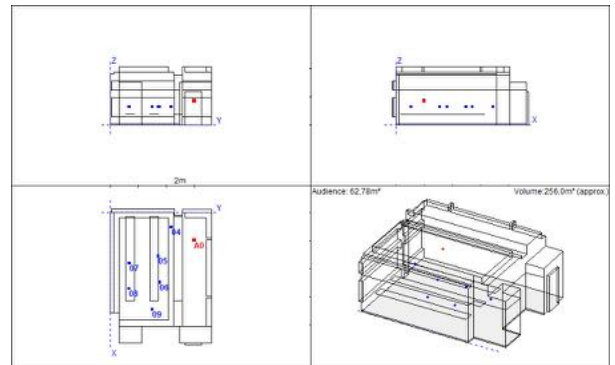


(h) Position 9.

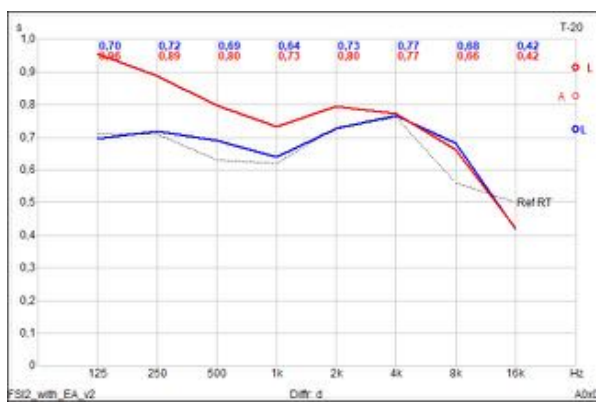
Simulation 2 - Einbau Kantenabsorber mit 40 x 40 cm



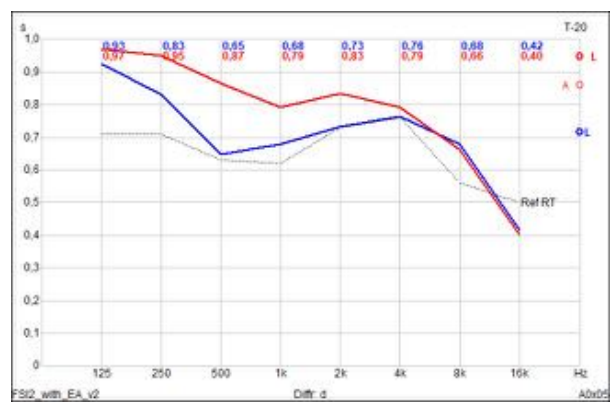
(a) 3D Grafik.



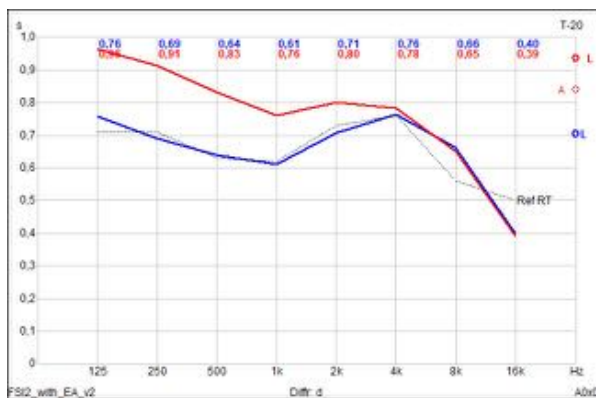
(b) Risse.



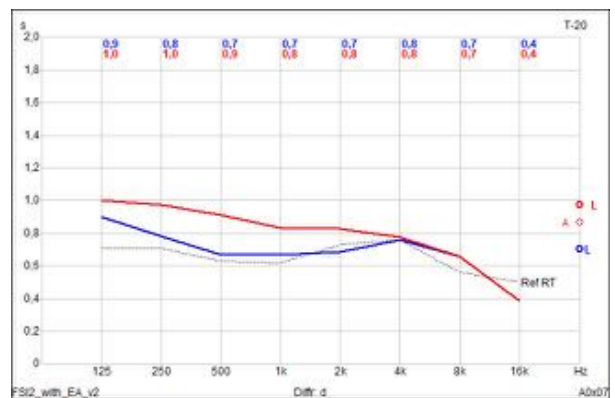
(c) Position 4.



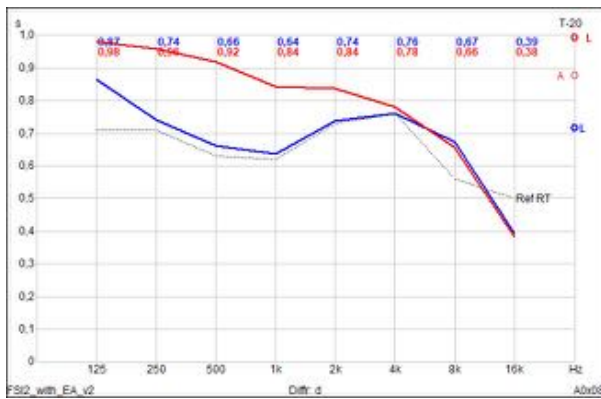
(d) Position 5.



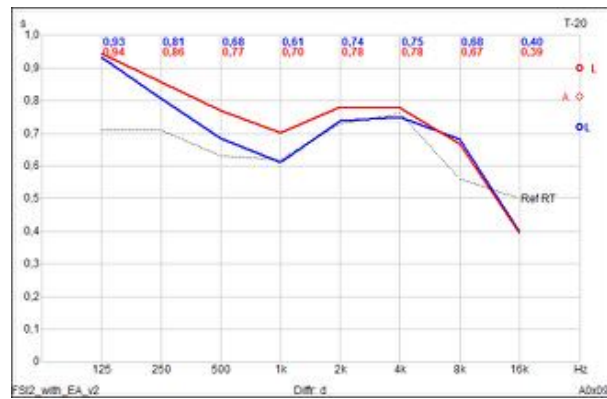
(e) Position 6.



(f) Position 7.

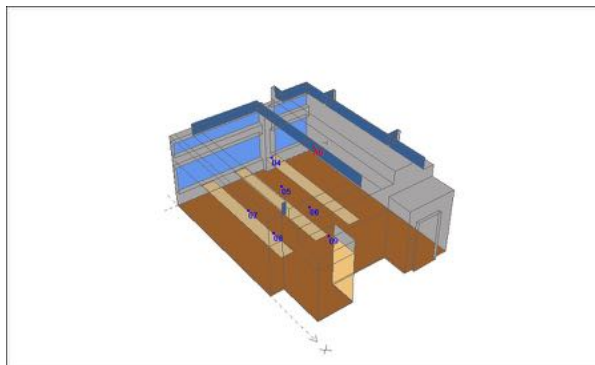


(g) Position 8.

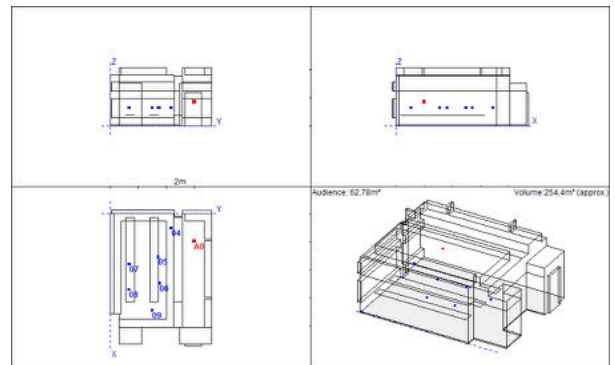


(h) Position 9.

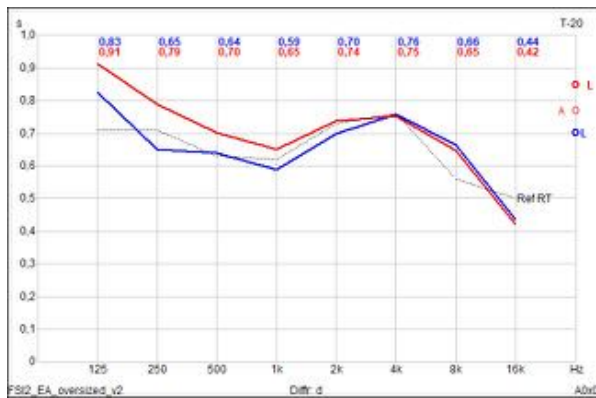
Simulation 3 - Einbau Kantenabsorber mit 55,32 x 55,32 cm



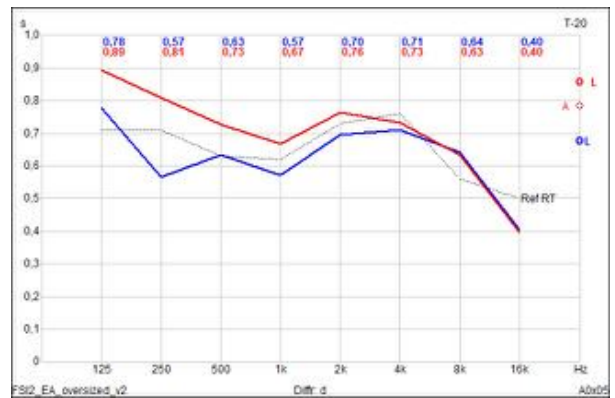
(a) 3D Grafik.



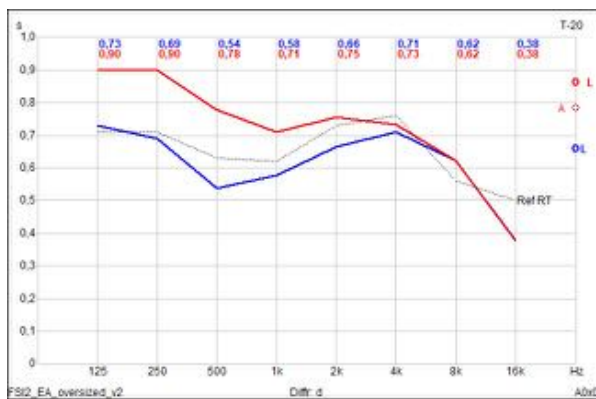
(b) Risse.



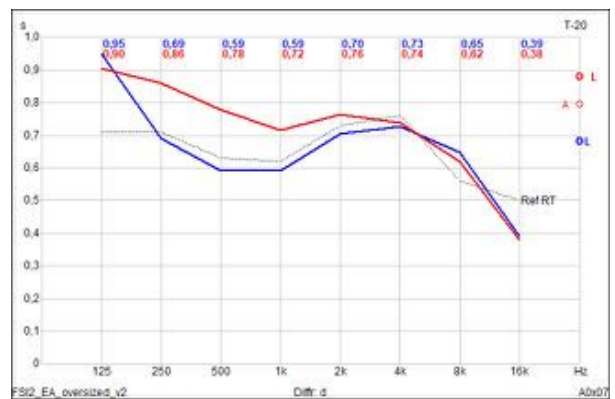
(c) Position 4.



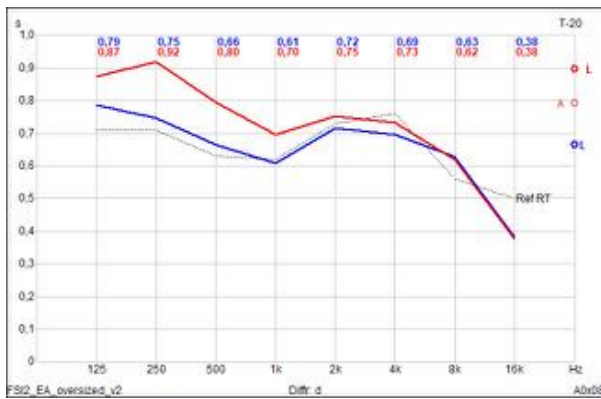
(d) Position 5.



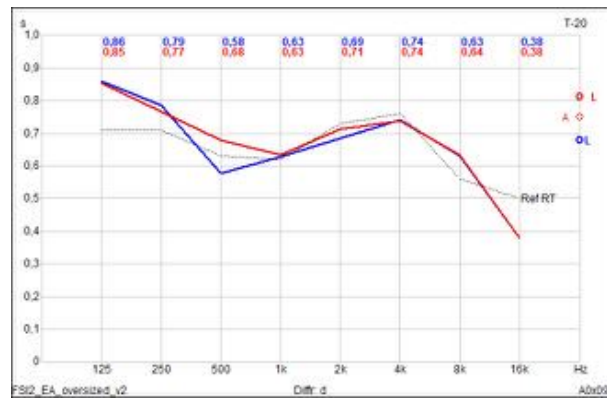
(e) Position 6.



(f) Position 7.

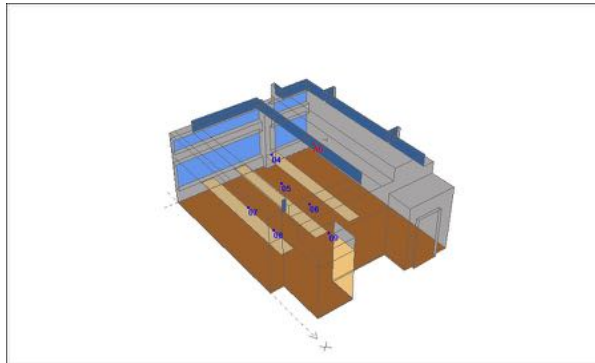


(g) Position 8.

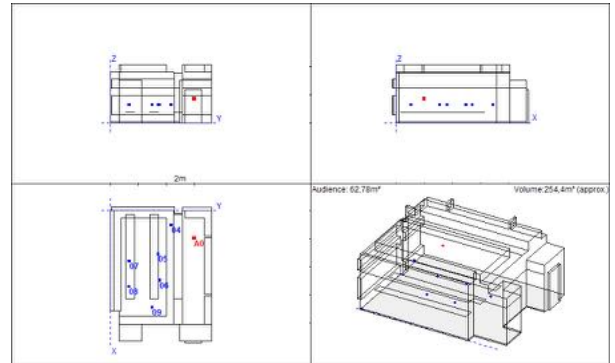


(h) Position 9.

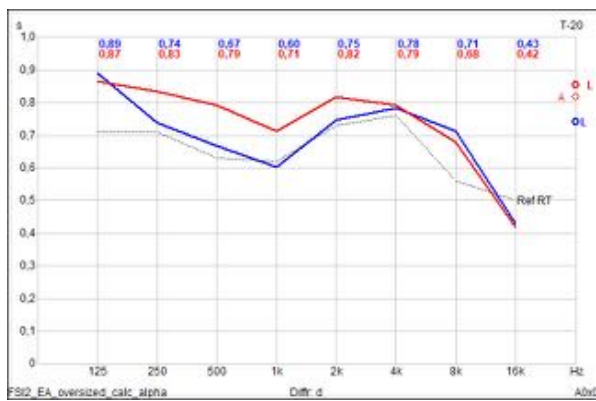
Simulation 4 - Einbau Kantenabsorber mit 55,32 x 55,32 cm, Absorptionsgrad berechnet



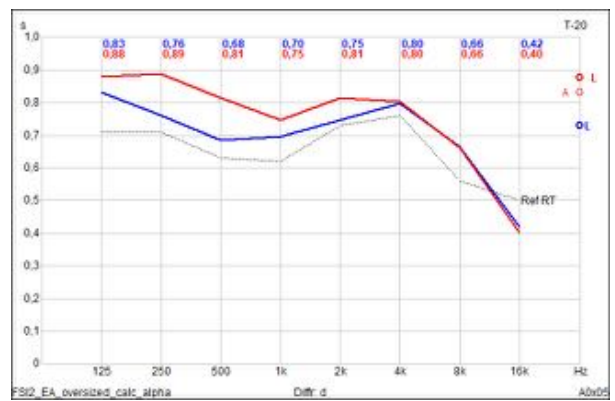
(a) 3D Grafik.



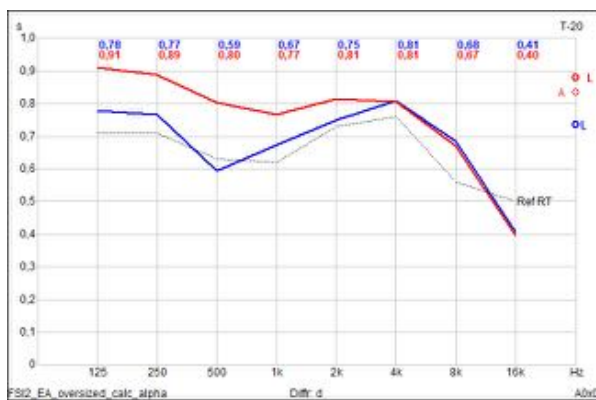
(b) Risse.



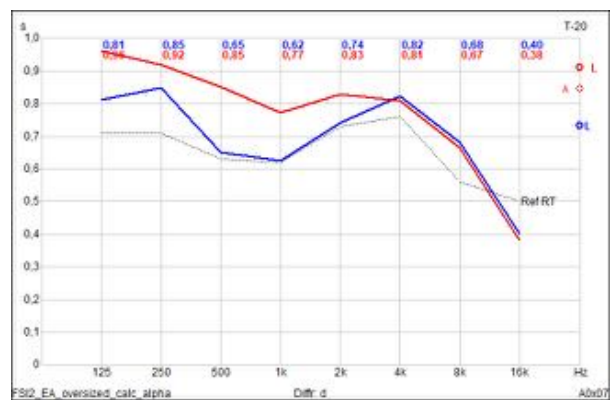
(c) Position 4.



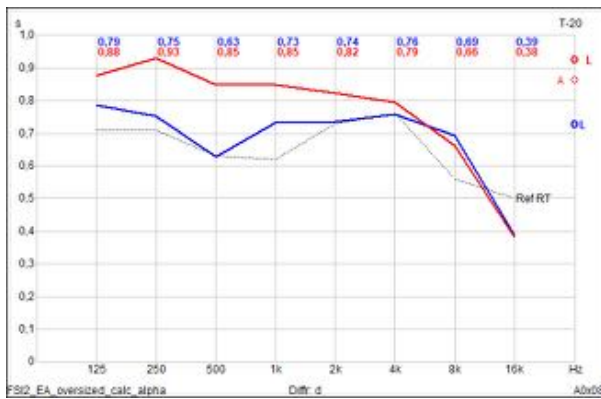
(d) Position 5.



(e) Position 6.



(f) Position 7.



(g) Position 8.



(h) Position 9.