
BACHELORARBEIT

PLANUNG UND EVALUIERUNG VON KANTENABSORBERN

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

von
Hetz Sieglinde, 1330307
Kordesch Janina, 1110458

Betreuer:
Prof. Dr. Ing. Helmut Viktor Fuchs

Graz, September 2017

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am

(Hetz Sieglinde)

Graz, am

(Kordesch Janina)

Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Wirkung und Weiterentwicklung von Kantenabsorbern, wobei hier der Schwerpunkt der Schallabsorption vor allem auf den tiefen Frequenzbereich gelegt werden soll, welcher häufig zu Unrecht in der raumakustischen Planung vernachlässigt wird.

Um das Konzept des Kantenabsorbers auszubauen und zu optimieren, wurden mikroperforierte Blechplatten herangezogen. Der Schallabsorptionsgrad dieser wurde dann für verschiedene Messanordnungen im Hallraum bestimmt. Zusätzlich wurden als Anschauungsobjekte zwei Hörsäle akustisch saniert, wobei der eine mit Wandpaneelen, der andere mit Kantenabsorbern ausgestattet wurde. Zur Dokumentation wurden beide Räume vor und nach der Sanierung akustisch vermessen, um die Resultate schließlich bewerten und miteinander vergleichen zu können.

Abstract

This bachelor thesis deals with the effect and further development of edge absorbers. The main focus of this study is the sound absorption at low frequencies, a topic that is often neglected in room acoustic design.

To optimize and expand the concept of edge absorbers, microperforated sheets were used. Thereby the sound absorption coefficient of different measurement setups in the reverberation room was determined. In addition two lecture rooms were acoustically optimized – one of them with acoustic panels on the wall while the other one was treated with edge absorbers. In both lecture rooms the reverberation time was measured before as well as after the acoustical optimization to evaluate and compare the impact of different absorber types on the sound field.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung & Motivation	9
1.1 Allgemeines	9
1.2 Ziel und Motivation	9
1.3 Aufbau und Gliederung der Arbeit	10
2 Anforderungen & Sanierung	11
2.1 Problemschwerpunkt tiefe Frequenzen	11
2.2 Kantenabsorber in der Raumakustik	13
2.3 Mikroperforierte Absorber (MPA)	15
3 Messungen im Hallraum	17
3.1 Allgemeines	17
3.2 Messaufbau	18
3.3 Leermessungen	20
3.4 Messungen der Platten SoundMicro	23
3.4.1 Anordnung 'Mitte'	24
3.4.2 Anordnung 'Kante'	26
3.4.3 Anordnung 'L-Form'	28
3.4.3.1 Anordnung 'L-Form niedrig'	28
3.4.3.2 Anordnung 'L-Form hoch'	29
3.4.4 Anordnung 'Baffles'	31
3.4.5 Anordnung '45°-Winkel'	33
3.5 Messungen der Platten SonoPerf A	34
3.5.1 Anordnung 'Mitte'	34
3.5.2 Anordnung 'L-Form niedrig'	36
3.5.3 Anordnung 'Ecke'	37
3.6 Diskussion der Messergebnisse	40
3.6.1 Vergleich beider Prüfobjekte	40
3.6.2 Vergleich Anordnung 'L-Form niedrig' und 'L-Form hoch'	42
3.6.3 Vergleich Anordnung 'L-Form niedrig' und 'Mitte'	42
3.6.4 Vergleich Anordnungen in den Kanten	44
4 Hypothesen zur Deutung der Resonanz erhöhungen	45
4.1 Allgemeines	45
4.2 Plattenresonator	46
4.3 Helmholtzresonator	48
4.4 MPA: modifizierter Helmholtzresonator	50
4.5 Schnelleximum bei $\frac{\lambda}{4}$	51
4.6 Fazit	53
5 Testräume	55
5.1 ÖNORM 8115-3	55
5.2 Ausgangszustand der Hörsäle i14 und i15	57
5.3 Hörsaal i15	59
5.3.1 Messaufbau	59
5.3.2 Messergebnis	62

5.4	Hörsaal i14	66
5.4.1	Messaufbau	66
5.4.2	Messergebnis	67
6	Akustische Sanierung	71
6.1	Planung der Sanierung des Hörsaals i15	71
6.2	Planung der Sanierung des Hörsaals i14	74
6.3	Ergebnis der Sanierung des Hörsaals i15	76
6.4	Ergebnis der Sanierung des Hörsaals i14	80
6.5	Evaluierung und Vergleich des Sanierungserfolgs	85
7	Zusammenfassung und Ausblick	87
8	Anhang	89
8.1	Datenblätter	89
8.1.1	Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)	90
8.1.2	Anordnung 'Kante' und '45°-Winkel' (SoundMicro)	91
8.1.3	Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)	92
8.1.4	Anordnung 'Mitte' ($h = 35$ cm) und 'L-Form niedrig' ($d = 35$ cm) (SoundMicro)	93
8.1.5	Anordnung 'Baffles' und 'L-Form hoch' (SoundMicro)	94
8.1.6	Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)	95
8.1.7	Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)	96
8.1.8	Anordnung 'Mitte' ($h = 35$ cm) und 'L-Form niedrig' ($d = 35$ cm) (SonoPerf A)	97
	Literaturverzeichnis	99
	Geräteverzeichnis	101
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	107
	Anhang A: Dateienverzeichnis	109

1

Einleitung & Motivation

1.1 Allgemeines

Welche Bedingungen muss ein Raum erfüllen – sei es, um zu arbeiten und sich gut konzentrieren zu können, sich wohlfühlen? Neben einer schönen Optik wird einer guten Akustik oft weniger Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl sie unsere ständige Begleiterin ist – sie äußert sich in Form von Sprache, Musik, aber auch Lärm und Geräuschen. Eine gute Raumakustik, d.h. akustische Transparenz und gute Sprachverständlichkeit, geht automatisch mit einer erhöhten Lebensqualität einher, da sie zu Stressreduktion, einer Verbesserung der Gesundheit und folglich zu einer erhöhten Effizienz im allgemeinen Arbeitsprozess führt. Besonders wenig Bedeutung wird den tiefen Frequenzen in der raumakustischen Planung zugeteilt, obwohl diese sehr wohl großen Einfluss auf die Raumakustik haben. Die Konsequenz eines Anstieges der Nachhallzeit im Bassbereich ist ein Dröhnen des Raumes, worunter die Sprachverständlichkeit stark zu leiden hat. Auch die geringe Raummodendichte führt zu wichtigen Störfaktoren.

Um dem entgegenzuwirken, werden Schallabsorber gebraucht, die genau in diesem Frequenzbereich wirken: Kantenabsorber. Wie der Name schon sagt, werden diese Art von Absorbern in die Kanten des Raumes angebracht, wo die Schallenergie besonders stark konzentriert ist. Durch Anwendung von mikroperforierten Platten aus Metall (statt perforierten Gipskartonplatten und Mineralwolle) können diese Tiefenabsorber weiterentwickelt und ausgebaut werden in Hinsicht auf geringeren Kostenaufwand, Praktikabilität und Hygiene.

1.2 Ziel und Motivation

Ziel dieser Arbeit ist zum einen die Untersuchung und Weiterentwicklung innovativer Schallabsorber, zum anderen die akustische Sanierung zweier Hörsäle der Technischen Universität Graz in der Inffeldgasse 18.

Wie schon oben erwähnt bieten mikroperforierte Akustikplatten (MPA-Platten) einen neuen Blickwinkel für die Schallabsorption, was zur Überlegung führt, das Konzept des Kantenabsorbers mit MPA-Platten zu kombinieren. Außerdem steht die Frage im Raum, ob die Platten so effizient wirken, dass gar kein zusätzliches Dämmmaterial, das für herkömmliche Schallabsorber eingesetzt wird, mehr gebraucht wird, woraus viele Vorteile resultieren: wegen der Beschaffenheit der Oberfläche dieser Platten, welche leicht zu reinigen, hitze- und chemikalienbeständig ist und keinen Nährboden für Keime bietet, könnten v.a. in Kranken- und Pflegehäusern oder auch Großraumküchen die hohen Brandschutz- und Hygieneauflagen erfüllt werden.

Als Motivation dient die Veranschaulichung der Wirkungsweise von Kantenabsorbern an zwei Hörsälen, wobei einer zum Vergleich mit herkömmlichem Absorptionsmaterial ausgestattet wird. Diese sollen in puncto besserer Sprachverständlichkeit und akustischer Transparenz neu gestaltet werden, um sowohl für Studenten als auch für Vortragende den Lern- und Lehrprozess zu erleichtern und einen Wohlfühlcharakter zu schaffen.

1.3 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Zu Beginn wird in Kapitel 2 ein Überblick über Kantenabsorber und mikroperforierte Absorber gegeben, wobei hier der Schwerpunkt auf den tieffrequenten Bereich gelegt wird.

Im Anschluss werden in Kapitel 3 die Messreihen der MPA-Platten beschrieben und dokumentiert und danach bewertet und miteinander verglichen. Im darauf folgenden Kapitel 4 werden die Resultate sowohl physikalisch als auch mathematisch nachvollzogen und am Schluss des Kapitels noch einmal zusammengefasst.

Kapitel 5 behandelt die Messung vor der akustischen Sanierung der beiden Hörsäle. Es wird hier auch auf die der Messung zu Grunde liegende Norm [ÖNORM B 8115-3, 2015] und auf den Ausgangszustand der Hörsäle eingegangen. Das nächste Kapitel 6 thematisiert den Sanierungsauftrag und zeigt die modernisierten Räume, deren Vermessung auch hier dokumentiert wird. Ein Ausblick dient als Evaluierung und Resümee der Sanierung und motiviert zur weiteren Auseinandersetzung mit der Thematik Kantenabsorber.

2

Anforderungen & Sanierung

Um zunächst eine akustische Sanierung formgerecht planen und daraufhin durchführen zu können, müssen vorerst gewisse Problematiken betrachtet werden. Einerseits beschäftigt sich dieses Kapitel mit den Schwierigkeiten bei tiefen Frequenzen, andererseits mit den Kantenabsorbern und mikroperforierten Absorbern.

2.1 Problemschwerpunkt tiefe Frequenzen

Es ist sehr umstritten, welchen Frequenzbereich man bei einer raumakustischen Planung betrachten sollte, um eine gute Sprachverständlichkeit oder Durchsichtigkeit für Musik zu erreichen. Hier gehen die Meinungen vieler Akustiker auseinander. Häufig wird den Frequenzen unterhalb der 125 Hz-Oktave keine wichtige Rolle zugetragen. Wenige glauben wiederum, dass das Problem genau bei den tiefen Frequenzen bis hin zur 63 Hz-Oktave liegt.

Die Sprachverständlichkeit wird durch Frequenzen im kHz-Bereich bestimmt. Diese werden in akustisch schlecht wirksamen Räumen jedoch häufig durch den vom Nutzer zum Beispiel Stühlerücken, Räuspfern etc. selbst erzeugten tieffrequenten Störschall verdeckt. Eine Verdeckung hoher Frequenzanteile durch tiefe Frequenzen ist deutlich stärker als umgekehrt.

Ein gutes Beispiel für schlechte Akustik und die Problematik tiefer Frequenzen ist ein Stehempfang, bei dem sich viele Personen in einem Raum versammeln und sich in kleineren Gruppen unterhalten. Je mehr Personen gleichzeitig sprechen, desto schlechter wird die Sprachverständlichkeit. Es kommt zum so genannten "Lombard-Effekt" – Personen erhöhen beim Sprechen die Lautstärke. Dieser Fall führt zum Anstieg des Grundgeräuschpegels, was wiederum zum schlechteren Hören führt und die betroffenen Personen zu noch lauterem Sprechen herausfordert. Dieser Effekt (s. Abb. 2.1) führt meist soweit, bis kein Wort mehr verstanden wird, da die Lautstärke der Stimmen zur Übertönung des Lärmpegels nicht mehr ausreicht. Dazu kommt es, da Personen selbst einen Absorber ungefähr oberhalb von 250 Hz bilden und tiefe Frequenzen darunter nahezu ungedämpft bleiben. Dadurch ist die Nachhallzeit bei den tiefen Frequenzen höher, was zu einem "Dröhnen" im Raum führt und somit die für die Sprachverständlichkeit wichtigen höheren Frequenzanteile verdeckt.

Um diesem Problem entgegenwirken zu können, müssen vor allem in kleinen Räumen Tiefenabsorber mit einer Wirkung zumindest bis zur 63 Hz-Oktave eingesetzt werden. Werden tiefe bis sehr tiefe Frequenzen absorbiert, so wird ein Frequenzbereich gedämpft, der keine wichtigen Informationen für Sprache enthält, und die Verdeckung der Sprachfrequenzanteile durch tieffrequenten Lärm deutlich reduziert, was zu einer günstigen Raumakustik führt. Werden hingegen ausschließlich Frequenzen oberhalb von 500 Hz absorbiert, wird das Ziel verfehlt: der Raum wirkt dann dumpf dröhnend.

Um akustische Transparenz, gute Sprachverständlichkeit und somit entspannte Kommunikation zu schaffen, müssen solche Räume von diesem Dröhnen befreit werden. [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011, S. 2 - 5], [Fuchs, 2010, S. 20]

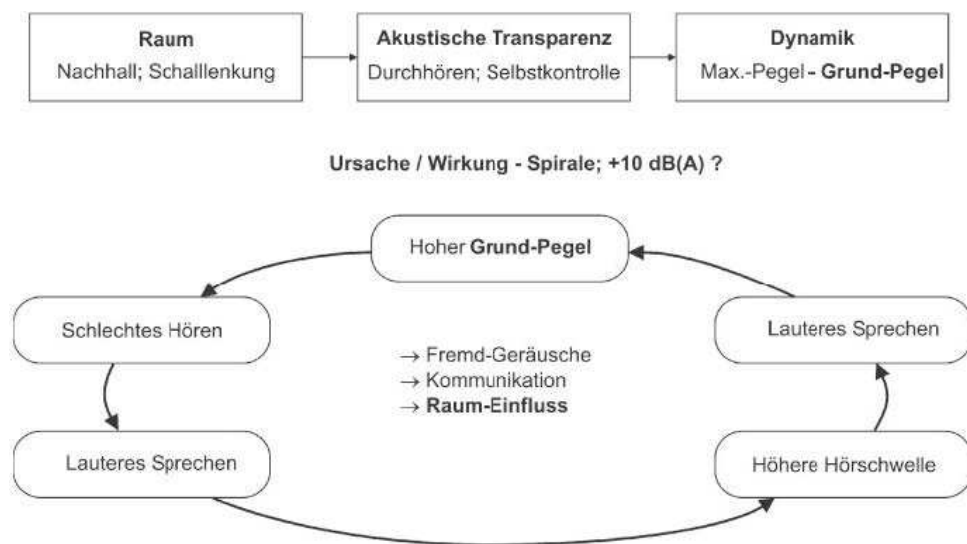


Abbildung 2.1: Modell der Lautheitsspirale [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011, S. 4]

Einen problematischen Aspekt im tiefen Frequenzbereich bildet die geringe Raummodendichte. Die Frequenzen der axialen, tangentialen und schrägen Moden können mit der Schallgeschwindigkeit c , den jeweiligen Abmessungen des Raumes in x -, y - und z -Richtung und der entsprechenden Ordnungszahl $n = 1, 2, 3$ usw. wie folgt berechnet werden:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.1)$$

Unter einer bestimmten Grenzfrequenz können Raummoden Klangverfärbungen hervorrufen, da sie unterhalb dieser Frequenz verstärkt isoliert auftreten und als einzelne Resonanzüberhöhungen hörbar sind. Oberhalb dieser vom Raumvolumen V abhängigen Grenzfrequenz ist innerhalb einer Terz die Raummodendichte so hoch, dass einzelne Resonanzüberhöhungen nicht mehr hörbar sind und somit keine störenden Klangverfärbungen mehr hervorgerufen werden. Diese störenden Eigenresonanzen können beispielsweise auch durch tieffrequenten Lärm angeregt werden. Diese Grenzfrequenz – auch als Schröderfrequenz f_S bezeichnet – kann bei bekanntem Raumvolumen und bekannter Nachhallzeit durch Wahl einer Konstante X zwischen 1200 und 4000 folgendermaßen berechnet werden: [Fuchs, 2010, S. 6 - 9]

$$f_S = X \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.2)$$

Um gute Sprachverständlichkeit und Klarheit für Musik zu erreichen, wäre ein flacher Verlauf der Nachhallzeit anstelle eines meist vorhandenen Anstieges hin zu den tiefen Frequenzen die Lösung. Durch Tiefenabsorption kann man kleine Räume vom brummigen "Nebel" befreien und akustische Transparenz erreichen. Leider werden bei Nachhallzeitmessungen tiefe Frequenzen unterhalb der 125 Hz-Oktave oft verworfen und nicht berücksichtigt, jedoch mittlere und hohe Frequenzen überbedämpft. Man sollte sich also unbedingt auch die tiefen Frequenzen mindestens bis hin zur 63 Hz-Oktave ansehen. [Fuchs H. V.;Zha X., 2014]

2.2 Kantenabsorber in der Raumakustik

Für eine optimale Schalldämpfung über einen breiten Frequenzbereich werden marktführend Verbundplatten-Resonatoren und Breitband-Kompaktabsorber eingesetzt. Um sich diese Absorber jedoch leisten zu können, muss ein hohes Budget vorhanden sein, das viele betroffene Einrichtungen wie beispielsweise Bildungsstätten nicht haben. Diese Marktlücke wird in kleinen und mittelgroßen Räumen durch kostengünstige, attraktive, einfach zu installierende Kantenabsorber, die auf dem Konzept der Bassdämpfung aufbauen, gefüllt.

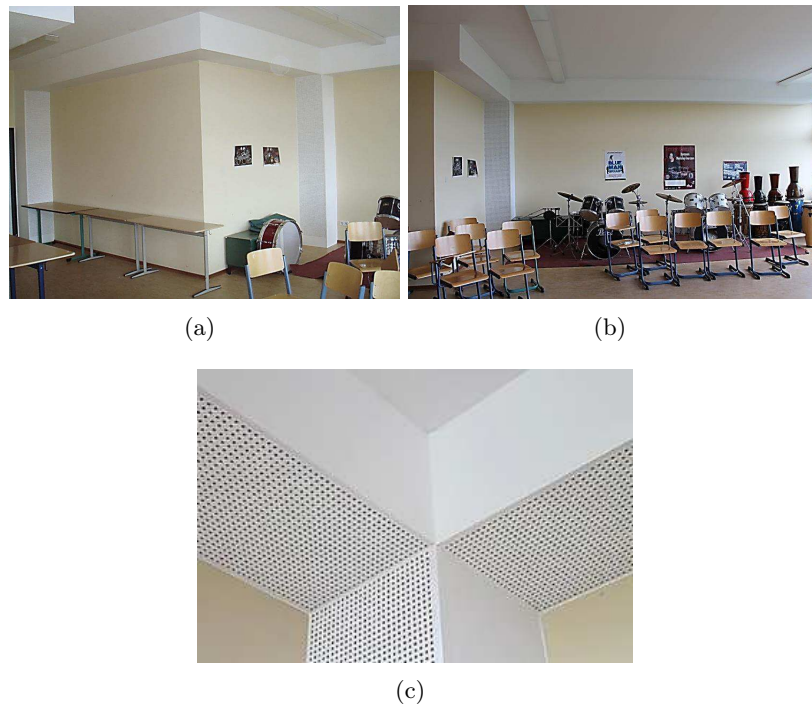


Abbildung 2.2: Kantenabsorber im Musikproberaum der Carlo-Schmid Oberschule in Berlin-Spandau: a) [Fuchs H. V.;Zha X., 2014, S. 6]; b) [Casa acustica, 2014]; c) [Casa acustica, 2014];

Herkömmliche poröse oder faserige Akustikpaneele oder -putze angebracht vor einer schallharten Oberfläche liefern bei hohen Frequenzen einen Absorptionsgrad α nahe 1, der jedoch zu den tiefen Frequenzen hin abhängig von der Dicke der Platten und vom Luftvolumen hinter der Platte stark abfällt. Wird entlang einer 6.48 m langen Raumkante von Ecke zu Ecke ein Kantenabsorber aus 9.5 mm dicken Gipskartonplatten (GK-Platten) (eine der zwei Platten gelocht mit einem Lochanteil von 20 %) mit den Maßen 400 mm · 500 mm und gefüllt mit ca. $25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Mineralwolle angebracht, so liefert dieser mit einer Fläche $S_A = 3.24 \text{ m}^2$ bei hohen Frequenzen (oberhalb von 1 kHz) einen Absorptionsgrad nahe 1. Zu den tiefen Frequenzen (125 Hz) hingegen steigt dieser auf den doppelten und zu den sehr tiefen (63 Hz) auf den sechsfachen Wert an (s. Abb. 2.3). Dieses charakteristische Spektrum der Kantenabsorber stellt sich erst ab einer Mineralwollefüllung von einer Dicke $d_\alpha \geq 400 \text{ mm}$ ein.

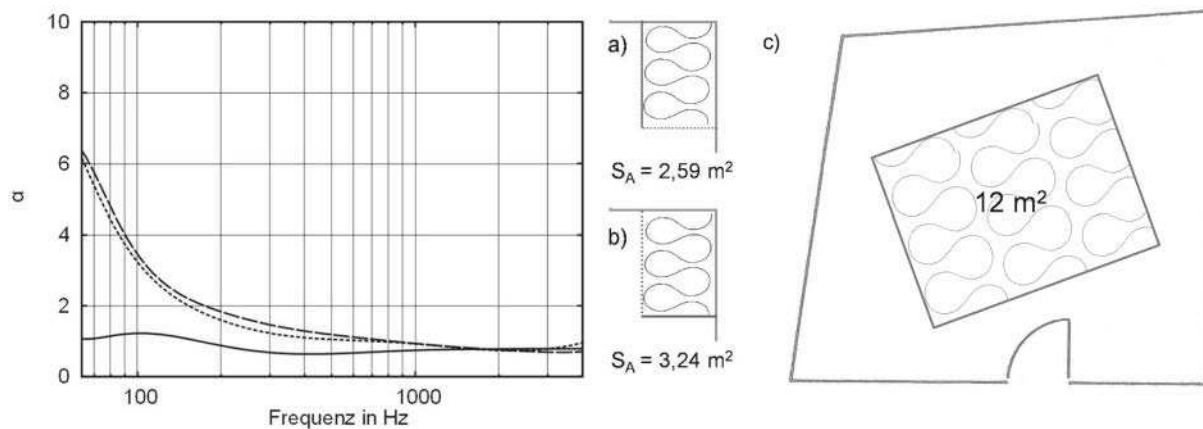


Abbildung 2.3: Gemittelter Absorptionsgrad von Kantenabsorbere in den Abmessungen $400 \cdot 500 \text{ mm}^2$ mit Mineralwolle-Füllung im Vergleich zur flächigen Anordnung desselben Materials mit umlaufenden Rahmen, jeweils bezogen auf die offene Fläche S_A . a) breite Seite mit GK-Platten, schmale mit GK-Lochplatten abgedeckt (strichliert); b) schmale Seite mit GK-Platten, breite mit GK-Lochplatten abgedeckt (punktiert); c) 12 m^2 flächig ausgelegte Mineralwolle in Raum mit $V = 220 \text{ m}^3$ (durchgezogen) [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011]

In Abb. 2.4 sind die Kantenabsorber mit unterschiedlich viel Dämmstofffüllung dargestellt. Sind diese nicht voll gefüllt, liefern sie für die tiefen Frequenzen den besten Absorptionsgrad. Werden drei Kantenabsorber in Raumkanten angebracht, zwei waagrecht unter der Decke und einer senkrecht darunter, so kann man die Raummoden gut erfassen. Wird der Kantenabsorber mit einem Spalt zur Wand oder zur Decke angeordnet, so verliert er kaum seine Wirksamkeit bei den tiefen Frequenzen.

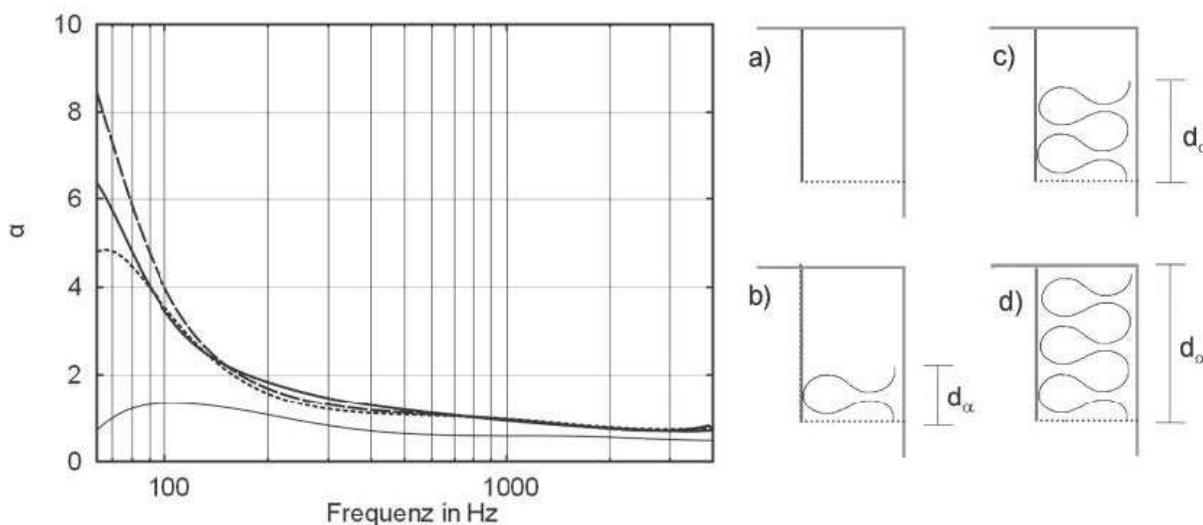


Abbildung 2.4: Gemittelter Absorptionsgrad eines Kantenabsorbers gemäß Abb. 2.3 a) mit unterschiedlich dicker Mineralwollefüllung (d_α), jeweils bezogen auf $S_A = 2,59 \text{ m}^2$. a) 0 mm (durchgezogen); b) 160 mm (punktiert); c) 320 mm (strichliert); d) 500 mm (fett durchgezogen) [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011]

Kantenabsorber weisen folgende Vorteile auf [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011, S. 5 - 10]:

- Hohe Wirkung im gesamten Frequenzbereich, vor allem bei den tiefen Frequenzen
- Beanspruchen eines sehr kleinen Raumbereichs, der nicht anderweitig genutzt wird

- Einfache Montage und Reinigung, ohne dass die Wirksamkeit darunter leidet
- Kostengünstige Anfertigung der GK-Platten
- Installation in Trockenbauweise
- Viel höhere Wirkung im tiefen Frequenzbereich trotz geringerer Fläche im Vergleich zu herkömmlichen Absorbern
- Optische Attraktivität
- Mögliche Verstaueung diverser Kabel, Leitungen und Leuchten im Absorberspalt zur Wand und im Hohlraum selbst
- Mögliche Verwendung als Sitzbänke in Raumkanten

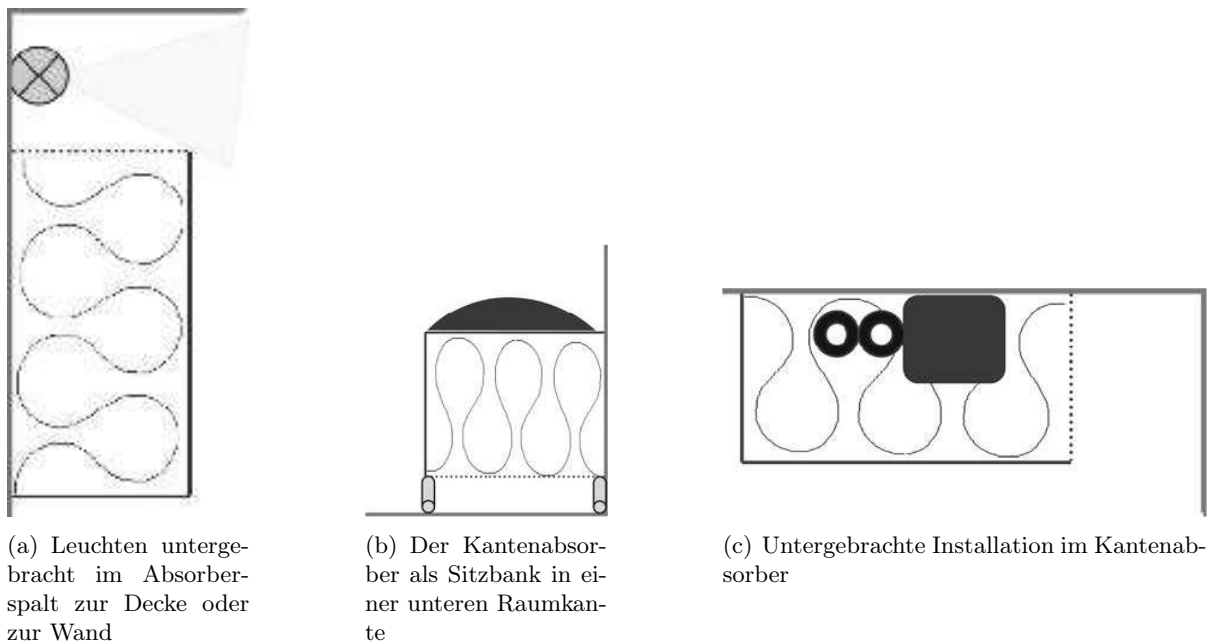


Abbildung 2.5: Prinzipskizzen verschiedener Kantenabsorber [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011]

2.3 Mikroperforierte Absorber (MPA)

In diesem Kapitel geht es um eine Absorberart, die ganz ohne Dämpfungsmaterial eine breitbandige Wirkung aufweisen kann. Es handelt sich hierbei um die sogenannten mikroperforierten Absorber. Die Grundidee ist die Nutzung der Reibung in kleinen Löchern und Schlitzen zur Absorption der Schallenergie. Mikroperforierte Paneele oder Folien arbeiten in Form eines Masse-Feder Systems nach Art eines Helmholtzresonators (s. Kapitel 4.3 auf Seite 48). In den vielen, winzigen, nebeneinander angeordneten Löchern oder Schlitzen schwingt die Luft als Masse, während die Luft zwischen mikroperforierter Platte und schallharter Wand die Feder bildet. MPA's weisen ein geringes Lochflächenverhältnis σ ($\sim 1\%$) auf. Die akustische Wirksamkeit mikroperforierter Absorber kann beinahe unabhängig vom Material durch die geometrischen Parameter eingestellt werden. Sogar optisch transparente Materialien wie Acrylglas, Polycarbonat etc. finden Anwendung. Mikroperforierte Absorber erfüllen nicht nur hohe hygienische Voraussetzungen, sondern auch ergonomische und ästhetische Anforderungen.

Die kleinste Abmessung der Löcher oder Schlitze befindet sich in der Größenordnung der akustischen Grenzschichtdicke δ (s. Abb. 4.1(b) auf Seite 46). Das Verhältnis von Porenabmessung zur Grenzschichtdicke δ spielt bei allen porösen Absorbern, die Schall durch Reibung bedämpfen, eine wesentliche Rolle.

Der Reibungsparameter x als dimensionsloses Verhältnis gibt Auskunft darüber, wie wirkungsvoll die Schwingung in den Löchern bedämpft werden kann. Die Formel für diesen lautet für zylindrische Löcher mit dem Radius r_0 in mm und mit der Frequenz f in Hz

$$x = \frac{r_0}{\delta} = 0.65 \cdot r_0 \cdot \sqrt{f} \quad (2.3)$$

und für Materialien mit guter Wärmeleitung wie beispielsweise Stahl oder Aluminium ändert sich Gl. 2.3 zu

$$x = 0.42 \cdot r_0 \cdot \sqrt{f} , \quad (2.4)$$

da MPA aus Metall eine größere Absorption aufweisen.

"Man kann also die Mikroperforation, je nach dem anvisierten Frequenzbereich, so einrichten, dass für r_0 im Submillimeter-Bereich x nicht viel von 1 abweicht. Mit entsprechend feiner Perforation (r_0) kann man die Reibung für die Schwingungen in den Löchern auch für höhere Frequenzen gerade so einstellen, dass es zur optimalen Bedämpfung des MPA-Resonators keines zusätzlichen Dämpfungsmaterials vor, in oder hinter den Löchern oder gar im Hohlraum dahinter bedarf. Mit ihrer inhärenten Reibung und der vollständig durch ihre geometrischen Parameter definierten Wirkungsweise lassen sich MPA also exakt aus ihren Auslegungs-Parametern berechnen, bzw. genau auf das vorgegebene Schallspektrum auslegen." [Fuchs, 2010, S. 105]

Mikroperforierte Platten werden optisch attraktiv in Möbeln eingesetzt und können dahinter auch modern beleuchtet werden. Durch den Einsatz mikroperforierter Absorber aus transparenten Materialien können auch Absorber in architektonisch geplanten Glasbauten eingebracht werden.

Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass in den kleinen Löchern dieser MPA's über längere Jahre hinweg betrachtet kein Schmutz haftet. Sie lassen sich auch praktisch, schnell und leicht montieren und wieder abbauen. [Fuchs H. V.;Zha X., 2006], [Fuchs, 2010, S. 101 - 106]

3

Messungen im Hallraum

In diesem Kapitel geht es um die Messung des Schallabsorptionsgrades α von mikroperforierten Platten zwei verschiedener Firmen im Hallraum für diffusen Schalleinfall. Die Theorie dieser MPA-Platten wurde schon in Kapitel 2.3 beschrieben.

3.1 Allgemeines

Der Schallabsorptionsgrad α gibt an, wie viel von der auf eine Absorptionsfläche S auftreffenden Schallenergie von dieser Fläche absorbiert wird. Die Bestimmung dieses Schallabsorptionsgrades wurde in Anlehnung an die [ÖNORM EN ISO 354, 2003] durchgeführt, wobei einige Messreihen Einschränkungen der Norm erforderten, da im Rahmen dieser Bachelorarbeit v.a. die Anbringung von Absorbern in den Kanten behandelt wird, sodass das Prüfobjekt nicht immer die Bedingungen erfüllte, die die Norm voraussetzt: bei einigen Messreihen liegt die äquivalente Absorptionsfläche nicht zwischen 10 und 12 m², bei den meisten Messreihen ist außerdem ein Abstand von mindestens 1 m zur Raumkante und weiters ein Abstand zwischen Mikrofon und Prüfobjekt von mindestens 1 m nicht immer gewährleistet. [ÖNORM EN ISO 354, 2003, S. 7 - 8]

Nach dieser Norm wird der Schallabsorptionsgrad α über die Nachhallzeit T , welche direkt über die Impulsantwort ermittelt werden kann, mithilfe der Sabine'schen Nachhallgleichung berechnet (s. Gl. (3.1) und (3.2)), wobei V das Hallraumvolumen beschreibt.

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) + 4 \cdot V \cdot (m_2 - m_1) \quad (3.1)$$

$$\alpha = \frac{A_T}{S} \quad (3.2)$$

Hierfür wird zunächst die Nachhallzeit ohne Prüfobjekt (T_1) (s. Leerraummessungen Kapitel 3.3) und anschließend die Nachhallzeit mit Prüfobjekt (T_2) gemessen. m_1 und m_2 berücksichtigen den Einfluss der Dissipation, der v.a. bei hohen Frequenzen eine Rolle spielt [ISO 9613-1, 1993]. A_T ist die äquivalente Absorptionsfläche des Prüfobjekts – also die Differenz aus äquivalenter Absorptionsfläche des Hallraums mit Prüfobjekt (A_2) und äquivalenter Absorptionsfläche des Hallraums ohne Prüfobjekt (A_1) – wodurch letztendlich der Schallabsorptionsgrad α berechnet werden kann. Die Schallgeschwindigkeit c ist von der Temperatur t abhängig und wird über $c = 331 + 0.6 \cdot \frac{t}{^\circ\text{C}}$ berechnet, wobei auch hier für c_2 die Temperatur der ersten Messung ohne Probe und für c_1 die Temperatur der zweiten Messung mit Probe eingesetzt wird.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden zwei verschiedene Prüfobjekte vermessen – die Platten SoundMicro der Firma CKM Building Material Corp. aus Taiwan (s. Kapitel 3.4) und die Platten SonoPerf A der Firma ANDRITZ aus Regensburg (s. Kapitel 3.5). Mit letzteren Platten wurden weniger Messversuche durchgeführt, da zum einen zu wenige Platten vorhanden waren, um alle Messreihen zu realisieren, und zum anderen sich die Handhabung wegen der Weichheit

der Platten als schwierig erwies. Deswegen konnten diese Mess-Setups nicht mit vertretbarem Aufwand verwirklicht werden.

Für die Berechnungen des Schallabsorptionsgrades wurde stets nur die akustisch wirksame Absorberoberfläche S angewandt und zwar immer nur einfach, auch wenn diese beidseitig von Schallwellen getroffen wurde. Die Flächen, die unmittelbar in Berührung mit einer schallharten Oberfläche kamen, wurden gleich Null gesetzt. Dies wurde durch die Messreihe der Anordnung 'Ecke' in Kapitel 3.5.3 begründet.

3.2 Messaufbau

Für die Hallraummessung wurden sechs Mikrofonpositionen (M1 - M6) und zwei Quellenpositionen jeweils für Dodekaeder (D1/D2) und Subwoofer (S1/S2) verwendet. Zusätzlich wurde die Nachhallzeit diagonal über zwei Ecken gemessen, indem der Subwoofer (S0) in die eine Ecke gestellt wurde und das Eckmikrofon (M0) in der oberen schräg gegenüber liegenden Ecke platziert wurde. Abb. 3.2 zeigt die beschriebenen Mikrofon- und Quellenpositionen. Die grauen Balken in der Skizze stellen die Absorber zur Grunddämpfung dar.

Um die Messpositionen (M1 - M6) abzudecken, wurden zwei NTi Messmikrofone verwendet. Die Eckmessung wurde mit dem Mikrofon AKG C480 B (s. Tab. 8.1) separat vollzogen. Das Messsequipment ist im Geräteverzeichnis in Tab. 8.1 auf Seite 101 nachzulesen.

Abb. 3.1 zeigt die drei Messmikrofone bzw. Subwoofer und Dodekaeder.



(a) Foto der drei Mikrofone



(b) Foto von Subwoofer und Dodekaeder

Abbildung 3.1: Fotos von den Mikrofonen und Quellen

Im Folgenden sind die Höhen der Mikrofone und des Dodekaeders aufgelistet:

- Höhe des ersten Messmikrofons: 1.7 m
- Höhe des zweiten Messmikrofons: 2 m
- Höhe des Eckmikrofons: 4.8 m
- Höhe des Dodekaeders: 1.36 m

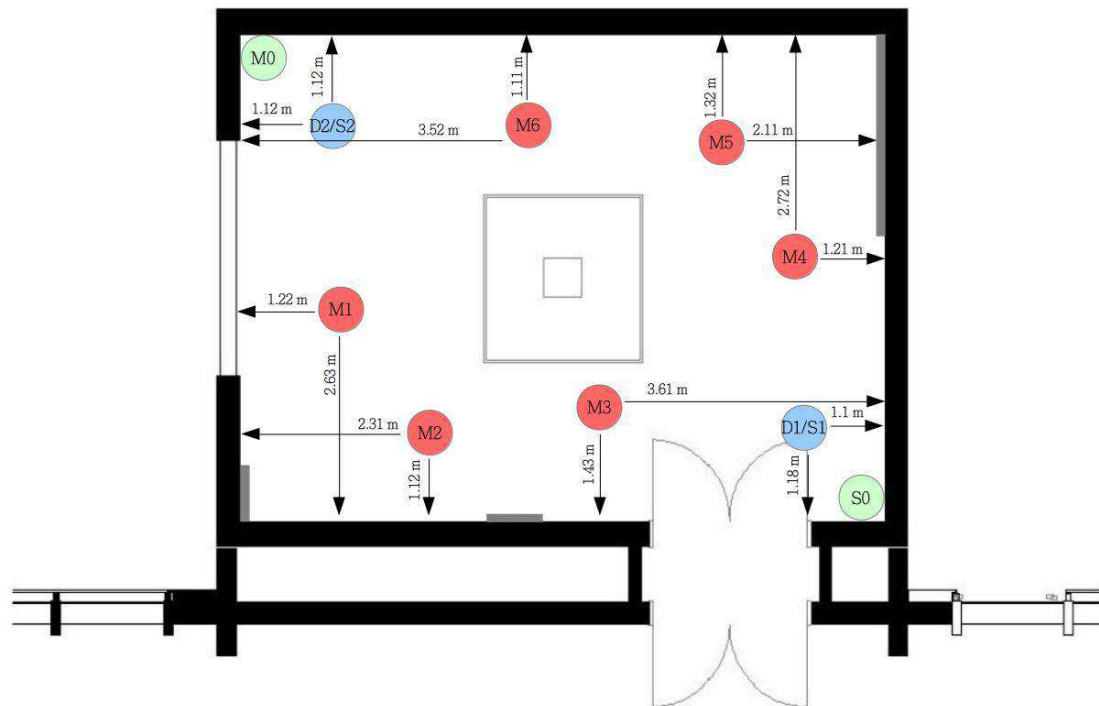


Abbildung 3.2: Skizze des Hallraumes mit Mikrofon- und Quellenpositionen

Gemessen wurde mit der Software WinMLS¹ mittels eines MLS-Signals. Folgende Einstellungen wurden hierfür vorgenommen:

- 2 Channel Messung
- Sequence order: 19
- No. of cycles: 2
- No. of pre-send cycles: 1
- MLS Typ: A

Die Mikrofone wurden zu Beginn kalibriert. Der Verstärker für den Dodekaeder wurde auf 0 dB eingestellt, beim Subwoofer wurde die Preset 3-Einstellung verwendet.

¹ Die nach ÖNORM EN 61260 genormte Terzbandmittenfrequenz beträgt für den Index 1 1250 Hz. Die Software WinMLS gibt jedoch 1260 Hz aus, was näher an der exakten Berechnung der Terzbandmittenfrequenz für den Index 1 liegt, weshalb in allen Tabellen die von der Software angegebene Terzbandmittenfrequenz von 1260 Hz verwendet wird. Außerhalb der Tabellen wird aber immer für diese Terz der normgemäße Wert von 1250 Hz verwendet.

3.3 Leermessungen

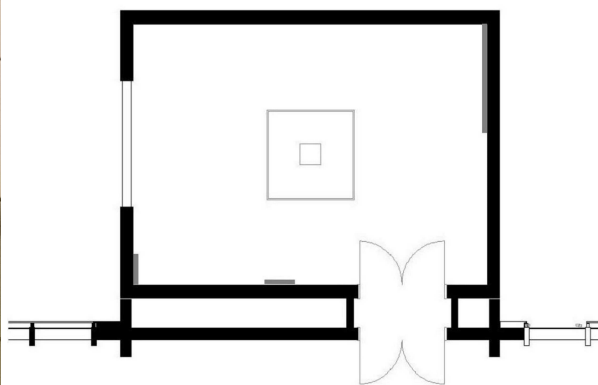
Insgesamt wurde die Nachhallzeit des Hallraumes im leeren Zustand vier Mal gemessen – am ersten Messtag vor und nach den eigentlichen Messungen (Leer1 und Leer2) und noch einmal jeweils vor den eigentlichen Messungen am dritten und vierten Messtag (Leer3 und Leer4). Leer bedeutet, dass nur die Absorber für die Grunddämpfung, die Diffusoren und das Messequipment im Hallraum waren (s. Abb. 3.3). Tab. 3.1 zeigt eine Übersicht relevanter Parameter der Leermessungen.

	Leer1	Leer2	Leer3	Leer4
Temperatur	19.8 °C	19.2 °C	19.8 °C	19.1 °C
rel. Luftfeuchtigkeit	48 %	51.9 %	51.8 %	53.8 %
Messdatum	21.11.2016		23.11.2016	24.11.2016
Hallraumvolumen	244 m ³			

Tabelle 3.1: Übersicht der Messparameter der Leermessungen



(a) Foto des Hallraumes im leeren Zustand



(b) Skizze des Hallraumes im leeren Zustand

Abbildung 3.3: Foto und Skizze des Hallraumes im leeren Zustand

Abb. 3.4 bzw. Tab. 3.2 zeigen die einzelnen Nachhallzeiten der Leermessungen.

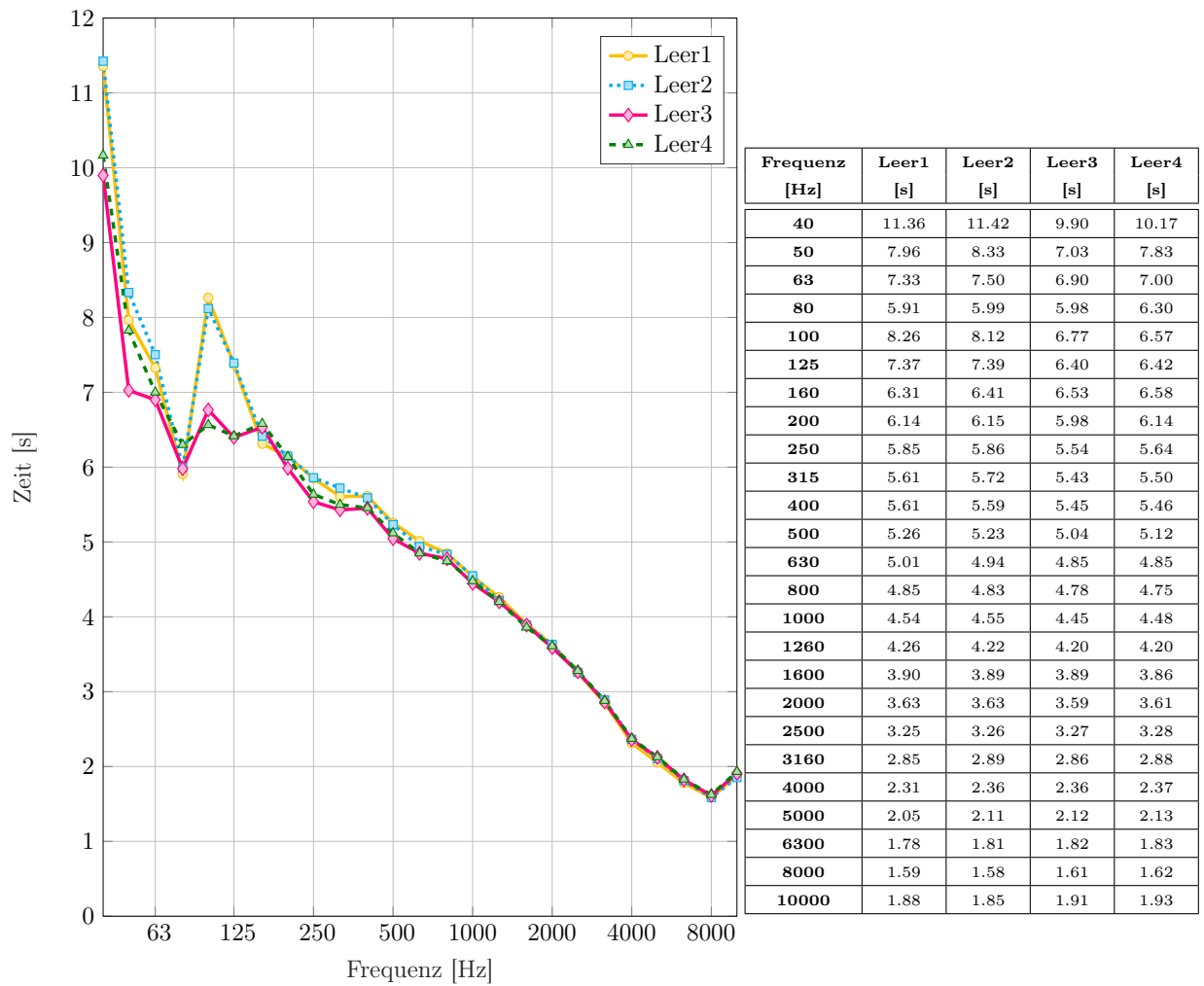
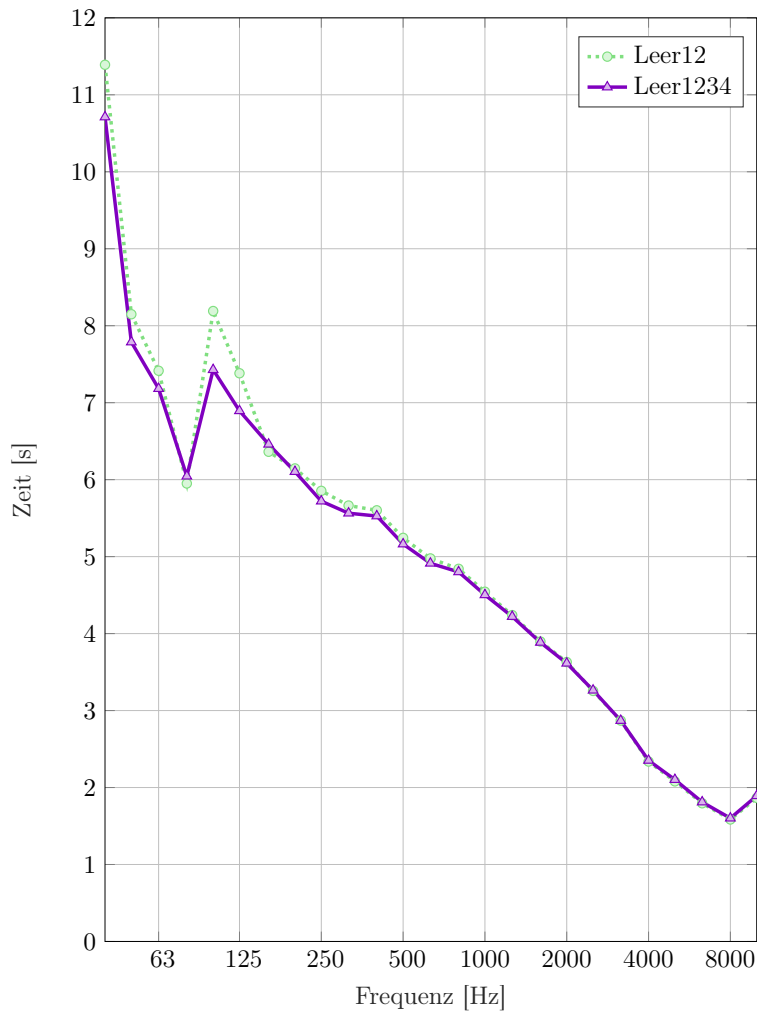


Abbildung 3.4: Nachhallzeit T_{30} der einzelnen Leermessungen

Tabelle 3.2: Nachhallzeit T_{30} der einzelnen Leermessungen

Da die Abweichung der Messpunkte vom ersten Messtag zum zweiten und dritten Messtag kaum voneinander abweichen – bis auf den Frequenzbereich zwischen 80 und 160 Hz – wird für Messreihen vom ersten Messtag die Mittelung aus Leer1 und Leer2 (= Leer12), für alle anderen Messreihen die Mittelung aus Leer1, Leer2, Leer3 und Leer4 (= Leer1234) herangezogen. Die dazugehörigen Kurven sind in Abb. 3.5 bzw. Tab. 3.3 abgebildet.



Frequenz [Hz]	Leer12 [s]	Leer1234 [s]
40	11.39	10.71
50	8.15	7.79
63	7.41	7.18
80	5.95	6.04
100	8.19	7.43
125	7.38	6.89
160	6.36	6.46
200	6.15	6.10
250	5.85	5.72
315	5.66	5.56
400	5.60	5.53
500	5.24	5.16
630	4.98	4.91
800	4.84	4.80
1000	4.54	4.50
1260	4.24	4.22
1600	3.90	3.89
2000	3.63	3.61
2500	3.25	3.26
3160	2.87	2.87
4000	2.34	2.35
5000	2.08	2.10
6300	1.80	1.81
8000	1.59	1.60
10000	1.86	1.89

Abbildung 3.5: Nachhallzeit T_{30} der gemittelten Leermessungen

Tabelle 3.3: Nachhallzeit T_{30} der gemittelten Leermessungen

3.4 Messungen der Platten SoundMicro

In diesem Kapitel werden verschiedene Messreihen der MPA-Platten SoundMicro beschrieben. In Tab. 3.4 sind Eigenschaften bzgl. der Beschaffenheit der Platten aufgezeigt und außerdem die Abmessung einer einzelnen Platte angeführt. Hierbei wird zwischen nicht gekantet und gekantet differenziert, weil je nach Messreihe verschiedene Aufbauten gewählt wurden. Die Platten wurden hierfür längs in der Mitte im 90°-Winkel gekantet. Die Form der Löcher ist konisch, d.h. auf der einen Seite der Platte haben die Löcher die Form des gelben Dreieckes in Tab. 3.4, welches auf der anderen Seite der Platte in ein winziges Loch – in der Tabelle als grauer Kreis gezeichnet – führt.

In Abb. 3.6 ist ein Foto der Platte SoundMicro zu sehen. Die Platten waren aufgrund ihres Zuschnitts und ihres Materials recht leicht und handlich, sodass viele Messreihen dieser Platten verwirklicht wurden.

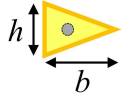
Hersteller	CKM Building Material Corp. Taiwan
Produktname	SoundMicro Panel Alum
Material	Aluminium
Plattendicke t	$t = 1 \text{ mm}$
Lochflächenverhältnis σ	$\sigma = 5 \%$
Form der Löcher (konisch)	
Abmessungen der Löcher	$h = 1.1 \text{ mm}, b = 1.75 \text{ mm}$
Fläche der nicht gekanteten Platte	$0.7 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} = 0.84 \text{ m}^2$
Fläche der gekanteten Platte	$2 \cdot 0.35 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} = 0.84 \text{ m}^2$

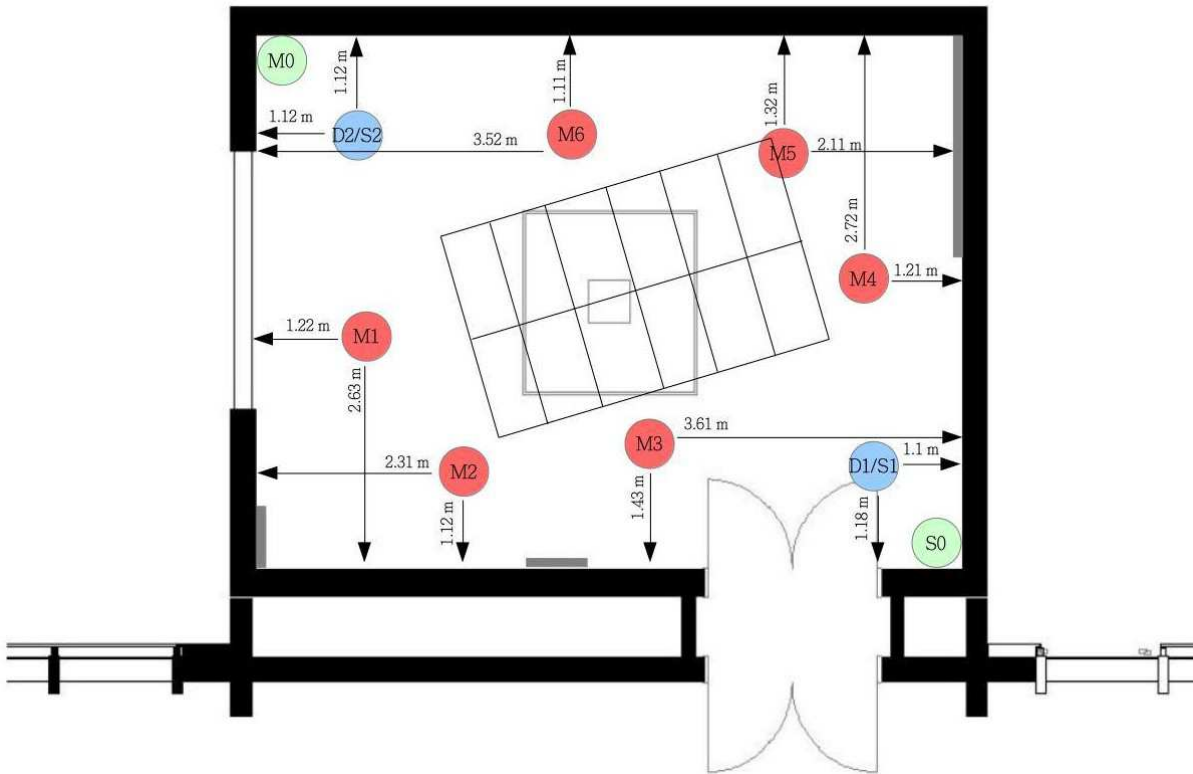
Tabelle 3.4: Eigenschaften der MPA-Platte SoundMicro



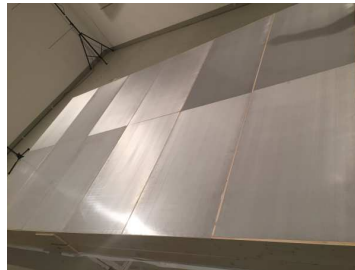
Abbildung 3.6: Foto der MPA-Platte SoundMicro

3.4.1 Anordnung 'Mitte'

Die zwölf Platten wurden auf einen Holzrahmen, welcher in zwei verschiedene Höhen (20 und 35 cm) einstellbar war, gelegt. Dieser Holzrahmen befand sich in der Mitte des Hallraumes (s. Abb. 3.7).



(a) Skizze des Hallraumes der Anordnung 'Mitte'



(b) Foto und Skizze der Anordnung 'Mitte', $h = 20$ cm (c) Foto und Skizze der Anordnung 'Mitte', $h = 35$ cm

Abbildung 3.7: Fotos und Skizzen der Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)

In Abb. 3.8 ist der gemessene Absorptionsgrad α abgebildet. Deutlich zu sehen sind die Resonanzhöhen bei 250 Hz für die Rahmenhöhe $h = 35$ cm und bei 500 Hz für die Rahmenhöhe $h = 20$ cm, wobei hier Absorptionsgradwerte bis fast 0.9 erreicht werden. Qualitativ gesehen sind beide Kurven recht ähnlich, für mittlere Frequenzen liegen beide Kurven bei $\alpha \approx 0.6$. Insgesamt ist der Absorptionsgrad für $h = 35$ cm ein bisschen höher.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.1 zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

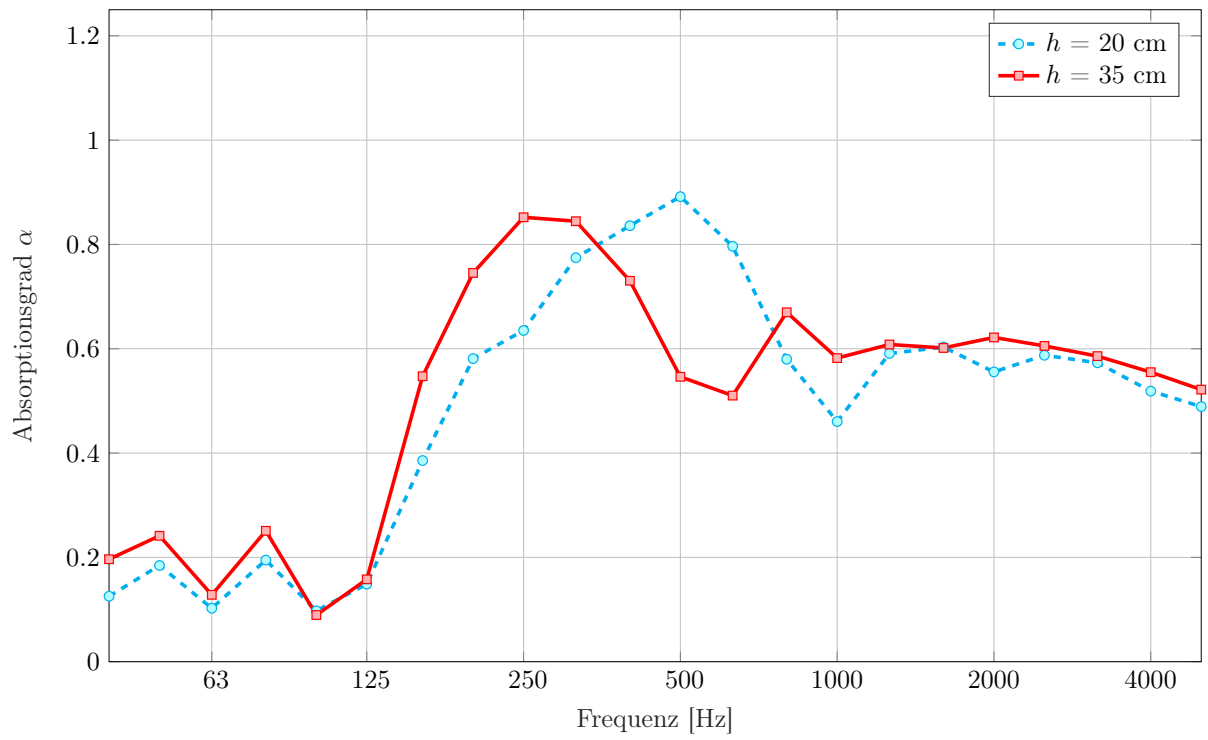
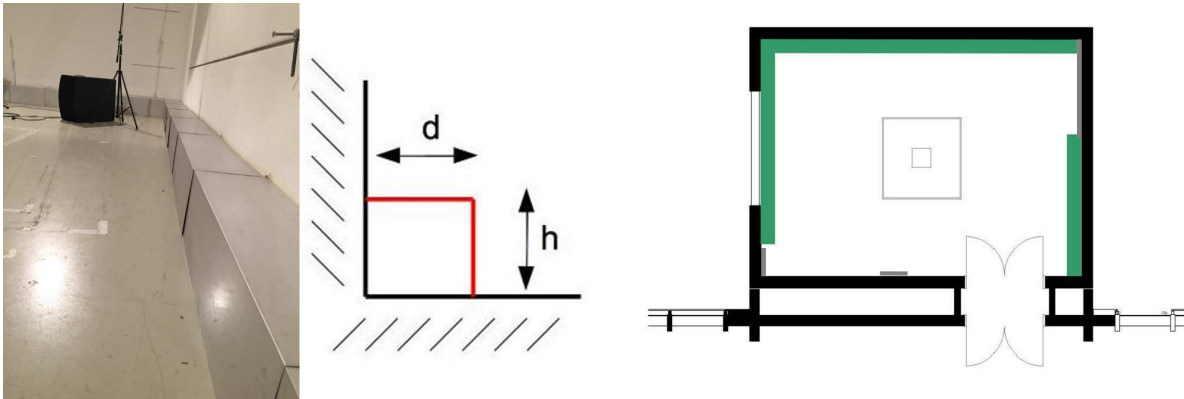


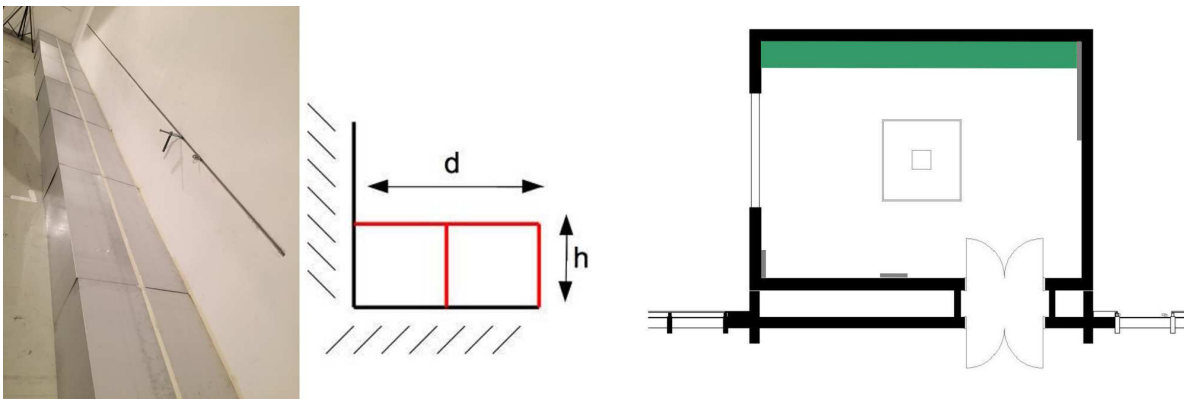
Abbildung 3.8: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)

3.4.2 Anordnung 'Kante'

Die Platten wurden in der Mitte gekantet und im 90° -Winkel in die Kanten des Hallraumes angebracht, sodass ein geschlossenes Luftvolumen erreicht wurde (s. Abb. 3.9(a) und Abb. 3.9(b)). Diese Konstruktion dient als Vergleich zu herkömmlichen Kantenabsorbern, deren Luftpolster jedoch mit Dämmmaterial gefüllt werden muss. Zusätzlich wurde die gleiche Messreihe durchgeführt mit dem Unterschied, dass die Platten in zweifacher Ausführung im 90° -Winkel in die Kante des Hallraumes angebracht wurden. So wurde das geschlossene Luftpolster in Abb. 3.9(a) quasi verdoppelt (s. Abb. 3.9(c) und Abb. 3.9(d)). In Abb. 3.9(b) bzw. Abb. 3.9(d) stellen die grauen Balken die Absorber einer permanenten Grunddämpfung dar, die grünen Balken die MPA-Platten.



(a) Foto und Skizze der Anordnung 'Kante', $h = 35$ cm, $d = 35$ cm, (b) Skizze des Hallraumes der Anordnung 'Kante', einfache Ausführung, $d = 35$ cm



(c) Foto und Skizze der Anordnung 'Kante', $h = 35$ cm, $d = 70$ cm, (d) Skizze des Hallraumes der Anordnung 'Kante', doppelte Ausführung, $d = 70$ cm

Abbildung 3.9: Fotos und Skizzen der Anordnung 'Kante'

In Abb. 3.10 ist der gemessene Absorptionsgrad α abgebildet. Deutlich zu sehen sind die Resonanzspitzen bei 250 Hz für beide Ausführungen, wobei der Maximalwert des Absorptionsgrades für die einfache Ausführung bei $\alpha = 1.21$ und für die doppelte Ausführung bei $\alpha = 0.97$ liegt. Die Form beider Kurven ist sehr ähnlich, für Frequenzen $f > 400$ Hz wirken die Platten in der doppelten Anordnung etwas besser.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.2 (Aufbau 1 und 2) zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

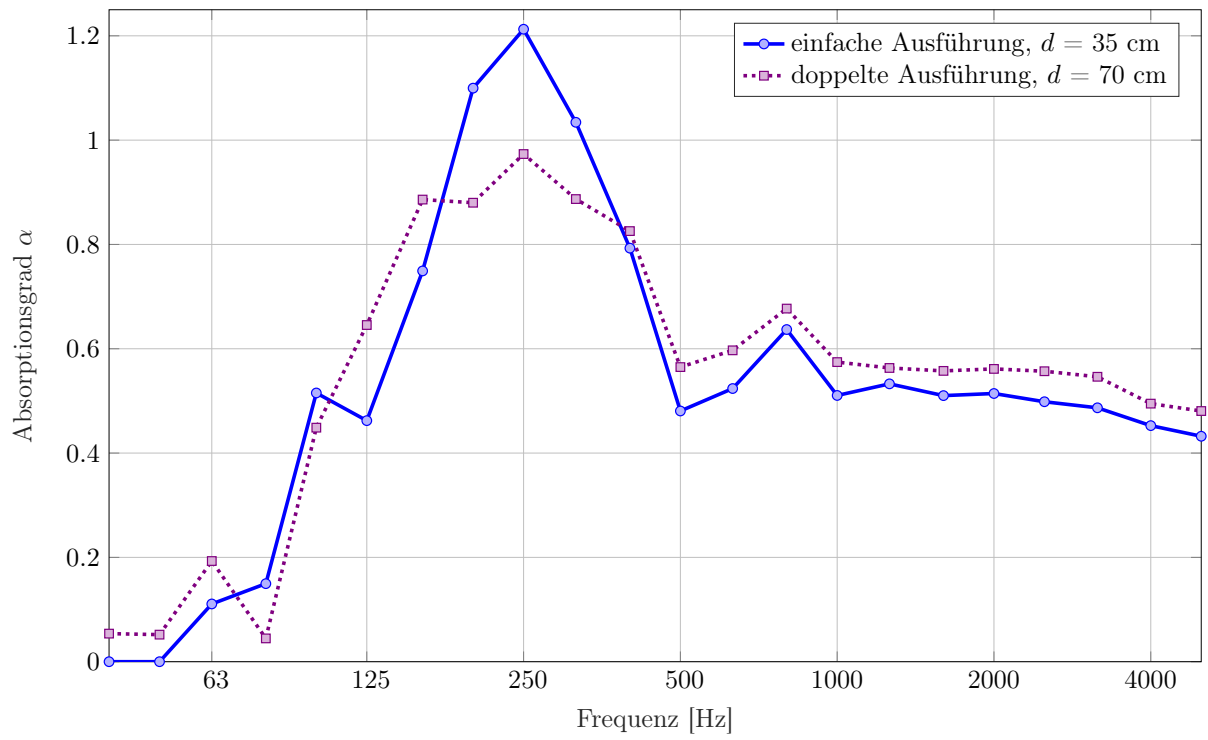


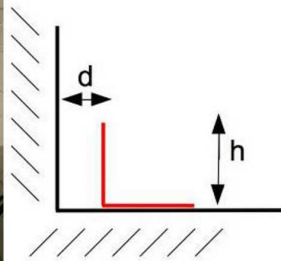
Abbildung 3.10: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Kante'

3.4.3 Anordnung 'L-Form'

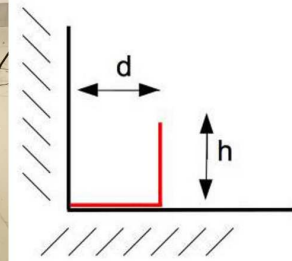
In der Messreihe 'L-Form' wurden die Platten parallel zur Wand wie ein 'L' in verschiedenen Höhen und Abständen gestellt. Deshalb wird in dieser Messreihe zwischen 'L-Form niedrig' und 'L-Form hoch' unterschieden.

3.4.3.1 Anordnung 'L-Form niedrig'

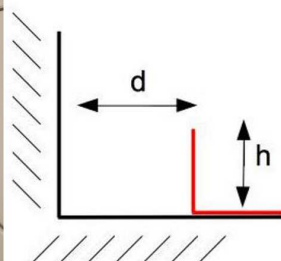
Bei 'L-Form niedrig' wurden die gekanteten Platten verwendet, wobei vier verschiedene Abstände zur Wand – 17.5 cm, 35 cm, 52.5 cm und 70 cm – gewählt wurden (s. Abb. 3.11).



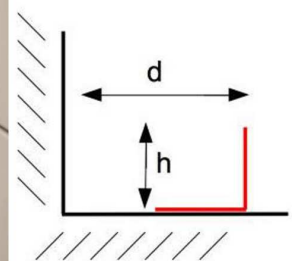
(a) Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form niedrig', $h = 35$ cm, $d = 17.5$ cm



(b) Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form niedrig', $h = 35$ cm, $d = 35$ cm



(c) Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form niedrig', $h = 35$ cm, $d = 52.5$ cm



(d) Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form niedrig', $h = 35$ cm, $d = 70$ cm

Abbildung 3.11: Fotos und Skizzen der Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)

In Abb. 3.12 ist der Absorptionsgrad α abgebildet. Auch hier sind deutliche Resonanzen zu erkennen – je größer der Abstand zur Wand wird, desto mehr verschieben sich die Resonanzen hin zu tiefen Frequenzen. Bei $d = 17.5$ cm wird ein recht breites Maximum bei 500 Hz erreicht, bei $d = 35$ cm eine Resonanzspitze bei 250 Hz. Für $d = 52.5$ cm und $d = 70$ cm liegt die Resonanz jeweils bei ca. 200 Hz. Die Resonanzspitze bei $d = 35$ cm ist mit $\alpha = 0.93$ am höchsten. Für die mittleren Frequenzen sammeln sich alle Kurven ca. zwischen $0.5 < \alpha < 0.6$.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.3 zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

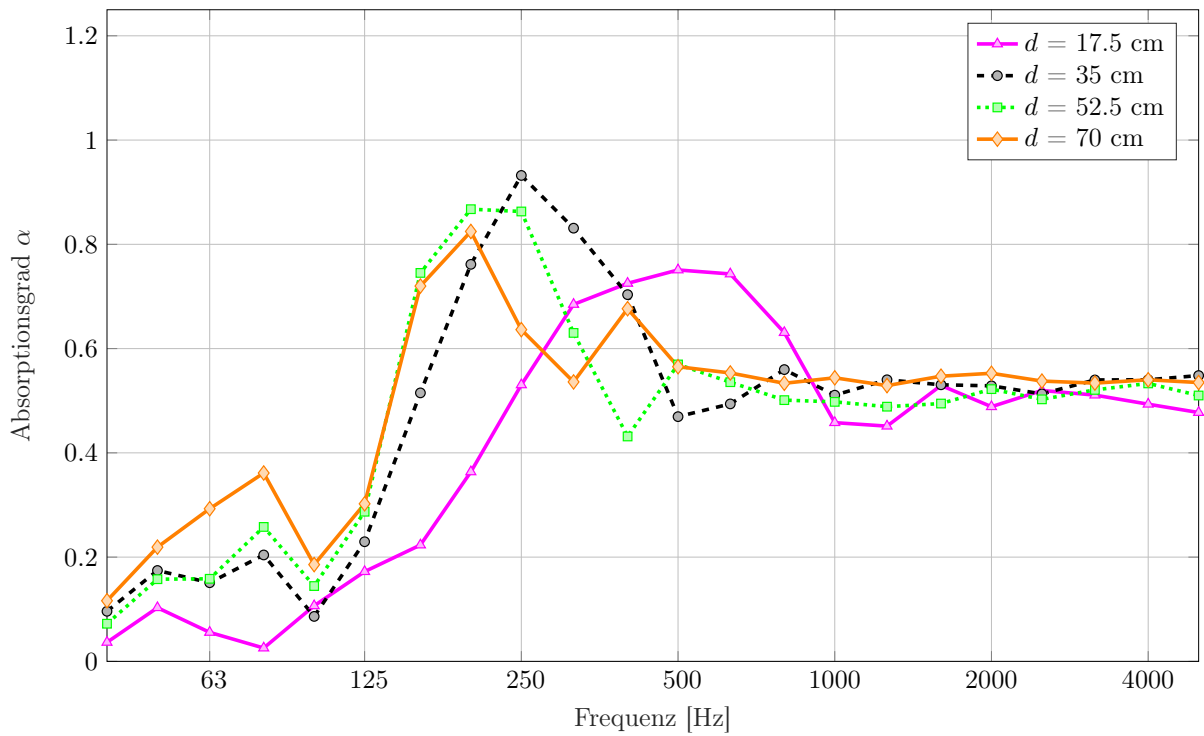


Abbildung 3.12: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)

3.4.3.2 Anordnung 'L-Form hoch'

Um einen Vergleich zum Aufbau Anordnung 'L-Form niedrig' in Abb. 3.11(b) zu erhalten, wurde noch eine Messreihe durchgeführt, die dieser Anordnung zwar entspricht, bei der jedoch die nicht gekanteten Platten verwendet wurden, d.h. jene mit den Abmessungen $1.2 \text{ m} \cdot 0.7 \text{ m}$. Für die Aufstellung der Platten im Abstand von 35 cm parallel zur Wand wurden kleine Holzstützen angebracht, sodass die zusätzlich mit Klebeband fixierten Platten nicht umfallen konnten. Insgesamt ergibt diese Anordnung durch die doppelte Höhe eine doppelte wirksame Absorptionsfläche im Vergleich zur Anordnung 'L-Form niedrig' (s. Abb. 3.11(b)). Der Aufbau ist in Abb. 3.13 veranschaulicht.

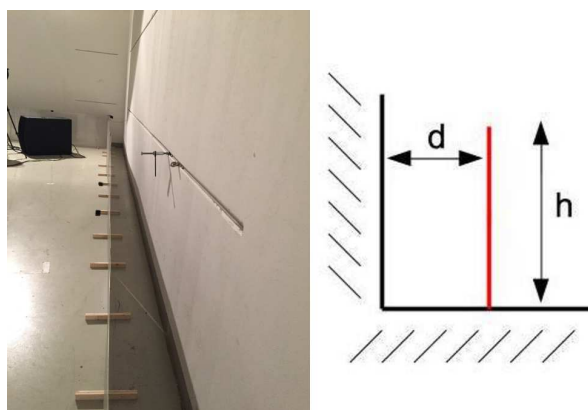


Abbildung 3.13: Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form hoch' (SoundMicro), $h = 70 \text{ cm}$, $d = 35 \text{ cm}$

In Abb. 3.14 ist der Absorptionsgrad α abgebildet. Dieser bewegt sich ab 500 Hz bei $\alpha \approx 0.5$, eine Resonanzerhöhung ist bei 315 Hz mit $\alpha = 0.64$ zu beobachten.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.5

(Aufbau 3) zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

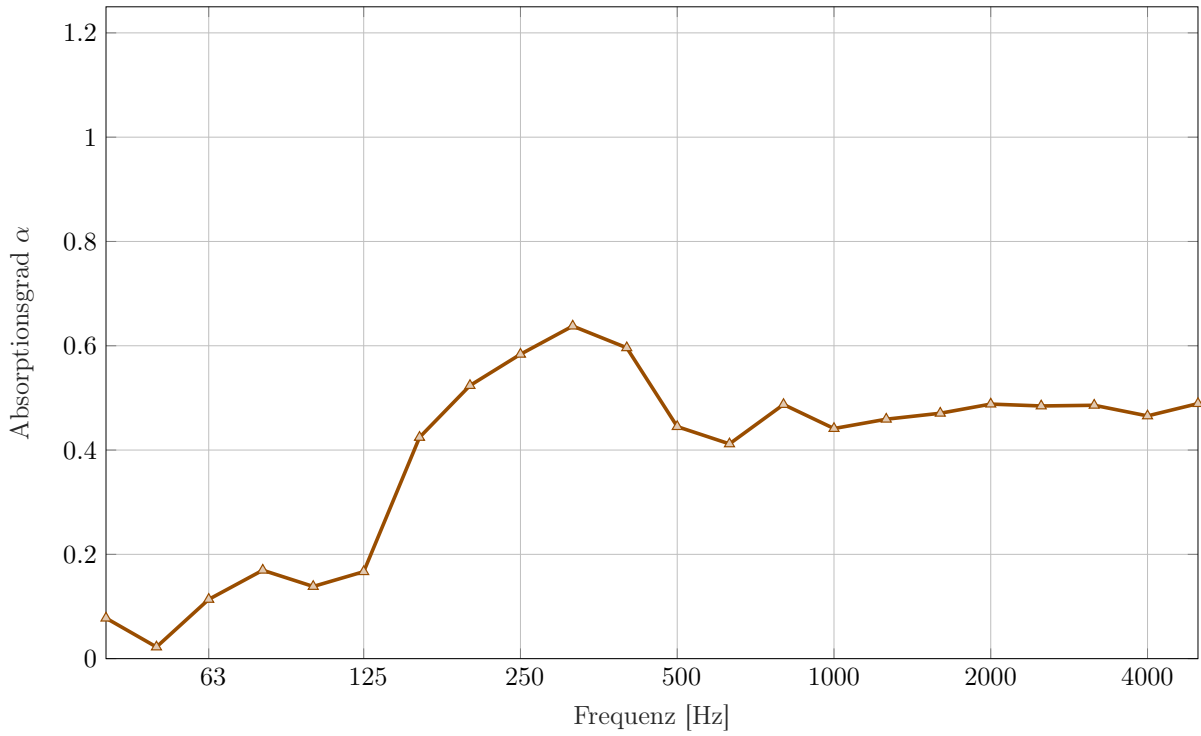
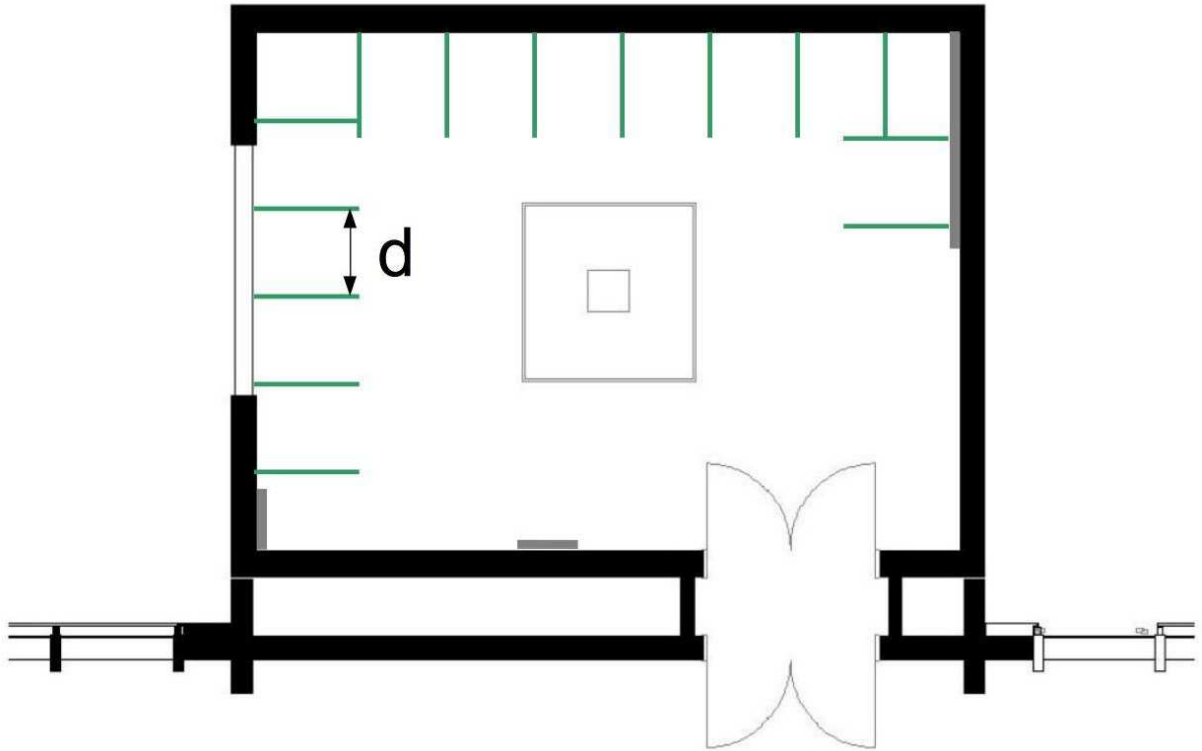


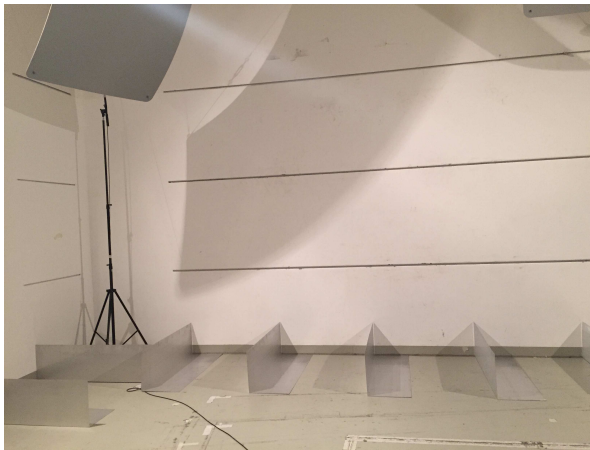
Abbildung 3.14: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form hoch' (SoundMicro)

3.4.4 Anordnung 'Baffles'

Die Platten wurden orthogonal zur Wand im Abstand von 1 m zueinander aufgestellt. Für diese Messreihe wurden zum einen die gekanteten Platten ($h = 35$ cm), zum anderen die nicht gekanteten Platten ($h = 70$ cm) verwendet. Für letztere wurden die bereits in Kapitel 3.4.3.2 beschriebenen Holzstützen sowie Klebeband zur Fixierung verwendet. Der Aufbau ist in Abb. 3.15 zu sehen.



(a) Skizze des Hallraumes der Anordnung 'Baffles', $d = 1$ m



(b) Foto der Anordnung 'Baffles', 35 cm hoch, $d = 1$ m (c) Foto der Anordnung 'Baffles', 70 cm hoch, $d = 1$ m

Abbildung 3.15: Fotos und Skizzen der Anordnung 'Baffles'

In Abb. 3.16 ist der Absorptionsgrad α abgebildet. Im Frequenzbereich von ca. 160 - 500 Hz zeigen die niedrigen Baffles eine deutlich höheren Absorptionsgrad. Der Absorptionsgrad α befindet sich hier im Bereich von 0.7, im Gegensatz dazu liegt der Absorptionsgrad α der hohen Baffles bei ca. 0.4. Ab ca. 400 Hz weisen beide Konstruktionen einen erstaunlich breitbandigen,

recht konstanten Absorptionsgrad auf – der Absorptionsgrad der niedrigen Baffles liegt innerhalb dieses Frequenzbereichs bei $\alpha \approx 0.5$ und der der hohen Baffles bei $\alpha \approx 0.4$. Die niedrige Baffleanordnung wirkt bis 125 Hz genauso gut und für $f > 125$ Hz deutlich besser als die hohe Baffleanordnung. Die Verdoppelung der Absorberfläche zeigt also nicht einen gleichbleibenden Absorptionsgrad, wie es zu erwarten wäre, sondern führt zu einer deutlich geringeren Wirkung, wie am niedrigeren Absorptionsgrad zu erkennen ist. Dies kann so erklärt werden, dass die niedrige Baffleanordnung den Bereich in den Raumkanten – wo die Schallabsorption bekanntlich am effizientesten ist – optimal ausnutzt, während hingegen die hinzugekommene obere Hälfte der hohen Baffleanordnung bereits außerhalb dieses Bereichs liegt.

Bemerkenswert sind die beiden Überhöhungen der niedrigen Baffleanordnung bei 160 und 315 Hz. Berücksichtigt man, dass die Periodizität einer Stehwelle $\frac{\lambda}{2}$ beträgt und setzt man den Baffleabstand von $1 \text{ m} = \frac{\lambda}{2}$, dann entspricht das einer Frequenz von 171.5 Hz. Vielfache davon wären 343, 514.5 Hz usw. Die beiden niedrigsten Frequenzen von 171.5 und 343 Hz fallen also in die Terzbänder mit den überhöhten Absorptionsgraden.

Berücksichtigt man weiters, dass in die 160 Hz-Terz auch die 8-fach Mode in Bezug auf die Länge von 8.34 m ($f_{8,0,0} = 164.5$ Hz) und die 6-fach Mode in Bezug auf die Breite von 5.99 m ($f_{0,6,0} = 171.8$ Hz) fallen, dann lässt sich die Hypothese aufstellen, dass die Stehwellen bei 164.5 bzw. bei 171.8 Hz sehr gut mit der periodischen Anordnung der mikroperforierten Platten zusammenpassen und dadurch der erhöhte Absorptionsgrad verursacht wird.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.5 (Aufbau 1 und 2) zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

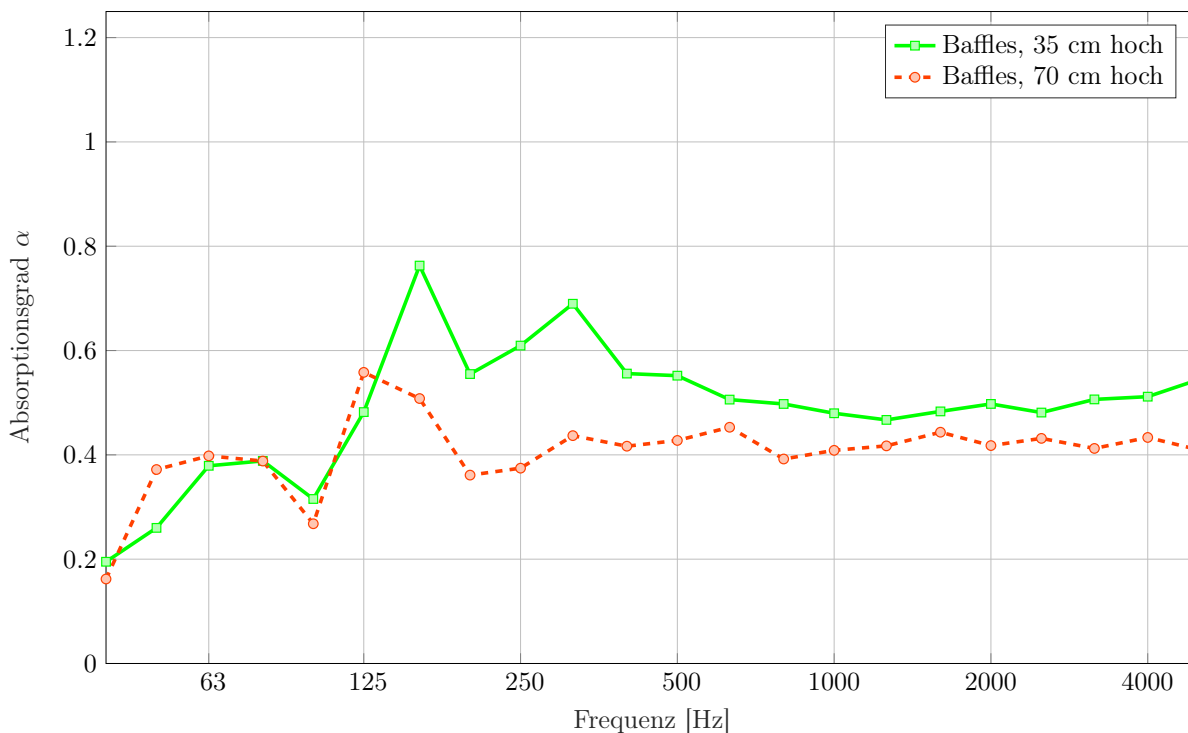


Abbildung 3.16: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Baffles'

3.4.5 Anordnung '45°-Winkel'

Die nicht gekanteten Platten wurden im 45°-Winkel in die Kanten des Hallraumes gelegt. Um den Abstand zur Wand von 35 cm konstant einhalten zu können, wurden lange Klebestreifen auf den Boden des Hallraumes geklebt. Der Aufbau ist in Abb. 3.17 veranschaulicht.



Abbildung 3.17: Foto und Skizze der Anordnung '45°-Winkel'

In Abb. 3.18 ist der Absorptionsgrad α abgebildet. Bei 250 Hz ist ein eindeutiges Absorptionsmaximum von $\alpha = 0.81$ zu erkennen. Nach Abklingen dieser Resonanz, also für Frequenzen ab 500 Hz, bleibt der Absorptionsgrad mit $\alpha \approx 0.5$ relativ konstant.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.2 (Aufbau 3) zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

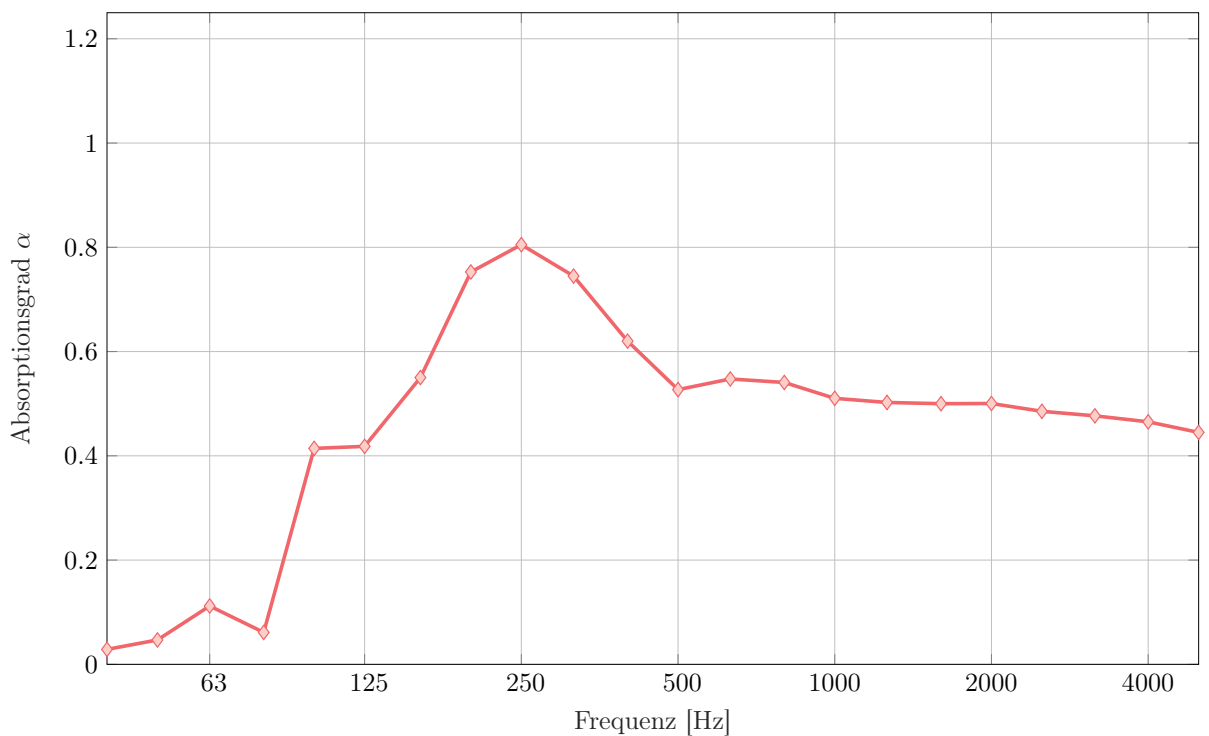


Abbildung 3.18: Absorptionsgrad α der Anordnung '45°-Winkel'

3.5 Messungen der Platten SonoPerf A

In diesem Kapitel werden verschiedene Messreihen der MPA-Platten SonoPerf A beschrieben. In Tab. 3.5 sind Eigenschaften bzgl. der Beschaffenheit der Platten aufgezeigt und außerdem die Abmessung einer einzelnen Platte angeführt (vgl. Tab. 3.4). Auch hier wird zwischen nicht gekantet und gekantet differenziert, wobei weniger Platten vorhanden waren als bei den Messungen der Platten SoundMicro. Die 2.3 m langen Platten wurden, nachdem die Messreihe Anordnung 'Mitte' durchgeführt worden war, in der Mitte durchgeschnitten und anschließend gekantet. Die Form der Löcher ist schlitzförmig.

In Abb. 3.19 ist ein Foto der Platte SonoPerf A zu sehen. Viele Mess-Setups (z.B. Anordnung 'Baffle', Anordnung 'L-Form hoch', Anordnung '45°-Winkel') konnten gar nicht verwirklicht werden, da die Platten schon nach der ersten Messanordnung gekantet wurden und die 2.3 m langen Platten somit nicht mehr zur Verfügung standen.

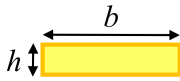
Hersteller	ANDRITZ
Produktname	SonoPerf A
Material	Stahl
Plattendicke t	$t = 0.75 \text{ mm}$
Lochflächenverhältnis σ	$\sigma = 5 \%$
Form der Schlitz	
Abmessungen der Schlitz	$h = 0.2 \text{ mm}, b = 2.4 \text{ mm}$
Fläche der nicht gekanteten Platte	$0.71 \text{ m} \cdot 2.3 \text{ m} = 1.633 \text{ m}^2$
Fläche der gekanteten Platte	$2 \cdot 0.355 \text{ m} \cdot 1.15 \text{ m} = 0.8165 \text{ m}^2$

Tabelle 3.5: Eigenschaften der MPA-Platte SonoPerf A

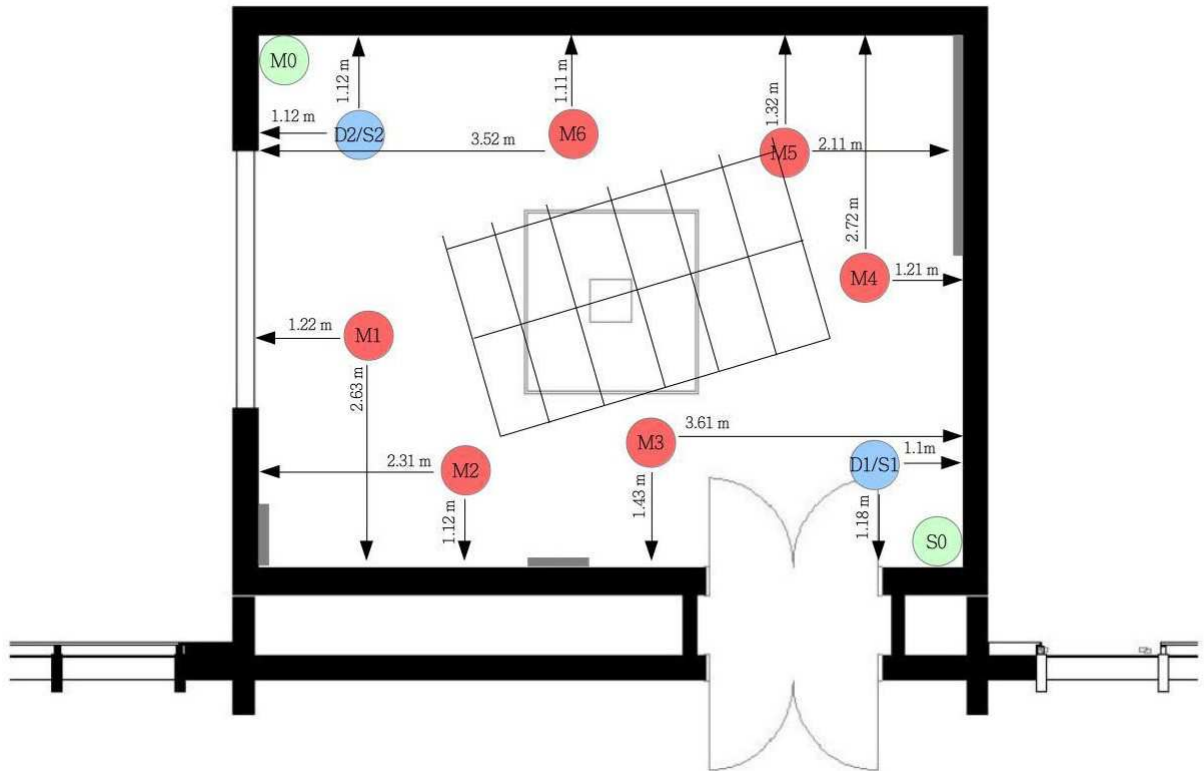


Abbildung 3.19: Foto der MPA-Platte SonoPerf A

3.5.1 Anordnung 'Mitte'

Diese Messreihe wurde analog zur Messreihe in Kapitel 3.4.1 (Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)) durchgeführt. Die sechs Platten wurden auf einen Holzrahmen, welcher in zwei verschiedenen Höhen (20 und 35 cm) einstellbar war, gelegt. Allerdings wellten sich die Platten auf dem Rahmen,

wodurch große Luftspalte zwischen Holzrahmen und der Platten entstanden. Um dem entgegenzuwirken, wurden die Platten gekittet. Die Breite des Holzrahmens musste noch angepasst werden, da zuvor die SoundMicro-Platten vermessen wurden, welche eine etwas größere Länge beanspruchten. Der Holzrahmen befand sich in der Mitte des Hallraumes (s. Abb. 3.20).



(a) Skizze des Hallraumes der Anordnung 'Mitte'

(b) Foto und Skizze der Anordnung 'Mitte', $h = 20$ cm (c) Foto und Skizze der Anordnung 'Mitte', $h = 35$ cm

Abbildung 3.20: Fotos und Skizzen der Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)

In Abb. 3.21 ist der gemessene Absorptionsgrad α abgebildet. Deutlich zu sehen ist die Resonanz bei 315 Hz für die Rahmenhöhe $h = 35$ cm und die etwas breitere Resonanz bei 500 Hz für die Rahmenhöhe $h = 20$ cm, wobei hier Absorptionsgradwerte bis 0.86 erreicht werden. Qualitativ gesehen sind beide Kurven recht ähnlich, für mittlere Frequenzen liegen beide Kurven zwischen $0.6 < \alpha < 0.7$. Insgesamt ist der Absorptionsgrad für $h = 35$ cm ein bisschen höher.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.6 zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

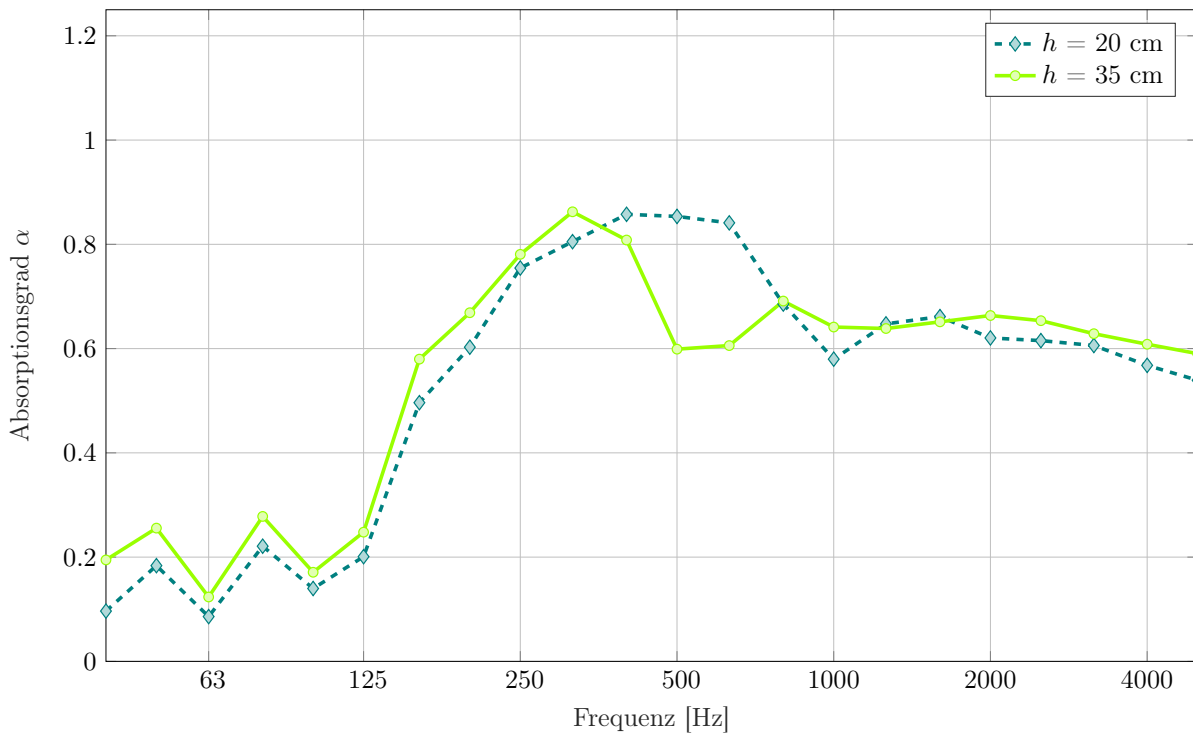
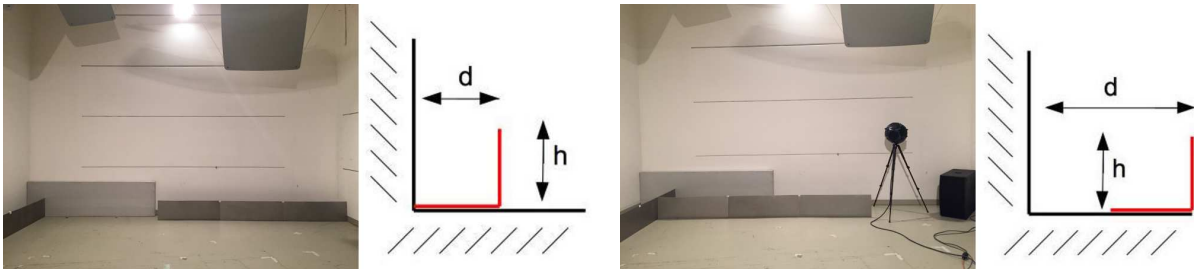


Abbildung 3.21: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)

3.5.2 Anordnung 'L-Form niedrig'

Diese Messreihe wurde analog zur Messreihe in Kapitel 3.4.3.1 (Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)) durchgeführt. Hier wurden die gekanteten Platten im Abstand von $d = 35.5$ cm und $d = 71$ cm wie ein 'L' parallel zur Wand aufgestellt; lediglich auf die Abstände $d = 17.5$ cm und $d = 52.5$ cm zur Wand wurde verzichtet (s. Abb. 3.22).



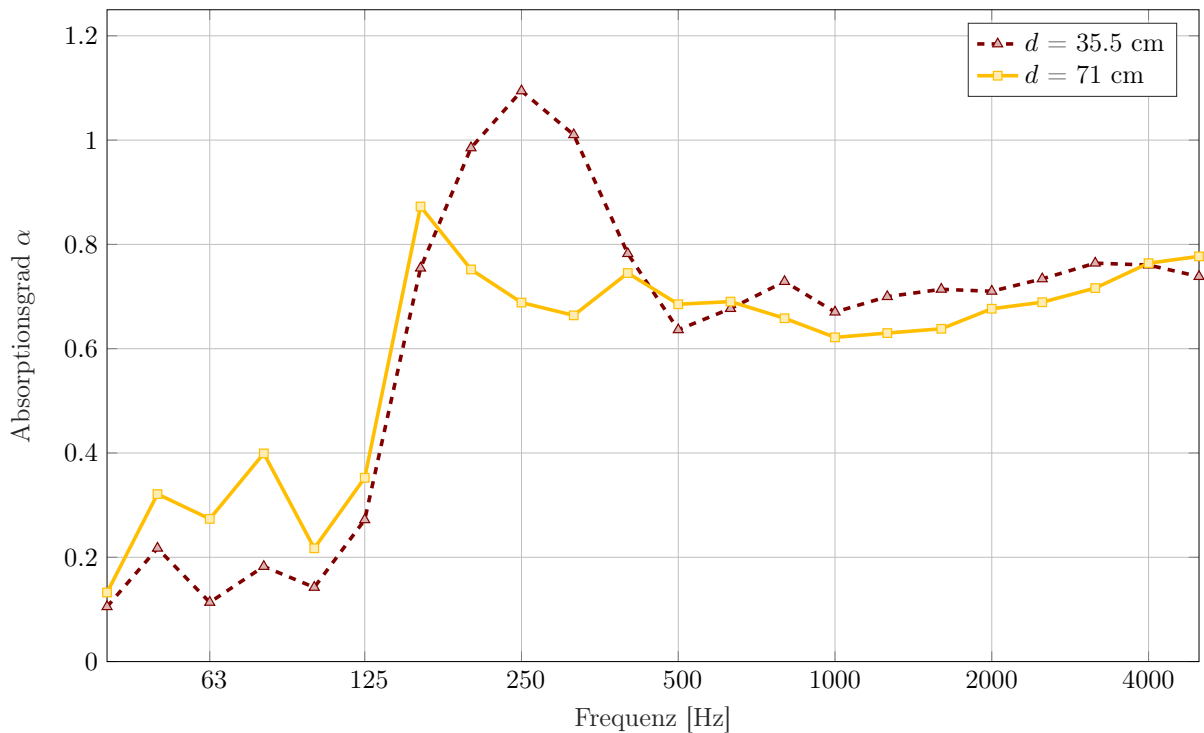
(a) Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form niedrig', $h = 35.5$ cm, $d = 35.5$ cm

(b) Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form niedrig', $h = 35.5$ cm, $d = 71$ cm

Abbildung 3.22: Fotos und Skizzen der Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)

In Abb. 3.23 ist der Absorptionsgrad α abgebildet. Wiederum ist für $d = 35.5$ cm bei 250 Hz eine eindeutige Resonanzhöhung mit $\alpha = 1.09$ zu erkennen. Die Kurve für $d = 71$ cm zeigt, dass diese Anordnung relativ breitbandig ab 160 Hz wirkt. Der Absorptionsgrad α bewegt sich hier ungefähr zwischen $0.6 < \alpha < 0.8$.

Die genauen Werte des Absorptionsgrades α sind Tab. 1 des Datenblattes im Anhang 8.1.7 zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Details dieser Messreihe.

Abbildung 3.23: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)

3.5.3 Anordnung 'Ecke'

Für die Anordnung 'Ecke' wurden die bereits in der Mitte gekanteten Platten direkt in die Ecke platziert ohne Abstand zur Wand oder zum Boden (s. Abb. 3.24). Mit diesem Aufbau sollte gezeigt werden, dass bei Aufstellung der Platten unmittelbar an einer schallharten Oberfläche, d.h. bei einem Abstand von 0 cm, die Platten kaum eine akustische Wirksamkeit besitzen. Tab. 3.6 zeigt eine Übersicht relevanter Parameter dieser Messreihe.

Temperatur	19.4 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	53 %
Messdatum	23.11.2016	Hallraumvolumen	244 m ³
Musterfläche	0.355 m · 1.15 m · 24 = 9.8 m ²	Abstand zur schallharten Oberfläche	0 cm zum Boden und zur Wand

Tabelle 3.6: Übersicht der Messparameter

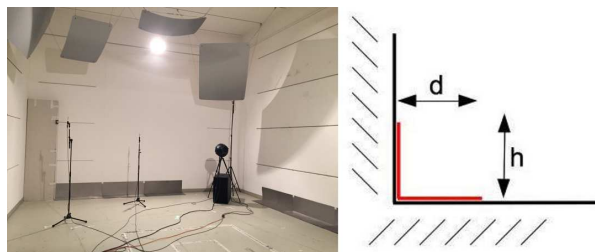


Abbildung 3.24: Foto und Skizze der Anordnung 'Ecke'

In Abb. 3.25 bzw. Tab. 3.7 ist das Messergebnis im Vergleich zur gemittelten Leermessung Leer1234 (s. Abb. 3.5 bzw. Tab. 3.3) dargestellt. Die Abweichung der Nachhallzeit T_{30} reduziert sich auf etwa eine halbe Sekunde, lediglich bei 100 Hz ist die Abweichung mit etwa einer Sekunde etwas größer. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde als Absorptionsfläche zur Berechnung der Nachhallzeit T_{30} stets die Fläche der freien Platten verwendet.

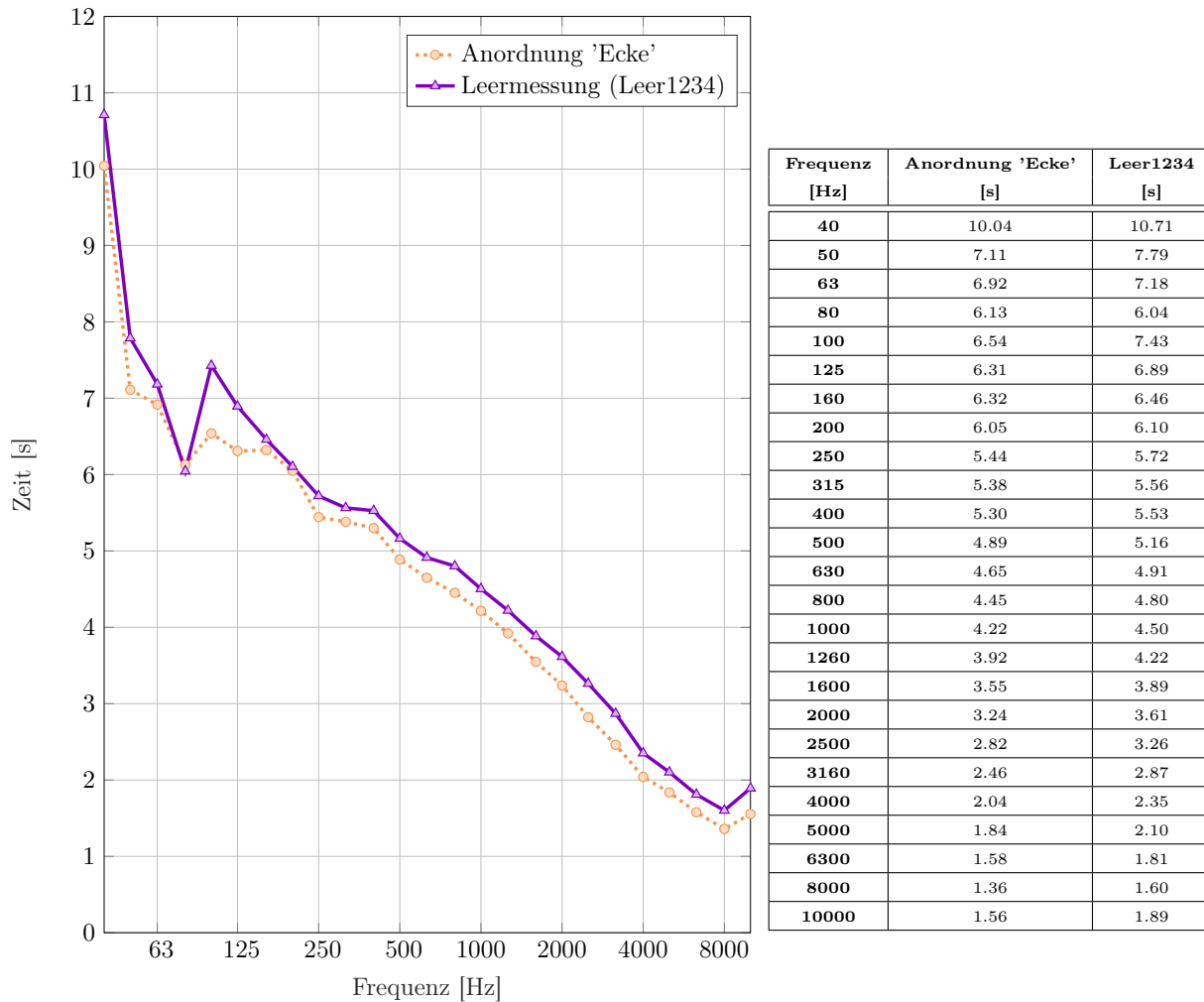


Abbildung 3.25: Nachhallzeit T_{30} der Platten angeordnet nach Abb. 3.24 und T_{30} der gemittelten Leermessung (s. Abb. 3.5 bzw. Tab. 3.3)

Tabelle 3.7: Nachhallzeit T_{30} der Platten angeordnet nach Abb. 3.24 und T_{30} der gemittelten Leermessung (s. Abb. 3.5 bzw. Tab. 3.3)

In Abb. 3.26 bzw. Tab. 3.8 ist der Absorptionsgrad α dargestellt. Für Frequenzen bis 1600 Hz bleibt $\alpha \leq 0.1$ – für höhere Frequenzen ist ein sichtlicher Anstieg bis zu $\alpha = 0.3$ zu beobachten.

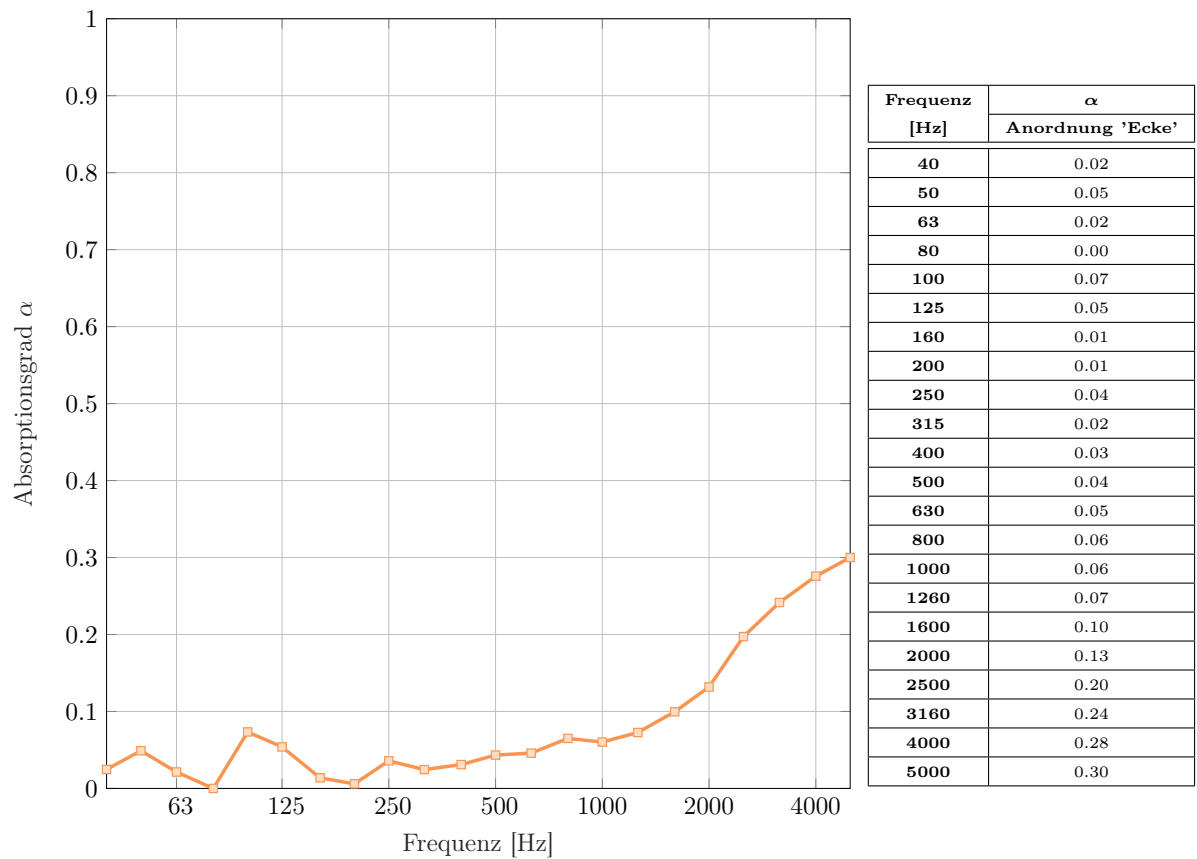


Abbildung 3.26: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Ecke'

Tabelle 3.8: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Ecke'

3.6 Diskussion der Messergebnisse

3.6.1 Vergleich beider Prüfobjekte

Zunächst interessiert, wie differenziert die zwei verschiedenen Prüfobjekte wirken. Hierzu werden die Anordnung 'Mitte' (s. Kapitel 3.4.1 bzw. Kapitel 3.5.1) und die Anordnung 'L-Form' (s. Kapitel 3.4.3 bzw. Kapitel 3.5.2) für jeweils beide Prüfobjekte gegenüber gestellt. Im Gegensatz zur Messreihe Anordnung 'Mitte' (s. Abb. 3.27) ist der Unterschied der Messreihe Anordnung 'L-Form' (s. Abb. 3.28) deutlich ausgeprägt. Schon ab 160 Hz gibt es Abweichungen der Platten SonoPerf A von ca. $\Delta\alpha \approx 0.2$, was für den restlichen Frequenzbereich auch größtenteils so bleibt. Die Platten SonoPerf A wirken also wesentlich besser als die Platten SoundMicro. Diese Tendenz zeigt sich auch bei der Messreihe Anordnung 'Mitte', wenn auch nicht so stark ausgeprägt. Hier beläuft sich das $\Delta\alpha \approx 0.05$.

Dieses Ergebnis konnte schon während der Messungen selbst beobachtet werden, jedoch entschied man sich aufgrund der Beschaffenheit und der Anzahl der Platten SonoPerf A, den Großteil der Messungen mit den Platten SoundMicro durchzuführen, wie auch schon in den früheren Kapiteln öfters erklärt.

Bei tiefen Frequenzen springt für beide Platten der Anordnung 'Mitte' der Absorptionsgrad bei $\alpha \approx 0.2$, bei der Anordnung 'L-Form' ist der Absorptionsgrad für den Abstand $d = 70$ cm (bzw. 71 cm bei SonoPerf A) in den Tiefen etwas höher mit $\alpha \approx 0.3$. Ansonsten bringt der größere Abstand für den restlichen Frequenzbereich eine eher schlechtere Wirkung mit sich. Dies gilt ebenfalls für beide Prüfobjekte.

Auffällig sind die Einbrüche bei 63 und 100 Hz, die bei beiden Anordnungen für jeweils beide Prüfobjekte auftreten. Nachdem dies kein Zufall sein kann, lässt sich darauf schließen, dass eine Eigenschaft des Hallraums selbst diese Einbrüche verursachte. Jedoch ist anzumerken, dass es immer schwierig ist, solche Peaks oder Einbrüche bei solch tiefen Frequenzen richtig zu deuten.

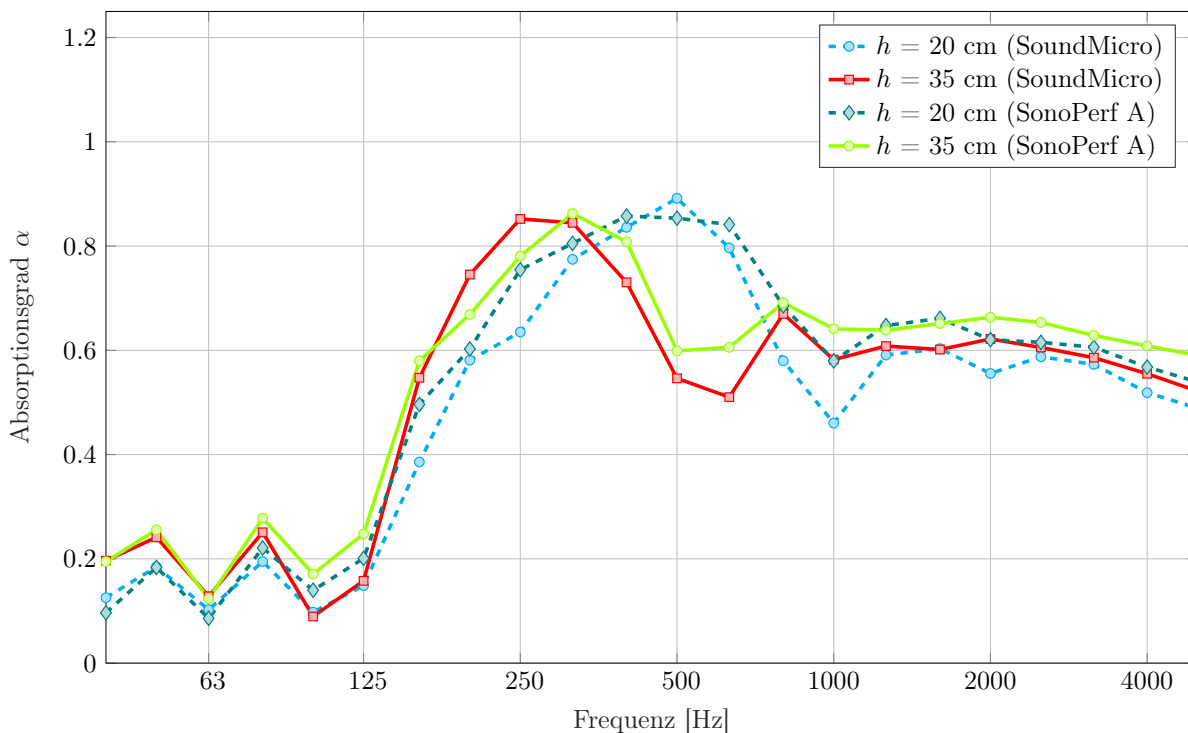


Abbildung 3.27: Absorptionsgrad α der Anordnung 'Mitte' (SoundMicro und SonoPerf A)

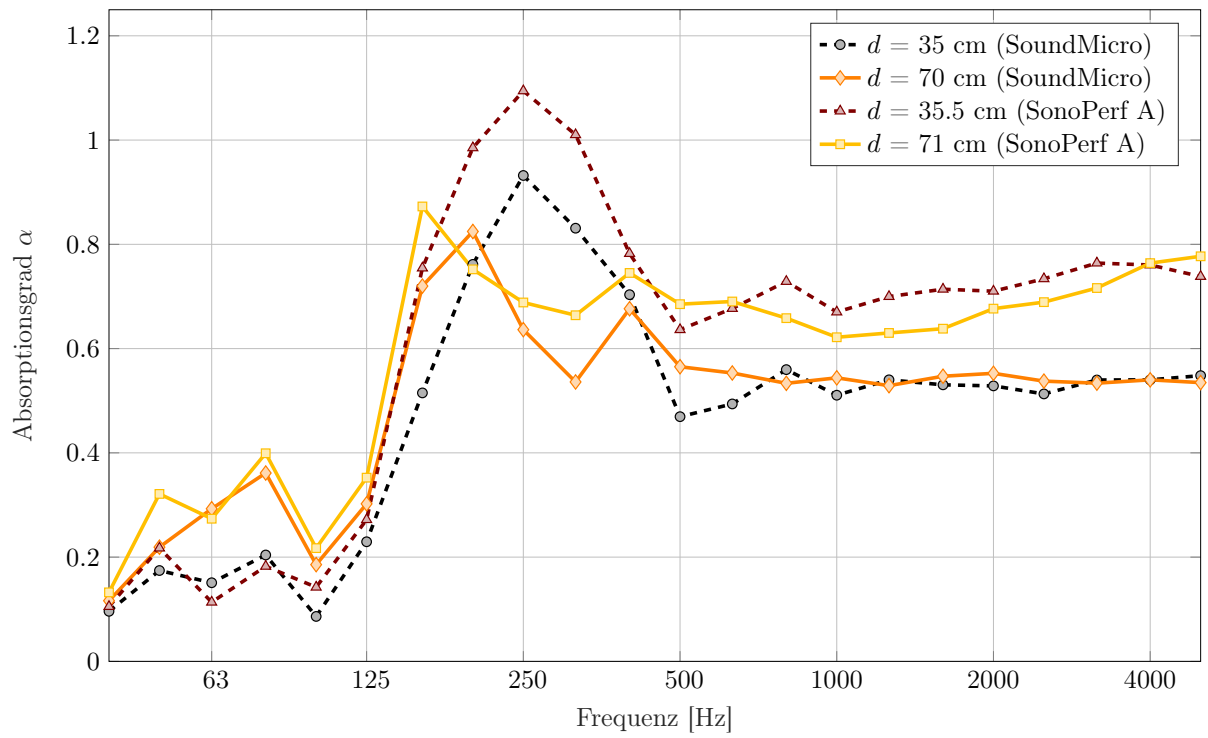


Abbildung 3.28: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro und SonoPerf A)

3.6.2 Vergleich Anordnung 'L-Form niedrig' und 'L-Form hoch'

In Abb. 3.29 werden die Messreihen Anordnung 'L-Form hoch' aus Kapitel 3.4.3.2 und Anordnung 'L-Form niedrig' aus Kapitel 3.4.3.1 miteinander verglichen. Das ist deshalb erwähnenswert, da eigentlich bei der Anordnung 'L-Form hoch' durch Einbringen der doppelten Absorberfläche ein gleicher Verlauf des Absorptionsgrades wie in Anordnung 'L-Form niedrig' erwartet wird. Letzterer zeigt aber im Bereich der Resonanz zwischen 250 und 315 Hz eine deutliche größere Erhöhung und wirkt im darauf folgenden Frequenzbereich um ca. $\alpha = 0.1$ besser. Auch hier kann damit argumentiert werden, dass die Wechselwirkung zwischen Absorber und Schallfeld vor allem in der Nähe der Raumkante die größte Wirksamkeit aufweist und daher der niedrige Absorber einen besseren Absorptionsgrad erreicht. Der obere Teil des hohen Absorbers hat nicht die gleich große Wirkung wie die unter Hälfte, weshalb die Gesamtaborption beim hohen Absorber im Vergleich zum niedrigeren geringer ist (vgl. Anordnung 'Baffles' in Kapitel 3.4.4).

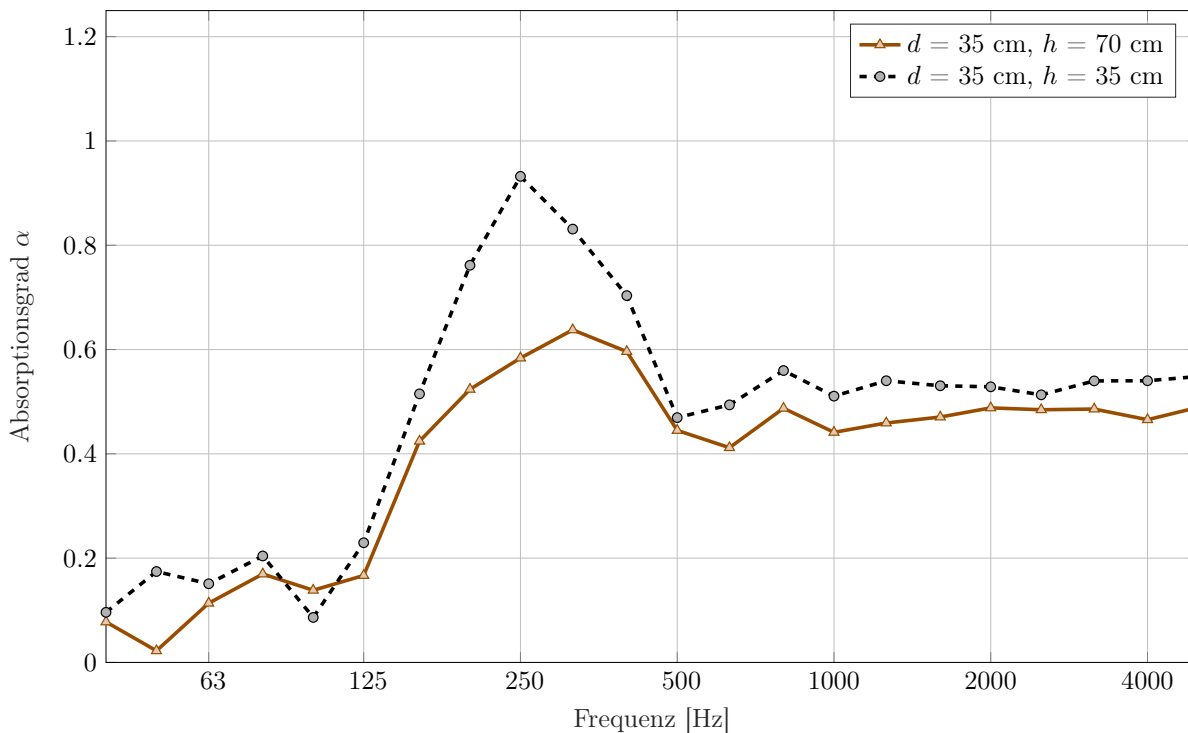


Abbildung 3.29: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form hoch und niedrig' für $d = 35$ cm (SoundMicro)

3.6.3 Vergleich Anordnung 'L-Form niedrig' und 'Mitte'

Hier werden die Anordnungen 'Mitte' (s. Kapitel 3.4.1 bzw. Kapitel 3.5.1) für $h = 35$ cm und 'L-Form niedrig' (s. Kapitel 3.4.3.1 und Kapitel 3.5.2) für $d = 35$ cm (bzw. $d = 35.5$ cm bei SonoPerf A) jeweils von SoundMicro und SonoPerf A miteinander verglichen. Die Platten als 'L' aufgestellt wirken fast so gut wie die Platten aufgelegt in der Mitte. Der Unterschied beläuft sich für Frequenzen ab ca. 800 Hz auf $\Delta\alpha \approx 0.1$ (s. Abb. 3.30).

Bei den Platten von ANDRITZ ist die Wirkung in den Kanten noch deutlicher. Wie bereits erwähnt ist die Absorberfläche der Anordnung 'Mitte' doppelt so groß wie die der Anordnung 'L-Form niedrig' (s. Datenblatt im Anhang 8.1.8). Im Bereich der Resonanz bei 250 Hz wirkt die Anordnung in den Kanten um $\alpha \approx 0.3$ besser. Diese Differenz nimmt für höhere Frequenzen zwar ab, die Tendenz bleibt jedoch (s. Abb. 3.31).

Sowohl für SoundMicro als auch für SonoPerf A liegt der Absorptionsgrad bei tiefen Frequenzen bei $\alpha \approx 0.2$.

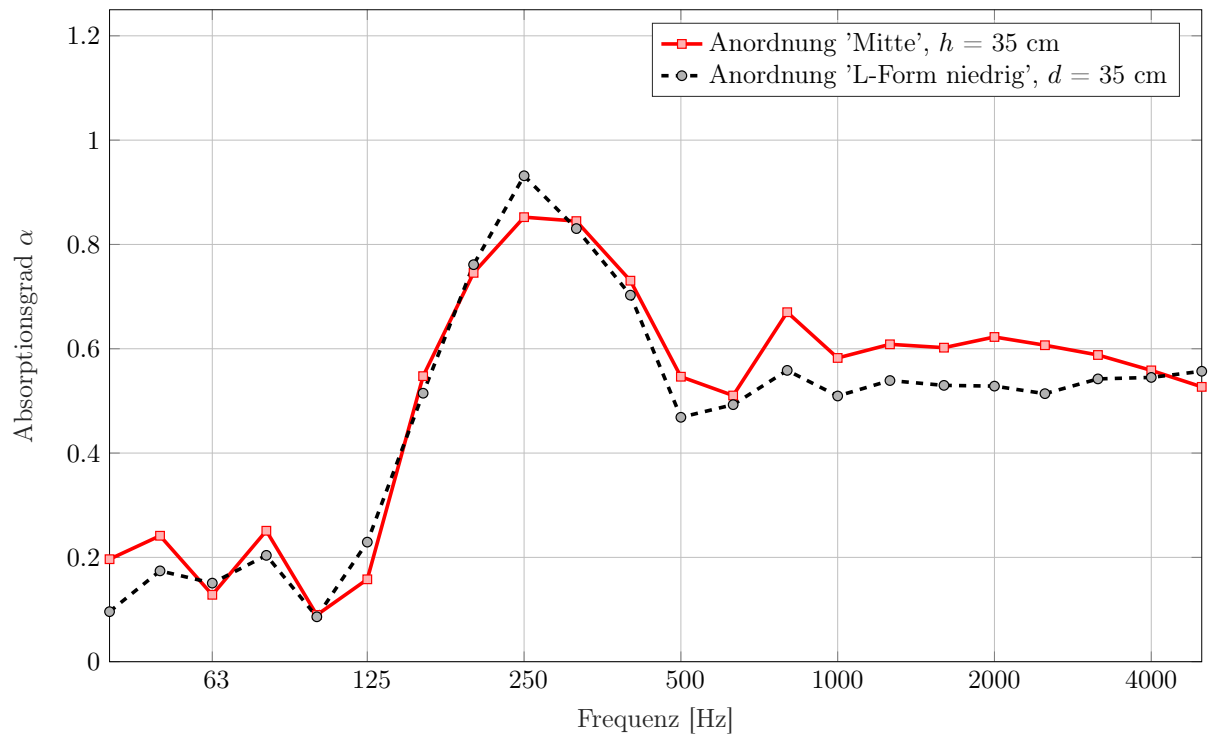


Abbildung 3.30: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' und 'Mitte' (SoundMicro)

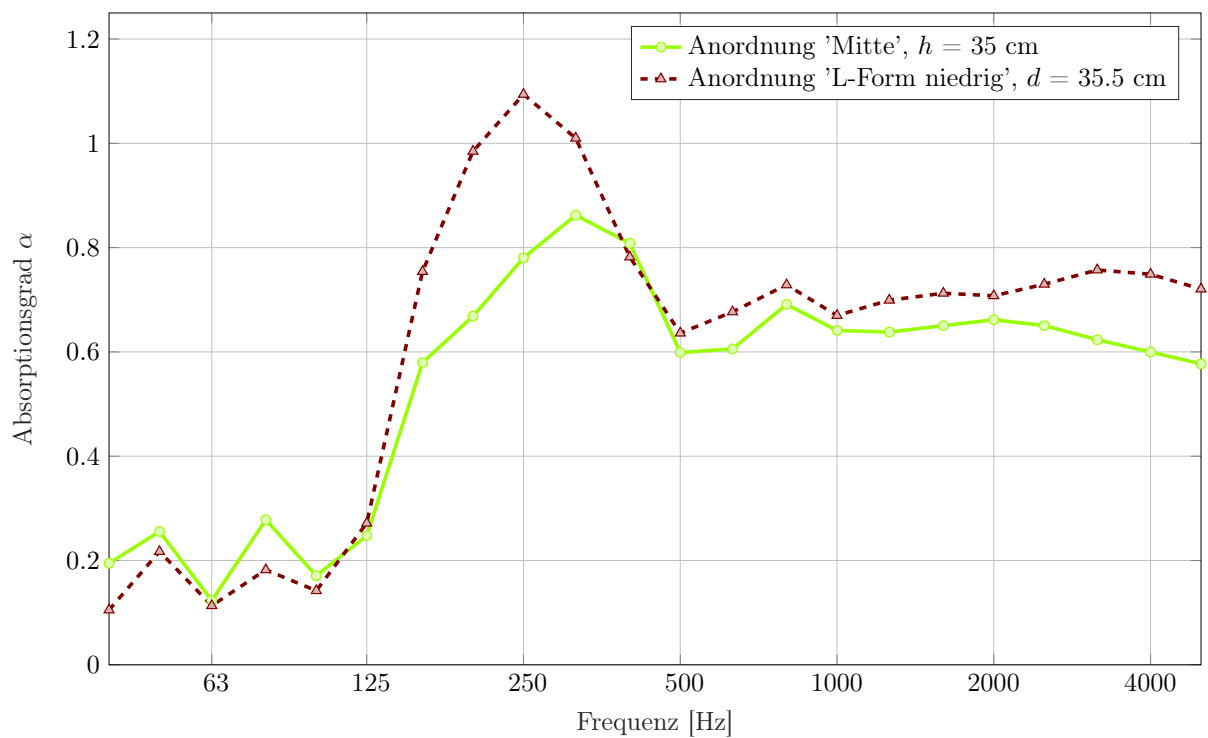


Abbildung 3.31: Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' und 'Mitte' (SonoPerf A)

3.6.4 Vergleich Anordnungen in den Kanten

In Abb. 3.32 sind jene Anordnungen zusammengetragen, die sich in den Kanten des Hallraums befanden, d.h. konkret die Anordnungen 'Kante' (s. Kapitel 3.4.2), 'L-Form niedrig' ($d = 35$ cm, s. Kapitel 3.4.3.1) und '45°-Winkel' (s. Kapitel 3.4.5). Im Folgenden sind nochmals die Absorberflächen S angeführt:

- Anordnung 'Kante', $d = 35$ cm: $S = 11.76$ m²
- Anordnung 'Kante', $d = 70$ cm: $S = 8.82$ m²
- Anordnung 'L-Form niedrig', $d = 35$ cm: $S = 5.88$ m²
- Anordnung '45°-Winkel': $S = 11.76$ m²

Die Anordnung 'Kante' in einfacher Ausführung hat die höchste Resonanz bei 250 Hz mit $\alpha = 1.21$ und erreicht damit den höchsten Absorptionsgrad aller Messreihen, die im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführt wurden. Trotz gleicher Absorberfläche decken sich die Werte der Anordnung '45°-Winkel' mit der eben beschriebenen erst ab 1000 Hz, zuvor ist der Absorptionsgrad v.a. im Bereich der Resonanzhöhung deutlich niedriger mit $\alpha = 0.81$. Die beiden anderen Anordnungen gliedern sich dazwischen ein. Obwohl bei der Anordnung 'L-Form niedrig' eine Absorberfläche von $S = 5.88$ m² = 11.76 m²/2 verwendet wurde, liegt die Resonanzspitze bei $\alpha = 0.93$ und nicht beim zu erwartenden Wert $\alpha = 1.21/2 = 0.6$ nach Gl. (3.1).

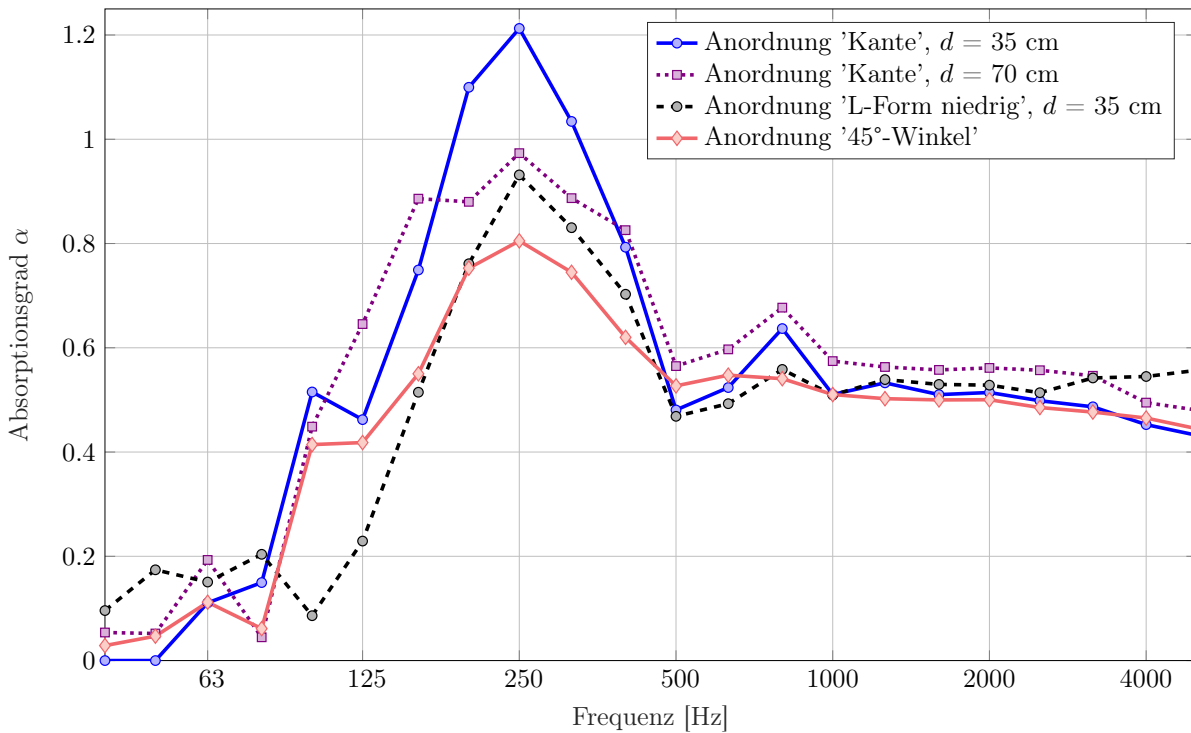


Abbildung 3.32: Absorptionsgrad α der Anordnungen 'Kante', 'L-Form niedrig' und '45°-Winkel' (Sound-Micro)

4

Hypothesen zur Deutung der Resonanzerhöhungen

Es sollen nun die in Kapitel 3.4 - Kapitel 3.6 beschriebenen Spitzen des Absorptionsgrades α interpretiert werden, sodass diese sowohl physikalisch als auch mathematisch nachvollziehbar sind. Hierzu werden verschiedene Hypothesen aufgestellt: Die Platte schwingt mit ihrer Eigenfrequenz (s. Kapitel 4.2), die winzigen Löcher in den Platten bilden mit dem dahinter befindlichen Luftvolumen einen Helmholtzresonator (s. Kapitel 4.3 bzw. Kapitel 4.4) oder der Abstand zur schallharten Oberfläche entspricht einem Viertel der Wellenlänge λ , bei dem die Schallschnelle v maximal wird (s. Kapitel 4.5).

4.1 Allgemeines

Zu jeder der eben angeführten Hypothesen kann eine Resonanzfrequenz f_{Res} je nach Anordnung berechnet werden. In Tab. 4.1 sind die dazu nötigen Parameter beider Prüfobjekte aufgelistet, wobei die Indizes SM und SP für die Platten SoundMicro und SonoPerf A stehen.

	SoundMicro	SonoPerf A
Dichte ρ [kg/m ³]	$\rho_{SM} = 2710$ kg/m ³ (Aluminium)	$\rho_{SP} = 7850$ kg/m ³ (Stahl, unlegiert)
Flächenbezogene Masse m'' [kg/m ²], berechnet über ρ	$m''_{SM} = 2.575$ kg/m ²	$m''_{SP} = 5.593$ kg/m ²
Radius $r_{0,gemessen}$ [mm]	$r_{0,gemessen,SM} = 0.55$ mm $r_{0,gemessen,SM,direkt} = 0.125$ mm	$r_{0,gemessen,SP} = 0.1$ mm -
Radius $r_{0,berechnet}$ [mm]	$r_{0,berechnet,SM} = 0.5307$ mm	$r_{0,berechnet,SP} = 0.3909$ mm

Tabelle 4.1: Übersicht der zu den Berechnungen nötigen Platteneigenschaften

Die flächenbezogene Plattenmasse m'' wurde aus der Dichte ρ berechnet. Um den Radius r_0 der Löcher zu bestimmen, der unabdingbar zur Beschreibung der MPA-Platteneigenschaften ist, orientierte man sich an der Skizze aus [Fuchs, 2010, S. 104], wobei δ die akustische Grenzschichtdicke beschreibt (s. Abb. 4.1).

Für die Platten SoundMicro wurden aufgrund ihrer konischen, dreiecksförmigen Form zwei verschiedene Radien mittels einer Schieblehre gemessen: $r_{0,gemessen,SM}$ wurde nach Abb. 4.1(b) gemessen, d.h. $h = 2 \cdot r_{0,gemessen,SM}$ in Tab. 3.4, und $r_{0,gemessen,SM,direkt}$ ist der gemessene Radius des spitzzulaufenden Endes des "Kegels" – also des "Loches". Bei den Platten SonoPerf A war es nicht ganz so kompliziert, da hier die Platten mit Schlitz perforiert waren. Wie in Abb. 4.1(b) analog zu SoundMicro ist hier $h = 2 \cdot r_{0,gemessen,SP}$ (s. Tab. 3.5).

$r_{0,berechnet}$ wurde aus der Fläche des Dreiecks (SoundMicro) bzw. Rechtecks (SonoPerf A), deren Längenangaben gemessen wurden, über die Kreisfläche rückgerechnet.

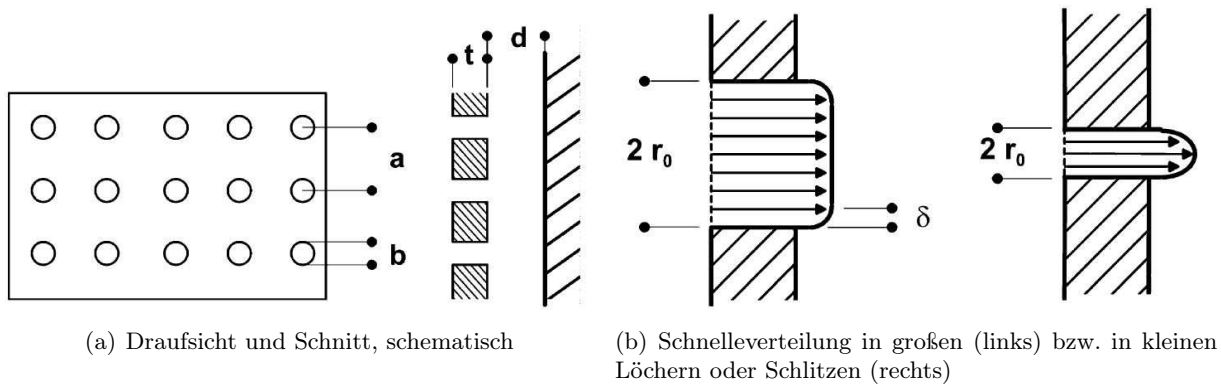


Abbildung 4.1: Zum Prinzip Mikroperforierter Absorber MPA [Fuchs, 2010, S. 104]

Zur Berechnung der Resonanzfrequenzen in Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4 wurde für die Platten SoundMicro immer $r_{0,berechnet,SM}$, für die Platten SonoPerf A immer $r_{0,gemessen,SP}$ herangezogen. Die Berechnungen wurden auch mit den anderen Radien ausprobiert, wobei die Abweichungen maximal $\Delta f_{Res} \approx 100$ Hz betragen – dies spielte jedoch keine größere Rolle, dazu mehr in Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4.

4.2 Plattenresonator

Jede Platte weist eine Eigenresonanz auf, d.h. bei Anregung dieser Frequenz, welche sich nach Gl. (4.1) berechnen lässt (siehe [Fuchs, 2010, S. 44]), schwingt die Platte und geht in Resonanz.

$$f_{Res,Platte} \cong \frac{1900}{\sqrt{m'' \cdot d \text{ [mm]}}} \quad (4.1)$$

In der zweiten Spalte von Tab. 4.2 und 4.3 sind die nach Gl. (4.1) diskret berechneten Resonanzfrequenzen $f_{Res,berechnet}$ zusammengetragen und werden in der vierten Spalte in Relation zu den gemessenen Resonanzfrequenzen $f_{Res,gemessen}$ gesetzt. Die Angabe erfolgt in [%]. Die Werte von $f_{Res,gemessen}$ sind Terzbandmittenfrequenzen und beziehen sich auf jene, bei denen im Absorptionsgrad α eine deutliche Resonanzerhöhung sichtbar ist. Dies gilt für das komplette Kapitel 4.

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]	$f_{Res,gemessen}$ [Hz]	$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]
Mitte, $h = 20$	84	500	17
Mitte, $h = 35$	63	250	25
L-Form niedrig, $d = 17.5$	90	500	18
L-Form niedrig, $d = 35$	63	250	25
L-Form niedrig, $d = 52.5$	52	250	21
L-Form niedrig, $d = 70$	45	200	22
Kante, $d = 35$	63	250	25
L-Form hoch, $d = 35$	63	315	20

Tabelle 4.2: berechnete und gemessene Plattenresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SoundMicro)

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]	$f_{Res,gemessen}$ [Hz]	$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]
Mitte, $h = 20$	57	400	14
Mitte, $h = 35$	43	315	14
L-Form niedrig, $d = 35.5$	43	250	17
L-Form niedrig, $d = 71$	30	160	19

Tabelle 4.3: berechnete und gemessene Plattenresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander h, d in cm (SonoPerf A)

Die Prozentwerte liegen zwischen 14 und 25 %, d.h. insgesamt weichen die berechneten Werte bis zu 86 % von den gemessenen ab. Das liegt zum einen daran, dass Gl. (4.1) ein abgeschlossenes Luftvolumen hinter der Platte voraussetzt. Das ist nur für die Anordnung 'Mitte' und 'Kante' gewährleistet; jedoch scheint dies keinen großen Einfluss zu haben, denn auch bei diesen Messreihen ist die Übereinstimmung ernüchternd. Zum anderen wurden bei diesen Berechnungen die Platten als gewöhnliche Aluminium- bzw. Stahlplatten mit 5 % weniger Volumen (das Lochflächenverhältnis σ beträgt bei beiden Prüfobjekten 5 %) behandelt, was aber nicht den realen Platten entspricht. Diese ändern ihr Schwingungsverhalten aufgrund ihrer komplett anderen Beschaffenheit und Struktur. Die Hypothese der Plattenresonanz bestätigt sich somit nicht.

4.3 Helmholtzresonator

Das Prinzip eines Helmholtzresonators ist in Abb. 4.2 veranschaulicht: Bei Anregung des Resonators wird der Luftpfropfen im Hals des Helmholtzresonators – in der Skizze also die Luftmasse innerhalb der Plattenlöcher – zum Schwingen auf dem Luftpolster V_0 (grün eingefärbt) gebracht. Dies erfolgt nach dem Masse-Feder-Prinzip, wobei die Masse den Luftpfropfen im Hals und die Feder das abgeschlossene Luftvolumen V_0 darstellt.

Die Frequenz, mit der der Resonator schwingt, kann nach den Gleichungen (4.2) - (4.4) [Fuchs, 2010, S. 35, S. 64, S. 81] berechnet werden, wobei c die Schallgeschwindigkeit und S_H die gesamte Lochfläche der Platte ist. t_{eff} ist die Plattendicke, bei der die Mündungskorrektur Δt bereits berücksichtigt wurde. Diese ist nötig, weil noch zusätzliche Luftteilchen am inneren und äußeren Rand der Platte mitschwingen.

$$\Delta t = 0.85 \cdot r_0 \quad (4.2)$$

$$t_{eff} = t + 2 \cdot \Delta t \quad (4.3)$$

$$f_{Res,Helmholtz} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_H}{V_0 \cdot t_{eff}}} = 54 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{d [\text{mm}] \cdot t_{eff}}} \quad (4.4)$$

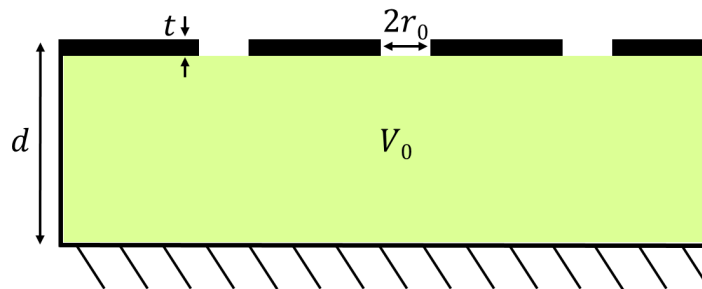


Abbildung 4.2: Skizze zum Prinzip eines Helmholtzresonators

Die folgenden Tabellen 4.4 und 4.5 beinhalten die nach den oben angeführten Gleichungen berechneten und die gemessenen Resonanzfrequenzen. Sowohl bei SoundMicro als auch bei SonoPerf A sind die Abweichungen sehr groß: Teilweise sind die berechneten Werte bei den Platten SoundMicro um das fast doppelte höher als die gemessenen, bei den Platten SonoPerf A sogar um das fast dreifache.

Auch hier muss erwähnt werden, dass diese Berechnungen eigentlich nur auf die Anordnung 'Mitte' und 'Kante' anwendbar sind, da hier ein abgeschlossenes Luftvolumen V_0 gewährleistet ist, doch auch bei diesen Aufbauten sind deutliche Abweichungen zu erkennen.

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]	$f_{Res,gemessen}$ [Hz]	$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]
Mitte, $h = 20$	619	500	124
Mitte, $h = 35$	468	250	187
L-Form niedrig, $d = 17.5$	662	500	132
L-Form niedrig, $d = 35$	468	250	187
L-Form niedrig, $d = 52.5$	382	250	153
L-Form niedrig, $d = 70$	331	200	165
Kante, $d = 35$	468	250	187
L-Form hoch, $d = 35$	468	315	149

Tabelle 4.4: berechnete und gemessene Helmholtzresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SoundMicro)

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]	$f_{Res,gemessen}$ [Hz]	$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]
Mitte, $h = 20$	890	400	223
Mitte, $h = 35$	673	315	214
L-Form niedrig, $d = 35.5$	668	250	267
L-Form niedrig, $d = 71$	472	160	295

Tabelle 4.5: berechnete und gemessene Helmholtzresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SonoPerf A)

4.4 MPA: modifizierter Helmholtzresonator

Speziell für mikroperforierte Platten beschreibt Gl. (4.7) ebenfalls das Helmholtzprinzip (s. Gl. (4.4) nur mit einer gesonderten Mündungskorrektur K_m (s. Gl. (4.6)), die vom Reibungsparameter x (s. Gl. (4.5)) und vom Verhältnis $\frac{r_0}{t}$ abhängt (s. Kapitel 2.3). [Fuchs, 2010, S. 106 f.] Der Reibungsparameter x wird über die gemessenen Resonanzfrequenzen abgeschätzt, d.h. für den Term \sqrt{f} werden die Werte aus $f_{Res,gemessen}$ eingesetzt. Die Resultate sind den Tabellen 4.6 und 4.7 zu entnehmen. Auch hier entsprechen sich berechnete und gemessene Werte überhaupt nicht. Wieder muss angemerkt werden, dass die Formeln aus Gl. (4.5) - (4.7) eigentlich nur für die Anordnungen 'Mitte' und 'Kante' angewandt werden dürfen, doch auch diese Aufbauten liefern keine zufriedenstellenden Entsprechungen außer Aufbau 'Mitte' ($h = 20$ cm, SoundMicro) mit einer Abweichung von 17 %.

Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis ist, dass man ein Masse-Feder-Prinzip schlichtweg nicht auf diese MPA-Platten anwenden kann. Die Abmessungen der Löcher oder Schlitzes sind so winzig, dass der Großteil des Luftpfropfens an der akustischen Grenzschicht "kleben" bleibt und somit eine erforderliche, frei schwingende Luftmasse in den Löchern oder Schlitzes nicht mehr vorhanden ist.

$$x = \frac{r_0}{\delta} = 0.42 \cdot r_0 \cdot \sqrt{f} \quad (4.5)$$

$$K_m = 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + 0.5 \cdot x^2}} + 1.7 \cdot \frac{r_0}{t} \quad (4.6)$$

$$f_{Res,MPA} = 54 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{d \cdot t \cdot K_m}} \quad (4.7)$$

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]	$f_{Res,gemessen}$ [Hz]	$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]
Mitte, $h = 20$	587	500	117
Mitte, $h = 35$	439	250	176
L-Form niedrig, $d = 17.5$	627	500	125
L-Form niedrig, $d = 35$	439	250	176
L-Form niedrig, $d = 52.5$	359	250	143
L-Form niedrig, $d = 70$	310	200	155
Kante, $d = 35$	439	250	176
L-Form hoch, $d = 35$	439	315	139

Tabelle 4.6: berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der MPA-Formel und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SoundMicro)

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]	$f_{Res,gemessen}$ [Hz]	$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]
Mitte, $h = 20$	791	400	198
Mitte, $h = 35$	598	315	190
L-Form niedrig, $d = 35.5$	593	250	237
L-Form niedrig, $d = 71$	419	160	262

Tabelle 4.7: berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der MPA-Formel und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SonoPerf A)

4.5 Schnellemaximum bei $\frac{\lambda}{4}$

Trifft eine Schallwelle auf eine schallharte Wand, ist die Normalkomponente ihrer Schallschnelle \vec{v} an diesem Punkt Null, eine Viertel-Wellenlänge (bzw. alle ungeradzahligen Vielfachen der Viertel-Wellenlänge) vor dem Auftreffen hat sie jedoch ihr Maximum. Dieses Prinzip machen sich poröse Absorber zu Nutze – wenn der Absorber $\frac{\lambda}{4}$ von der Wand entfernt ist, ist dort die Absorption am effizientesten, da aufgrund des Schnellemaximums die Teilchen durch Reibung am meisten Energie verlieren. Abb. 4.3 zeigt die Einhüllende der Stehwelle jeweils vom Schalldruck p (rot), der an der Wand immer seinen Maximalwert hat und von der Schallschnelle \vec{v} einmal für die gleiche Frequenz wie die des Schalldruckes (schwarz durchgezogen) und einmal für die dreifache Frequenz (schwarz punktiert), dessen Dreiviertel-Wellenlänge sich mit dem Ort der Viertel-Wellenlänge der einfachen Frequenz deckt.

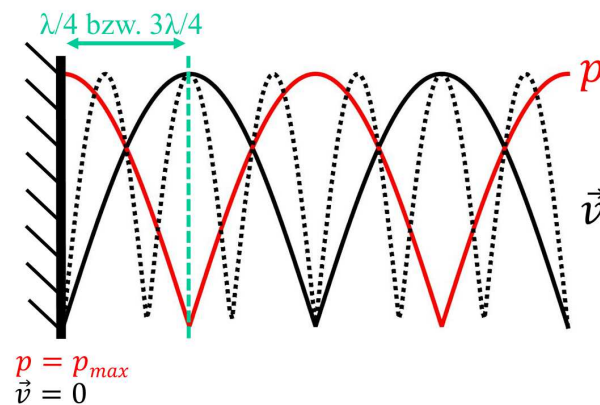


Abbildung 4.3: Stehwelleneinhüllende jeweils vom Schalldruck p und von der Schallschnelle v

Gl. (4.8) und (4.9) zeigen die Zusammenhänge zwischen der Frequenz $f_{Res, \frac{\lambda}{4}}$ (bzw. $f_{Res, \frac{3\lambda}{4}}$), der Schallgeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ bei Berücksichtigung, dass der Abstand zur Wand $d = \frac{\lambda}{4}$ (bzw. $\frac{3\lambda}{4}$) entspricht, um die jeweilige Resonanzfrequenz zu ermitteln.

$$f_{Res, \frac{\lambda}{4}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4 \cdot d \text{ [m]}} \quad (4.8)$$

$$f_{Res, \frac{3\lambda}{4}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot c}{4 \cdot d \text{ [m]}} \quad (4.9)$$

Die Resultate sind Tab. 4.8 und Tab. 4.9 zuzunehmen. Die Übereinstimmung von nach Gl. (4.8) und (4.9) berechneten Resonanzfrequenzen und den gemessenen ist erstaunlich gut und liegt bei Aufbauten mit $h; d < 35.5$ cm zwischen 78 und 107 %. Je größer die Abstände zum Boden oder zur Wand werden, desto weniger stimmen die Ergebnisse überein. Dies ist plausibel, da sich die Schallwellen besser um die MPA-Platte beugen können, je größer ihre Wellenlänge ist.

Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]		$f_{Res,gemessen}$ [Hz]		$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]	
	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$
Mitte, $h = 20$	429	1286	500	1600	86	80
Mitte, $h = 35$	245	735	250	800	98	92
L-Form niedrig, $d = 17.5$	490	1470	500	1600	98	92
L-Form niedrig, $d = 35$	245	735	250	800	98	92
L-Form niedrig, $d = 52.5$	163	490	250	500	65	98
L-Form niedrig, $d = 70$	123	368	200	400	61	92
Kante, $d = 35$	245	735	250	800	98	92
L-Form hoch, $d = 35$	245	735	315	800	78	92

Tabelle 4.8: berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der $\frac{\lambda}{4}$ -Hypothese (bzw. $\frac{3\lambda}{4}$ -Hypothese) und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SoundMicro)

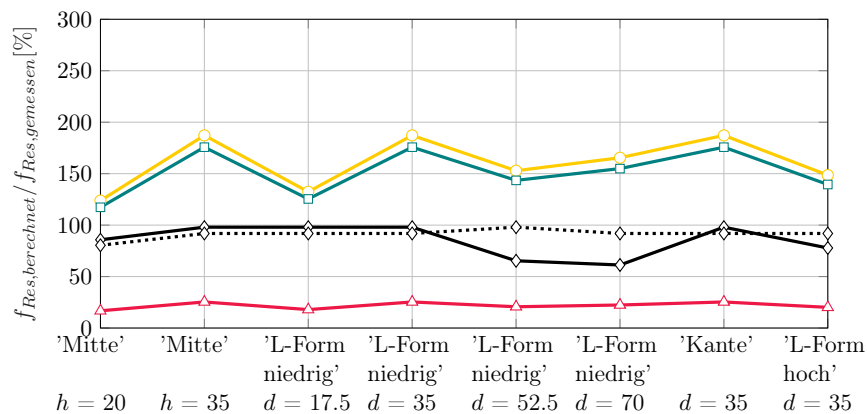
Aufbau	$f_{Res,berechnet}$ [Hz]		$f_{Res,gemessen}$ [Hz]		$\frac{f_{Res,berechnet}}{f_{Res,gemessen}}$ [%]	
	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{3\lambda}{4}$
Mitte, $h = 20$	429	1286	400	1600	107	80
Mitte, $h = 35$	245	735	315	800	78	92
L-Form niedrig, $d = 35.5$	242	725	250	800	97	91
L-Form niedrig, $d = 71$	121	362	160	400	75	91

Tabelle 4.9: berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der $\frac{\lambda}{4}$ -Hypothese (bzw. $\frac{3\lambda}{4}$ -Hypothese) und deren Verhältnis zueinander; h, d in cm (SonoPerf A)

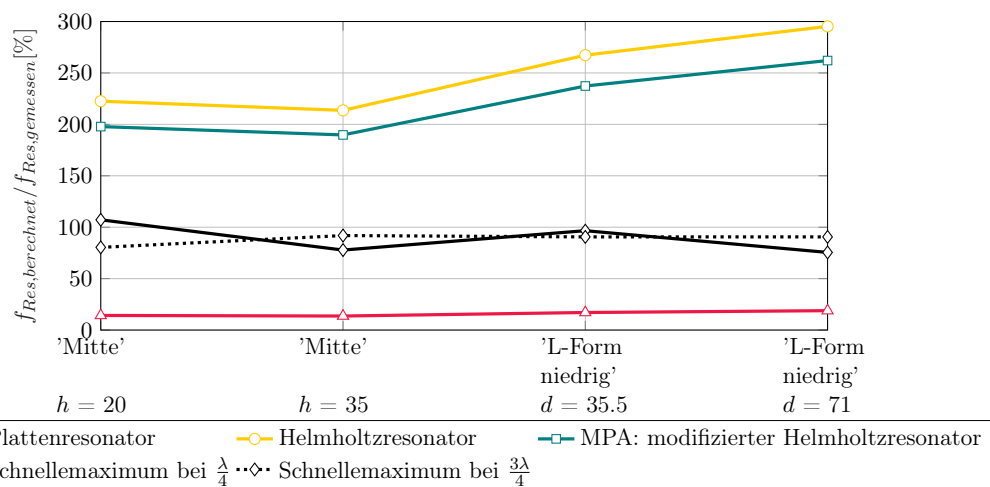
4.6 Fazit

In Abb. 4.4 sind die Verhältnisse $f_{Res,berechnet}/f_{Res,gemessen}$ der oben angeführten Tabellen für beide Prüfobjekte noch mal grafisch dargestellt. Da die MPA-Formel (Gl. (4.7)) auf dem Helmholtzprinzip beruht, verlaufen die Kurven des Helmholtzresonators und die des modifizierten Helmholtzresonators parallel – letztere hat nur einen kleinen Offset in Richtung 100 %. Beide Hypothesen liefern aber keine nachvollziehbaren Ergebnisse. Dies war schon in den Plots der Absorptionsgrade in Kapitel 3 ersichtlich, in denen die Resonanz bei höheren Frequenzen nie abklang, sondern einen höheren, teilweise recht konstanten Verlauf des Absorptionsgrades aufwies. Bei den Platten SonoPerf A ist dieser etwas größer, dafür ist aber auch die Abweichung der Helmholtzhypothesen insgesamt größer. Auch die Plattenresonanzhypothese ist bei beiden Prüfobjekten weit von den 100 % entfernt.

Eindeutig zu erkennen ist, dass die Hypothese begründet durch das Schnellemaximum bei $\frac{\lambda}{4}$ die plausibelsten Ergebnisse liefert: Bei beiden Prüfobjekten liegt die Kurve immer im Bereich bei den 100 % und liefert auch bei weiteren Abständen zwar eine schlechtere, aber immer noch wesentlich bessere Übereinstimmung als bei den anderen Hypothesen. Auch die Resonanzerhöhungen nach der $\frac{3\lambda}{4}$ -Hypothese sprechen dafür. Schlussendlich kann man also daraus folgern, dass die MPA-Absorber, die im Rahmen dieser Bachelorarbeit vermessen wurden, wie ein poröser Absorber im $\frac{\lambda}{4}$ -Abstand zur Wand wirken.



(a) SoundMicro



(b) SonoPerf A

Abbildung 4.4: Verhältnis von berechneten zu gemessenen Resonanzfrequenzen; h, d in cm

5

Testräume

Dieses Kapitel beschäftigt sich zunächst mit den raumakustischen Anforderungen und damit mit dem Inhalt der ÖNORM B 8115-3. Zur Messung der Nachhallzeit der Hörsäle i14 und i15 diente die ÖNORM EN ISO 3382-2 als Grundlage bzgl. passendem Messverfahren, Messequipment und Messaufbau. Daraufhin wird der Ausgangszustand der beiden Hörsäle näher erläutert und die Nachhallzeitmessung dieser beschrieben.

5.1 ÖNORM 8115-3

In der [ÖNORM B 8115-3, 2015] sind raumakustische Anforderungen für Veranstaltungsräume, Unterrichtsräume, Betriebsräume, Büroräume sowie Räume, bei denen die Lärminderung im Fokus steht, niedergeschrieben. Sie soll dazu dienen, dass in den angeführten Räumen eine gute Hörsamkeit und dadurch eine günstige Sprachverständlichkeit erreicht werden kann.

Die Akustik eines Raumes wird durch seine Lage im jeweiligen Gebäude sowie der Schalldämmung der Bauteile bestimmt. Die Schallabsorption der Flächen und der Einrichtung sorgen für die jeweilige Verteilung des Schalls im Raum. Die Anordnung der absorbierenden und reflektierenden Flächen beeinflussen die Hörsamkeit und Lärminderung. Durch gleichmäßige Schallverteilung kann gute Hörsamkeit erzielt werden.

"Gute Hörsamkeit wird durch die akustische Ausstattung entsprechend der für die jeweilige Nutzung optimalen Nachhallzeit und durch Sicherstellung eines möglichst geringen Grundgeräuschpegels im Raum erzielt. Neben der Nachhallzeit sind auch die Raumgeometrie und die Verteilung der schallabsorbierenden und der schallreflektierenden Flächen und die Diffusität für die Hörsamkeit von großer Bedeutung." [ÖNORM B 8115-3, 2015, S. 4]

In kleinen Räumen kommt es oft zu vereinzelt, ungünstig wirksamen Raumresonanzen vor allem bei tiefen Frequenzen. Diese können durch auf diese Frequenzen abgestimmte Absorber gemildert werden. Ein weiteres bekanntes Phänomen sind Flatterechos. Dieser Effekt wird umso stärker, je einseitiger die Absorptionsflächen im Raum verteilt werden und tritt vor allem in kleinen Räumen mit reflektierenden, parallelen Oberflächen auf. All diese Effekte führen zu einer Nachhallzeit, die dementsprechend über dem Toleranzbereich liegt.

Die ideale Nachhallzeit T wird für voll besetzte Räume und verschiedene Nutzungsarten definiert und in einem entsprechenden Toleranzband angegeben (s. Abb. 5.2). Die optimale Nachhallzeit T für Kommunikation, Sprache, Musikaufführungen und Musikproberäume berechnet sich aus dem Volumen V wie folgt:

$$T = 0.32 \cdot \lg(V) - 0.17 \text{ für Kommunikation} \quad (5.1)$$

$$T = 0.37 \cdot \lg(V) - 0.14 \text{ für Sprache} \quad (5.2)$$

$$T = 0.45 \cdot \lg(V) - 0.07 \text{ für Musikaufführung} \quad (5.3)$$

$$T = 0.47 \cdot \lg(V) - 0.37 \text{ für Musikproberäume} \quad (5.4)$$

Für Klassenräume und Medienräume in Schulen soll sich die Nachhallzeit T laut Norm im Toleranzbereich der Nutzungsart "Kommunikation", für Hörsäle und Vortragsräume im Toleranzband der Nutzungsart "Sprache" bewegen (s. Abb. 5.1).

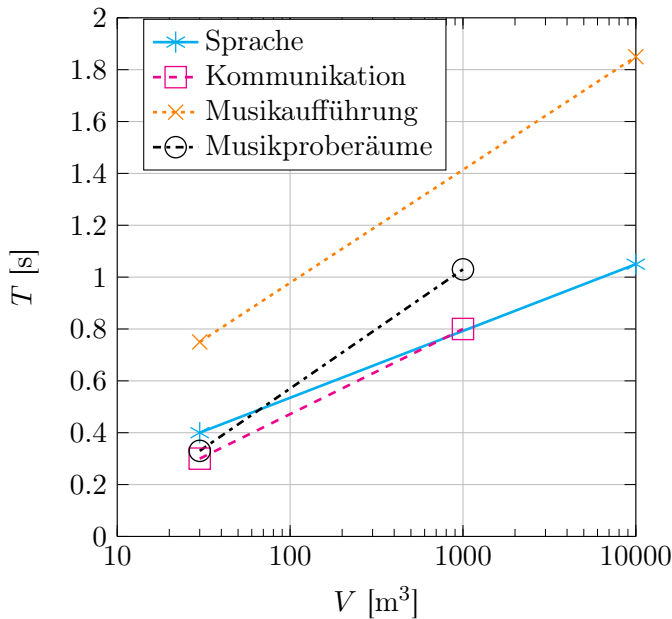


Abbildung 5.1: Optimale Nachhallzeit T für unterschiedliche Nutzungen

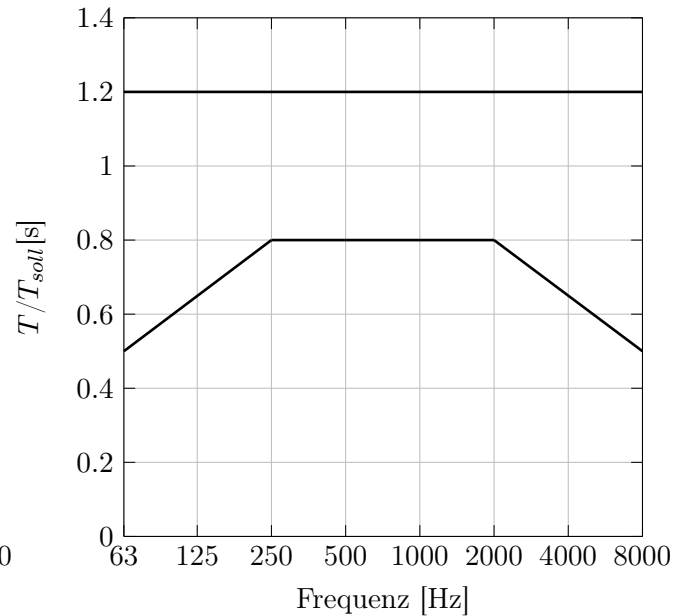


Abbildung 5.2: Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit T auf T_{soll} normiert in Abhängigkeit von der Frequenz für Sprache, Kommunikation und Musikproberäume

Für Räume, die für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden, soll ein Kompromiss innerhalb der möglichen Anforderungen gefunden werden. Für hörbeeinträchtigte Personen steigt die Sprachverständlichkeit mit abnehmender Nachhallzeit, weshalb die Nachhallzeit um weitere 20 % unter dem in Abb. 5.2 angeführten Toleranzband liegen sollte. Diese Bedingung gilt auch für die Sprachverständlichkeit bei Kommunikation in einer Fremdsprache.

Die Lärminderung trägt nicht nur positiv zur Sprachverständlichkeit bei, sondern ist auch ein wichtiger Bestandteil bezüglich der Gesundheit. Dafür muss ein gewisser Mindestwert des auf die Raumnutzung bezogenen, mittleren Schallabsorptionsgrades α_m angestrebt werden. Dieser ist von der Raumeinrichtung abhängig. Wird die Einrichtung nicht berücksichtigt, so bezieht sich der Mindestwert des Schallabsorptionsgrades α_m auf die Raumbegrenzungsflächen (s. Tab. 5.1). Die Anforderungen der Norm an die akustische Ausstattung sollten nicht nur erfüllt, sondern auch durch eine Berechnung oder durch eine Nachhallzeitmessung nach [ÖNORM EN ISO 3382-2, 2009] nachgewiesen werden.

Oktavband-Mittenfrequenzen [Hz]		250	500	1000	2000	4000
eingerrichteter Raum	α_m	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
geringe Einrichtung	α_m	0.20	0.25	0.25	0.25	0.20
Raumbegrenzungsflächen	$\alpha_{m,B}$	0.20	0.25	0.25	0.25	0.20

Tabelle 5.1: Mindestwerte für den mittleren Schallabsorptionsgrad α_m [ÖNORM B 8115-3, 2015, S. 7]

Da bei diesem Sanierungsprojekt nicht nur das Erreichen der Soll-Nachhallzeit angestrebt wird, sondern auch durch die Verwendung verschiedener Absorberkonzepte der Einfluss der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen untersucht werden soll, werden bei allen Messungen zwei Parameter für die Evaluierung und den Vergleich herangezogen:

zum einen die mittlere Nachhallzeit $T_m = \frac{T_{500} + T_{1000}}{2}$ bzw. bei Terzbandnachhallzeiten $T_m = \frac{T_{400} + T_{500} + T_{630} + T_{800} + T_{1000} + T_{1250}}{6}$ und zum anderen für die Charakterisierung der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen das Bassverhältnis $BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}}$ bzw. bei Terzbandnachhallzeiten $BR = \frac{T_{100} + T_{125} + T_{160} + T_{200} + T_{250} + T_{315}}{T_{400} + T_{500} + T_{630} + T_{800} + T_{1000} + T_{1250}}$.

5.2 Ausgangszustand der Hörsäle i14 und i15

Bevor mit der Planung und der anschließenden Umsetzung einer akustischen Sanierung begonnen werden kann, werden die Räume zunächst einmal begutachtet, um einen Eindruck des allgemeinen Zustandes zu erhalten. Von großer Wichtigkeit sind die geometrischen Abmessungen sowie die Messung der akustischen Parameter der jeweiligen Räume.

Die beiden aneinander grenzenden Hörsäle i14 und i15 befinden sich im Kellergeschoss der Inffeldgasse 18 (s. Abb. 5.3). Bei gleicher Höhe ist der Hörsaal i14 mit einer Grundfläche von 76 m² gegenüber dem Hörsaal i15 mit einer Fläche von 58 m² etwas größer.

Ausgestattet sind sie jeweils mit einer Tafel, mehreren Holztischen und Holzstühlen. Die Fensterfront, welche sich über die gesamte Länge der Nordseite des Raumes erstreckt, beginnt bei einer Höhe von 2.8 m und schließt mit der Deckenhöhe von 4 m ab (s. Abb. 5.4). Bei der Decke handelt es sich um eine um 50 cm abgehängte Akustikdecke. Gegenüber der Fensterfront befindet sich die Eingangstür zum jeweiligen Hörsaal sowie ein Waschbecken. Aufgrund der herausragenden, rechteckigen Mauerelemente auf der Seite der Eingangstür besitzen beide Hörsäle viele Kanten, die dem jeweiligen Raum einen speziellen Charakter verleihen (s. Abb. 5.5).

Aufgrund ihrer Lage sind die Hörsäle wenig lichtdurchflutet, was zu einem typischen Kellerraumfeeling führt. Die Sprachverständlichkeit in beiden Räumen fordert enorme Aufmerksamkeit und Konzentration, um Vorträgen auf lange Dauer folgen zu können. Akustisch betrachtet besitzen die Wände als auch der Boden schallharte Eigenschaften, was zu erheblichen Reflexionen in beiden Räumen führt. In beiden Hörsälen sind Flatterechos wahrnehmbar.

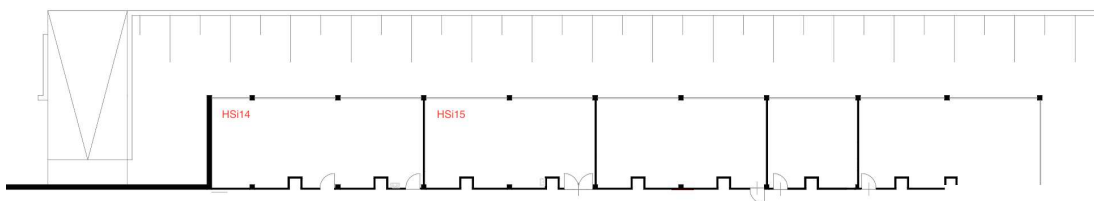


Abbildung 5.3: Grundriss vom Nordteil des Kellergeschosses in der Inffeldgasse 18



(a) Hörsaal i14



(b) Hörsaal i15

Abbildung 5.4: Fensterfront der beiden Hörsäle



(a) Hörsaal i14



(b) Hörsaal i15

Abbildung 5.5: Eingangsfrent der beiden Hörsäle

5.3 Hörsaal i15

Hörsaal i15	
Nachhallzeitmessung	5. November 2016 9:00 - 13:30 Uhr
Anwesende Personen	Hetz Sieglinde Kordesch Janina
Raummaße (l · b · h)	10.86 m · 5.32 m · 4 m
Raumvolumen (abzüglich herausragender Kantenelemente)	$V = 213.63 \text{ m}^3$
Geschätzte Nachhallzeit	$\hat{T} = 0.9 \text{ s}$
Temperatur zur Messzeit	20 °C
Relative Luftfeuchtigkeit zur Messzeit	31.6 %
A-bewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{AF} = 40 \text{ dB}$
Unbewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{ZF} = 70 \text{ dB}$

Tabelle 5.2: Daten zum Hörsaal i15

Die in Tab. 5.2 angeführten Raummaße beziehen sich auf die maximalen geometrischen Abmessungen des Hörsaals. Aufgrund vieler herausragender Kantenelemente im Raum variieren die Maße dementsprechend. Bei der Berechnung des Raumvolumens wurden diese berücksichtigt.

5.3.1 Messaufbau

Das Messequipment entspricht weitestgehend dem, das auch für die Hallraummessung in Kapitel 3 verwendet wurde und ist im Geräteverzeichnis in Tab. 8.2 auf Seite 102 nachzulesen (s. Abb. 5.6).

In Abb. 5.7 ist das Blockschaltbild für die Dodekaeder Messungen ersichtlich.

Um auch bei den tiefen Frequenzen möglichst genau messen zu können, wurde eine weitere Quelle, ein Subwoofer, verwendet. Für die zwei verwendeten Quellen wurden jeweils zwei verschiedene Quellpositionen festgelegt. Eine Quellposition wurde vor der Tafel gewählt, wo sich üblicherweise der Vortragende aufhält. Die zweite Quellposition wurde etwas weiter in den Raum zu den Hörerinnen und Hörern hinein versetzt (s. Abb. 5.8).

Der Mindestabstand d_{min} zwischen Quelle und Mikrofon wurde mit der geschätzten Nachhallzeit $\hat{T} = 0.9 \text{ s}$ und der Schallgeschwindigkeit $c = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ wie folgt berechnet: [ÖNORM EN ISO 3382-2, 2009, S. 8]

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot \hat{T}}} = 1.6638 \text{ m} \quad (5.5)$$

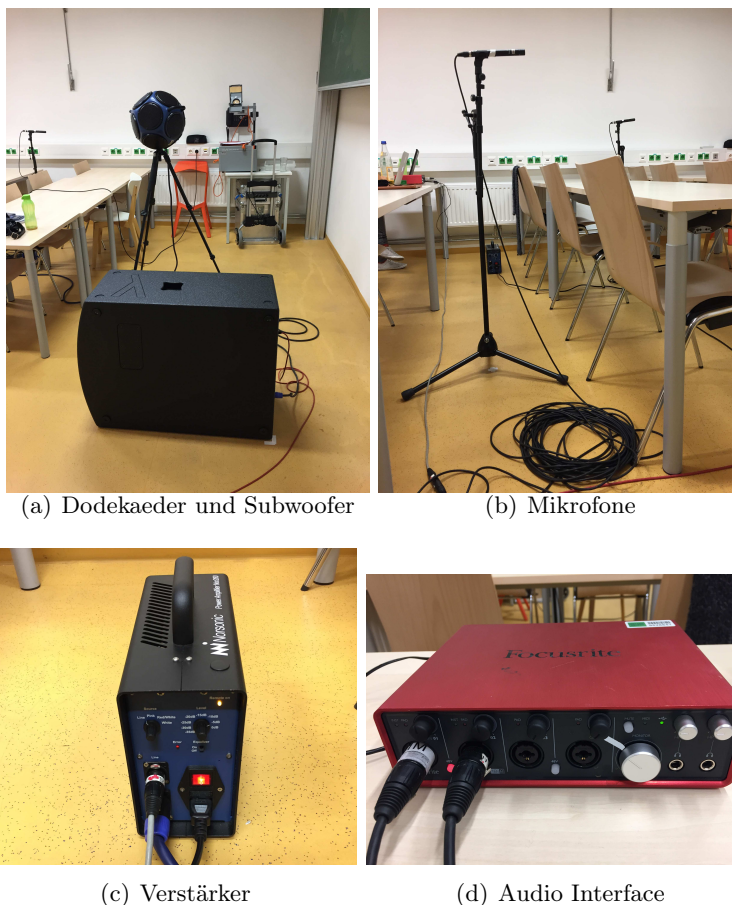


Abbildung 5.6: Messequipment

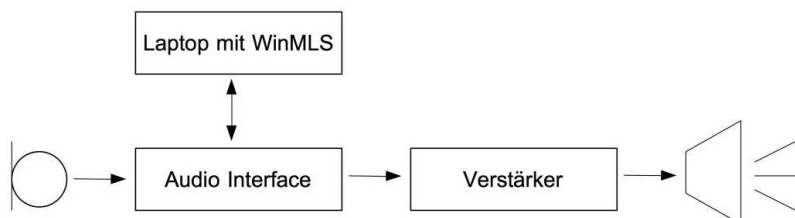


Abbildung 5.7: Blockschaltbild des Messaufbaus

Die Mikrofonpositionen wurden so gewählt, dass sie den gesamten Hörsaal möglichst gleichmäßig abdecken. Die Entfernungen zu den Begrenzungsflächen wurden vermessen und alle Positionen im Grundrissplan des Hörsaals eingezeichnet. Für die Mikrofonhöhe wurde 1.20 m gewählt, da der Raum vorwiegend vom sitzenden Publikum genutzt wird.

In Abb. 5.8 sind der Dodekaederlautsprecher blau, der Subwoofer grün und die Mikrofone rot dargestellt.

Der Verstärker wurde auf den Level -5 dB eingestellt. Beim Subwoofer wurde die Preset 3-Einstellung verwendet, um den möglichst breiten Frequenzbereich zu erhalten. Der Wiedergabebereich des Subwoofers lag somit bei 35 - 200 Hz. Der Frequenzbereich des Dodekaeders betrug 63 Hz - 8 kHz. Die beiden AKG Kugelmikrofone wurden bei 1000 Hz auf 94 dB kalibriert.

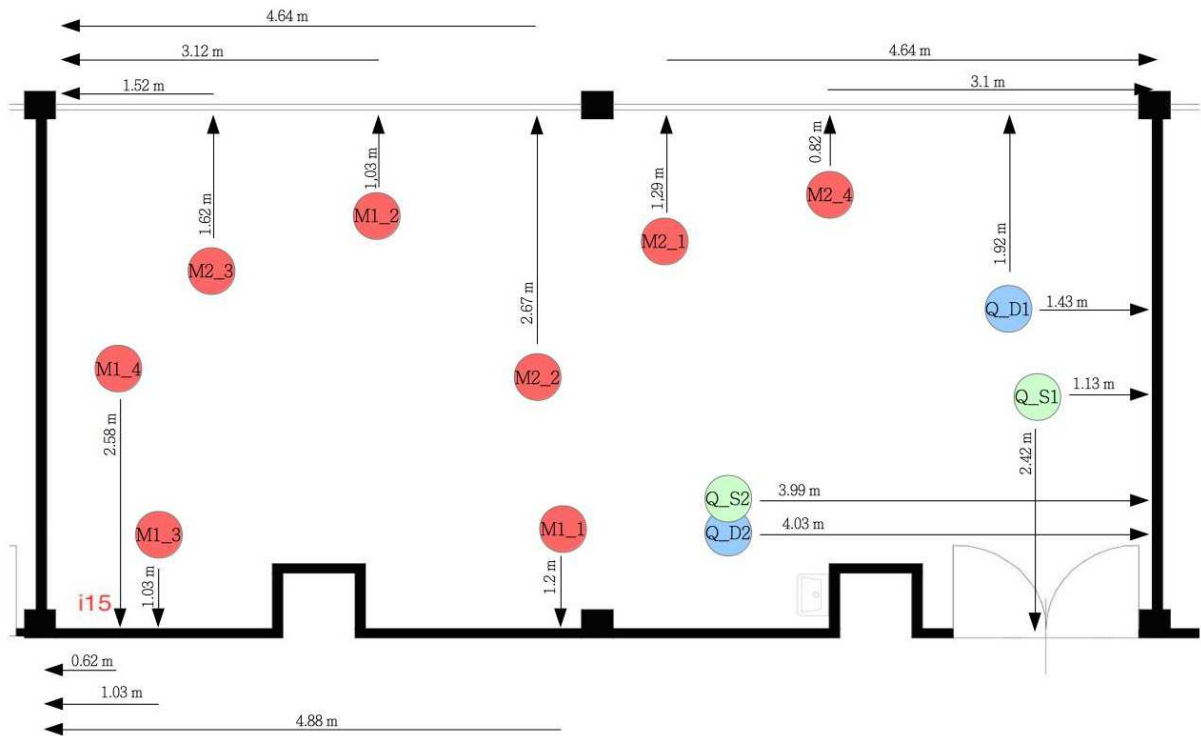


Abbildung 5.8: Mikrofon- und Quellpositionen des Hörsaals i15

In der Software WinMLS wurden – wie auch in Kapitel 3 – für die Messungen noch folgende Einstellungen vorgenommen:

- 2 Channel Messung
- Sequence order: 17
- No. of cycles: 2
- No. of pre-send cycles: 1
- MLS Typ: A

Die Messungen wurden im unbesetzten Raum mit dem Verfahren der integrierten Impulsantwort durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird die Abklingkurve durch Rückwärtsintegration der quadrierten, gefilterten Impulsantwort bestimmt. Laut [ÖNORM EN ISO 3382-2, 2009, S. 11] eignen sich als Anregungssignal ein Pistolenschuss oder aber ein Sinus-Sweep bzw. pseudozufälliges Rauschen (MLS-Signal). Der Vorteil der letzten beiden angeführten Signale ist, dass ein deutlich höherer SNR (Signal-Stör-Abstand) erreicht werden kann. Da die Messungen für tiefe Frequenzen mit einem Subwoofer durchgeführt wurden, wurde das MLS-Anregungssignal verwendet, damit es auch in keiner Stufe der Messapparatur zu einer Übersteuerung kommt.

Vorab wurde an allen acht Messpositionen der ersten Schallquellenpositionen (Q_D1, Q_S1) gemessen. Daraufhin wurden beide Schallquellen auf die Positionen Q_D2 bzw. Q_S2 umgestellt. Zusätzlich wurde die Mikrofonposition M1_1 zur Einhaltung des Mindestabstandes d_{min} an die vorherige Quellenposition Q_D1 versetzt. Somit wurden dann an der Schallquellenposition Q_D2 und Q_S2 die Messungen aller Messpositionen durchgeführt (s. Abb. 5.8).

Zur späteren Datenauswertung der Messungen wurden die Textdateien der Nachhallzeit in Terzbändern und der ISO 3382 Maße in Oktavbändern sowie die Impulsantworten als .wmb und .wav-Dateien exportiert.

5.3.2 Messergebnis

Um bei tiefen Frequenzen auch gute Anregung zu erreichen, wurden die Nachhallzeitmessungen in beiden Hörsälen mit einem Dodekaeder und einem zusätzlichen Subwoofer durchgeführt. In Abb. 5.9 und in Tab. 5.3 sind die Ergebnisse der Nachhallzeitmessung für Dodekaeder (Dod) und Subwoofer (Sub) vor und nach der akustischen Sanierung durch Kantenabsorber (KA) ersichtlich. Aufgrund eines nicht mehr regulär funktionierenden Subwoofers bei der Nachhermessung (stark nachhallend) konnte bei tiefen Frequenzen keine korrekte Auswertung durchgeführt werden (s. Abb. 5.9 gelbes Quadrat). Wegen dieses Artefakts konnten die Subwoofermessungen nicht für die Auswertung verwendet werden und es musste in den folgenden Kapiteln auch für tiefe Frequenzen auf die Dodekaedermessungen zurückgegriffen werden.

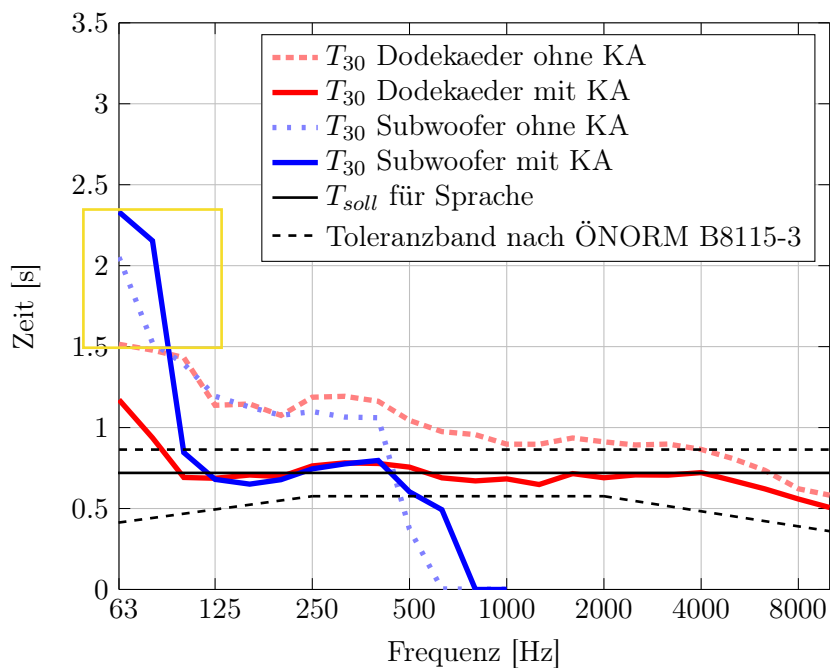


Abbildung 5.9: Nachhallzeit T_{30} für Dodekaeder und Subwoofer vor und nach der Sanierung (i15)

Frequenz [Hz]	T_{30} Dod ohne KA [dB]	T_{30} Dod mit KA [dB]	T_{30} Sub ohne KA [dB]	T_{30} Sub mit KA [dB]
63	1.51	1.17	2.05	2.33
80	1.48	0.94	1.52	2.15
100	1.43	0.69	1.39	0.85
125	1.14	0.69	1.19	0.68
160	1.15	0.71	1.13	0.65
200	1.08	0.70	1.08	0.68
250	1.19	0.76	1.10	0.74
315	1.19	0.78	1.06	0.78
400	1.16	0.78	1.06	0.80
500	1.04	0.76	0.37	0.60
630	0.98	0.69		0.49
800	0.96	0.67		
1000	0.90	0.68		
1260	0.90	0.65		
1600	0.94	0.72		
2000	0.91	0.69		
2500	0.89	0.71		
3160	0.90	0.71		
4000	0.86	0.72		
5000	0.81	0.67		
6300	0.74	0.62		
8000	0.62	0.56		
10000	0.58	0.51		

Tabelle 5.3: Nachhallzeit T_{30} für Dodekaeder und Subwoofer vor und nach der Sanierung (i15)

Die gemessene und über alle Messpositionen gemittelte Nachhallzeit T_{30} zeigt in Abb. 5.10 im Bereich 500 - 4000 Hz einen gleichmäßigen Verlauf. Zwischen 200 und 500 Hz kommt es zu einer leichten Überhöhung. Hin zu den tiefen Frequenzen steigt die Nachhallzeit bis zu 1.51 s an. Unterhalb der Schröderfrequenz f_S kann es durch Raummoden zu Klangverfärbungen kommen. Im Folgenden wurde diese nach Gl. 2.2 für die über alle Terzbänder gemittelte Nachhallzeit $T = 1.02$ s berechnet: [Fuchs, 2010, S. 9], [Fuchs H. V.;Zha X., 2014, S. 1]

$$f_S = 1200 \cdot \sqrt{\frac{1.02}{213.63}} = 82.92 \text{ Hz} \quad (5.6)$$

$$f_S = 2000 \cdot \sqrt{\frac{1.02}{213.63}} = 138.2 \text{ Hz} \quad (5.7)$$

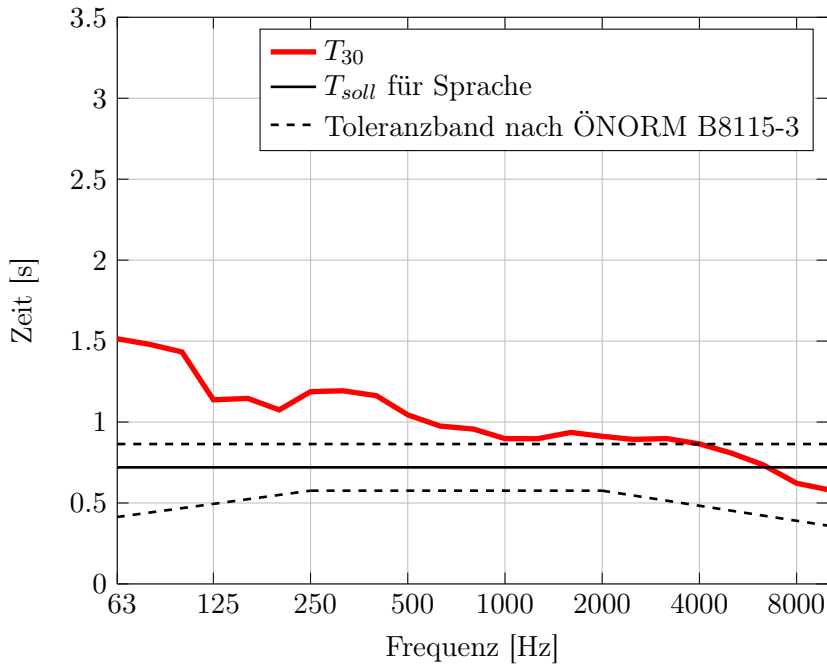
$$f_S = 4000 \cdot \sqrt{\frac{1.02}{213.63}} = 276.39 \text{ Hz} \quad (5.8)$$

Die Berechnungen der Schröderfrequenz wurden für die drei in der Literatur üblich vorkommenden Werte 1200, 2000 und 4000 durchgeführt. Wenn man sich die Kastengrafik in Abb 5.11 ansieht, erkennt man, dass es nach unten bis zu 160 Hz zu keinen großen Abweichungen kommt. Demnach ist die nach Gl. 5.7 berechnete Schröderfrequenz für diesen Hörsaal relevant.

Die berechnete Soll-Nachhallzeit T_{soll} für Kommunikation und Sprache laut [ÖNORM B 8115-3, 2015] beträgt:

$$T_{soll, Komm} = 0.32 \cdot \lg(V) - 0.17 = 0.575 \text{ s} \quad (5.9)$$

$$T_{soll, Sprache} = 0.37 \cdot \lg(V) - 0.14 = 0.722 \text{ s} \quad (5.10)$$



Frequenz [Hz]	T_{30} [s]
63	1.51
80	1.48
100	1.43
125	1.14
160	1.15
200	1.08
250	1.19
315	1.19
400	1.16
500	1.04
630	0.98
800	0.96
1000	0.90
1260	0.90
1600	0.94
2000	0.91
2500	0.89
3160	0.90
4000	0.86
5000	0.81
6300	0.74
8000	0.62
10000	0.58

Abbildung 5.10: Nachhallzeit T_{30} (i15)

Tabelle 5.4: Nachhallzeit T_{30} (i15)

In Abb. 5.11 ist die Nachhallzeit T_{30} von allen Messungen nochmals in einer Kastengrafik dargestellt. Die blaue Box entspricht dem Bereich, in dem 50 % der Daten liegen. Die rote Linie in dieser Box entspricht dem Median aller gemessenen Werte. Somit ist in der Kastengrafik der Nachhallzeit gut erkennbar, dass die Abweichungen hin zu den hohen Frequenzen immer geringer werden. Die roten + markieren die Ausreißer bei der entsprechenden Frequenz. Offensichtliche Fehlermessungen wie z.B. in Abb 5.11 bei 63 Hz mit gelben Quadraten gekennzeichnet wurden bei der Auswertung eliminiert.

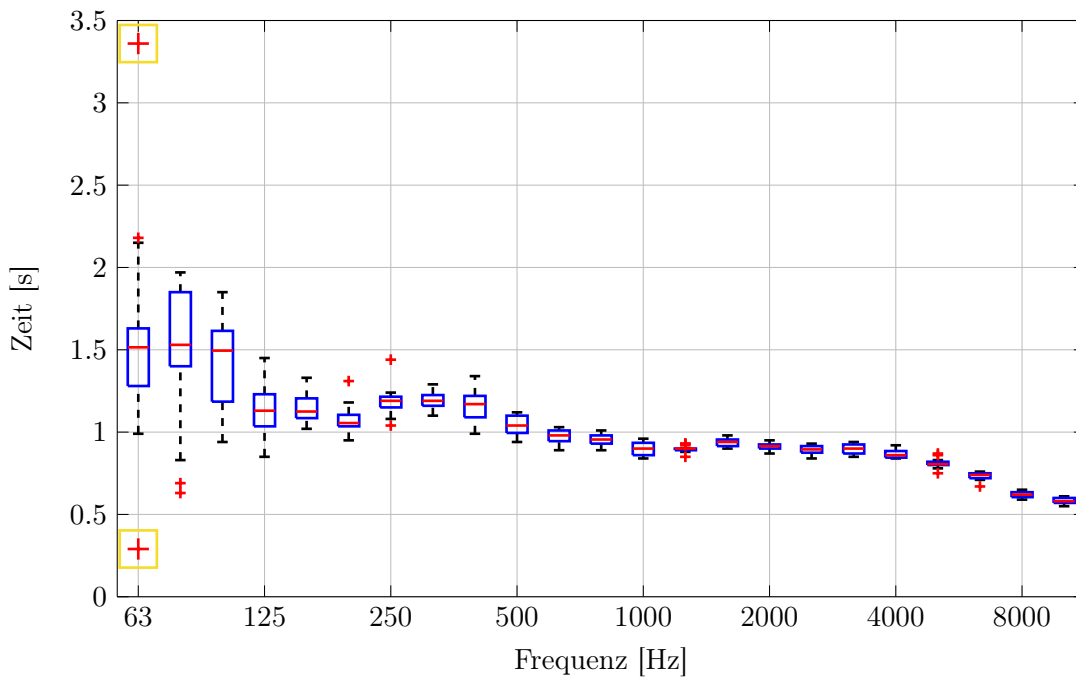


Abbildung 5.11: Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} (i15)

Die mittlere Nachhallzeit im Hörsaal i15 beträgt vor der Sanierung $T_m = 0.99$ s und das Bassverhältnis $BR = 1.21$.

In Abb. 5.12 und Abb. 5.13 sind die Impulsantworten der ersten Quellenposition für Dodekaeder und Subwoofer dargestellt. Repräsentativ für den gesamten Hörsaal wurde dafür die Mikrofonposition M2_2 gewählt. Aus der Impulsantwort kann direkt die Nachhallzeit berechnet werden. Man kann sehr gut die einzelnen Reflexionen erkennen und sie dient somit zur qualitativen Beurteilung.

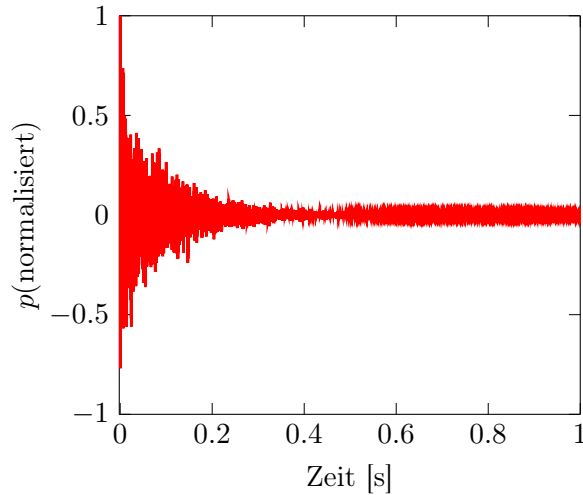


Abbildung 5.12: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i15)

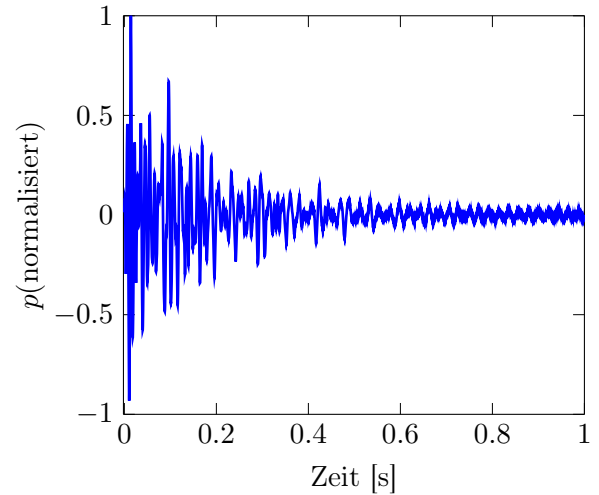


Abbildung 5.13: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i15)

5.4 Hörsaal i14

Hörsaal i14	
Nachhallzeitmessung	5. November 2016 15:00 - 19:30 Uhr
Anwesende Personen	Hetz Sieglinde Kordesch Janina
Raummaße (l · b · h)	13.58 m · 5.32 m · 4 m
Raumvolumen (abzüglich herausragender Kantenelemente)	$V = 267.28 \text{ m}^3$
Geschätzte Nachhallzeit	$\hat{T} = 1 \text{ s}$
Temperatur zur Messzeit	20 °C
Relative Luftfeuchtigkeit zur Messzeit	36.7 %
A-bewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{AF} = 35 \text{ dB}$
Unbewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{ZF} = 60 \text{ dB}$

Tabelle 5.5: Daten zum Hörsaal i14

Die in Tab. 5.5 angeführten Raummaße beziehen sich auf die maximalen geometrischen Abmessungen des Hörsaals. Aufgrund vieler herausragender Kantenelemente im Raum variieren die Maße dementsprechend. Bei der Berechnung des Raumvolumens wurden diese berücksichtigt.

5.4.1 Messaufbau

Es wurde dasselbe Messequipment verwendet, welches schon im zuvor angeführten Kapitel 5.3.1 beschrieben wurde. Die genauen Angaben zu den verwendeten Geräten findet man im Geräteverzeichnis (s. Tab. 8.2 auf Seite 102).

Bestimmt wurden jeweils zwei Quellpositionen für den Dodekaeder und den Subwoofer. Die Quellpositionen Q_D1 und Q_S1 befanden sich vor der Tafel, wobei die Positionen Q_D2 und Q_S2 abermals etwas weiter zum Publikum hinein verschoben wurden. Acht Mikrofonpositionen deckten den gesamten Hörsaal gut ab. Um den Mindestabstand d_{min} der Mikrofonpositionen zur Quelle einhalten zu können, wurde die Mikrofonposition M2_2 bei den Messungen der zweiten Schallquellenposition um 61 cm zur Rückwand nach hinten verschoben (s. Abb. 5.14). Der Mindestabstand d_{min} wurde mit der geschätzten Nachhallzeit $\hat{T} = 1 \text{ s}$ und der Schallgeschwindigkeit $c = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ wie folgt berechnet: [ÖNORM EN ISO 3382-2, 2009, S. 8]

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot \hat{T}}} = 1.766 \text{ m} \quad (5.11)$$

Alle ausgewählten Schallquellen- und Mikrofonpositionen sowie die Abstände zu den Begrenzungsflächen wurden im Grundrissplan des Hörsaals eingetragen. Die Mikrofonhöhe wurde aufgrund der Nutzung des Hörsaals von sitzendem Publikum auf 1.2 m eingestellt.

Der Verstärker wurde auf den Level -5 dB eingestellt. Beim Subwoofer wurde wieder die Preset 3-Einstellung verwendet. Die beiden AKG Kugelmikrofone wurden bei 1000 Hz auf 94 dB kalibriert. Die Messungen wurden im unbesetzten Raum mit dem Verfahren der integrierten Impulsantwort durchgeführt.

In der Software WinMLS wurden für die Messungen noch folgende Einstellungen vorgenommen:

- 2 Channel Messung
- Sequence order: 17
- No. of cycles: 2
- No. of pre-send cycles: 1
- MLS Typ: A

Da die Subwoofer Messungen gestreut und somit keine gute Reproduzierbarkeit aufwiesen, wurden bei jeder Mikrofonposition jeweils drei Messungen durchgeführt, um diese dann bei der Datenauswertung zu mitteln. Dadurch wurden genauere Ergebnisse im schwer zu messenden tieffrequenten Bereich erwartet. Diese Streuungen sind auf mögliche Moden zurückzuführen.

Für die Datenauswertung der Messungen wurden die Textdateien der Nachhallzeit in Terzbändern und der ISO 3382 Maße in Oktavbändern sowie die Impulsantworten als .wmb und .wav-Dateien exportiert.

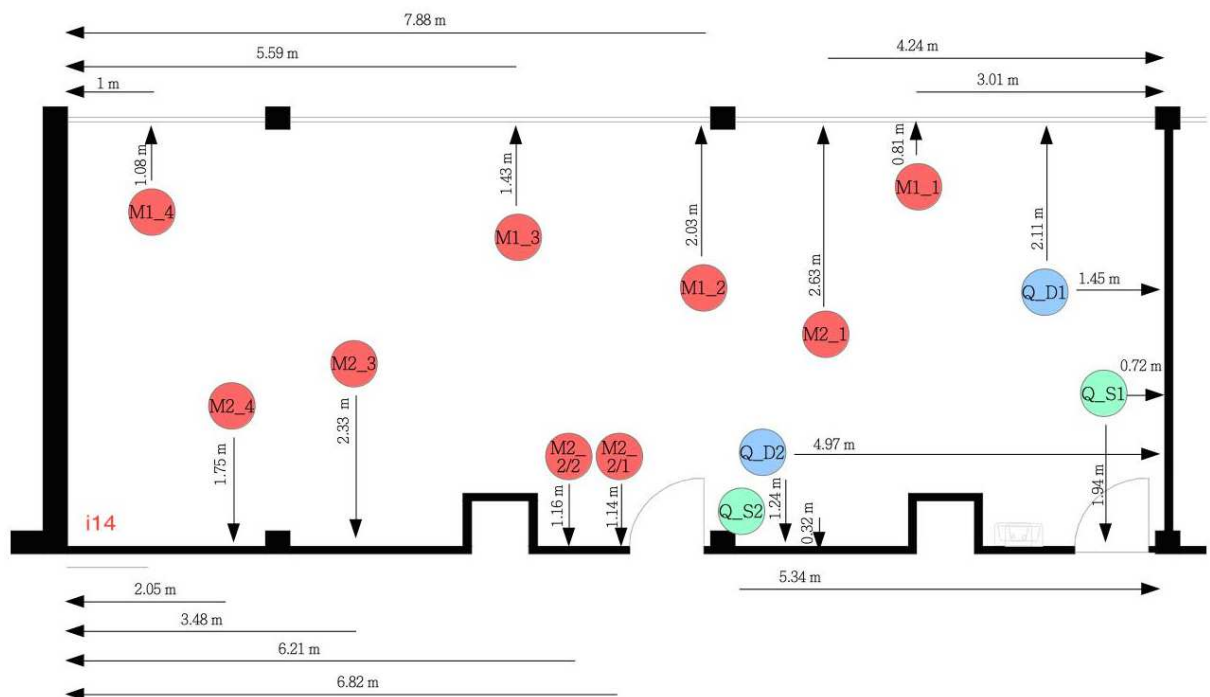


Abbildung 5.14: Mikrofon- und Quellpositionen (i14)

5.4.2 Messergebnis

Die gemessene und über alle Messpositionen gemittelte Nachhallzeit T_{30} zeigt in Abb. 5.15 einen wie erwarteten Anstieg hin zu den tiefen Frequenzen. Zwischen den Frequenzen 500 Hz und 8 kHz liegt die Nachhallzeit laut [ÖNORM B 8115-3, 2015] sogar fast durchgehend innerhalb des Toleranzbandes. Jedoch steigt sie ab 500 Hz hin zu den tiefen Frequenzen bis 1.41 s an. Die relevante Schröderfrequenz berechnet nach Gl. 2.2 für die über alle Terzbänder gemittelte Nachhallzeit $T = 0.96$ s lautet: [Fuchs, 2010, S. 9], [Fuchs H. V.;Zha X., 2014, S. 1]

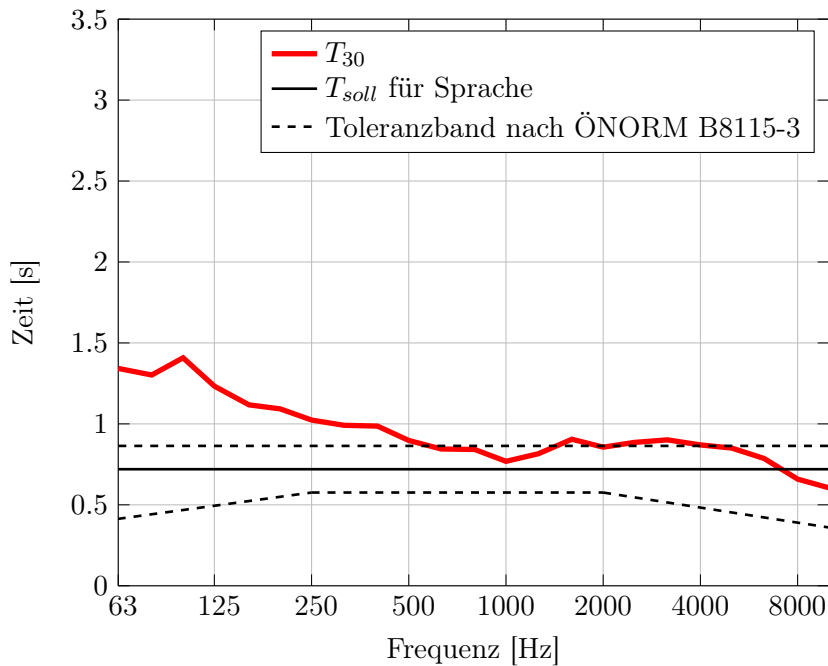
$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{0.96}{267.28}} = 119.86 \text{ Hz} \quad (5.12)$$

Die berechnete Soll-Nachhallzeit T_{soll} für Kommunikation und Sprache laut [ÖNORM B 8115-3, 2015] beträgt:

$$T_{soll, Komm} = 0.32 \cdot \lg(V) - 0.17 = 0.607 \text{ s} \quad (5.13)$$

$$T_{soll, Sprache} = 0.37 \cdot \lg(V) - 0.14 = 0.758 \text{ s} \quad (5.14)$$

In Abb. 5.16 ist die Nachhallzeit T_{30} von allen Messungen in einer Kastengrafik dargestellt. In dieser ist gut erkennbar, dass die Schwankungen hin zu den tiefen Frequenzen zunehmen.



Frequenz [Hz]	T_{30} [s]
63	1.34
80	1.30
100	1.41
125	1.23
160	1.12
200	1.09
250	1.02
315	0.99
400	0.99
500	0.90
630	0.85
800	0.84
1000	0.77
1260	0.82
1600	0.91
2000	0.86
2500	0.89
3160	0.90
4000	0.87
5000	0.85
6300	0.79
8000	0.66
10000	0.60

Abbildung 5.15: Nachhallzeit T_{30} (i14)

Tabelle 5.6: Nachhallzeit T_{30} (i14)

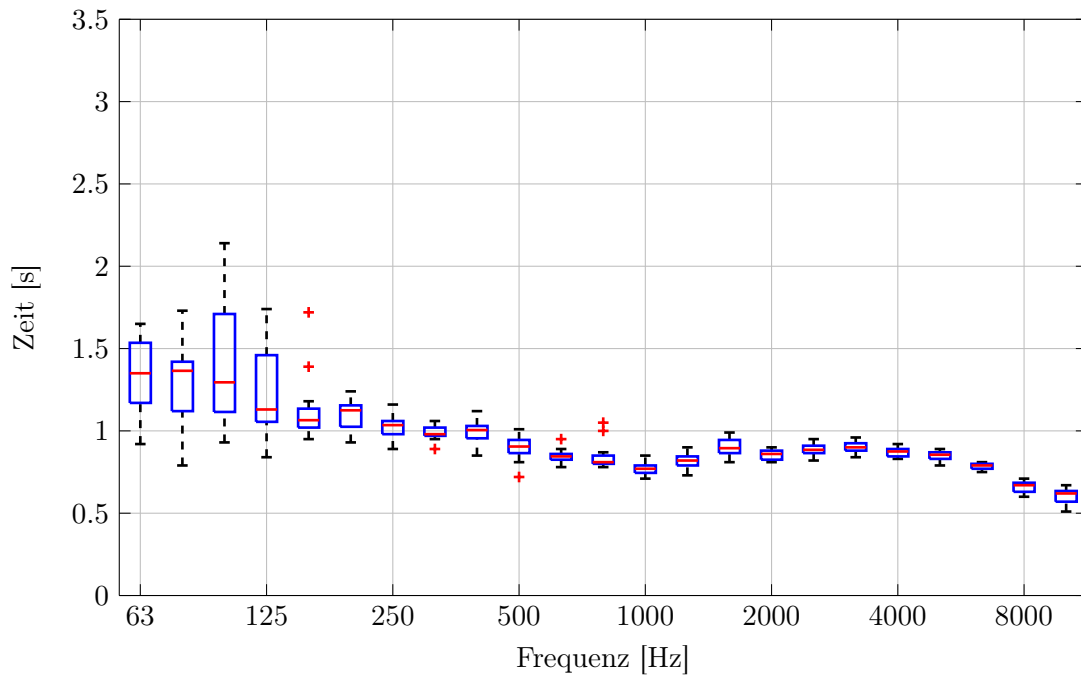


Abbildung 5.16: Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} (i14)

Die mittlere Nachhallzeit im Hörsaal i14 beträgt vor der Sanierung $T_m = 0.86$ s und das Bassverhältnis $BR = 1.33$.

In Abb. 5.17 und Abb. 5.18 sind die Impulsantworten für den Messpunkt M1_2 für Dodekaeder und Subwoofer dargestellt. Dieser Messpunkt wurde repräsentativ für alle Mikrofonpositionen des Hörsaals i14 gewählt.

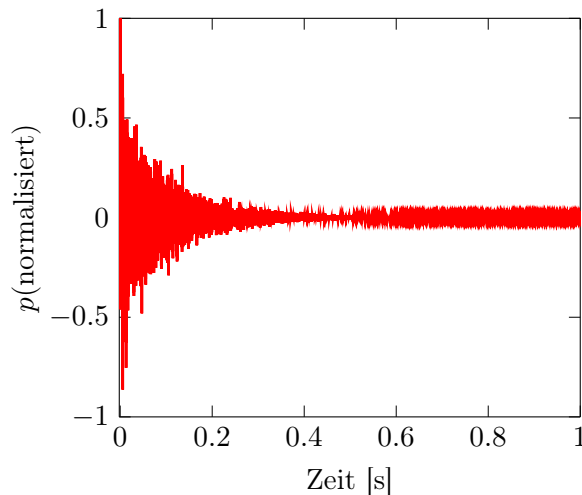


Abbildung 5.17: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i14)

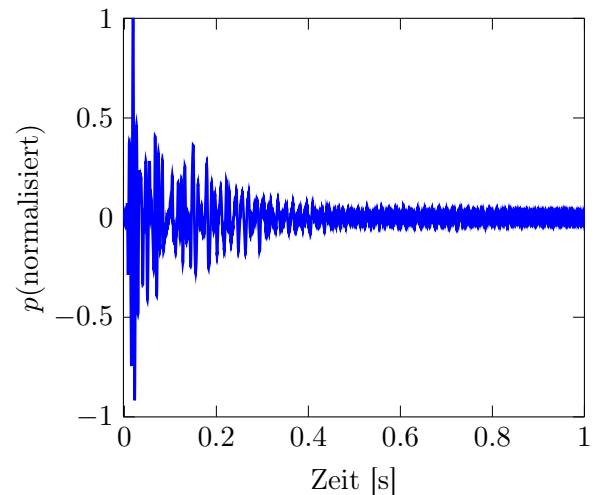


Abbildung 5.18: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i14)

6

Akustische Sanierung

Die Hörsäle i14 und i15, deren Nachhallzeit T und deren Impulsantworten bereits gemessen wurden (s. Kapitel 5), wurden nun akustisch saniert und ein zweites Mal vermessen. Der Hörsaal i14 wurde mit Akustikwandpaneelen ausgekleidet, der Hörsaal i15 mit den in Kapitel 2.2 beschriebenen Kantenabsorbern.

6.1 Planung der Sanierung des Hörsaals i15

Nach der Auswertung der Nachhallzeitmessungen der Testräume konnte mit den Planungen für die akustische Sanierung begonnen werden. Nach einer weiteren Begutachtung wurde unter der Leitung von Dr. Prof. Ing. Helmut V. Fuchs der Hörsaal i15 mit Kantenabsorbern ausgekleidet, wobei die Positionierung und Auswahl der Absorber auf empirischen Erfahrungswerten beruhte. Weil der Hörsaal sowieso schon hervorragende Kanten hatte (s. Abb. 6.2(a) und 6.2(b)), konnte man an diesen Stellen die Absorber sehr gut unauffällig unterbringen. Auch in die nach unten abgehängte Akustikdecke wurden an der Tafelseite und an deren gegenüberliegenden Rückseite Kantenabsorber eingebaut. Abb. 6.2(c) und 6.2(d) zeigen den Hörsaal i15, wie er mit Kantenabsorbern (rot eingefärbt) aussehen wird. Die genauen Abmessungen der Absorber sind angegeben.

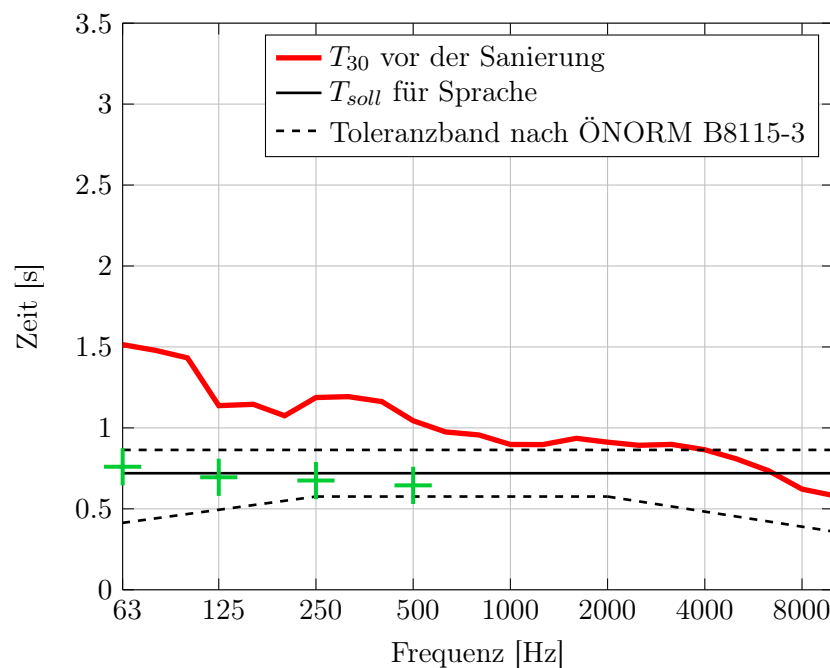


Abbildung 6.1: Empirische Prognose der Nachhallzeit T_{30} nach der Sanierung laut Dr. Prof. Ing. Helmut V. Fuchs (grün markiert) im Vergleich zu T_{30} vor der Sanierung (i15)

Nach Vorliegen der Nachhallzeitmessung vor der Sanierung hat Herr Dr. Prof. Ing. Helmut V. Fuchs eine konkrete Prognose aufgestellt, welche lediglich auf seinen umfangreichen Erfahrungswerten mit Kantenabsorbern basiert. Sie ist in Abb. 6.1 (grün markiert) auch grafisch dargestellt:

”Als Zielgröße für die Nachhallzeit würde ich für diesen Raum nach DIN 18041 (besetzt, ”Unterricht, Kommunikation”, ”Vortrag inklusiv”) etwa $T = 0.7$ s ansetzen. In diesem Fall bin ich unvorsichtig genug, eine unverbindliche Prognose zu wagen (...). In jedem Fall erwarte ich eine deutlich verbesserte Hörsamkeit durch den Einbau der KA.”

Das Material der Kantenabsorber belief sich sowohl auf ungelochte als auch gelochte (22 % Lochflächenanteil) 12.5 mm dicke Gipskartonbauplatten:

Fläche der gelochten Platten:	14.412 m ²
Fläche der ungelochten Platten:	8.1084 m ²

Gefüllt wurden die Verkofferungen mit Mineralwolle ($\rho = 40$ kg/m³). Die Gesamtkosten betragen € 5960.59.

Abschließend ist anzumerken, dass derzeit noch kein Rechenmodell für die Sanierungsplanung mittels Kantenabsorbern existiert – diese basiert ausschließlich auf praktischen Erfahrungswerten – und dabei wird es nach Meinung von Fuchs auch auf absehbare Zeit bleiben.

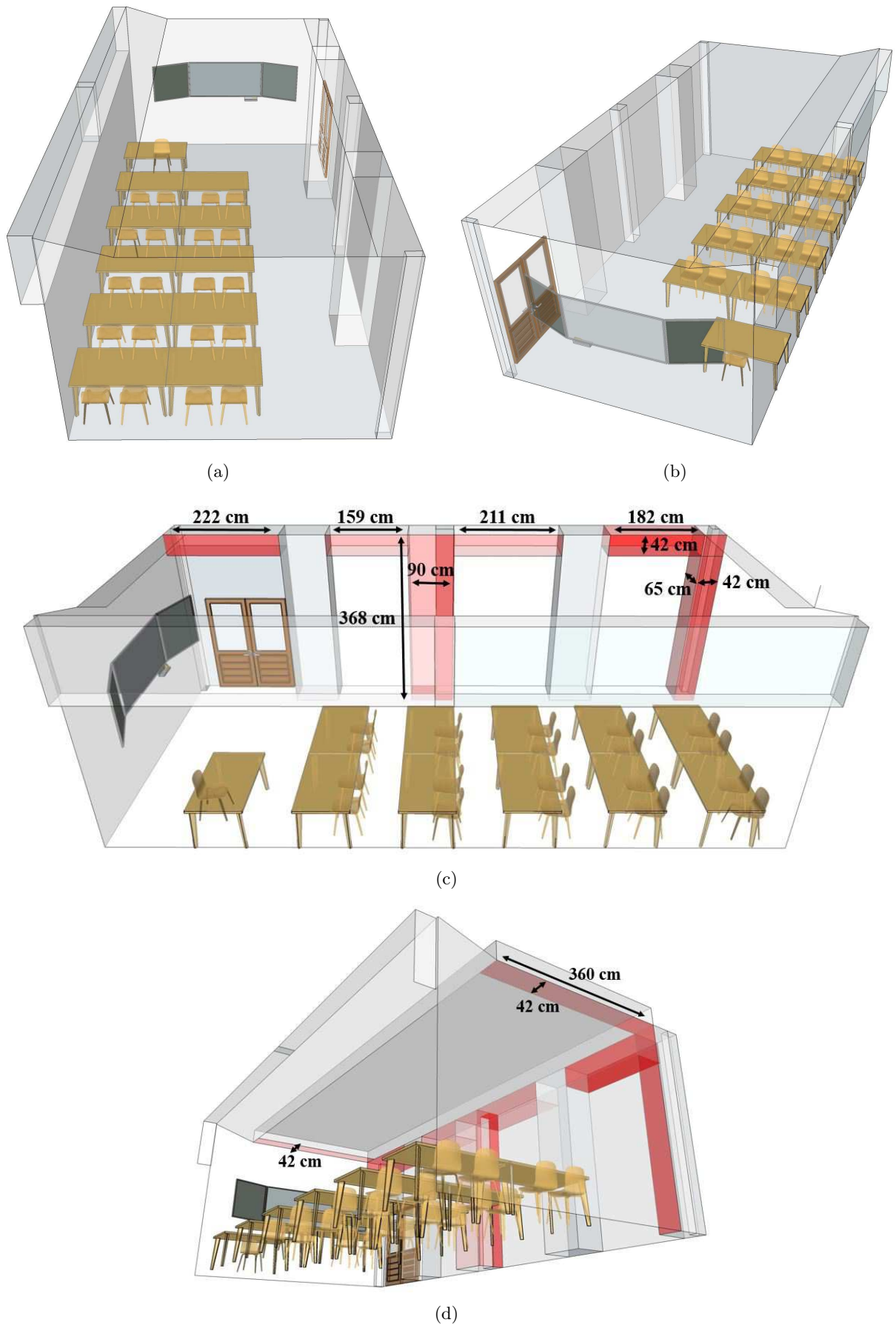


Abbildung 6.2: Sketch-Up-Simulationen des Hörsaals i15 vor ((a),(b)) und nach ((c),(d)) der Sanierung

6.2 Planung der Sanierung des Hörsaals i14

Die Sanierung dieses Hörsaals wurde von der Abteilung Gebäude und Technik der TU Graz geplant, welche die Firma GU bautech GmbH dazu beauftragte, diese umzusetzen.

Hierzu wurde mittels eines Akustiktools (Knauf AMF Acoustics Calculator) durch Eingeben der Raumparameter die Nachhallzeit ohne Absorber bestimmt. Anschließend wurde ausgerechnet, wie viele und welche Absorber einzubauen sind, um die Nachhallzeit in das Toleranzband (für Sprache) nach DIN 18041 zu verschieben (s. Abb. 6.3). In Abb. 6.12 ist die gemessene der simulierten Nachhallzeit jeweils mit und ohne Absorber gegenübergestellt, wobei letztere um ein Wesentliches höher ist als die gemessene. Diese Fehleinschätzung geht jedoch in die Planung mit ein.

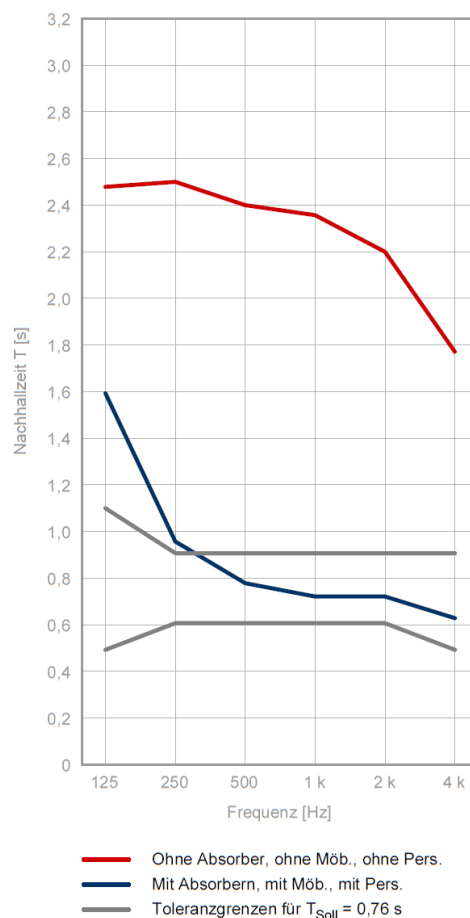


Abbildung 6.3: Nachhallzeit nach Akustiktool berechnet (i14)

In Tab. 6.1 sind die Parameter der Absorber aufgelistet, mit denen der Hörsaal i14 verkleidet wurde. Anschließend ist in Abb. 6.4 eine Skizze des Hörsaals mit den Positionen der anzubringenden Wandpaneele zu sehen. Die insgesamt zusätzlich eingebrachte Absorberoberfläche beträgt also hier 21.6 m^2 , entsprechend der Fläche einer Stirnwand des Raumes.

Hersteller	WEKUSTIK
Produktname	WEKUSTIK Wandpaneel
Absorberklasse	A
Akustikmaterial	WEKUSTIK Akustikvlies; Brandklasse B-s1, d0
Stoffbezug	WEKUSTIK Akustikstoff in den Farben YS165 und YS173, jeweils 5 Stk.; Brandklasse B1 nach DIN 4102
Format	1.2 m · 1.8 m
Absorbertiefe	5 cm
Anzahl der Wandpaneele	10 Stk.
Gesamtkosten	€ 8790.05

Tabelle 6.1: Parameter der Wandpaneele

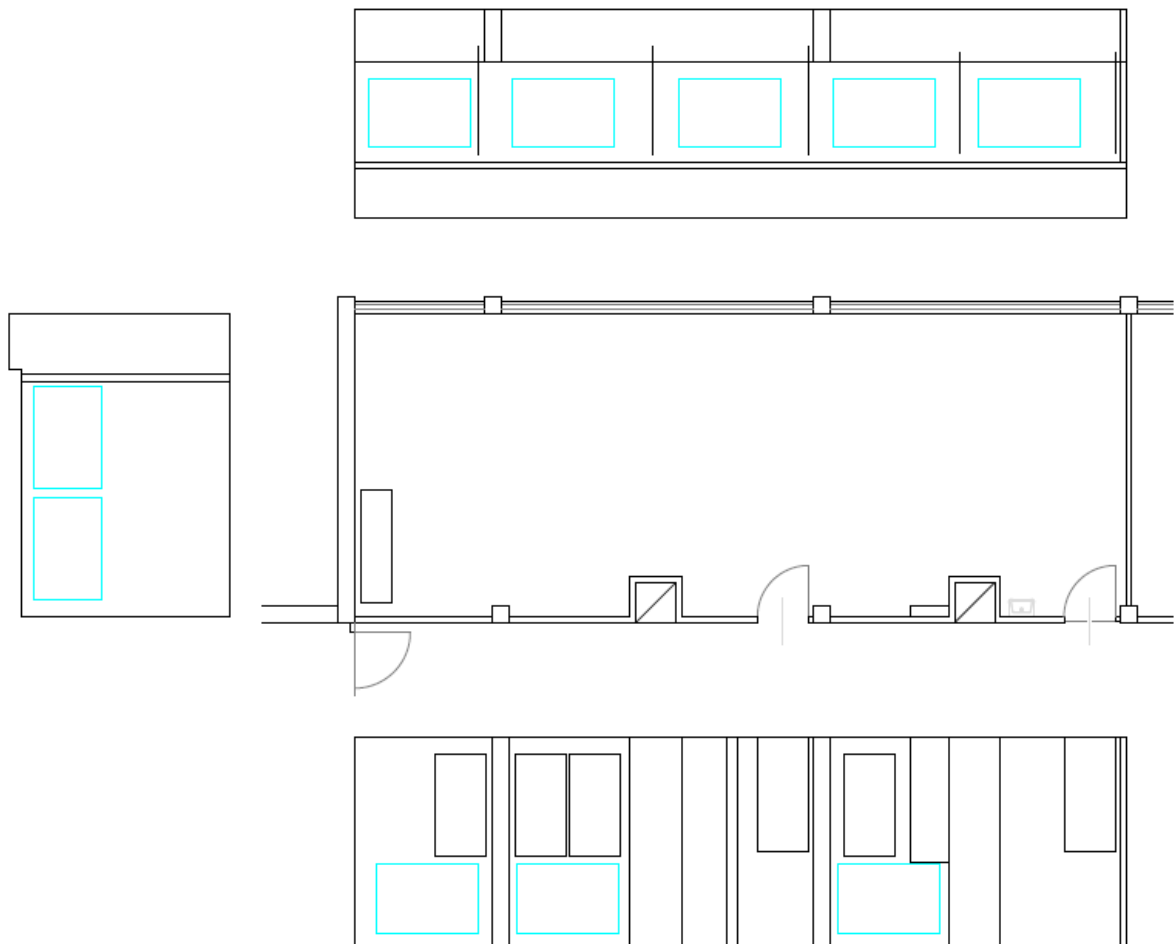


Abbildung 6.4: Skizze des Hörsaals i14 mit den Positionen der anzubringenden Akustikpaneele

6.3 Ergebnis der Sanierung des Hörsaals i15

Zur Bewertung der akustischen Optimierung durch Kantenabsorber bzw. Wandpaneele wurde eine weitere Nachhallzeitmessung durchgeführt. Das verwendete Messequipment ist im Geräteverzeichnis (s. Tab. 8.3 auf Seite 102) niedergeschrieben. Es wurden die selben Quellen- und Mikrofonpositionen wie in Kapitel 5.3.1 in Abb. 5.8 bzw. in Kapitel 5.4.1 in Abb. 5.14 angeführt verwendet.

Abb. 6.5 zeigt den Hörsaal i15 nach der Sanierung. Die Kantenabsorber sind kaum sichtbar und gut in den Raum integriert.



Abbildung 6.5: Fotos des Hörsaals i15 nach der Sanierung

In Tab. 6.2 sind die Daten der Nachhallzeitmessung des Hörsaals i15 angeführt.

Nachhallzeitmessung Hörsaal i15 nach der Sanierung	
Datum	4. März 2017
Uhrzeit	13:00 - 15:30 Uhr
Anwesende Personen	Hetz Sieglinde Kordesch Janina
Geschätzte Nachhallzeit	$\hat{T} = 0.7 \text{ s}$
Temperatur zur Messzeit	21.2 °C
Relative Luftfeuchtigkeit zur Messzeit	33.4 %
A-bewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{AF} = 47 \text{ dB}$
Unbewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{ZF} = 55 \text{ dB}$
Verwendetes Messsignal	MLS
Messsoftware	WinMLS
Verwendete Quellen	Dodekaeder und Subwoofer
Verwendete Mikrofone	NTi Messmikrofone

Tabelle 6.2: Daten zur Nachhallzeitmessung nach der Sanierung (i15)

Abb. 6.6 zeigt die gemessene Nachhallzeit T_{30} , in Tab. 6.3 sind ihre Werte aufgelistet. Schon ab 100 Hz befindet sich die Nachhallzeit innerhalb des Toleranzbandes und schwankt um den Wert $T = 0.7 \text{ s}$. Die Kantenabsorber zeigen bis zu dieser Frequenz deutlich ihre Wirkung. Herrn Fuchs' Prognose basierte zwar nur auf Empirie, entspricht aber bemerkenswerterweise völlig – die 63 Hz-Oktave ausgenommen – dem gemessenen Ergebnis.

Abb. 6.7 beinhaltet die Kastengrafik der Nachhermessung. Abb. 6.8 zeigt den Absorptionsgrad α des sanierten Raumes, welcher zu den tiefen Frequenzen hin zunimmt. Der Einfluss der Dissipation wurde hierbei für die Berechnung vernachlässigt, da sich sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur Vor- und Nachmessung nur unmerklich unterschieden.

Dieses Ergebnis wird auch beim Betreten des Raumes wahrgenommen: Das "Dröhnen" ist verschwunden, die Räumlichkeit jedoch geblieben, sodass eine natürliche Sprachqualität geschaffen wurde.

Die Kantenabsorber integrieren sich optisch sehr gut in den Raum und sind kaum als Absorber erkennbar, wenn man nicht weiß, dass der Raum durch Kantenabsorber akustisch saniert wurde.

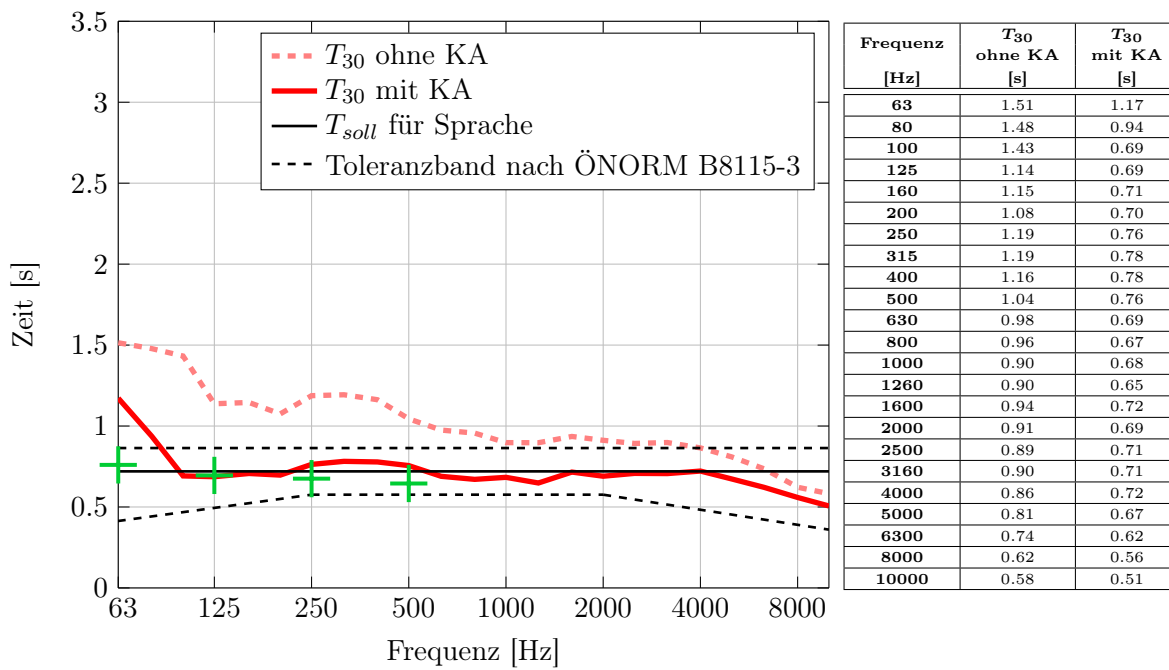


Abbildung 6.6: Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung (i15) im Vergleich zur Prognose nach Fuchs (grün markiert)

Tabelle 6.3: Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung (i15)

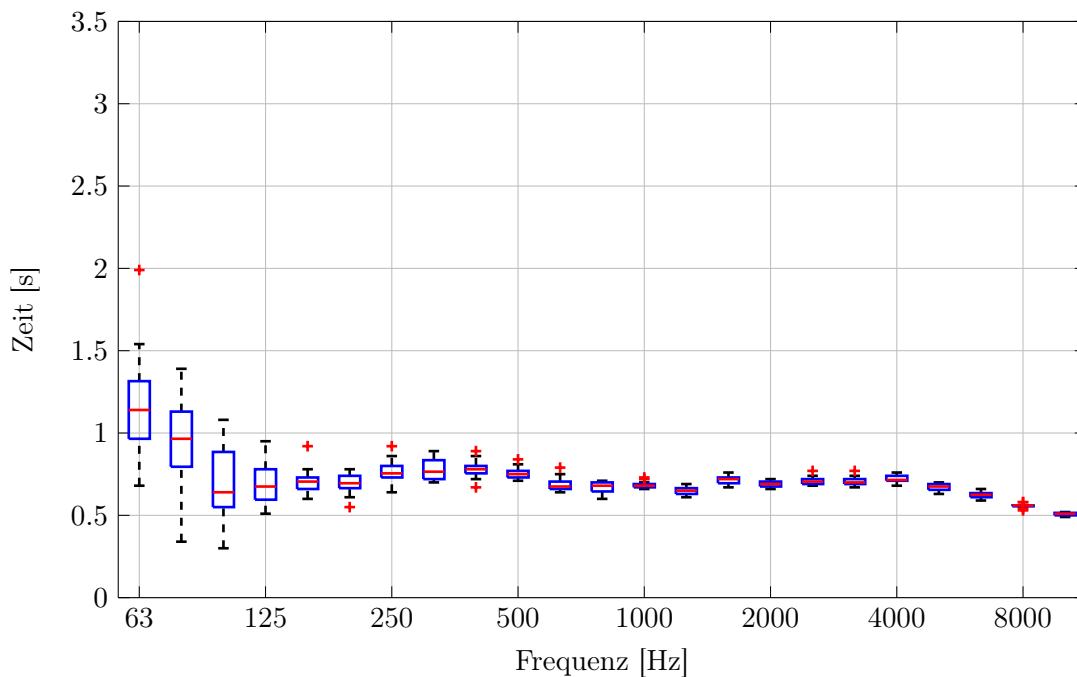
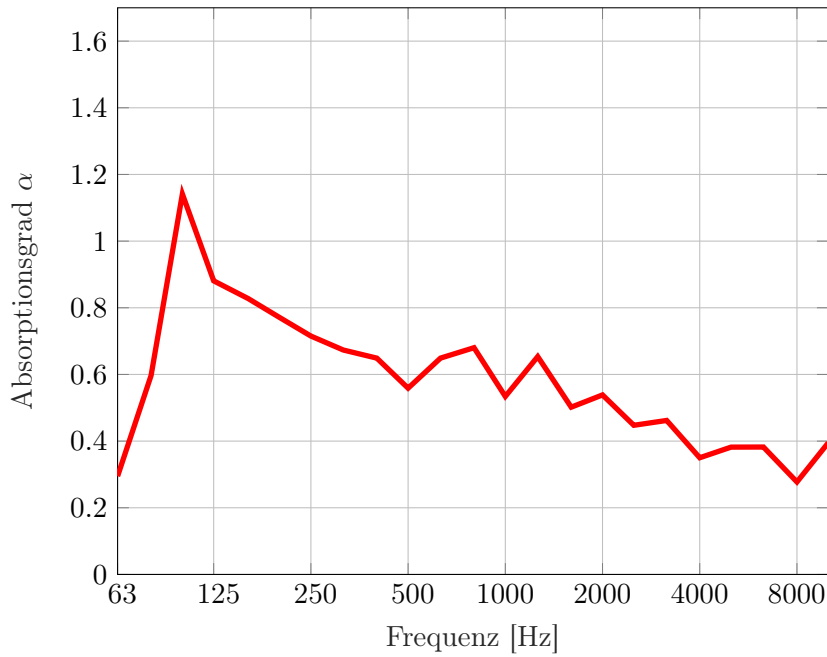


Abbildung 6.7: Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} nach der Sanierung (i15)

Abbildung 6.8: Absorptionsgrad α (i15)

Frequenz [Hz]	α
63	0.29
80	0.60
100	1.14
125	0.88
160	0.83
200	0.77
250	0.72
315	0.67
400	0.65
500	0.56
630	0.65
800	0.68
1000	0.53
1260	0.65
1600	0.50
2000	0.54
2500	0.45
3160	0.46
4000	0.35
5000	0.38
6300	0.38
8000	0.28
10000	0.39

Tabelle 6.4: Absorptionsgrad α (i15)

Die mittlere Nachhallzeit im Hörsaal i15 beträgt nach der Sanierung $T_m = 0.71$ s und das Bassverhältnis $BR = 1.02$.

In Abb. 6.9 und Abb. 6.10 sind die Impulsantworten der ersten Quellenposition jeweils für den Dodekaeder und den Subwoofer dargestellt. Repräsentativ für den gesamten Hörsaal wurde dafür die Mikrofonposition M2_2 gewählt.

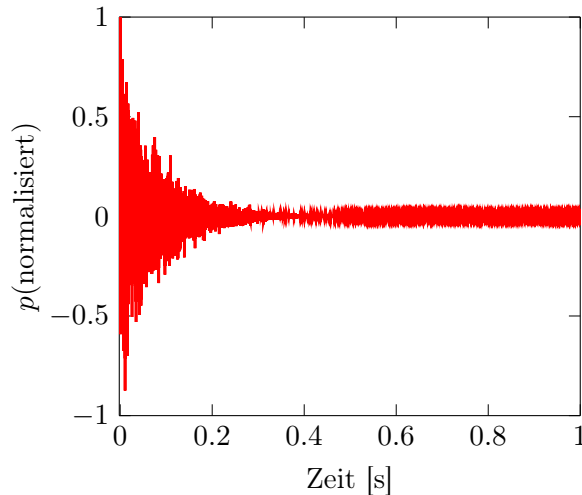


Abbildung 6.9: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i15)

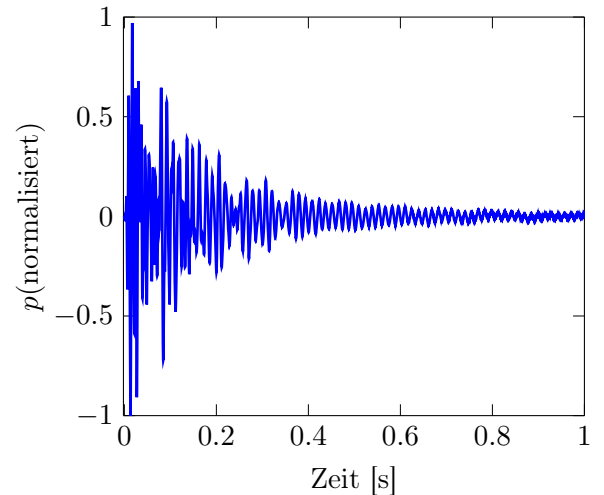


Abbildung 6.10: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i15)

6.4 Ergebnis der Sanierung des Hörsaals i14

Abb. 6.11 zeigt den Hörsaal i14 nach der Sanierung. Die Wandpaneele sind wesentlich auffälliger als die Kantenabsorber, können dafür aber auch als Pinnwand benutzt werden.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 6.11: Fotos des Hörsaals i14 nach der Sanierung

In Tab. 6.5 sind die Daten der Nachhallzeitmessung des Hörsaals i14 angeführt.

Nachhallzeitmessung Hörsaal i14 nach der Sanierung	
Datum	4. März 2017
Uhrzeit	16:00 - 18:00 Uhr
Anwesende Personen	Hetz Sieglinde Kordesch Janina
Geschätzte Nachhallzeit	$\hat{T} = 0.5$ s
Temperatur zur Messzeit	19.8 °C
Relative Luftfeuchtigkeit zur Messzeit	36.7 %
A-bewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{AF} = 47$ dB
Unbewerteter Grundgeräuschpegel	$L_{ZF} = 57$ dB
Verwendetes Messsignal	MLS
Messsoftware	WinMLS
Verwendete Quellen	Dodekaeder und Subwoofer
Verwendete Mikrofone	NTi Messmikrofone

Tabelle 6.5: Daten zur Nachhallzeitmessung nach der Sanierung (i14)

Abb. 6.12 zeigt die gemessene Nachhallzeit T_{30} , in Tab. 6.6 sind ihre Werte aufgelistet. Abb. 6.13 beinhaltet die dazugehörige Kastengrafik. Erst ab 160 Hz befindet sich die Nachhallzeit innerhalb des Toleranzbandes, zwischen 500 und 2500 Hz sogar unterhalb davon. Die Absorber wirken also besonders stark in den mittleren Frequenzen, haben jedoch weniger Einfluss auf den tiefen Frequenzbereich, was durch die geringe Bautiefe begründet ist. Außerdem wurde für die Planung von einer simulierten Nachhallzeit ausgegangen, welche viel zu hoch war. Folglich wurde die äquivalente Absorptionsfläche zu hoch berechnet – die Konsequenz ist eine Überbedämpfung des Raumes bei mittleren Frequenzen und auch bei hohen Frequenzen, die für die Sprachverständlichkeit bekanntlich entscheidend sind.

Abb. 6.14 zeigt den Absorptionsgrad α des sanierten Raumes, welcher zu den tiefen Frequenzen hin stark abnimmt, für die Mitten und Höhen jedoch sehr hoch ist. Der Einfluss der Dissipation wurde hierbei für die Berechnung vernachlässigt, da sich sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur Vor- und Nachmessung nur unmerklich unterscheiden.

Wenn man den Raum betritt, spiegelt sich dieses Ergebnis wieder – die mittleren und hohen Frequenzen sind sehr stark gedämpft, das "Dröhnen" des Raumes ist jedoch – wenn auch nicht mehr so stark ausgeprägt – geblieben. Folglich ist der natürliche Raumklang nicht mehr gewährleistet und die Sprachverständlichkeit verbesserte sich nur mäßig.

Optisch lassen die Wandpaneele den Raum insgesamt kleiner wirken und stechen im Gegensatz zu den Kantenabsorber sofort ins Auge.

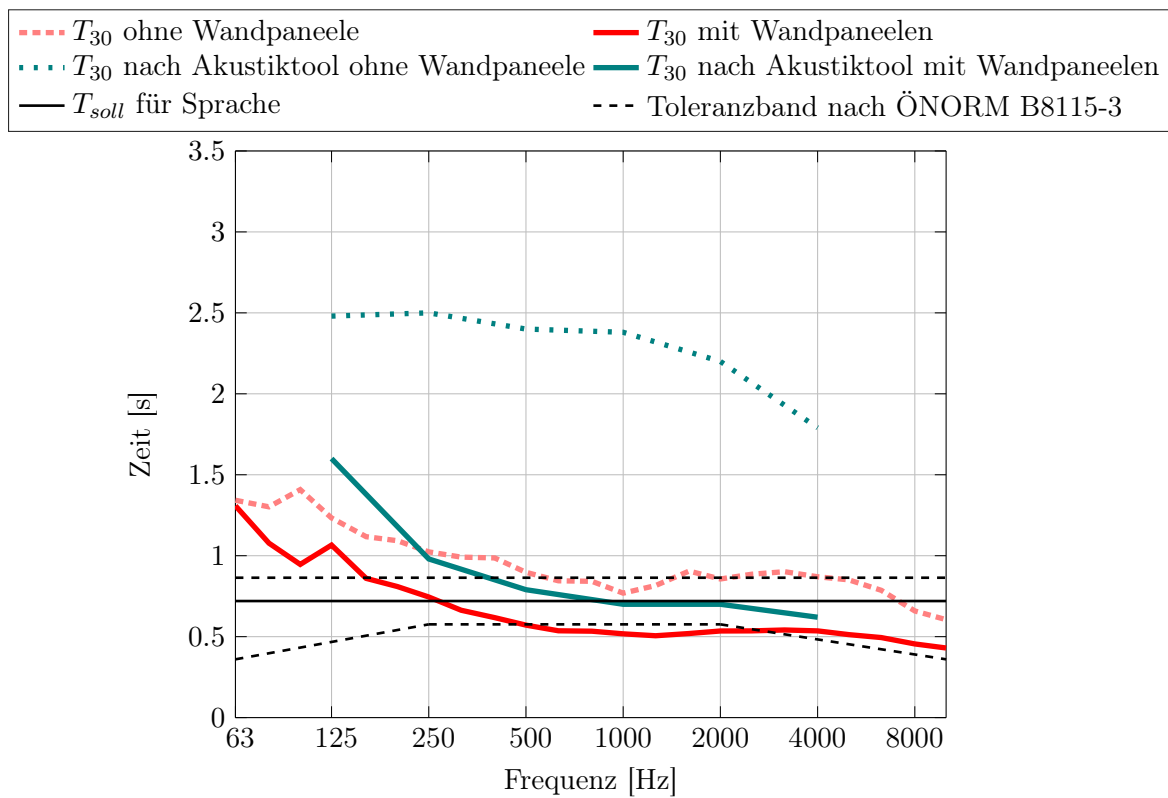
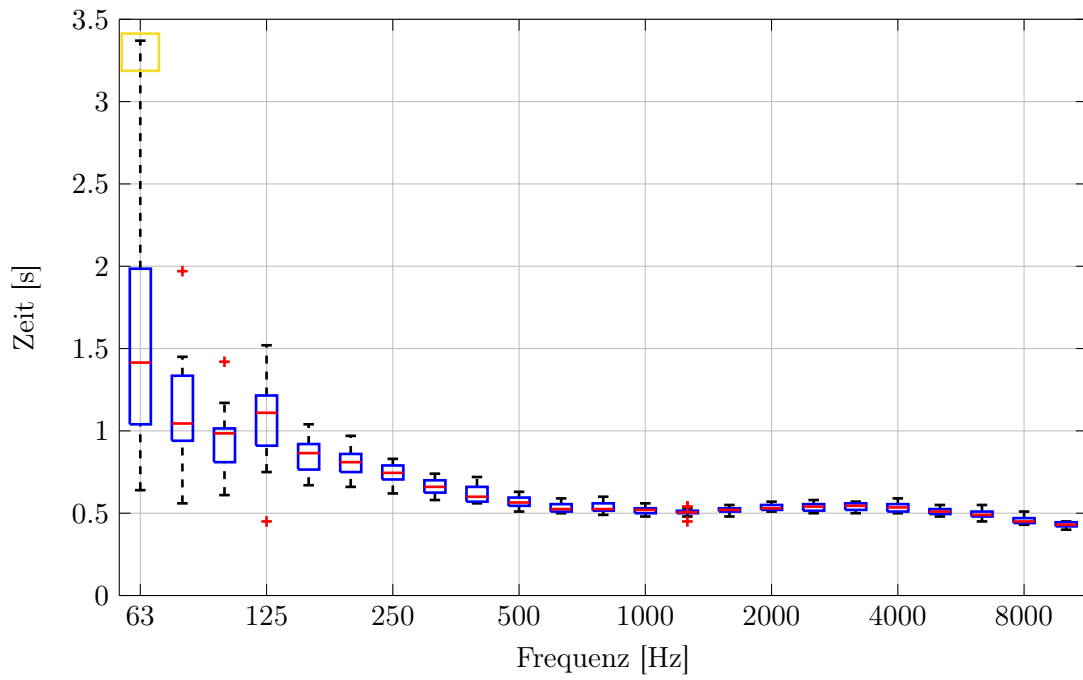
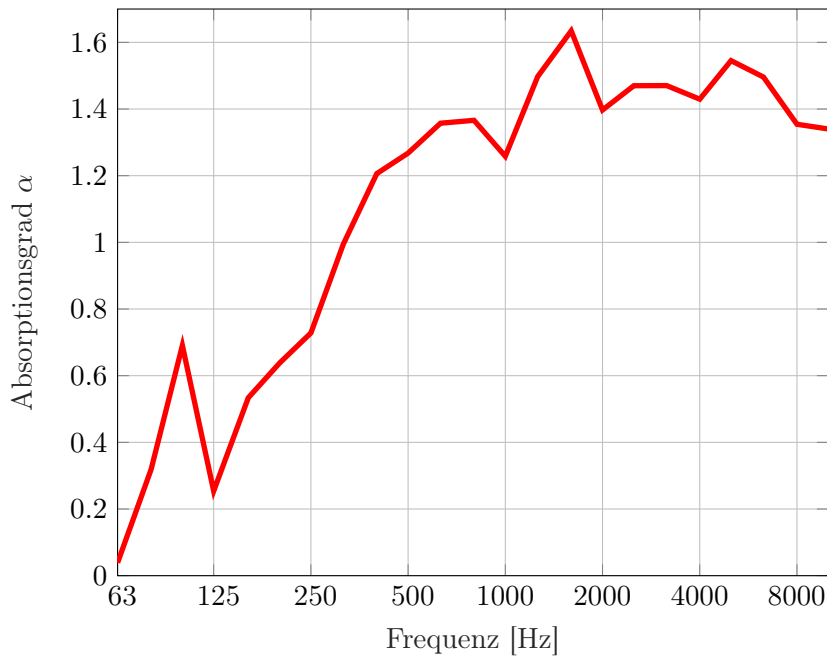


Abbildung 6.12: Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung, gemessen und mit Akustiktool berechnet (i14)

Frequenz [Hz]	T_{30} ohne Paneele [s]	T_{30} mit Paneelen [s]
63	1.34	1.31
80	1.30	1.08
100	1.41	0.95
125	1.23	1.07
160	1.12	0.86
200	1.09	0.81
250	1.02	0.75
315	0.99	0.66
400	0.99	0.62
500	0.90	0.57
630	0.85	0.54
800	0.84	0.53
1000	0.77	0.52
1260	0.82	0.51
1600	0.91	0.52
2000	0.86	0.54
2500	0.89	0.54
3160	0.90	0.54
4000	0.87	0.54
5000	0.85	0.51
6300	0.79	0.49
8000	0.66	0.46
10000	0.60	0.43

Tabelle 6.6: Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung (i14)

Abbildung 6.13: Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} nach der Sanierung (i14)

Frequenz [Hz]	α
63	0.04
80	0.32
100	0.69
125	0.25
160	0.53
200	0.64
250	0.73
315	0.99
400	1.21
500	1.27
630	1.36
800	1.37
1000	1.26
1260	1.50
1600	1.63
2000	1.40
2500	1.47
3160	1.47
4000	1.43
5000	1.55
6300	1.50
8000	1.35
10000	1.34

Abbildung 6.14: Absorptionsgrad α (i14)Tabelle 6.7: Absorptionsgrad α (i14)

Die mittlere Nachhallzeit im Hörsaal i14 beträgt nach der Sanierung $T_m = 0.55$ s und das Bassverhältnis $BR = 1.55$.

In Abb. 6.15 und Abb. 6.16 sind die Impulsantworten der ersten Quellenposition für Dodekaeder und Subwoofer dargestellt. Repräsentativ für den gesamten Hörsaal wurde dafür die Mikrofonposition M2_2 gewählt.

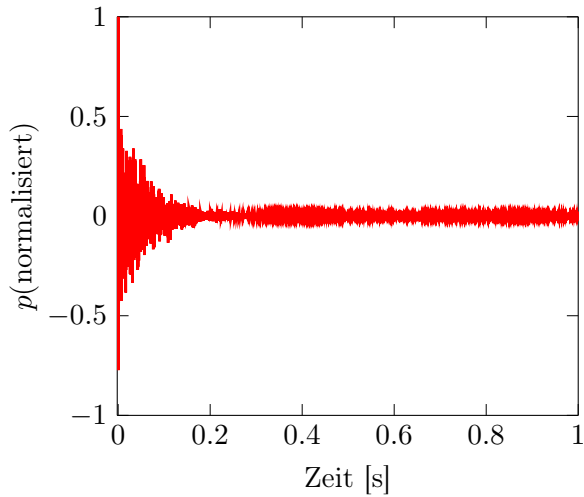


Abbildung 6.15: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i14)

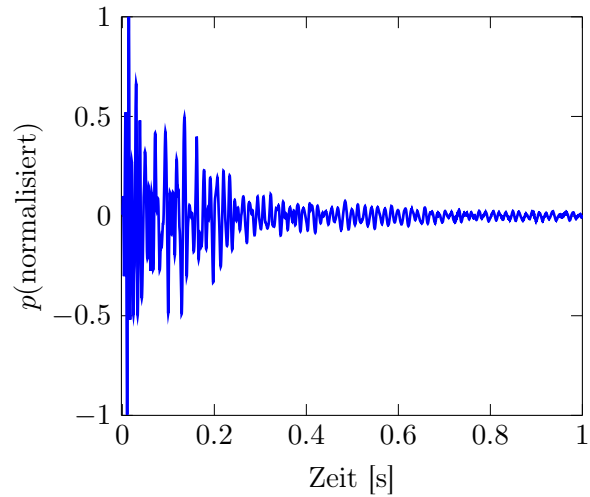


Abbildung 6.16: Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i14)

6.5 Evaluierung und Vergleich des Sanierungserfolgs

Da es bei diesem Sanierungsprojekt nicht nur um das Erreichen der gewünschten mittleren Nachhallzeit T_m geht, sondern auch um den Einfluss der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen, soll für die Evaluierung und den Vergleich des Sanierungserfolgs neben der mittleren Nachhallzeit auch das Bassverhältnis BR herangezogen werden.

	Hörsaal i15 Kantenabsorber	Hörsaal i14 Akustikpaneele
T_{soll}	0.722 s	0.758 s
$T_{m,vor}$	0.99 s	0.86 s
$T_{m,vor}$ in [%] von T_{soll}	137 %	113 %
$T_{m,nach}$	0.71 s	0.55 s
$T_{m,nach}$ in [%] von T_{soll}	98 %	73 %
ΔT_m in [%] von T_{soll}	39 %	41 %
BR_{vor}	1.21	1.33
BR_{nach}	1.02	1.55
BR_{nach} in [%] von BR_{vor}	84 %	117 %

Tabelle 6.8: Mittlere Nachhallzeit T_m und Bassverhältnis BR vor und nach der Sanierung

Betrachtet man zunächst die mittlere Nachhallzeit $T_{m,nach}$, so zeigt Tabelle 6.8, dass für den Hörsaal i15 die Soll-Nachhallzeit T_{soll} mit 98 % nahezu ideal erreicht wurde. Der Hörsaal i14 ist mit nur 73 % der Soll-Nachhallzeit deutlich überbedämpft.

Nimmt man dazu noch das Bassverhältnis BR , so ist aus Tabelle 6.8 ersichtlich, dass für den Hörsaal i15 das Bassverhältnis BR_{nach} nahezu 1 ist und durch die Kantenabsorber auf 84 % des ursprünglichen Bassverhältnisses gesenkt werden konnte. Im Hörsaal i14 ist hingegen das für Sprache schon ungünstige ursprüngliche Bassverhältnis BR_{vor} von 1.33 durch die Sanierung sogar auf 1.55 angestiegen, also auf 117 % des ursprünglichen Wertes. Das liegt an der zu tiefen Frequenzen hin sehr schwachen Absorption der Akustikpaneele.

Diese Werte lassen erwarten, dass der Hörsaal i15 seiner Größe entsprechend eine gute mittlere Nachhallzeit hat und mit der Verringerung des Bassverhältnisses auf 1 durch die Sanierung auch entdröhnt wurde. Beim Hörsaal i14 ist zu erwarten, dass er durch die Überbedämpfung der mittleren Nachhallzeit für seine Größe als trocken empfunden wird und durch den Anstieg des Bassverhältnisses auf 1.55 in Bezug auf das Dröhnen eine deutliche Schwäche aufweist, was sich bei üblichen "Betriebsgeräuschen" wie Sesselrücken und dergleichen erkennbar macht.

Zusammenfassend ist also bei der Betrachtung von mittlerer Nachhallzeit und Bassverhältnis der Sanierungsvariante mit Kantenabsorbieren gegenüber der Sanierungsvariante mit Akustikpaneelen aus akustischer Sicht eindeutig der Vorzug zu geben. Es bleibt abzuwarten, ob diese zahlenmäßig sehr eindeutigen Ergebnisse von den Nutzern der Hörsäle subjektiv ebenso empfunden werden und wie groß der akustische Qualitätsunterschied eingestuft wird.

7

Zusammenfassung und Ausblick

Das eine Ziel dieser Bachelorarbeit war die Sanierung der beiden Hörsäle, einerseits durch Kantenabsorber, andererseits durch herkömmliche Absorber, um den direkten Vergleich der Wirkungsweisen dieser beiden Schallabsorber anhand zweier Anschauungsobjekte genauer untersuchen bzw. sich auch anhören zu können, welche auch als Fallbeispiele in der Lehre der Raumakustik der TU Graz herangezogen werden können. Denn die gemessenen Resultate sind auch subjektiv wahrnehmbar: Während im Hörsaal i14 die für die Sprache so wichtigen mittleren und hohen Frequenzen sogar eher überbedämpft wurden, woraus eine höhere Sprachenergie, die aufgebracht werden muss, resultiert, was sich auf den Lehr- und Lernbetrieb ungünstig auswirkt, wurde im Hörsaal i15 durch das Konzept der Bassdämpfung ein natürlicher Raumklang kreiert. Bemerkenswert bei diesem Hörsaal ist auch der Verlauf der Nachhallzeit, der sich nahezu konstant über die Frequenz ab 100 Hz erstreckt.

In Abb. 7.1 ist diese Bilanz der beiden Testräume noch einmal gegenübergestellt, auch im Vergleich zur Situation vor der Sanierung. Beim porösen Absorber (Wandpaneel im Hörsaal i14) wurde ab 500 Hz zwar ein gleichmäßiger Verlauf der Nachhallzeit erreicht, wobei diese jedoch schon so niedrig ist, dass der Raum überbedämpft wurde. Hin zu den Tiefen steigt die Nachhallzeit kontinuierlich, sodass das Dröhnen bleibt, wenn auch geringfügig gemindert. Konträr dazu die Sanierung mit Kantenabsorbern (Hörsaal i15): Eindeutig zu erkennen ist die hohe Tiefenabsorption im Gegensatz bei den Mitten und Höhen. Schon ab 100 Hz wurde ein ebener Verlauf der Nachhallzeit über der Frequenz geschaffen, hin zur 63 Hz-Oktave gibt es nur einen kleinen Anstieg.

Auch das Bassverhältnis und die mittlere Nachhallzeit veranschaulichen dieses Ergebnis: Die Soll-Nachhallzeit des Hörsaals i14 wurde mit nur 73 % erreicht, das Bassverhältnis wurde sogar auf 1.55 erhöht, was die Überbedämpfung und das Dröhnen des Raumes widerspiegelt. Die Soll-Nachhallzeit des Hörsaals i15 wurde hingegen mit nahezu idealen 98 % erreicht, das Bassverhältnis wurde auf annähernd 1 reduziert, was den Sanierungserfolg mittels Kantenabsorber bestärkt.

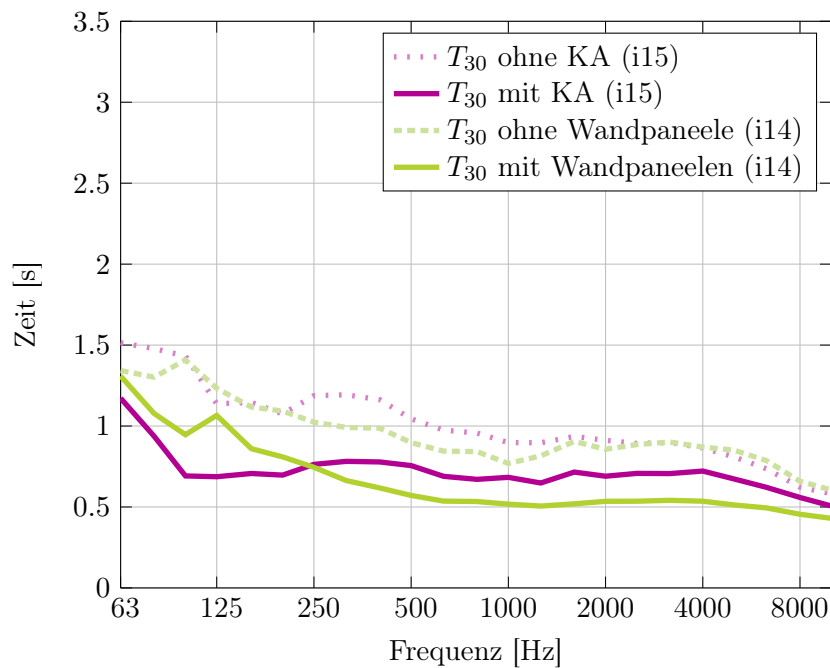


Abbildung 7.1: Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung beider Hörsäle

Eine interessante Fortsetzung dieser Bachelorarbeit wäre eine Analyse verschiedener Lernsituationen in den Hörsälen, sei es ein Frontalvortrag oder eine Gruppendiskussion, unter psychoakustischer Beurteilung, um das gemessene Resultat auch im realen Arbeitsprozess zu prüfen. Hierbei könnte eine Detailuntersuchung mit Nutzerbefragung durchgeführt werden in Hinblick auf das Dröhnverhalten des Raumes. Dies bietet sich an, weil zwei unterschiedlich sanierte Räume vorliegen.

Das andere Ziel war die Erforschung und Weiterentwicklung mikroperforierter Platten und die Kombination dieser mit Kantenabsorbieren im Hinblick auf die Entwicklung neuartiger Schallabsorber, welche in der Raumakustik bahnbrechende Perspektiven eröffnen könnten. Im Laufe der Messungen im Hallraum wurde immer mehr klar, wie wichtig die kreative Experimentierfreudigkeit bezüglich verschiedener Mess-Setups ist, um unerwartet gute und hochinteressante Ergebnisse zu erzielen. Während die Anordnung 'Kante', welche die eigentliche Grundidee der Hallraummessung behandelte, nämlich die Verschmelzung zweier Schallabsorptionskonzepte – die Bassdämpfung und die Mikroperforation – die hohen Erwartungen verfehlte, wirkte hingegen beispielsweise die Anordnung 'Baffles' erstaunlich breitbandig, was zur Überlegung führt, dies auch in der Praxis anzuwenden. Hierbei ist es auch möglich, die Baffles aufgrund ihres simplen Aufbaus an der Decke durch eine Klippkonstruktion aufzuhängen.

In jedem Falle öffnen sich durch Anwendung mikroperforierter Platten neue Türen für die Schallabsorption in Einrichtungen, in denen in dieser Hinsicht noch hohe Anforderungen beispielsweise im Hygiene- und Brandschutzbereich erfüllt werden müssen.

Durch Einsatz von Kantenabsorbieren halten sich die Kosten gering, trotzdem wird eine hohe akustische Qualitätsbesserung erzielt. Jedoch gibt es hierfür noch kein ausgereiftes Rechenmodell zur Planung der Sanierung, sodass in diesem Bereich sicherlich noch Forschungsbedarf besteht.

8

Anhang

8.1 Datenblätter

8.1.1 Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)

Messprotokoll der Schallabsorption

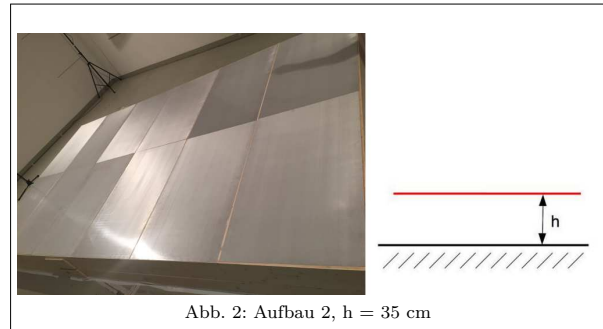
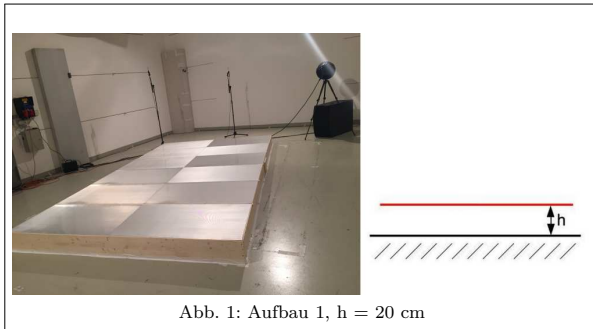
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: CKM Building Material Corp., Taiwan
 Produktname: SoundMicro Panel Alum, Plattendicke 1 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden liegend über einen Holzrahmen im Abstand von 20 cm zum Boden in die Mitte des Hallraumes angebracht (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Aufbau 2 entspricht Aufbau 1 mit dem Unterschied, dass der Abstand zum Boden auf 35 cm erweitert wurde (s. Abb. 2).

	Aufbau 1	Aufbau 2		Aufbau 1	Aufbau 2
Temperatur	19.5 °C	19.4 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	49.5 %	50.9 %
Messdatum	21.11.2016		Hallraumvolumen	244 m ³	
Musterfläche	0.7 m · 1.2 m · 12 = 10.08 m ²		Abstand zur schallharten Oberfläche	20 cm zum Boden	35 cm zum Boden

Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α	
	Aufbau 1	Aufbau 2
40	0.13	0.20
50	0.18	0.24
63	0.10	0.13
80	0.19	0.25
100	0.10	0.09
125	0.15	0.16
160	0.39	0.55
200	0.58	0.75
250	0.64	0.85
315	0.77	0.84
400	0.84	0.73
500	0.89	0.55
630	0.80	0.51
800	0.58	0.67
1000	0.46	0.58
1260	0.59	0.61
1600	0.60	0.60
2000	0.56	0.62
2500	0.59	0.61
3160	0.57	0.59
4000	0.52	0.56
5000	0.49	0.52

Tab. 1: Absorptionsgrad α

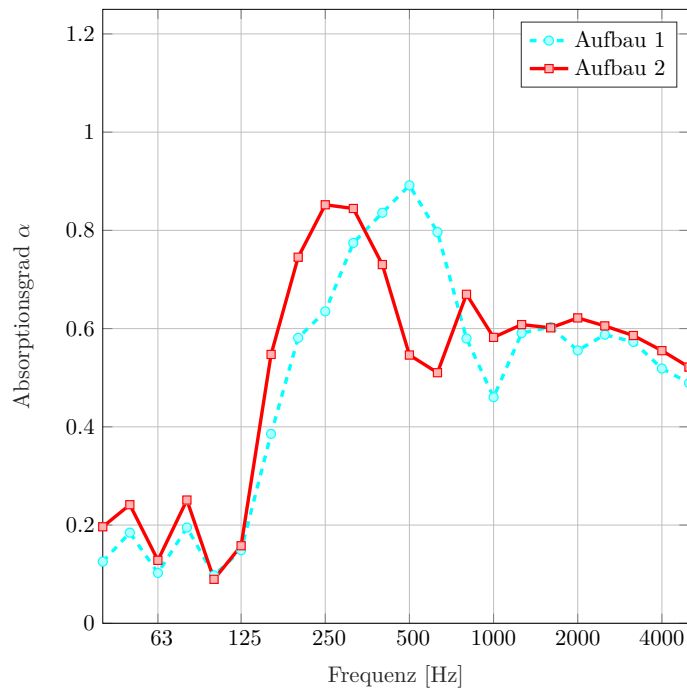


Abb. 3: Absorptionsgrad α

8.1.2 Anordnung 'Kante' und '45°-Winkel' (SoundMicro)

Messprotokoll der Schallabsorption

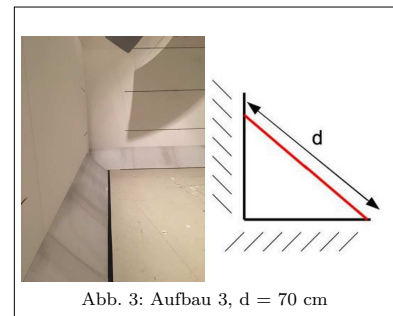
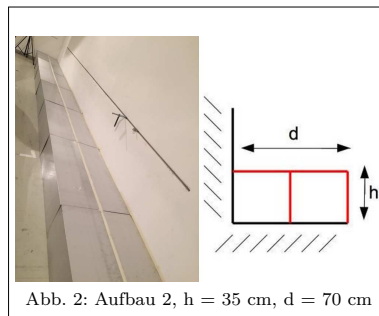
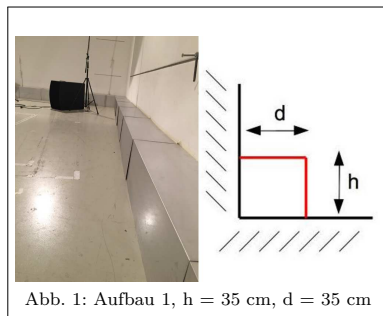
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: CKM Building Material Corp., Taiwan
 Produktname: SoundMicro Panel Alum, Plattendicke 1 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten (MPA-Platten) wurden im 90°-Winkel in die Kanten des Hallraumes angebracht, sodass ein geschlossenes Luftvolumen vorhanden war (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Die MPA-Platten wurden jeweils in zweifacher Anordnung im 90°-Winkel in die Kanten des Hallraumes angebracht, sodass ein doppeltes geschlossenes Luftvolumen vorhanden war (s. Abb. 2).
 Aufbau 3: Die MPA-Platten wurden im 45°-Winkel in die Kanten des Hallraumes gelegt (s. Abb. 3).

	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3		Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3
Temperatur	19.5 °C	19.4 °C	19.1 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	54.2 %	54.4 %	54.5 %
Messdatum	22.11.2016		24.11.2016	Hallraumvolumen	244 m ³		
Musterfläche	2 · 0.35 m · 1.2 m · 14 = 11.76 m ²	3 · 0.35 m · 1.2 m · 7 = 8.82 m ²	0.7 m · 1.2 m · 14 = 11.76 m ²	Abstand zur schallharten Oberfläche	35 cm zur Wand	70 cm zur Wand	alle Werte zwischen 0 und 35 cm

Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α		
	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3
40	0.00	0.05	0.03
50	0.00	0.05	0.05
63	0.11	0.19	0.11
80	0.15	0.04	0.06
100	0.52	0.45	0.41
125	0.46	0.65	0.42
160	0.75	0.89	0.55
200	1.10	0.88	0.75
250	1.21	0.97	0.81
315	1.03	0.89	0.74
400	0.79	0.83	0.62
500	0.48	0.56	0.53
630	0.52	0.60	0.55
800	0.64	0.68	0.54
1000	0.51	0.57	0.51
1260	0.53	0.56	0.50
1600	0.51	0.56	0.50
2000	0.51	0.56	0.50
2500	0.50	0.56	0.49
3160	0.49	0.55	0.48
4000	0.45	0.49	0.47
5000	0.43	0.48	0.44

Tab. 1: Absorptionsgrad α

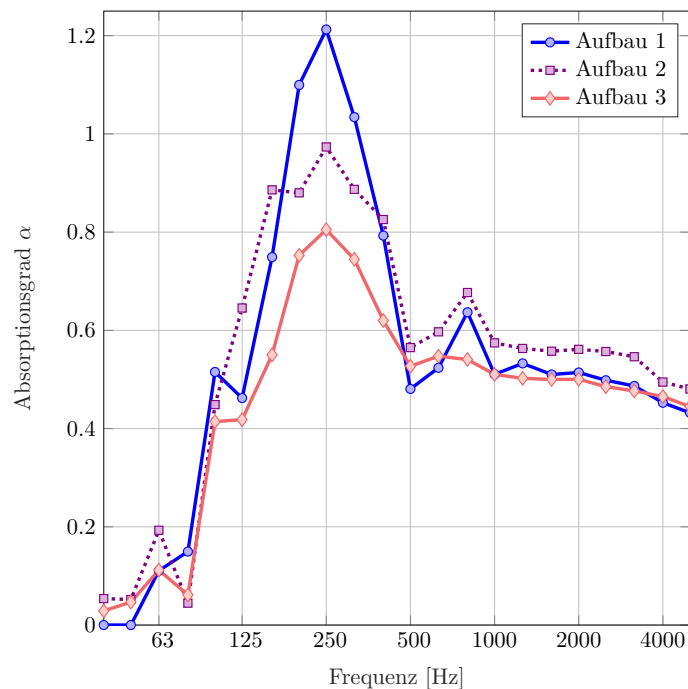


Abb. 4: Absorptionsgrad α

8.1.3 Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)

Messprotokoll der Schallabsorption

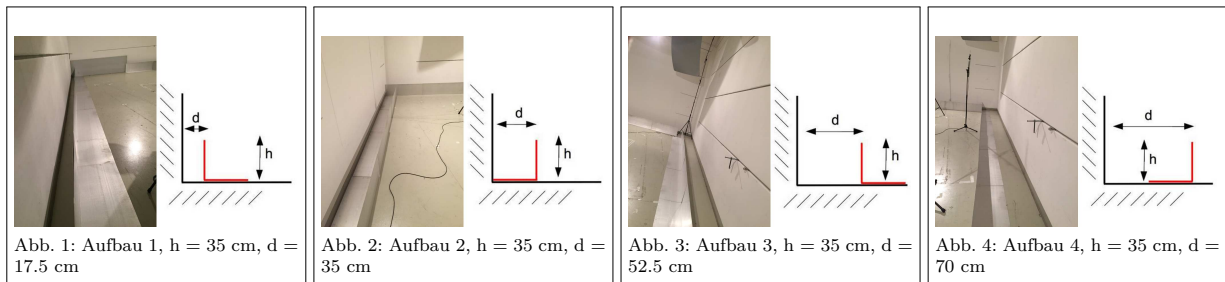
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

- Hersteller: CKM Building Material Corp., Taiwan
 Produktname: SoundMicro Panel Alum, Plattendicke 1 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden längs in der Mitte gekantet und parallel im Abstand von 17.5 cm zur Wand aufgestellt (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Aufbau 2 entspricht Aufbau 1 mit dem Unterschied, dass der Abstand von Platte zu Wand auf 35 cm vergrößert wurde (s. Abb. 2).
 Aufbau 3: Aufbau 3 entspricht Aufbau 1 mit dem Unterschied, dass der Abstand von Platte zu Wand auf 52.5 cm vergrößert wurde (s. Abb. 3).
 Aufbau 4: Aufbau 4 entspricht Aufbau 1 mit dem Unterschied, dass der Abstand von Platte zu Wand auf 70 cm vergrößert wurde (s. Abb. 4).

	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3	Aufbau 4		Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3	Aufbau 4
Temperatur	19.3 °C	19.4 °C	19.1 °C	19.3 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	53.4 %	53.9 %	54.1 %	54 %
Messdatum	23.11.2016	22.11.2016	23.11.2016	22.11.2016	Hallraumvolumen	244 m ³			
Musterfläche	0.35 m · 1.2 m · 14 = 5.88 m ²				Abstand zur Wand	17.5 cm	35 cm	52.5 cm	70 cm

Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α			
	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3	Aufbau 4
40	0.04	0.10	0.07	0.12
50	0.10	0.17	0.16	0.22
63	0.06	0.15	0.16	0.29
80	0.03	0.20	0.26	0.36
100	0.11	0.09	0.14	0.19
125	0.17	0.23	0.29	0.30
160	0.22	0.52	0.75	0.72
200	0.36	0.76	0.87	0.82
250	0.53	0.93	0.86	0.64
315	0.68	0.83	0.63	0.54
400	0.73	0.70	0.43	0.68
500	0.75	0.47	0.57	0.57
630	0.74	0.49	0.54	0.55
800	0.63	0.56	0.50	0.53
1000	0.46	0.51	0.50	0.54
1260	0.45	0.54	0.49	0.53
1600	0.53	0.53	0.49	0.55
2000	0.49	0.53	0.52	0.55
2500	0.52	0.51	0.50	0.54
3160	0.51	0.54	0.52	0.53
4000	0.49	0.54	0.53	0.54
5000	0.48	0.55	0.51	0.53

Tab. 1: Absorptionsgrad α

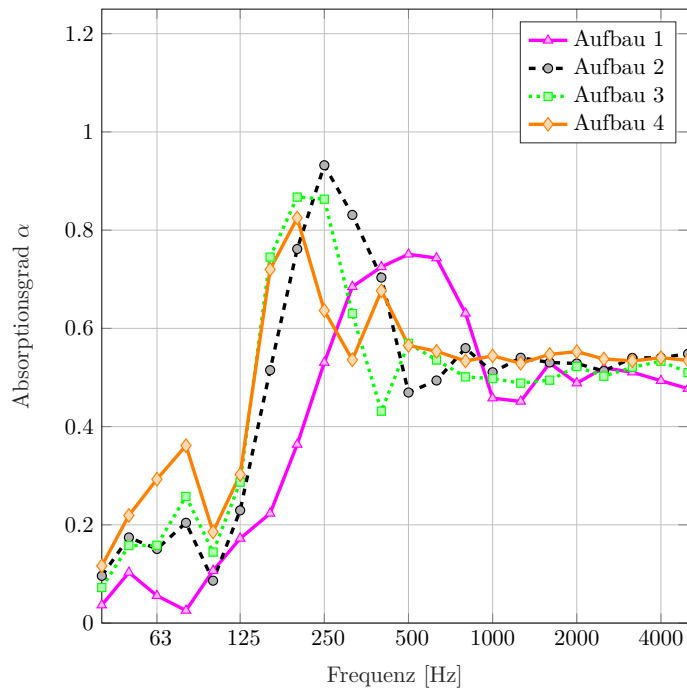


Abb. 5: Absorptionsgrad α

8.1.4 Anordnung 'Mitte' ($h = 35 \text{ cm}$) und 'L-Form niedrig' ($d = 35 \text{ cm}$) (SoundMicro)

Messprotokoll der Schallabsorption

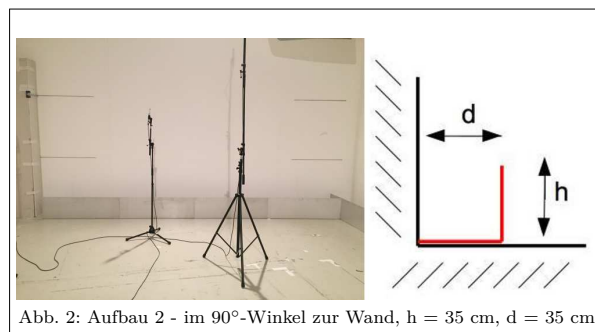
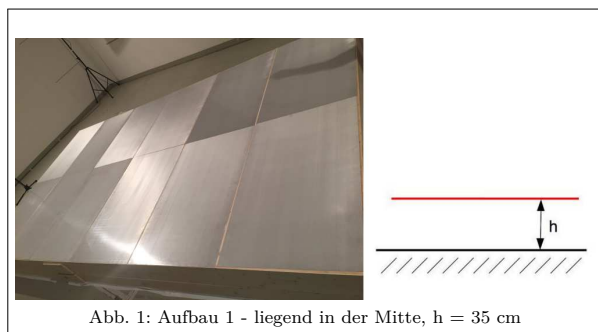
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: CKM Building Material Corp., Taiwan
 Produktname: SoundMicro Panel Alum, Plattendicke 1 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden liegend über einen Holzrahmen im Abstand von 35 cm zum Boden in die Mitte des Hallraumes angebracht (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden längs in der Mitte gekantet, sodass sie in die Kanten des Hallraumes im 90°-Winkel angebracht werden konnten (s. Abb. 2).

	Aufbau 1	Aufbau 2		Aufbau 1	Aufbau 2
Temperatur	19.4 °C		rel. Luftfeuchtigkeit	50.9 %	53.9 %
Messdatum	21.11.2016	22.11.2016	Halbraumvolumen	244 m ³	
Musterfläche	0.7 m · 1.2 m · 12 = 10.08 m ²	0.35 m · 1.2 m · 14 = 5.88 m ²	Abstand zur schallharten Oberfläche	35 cm zum Boden	35 cm zur Wand

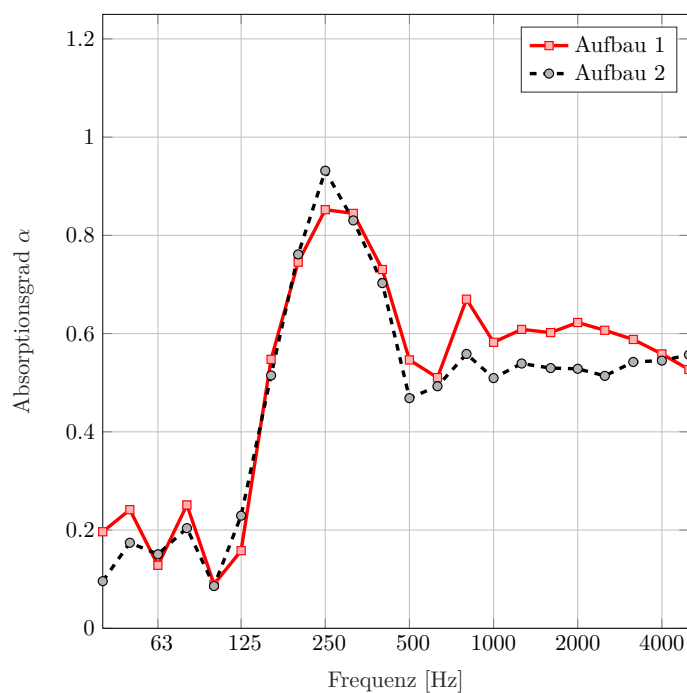
Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α	
	Aufbau 1	Aufbau 2
40	0.20	0.10
50	0.24	0.17
63	0.13	0.15
80	0.25	0.20
100	0.09	0.09
125	0.16	0.23
160	0.55	0.51
200	0.75	0.76
250	0.85	0.93
315	0.84	0.83
400	0.73	0.70
500	0.55	0.47
630	0.51	0.49
800	0.67	0.56
1000	0.58	0.51
1260	0.61	0.54
1600	0.60	0.53
2000	0.62	0.53
2500	0.61	0.51
3160	0.59	0.54
4000	0.56	0.55
5000	0.53	0.56

Tab. 1: Absorptionsgrad α



8.1.5 Anordnung 'Baffles' und 'L-Form hoch' (SoundMicro)

Messprotokoll der Schallabsorption

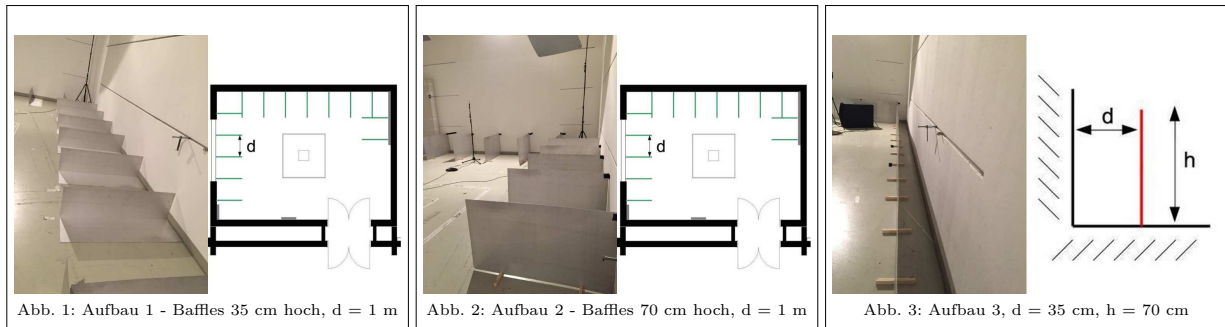
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: CKM Building Material Corp., Taiwan
 Produktname: SoundMicro Panel Alum, Plattendicke 1 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten (MPA-Platten) mit der Höhe von 35 cm wurden orthogonal zur Wand als freischwingende Platten im jeweiligen Abstand von 1 m zueinander aufgestellt (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Aufbau 1b entspricht Aufbau 1a mit dem Unterschied, dass die Höhe der Baffles 70 cm betrug (s. Abb. 2).
 Aufbau 3: Die MPA-Platten wurden parallel im Abstand von 35 cm zur Wand nebeneinander aufgestellt (s. Abb. 3).

	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3		Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3
Temperatur	19.2 °C	19.3 °C	20 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	53.9 %	53 %	52.3 %
Messdatum	23.11.2016	24.11.2016		Hallraumvolumen	244 m ³		
Musterfläche	0.35 m · 1.2 m · 14 = 5.88 m ²	0.7 m · 1.2 m · 14 = 11.76 m ²		Abstand zur Oberfläche	1 m zueinander		35 cm zur schallharten Wand

Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α		
	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3
40	0.20	0.16	0.08
50	0.26	0.37	0.02
63	0.38	0.40	0.11
80	0.39	0.39	0.17
100	0.32	0.27	0.14
125	0.48	0.56	0.17
160	0.76	0.51	0.42
200	0.55	0.36	0.52
250	0.61	0.37	0.58
315	0.69	0.44	0.64
400	0.56	0.42	0.60
500	0.55	0.43	0.44
630	0.51	0.45	0.41
800	0.50	0.39	0.49
1000	0.48	0.41	0.44
1260	0.47	0.42	0.46
1600	0.48	0.44	0.47
2000	0.50	0.42	0.49
2500	0.48	0.43	0.48
3160	0.51	0.41	0.49
4000	0.51	0.43	0.47
5000	0.54	0.41	0.49

Tab. 1: Absorptionsgrad α

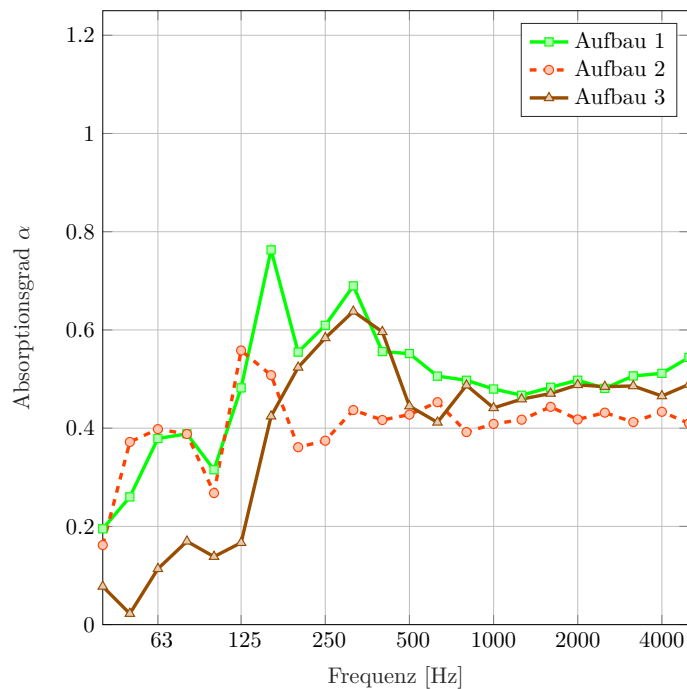


Abb. 4: Absorptionsgrad α

8.1.6 Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)

Messprotokoll der Schallabsorption

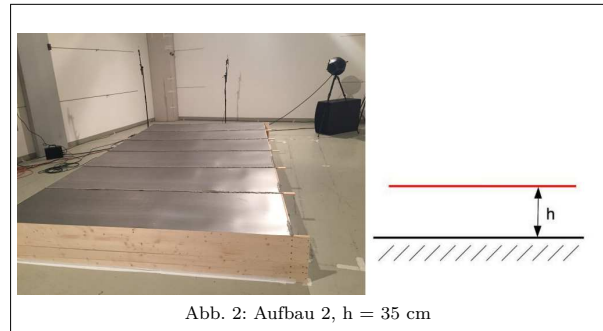
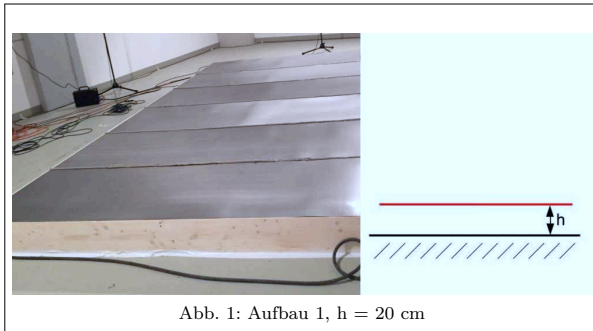
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: ANDRITZ
 Produktname: SonoPerf A, Lochflächenverhältnis 5 %, Blechdicke 0.75 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden liegend über einen Holzrahmen im Abstand von 20 cm zum Boden in die Mitte des Hallraumes angebracht (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Aufbau 2 entspricht Aufbau 1 mit dem Unterschied, dass der Abstand zum Boden auf 35 cm erweitert wurde (s. Abb. 2).

	Aufbau 1	Aufbau 2		Aufbau 1	Aufbau 2
Temperatur	19.3 °C	19.4 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	51.9 %	50.3 %
Messdatum	21.11.2016		Hallraumvolumen	244 m ³	
Musterfläche	0.71 m · 2.3 m · 6 = 9.8 m ²		Abstand zur schallharten Oberfläche	20 cm zum Boden	35 cm zum Boden

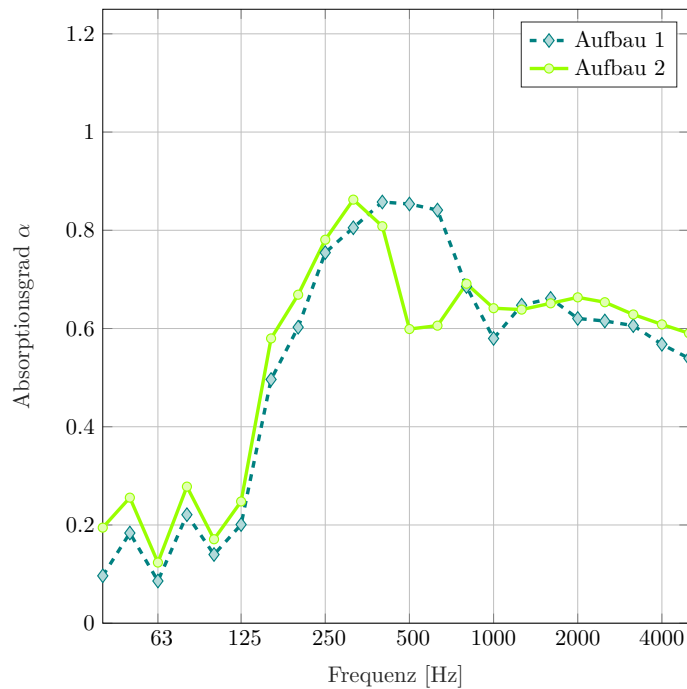
Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α	
	Aufbau 1	Aufbau 2
40	0.10	0.19
50	0.18	0.26
63	0.09	0.12
80	0.22	0.28
100	0.14	0.17
125	0.20	0.25
160	0.50	0.58
200	0.60	0.67
250	0.75	0.78
315	0.81	0.86
400	0.86	0.81
500	0.85	0.60
630	0.84	0.61
800	0.69	0.69
1000	0.58	0.64
1260	0.65	0.64
1600	0.66	0.65
2000	0.62	0.66
2500	0.62	0.65
3160	0.61	0.63
4000	0.57	0.61
5000	0.54	0.59

Tab. 1: Absorptionsgrad α



8.1.7 Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)

Messprotokoll der Schallabsorption

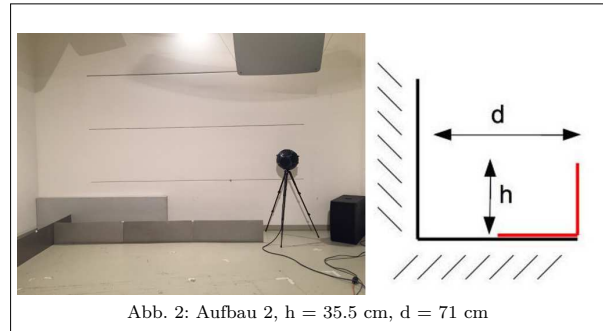
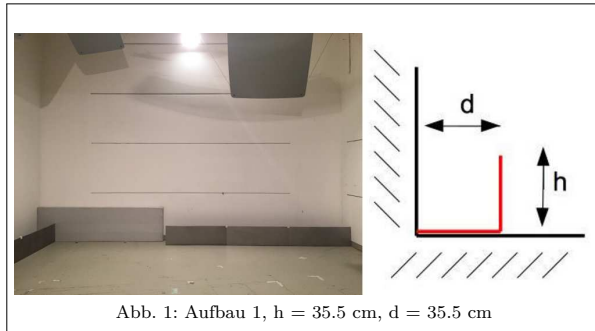
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: ANDRITZ
 Produktname: SonoPerf A, Lochflächenverhältnis 5 %, Blechdicke 0.75 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden längs in der Mitte gekantet, sodass sie in die Kanten des Hallraumes im 90°-Winkel angebracht werden konnten. Der Abstand der Platte zur Wand betrug somit 35.5 cm (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Aufbau 2 entspricht Aufbau 1 mit dem Unterschied, dass sich der Abstand von Platte zu Wand auf 71 cm verdoppelte (s. Abb. 2).

	Aufbau 1	Aufbau 2		Aufbau 1	Aufbau 2
Temperatur	19.5 °C	19.4 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	51.6 %	52.8 %
Messdatum	23.11.2016		Hallraumvolumen	244 m ³	
Musterfläche	0.355 m · 1.15 m · 12 = 4.9 m ²		Abstand zur schallharten Oberfläche	35.5 cm zur Wand	71 cm zur Wand

Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α	
	Aufbau 1	Aufbau 2
40	0.11	0.13
50	0.22	0.32
63	0.11	0.27
80	0.18	0.40
100	0.14	0.22
125	0.27	0.35
160	0.75	0.87
200	0.99	0.75
250	1.09	0.69
315	1.01	0.66
400	0.78	0.75
500	0.64	0.69
630	0.68	0.69
800	0.73	0.66
1000	0.67	0.62
1260	0.70	0.63
1600	0.71	0.64
2000	0.71	0.68
2500	0.73	0.69
3160	0.76	0.72
4000	0.76	0.76
5000	0.74	0.78

Tab. 1: Absorptionsgrad α

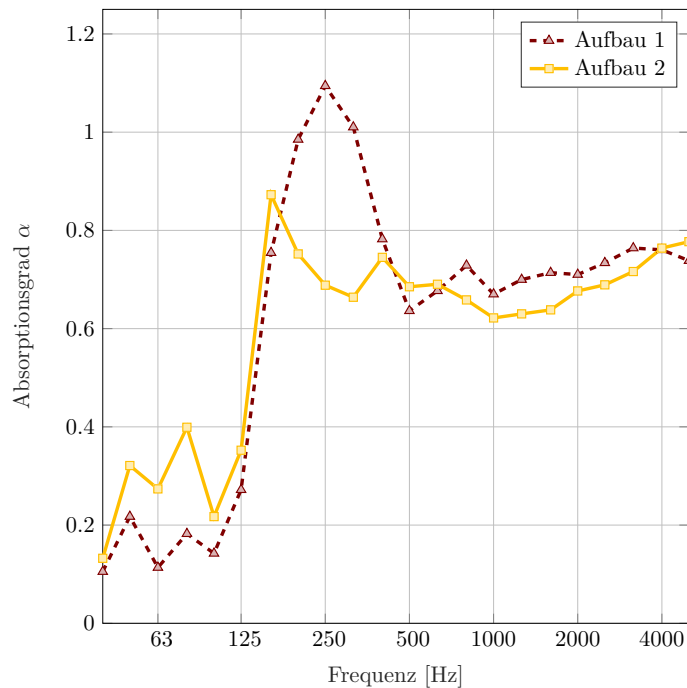


Abb. 3: Absorptionsgrad α

8.1.8 Anordnung 'Mitte' ($h = 35 \text{ cm}$) und 'L-Form niedrig' ($d = 35 \text{ cm}$) (SonoPerf A)

Messprotokoll der Schallabsorption

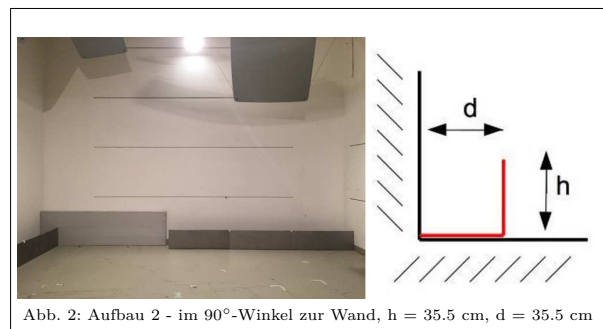
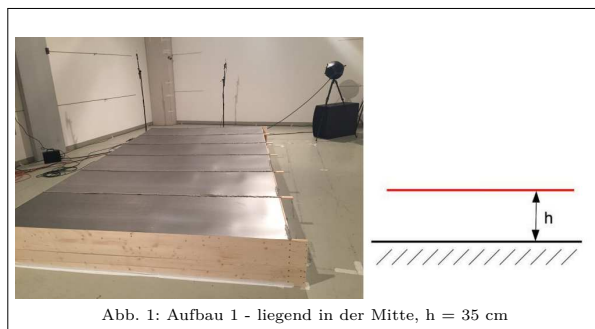
(in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 354)

Prüfobjekt:

Hersteller: ANDRITZ
 Produktname: SonoPerf A, Lochflächenverhältnis 5 %, Blechdicke 0.75 mm
 Aufbau 1: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden liegend über einen Holzrahmen im Abstand von 35 cm zum Boden in die Mitte des Hallraumes angebracht (s. Abb. 1).
 Aufbau 2: Die mikroperforierten Akustikplatten wurden längs in der Mitte gekantet, sodass sie in die Kanten des Hallraumes im 90°-Winkel angebracht werden konnten (s. Abb. 2).

	Aufbau 1	Aufbau 2		Aufbau 1	Aufbau 2
Temperatur	19.4 °C	19.5 °C	rel. Luftfeuchtigkeit	50.3 %	51.6 %
Messdatum	21.11.2016	23.11.2016	Hallraumvolumen	244 m ³	
Musterfläche	0.71 m · 2.3 m · 6 = 9.8 m ²	0.355 m · 1.15 m · 12 = 4.9 m ²	Abstand zur schallharten Oberfläche	35 cm zum Boden	35.5 cm zur Wand

Messaufbau:



Messresultate (in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 354):

Frequenz [Hz]	α	
	Aufbau 1	Aufbau 2
40	0.19	0.11
50	0.26	0.22
63	0.12	0.11
80	0.28	0.18
100	0.17	0.14
125	0.25	0.27
160	0.58	0.75
200	0.67	0.98
250	0.78	1.09
315	0.86	1.01
400	0.81	0.78
500	0.60	0.64
630	0.61	0.68
800	0.69	0.73
1000	0.64	0.67
1260	0.64	0.70
1600	0.65	0.71
2000	0.66	0.71
2500	0.65	0.73
3160	0.62	0.76
4000	0.60	0.75
5000	0.58	0.72

Tab. 1: Absorptionsgrad α

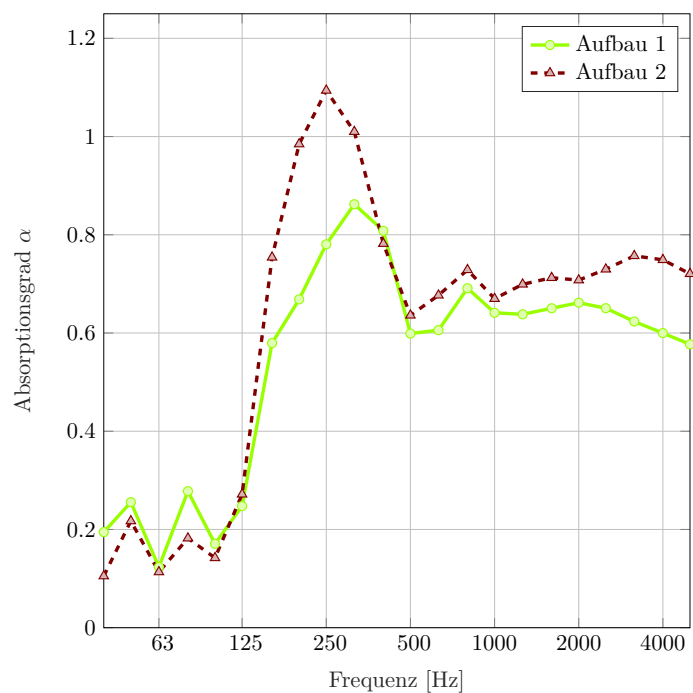


Abb. 3: Absorptionsgrad α

Literaturverzeichnis

- [Casa acustica, 2014] Casa acustica (2014). "Kanten-Absorber KA". <http://www.casa-acustica.de/index.php/was-uns-bewegt/kanten-absorber-ka.html>. Eingesehen am 28.01.2017.
- [Fuchs, 2010] Fuchs, H. V. (2010). "Schallabsorber und Schalldämpfer". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage.
- [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011] Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X. (2011). "Zur Steigerung der Wirkung passiver Absorber: Schall in Raumkanten schlucken". *gi Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik*.
- [Fuchs H. V.;Zha X., 2006] Fuchs H. V.;Zha X. (2006). "Micro-Perforated Structures as Sound Absorbers - A Review and Outlook". *Acta Acustica united with Acustica*.
- [Fuchs H. V.;Zha X., 2014] Fuchs H. V.;Zha X. (2014). "Requirement for Low-Frequency Reverberation in Spaces for Music: Part 1: Smaller Rooms for Different Uses". *Foundation Casa Acustica*.
- [ISO 9613-1, 1993] ISO 9613-1 (1993). "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere". *International Organization for Standardization, Geneva*.
- [ÖNORM B 8115-3, 2015] ÖNORM B 8115-3 (2015). "Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 3: Raumakustik". *Austrian Standards*.
- [ÖNORM EN ISO 3382-2, 2009] ÖNORM EN ISO 3382-2 (2009). "Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik, Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen". *Austrian Standards*.
- [ÖNORM EN ISO 354, 2003] ÖNORM EN ISO 354 (2003). "Akustik – Messung der Schallabsorption in Halbräumen". *Austrian Standards*.

Geräteverzeichnis

Art	Typ	Anzahl
Mikrofon	AKG C480 B	1
	NTi AUDIO MA220	2
Kugelhülse	CK 62ULS	1
Audio Interface	Focusrite Scarlett18i8	1
Laptop	Lenovo T60 IBMThinkPad	1
Messsoftware	WinMLS	1
Mikrofonständer klein	-	2
Mikrofonständer groß	-	1
zusätzlicher Galgen	-	1
Lautsprecher	Dodekaeder Manfrotto 190XPROB	1
Stativ für Lautsprecher	-	1
Subwoofer	LAMBDA LABS MF 15 A 0298	1
Verstärker	Norsonic Power Amplifier Nor280	1
Kalibrator	Brüel und Kjaer Type 4231	1
Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmesser	testo 610	1
Laserentfernungsmesser	BOSCH DLE70 Professional	1
Maßband	-	1
Gaffer Tape	-	1
Kitt-Pistole	COX (145 PSI)	1
Stromtrommel	brennenstuhl 15 m	1
Kabel	XLR 20 m	4
Kabel	XLR 10 m	1
Kabel	XLR kurze Strippe in rot	3
Kabel	XLR zu Klinke	1

Tabelle 8.1: Hallraummessung

Art	Typ	Anzahl
Mikrofon	AKG C480	2
Kugelhülse	CK 62ULS	2
Audio Interface	Focusrite Scarlett18i8	1
Laptop	Lenovo T60 IBMThinkPad	1
Messsoftware	WinMLS	1
Mikrofonständer	-	2
Lautsprecher	Dodekaeder Manfrotto 190XPROB	1
Subwoofer	LAMBDA LABS MF 15 A 0298	1
Schallpegelmesser	NTi AUDIO XL2	1
Verstärker	Norsonic Power Amplifier Nor280	1
Kalibrator	Brüel und Kjaer Type 4231	1
Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmesser	testo 610	1
Laserentfernungsmesser	BOSCH DLE70 Professional	1
Maßband	-	1
Klebeband	-	1
Stromtrommel	brennenstuhl 15 m	1
Kabel	XLR 15 m	2
Kabel	XLR kurze Strippe in rot	2
Kabel	XLR Männchen zu Klinke	1

Tabelle 8.2: Nachhallzeitmessung i14 und i15

Art	Typ	Anzahl
Mikrofon	NTi AUDIO MA220	2
Audio Interface	RME Fireface UCX	1
Laptop	Lenovo T60 IBMThinkPad	1
Messsoftware	WinMLS	1
Mikrofonständer	-	2
Lautsprecher	Dodekaeder Manfrotto 190XPROB	1
Subwoofer	LAMBDA LABS MF 15 A 0298	1
Schallpegelmesser	NTi AUDIO XL2	1
Verstärker	Norsonic Power Amplifier Nor280	1
Kalibrator	Brüel und Kjaer Type 4231	1
Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmesser	testo 610	1
Laserentfernungsmesser	BOSCH DLE70 Professional	1
Maßband	-	1
Klebeband	-	1
Stromtrommel	brennenstuhl 15 m	1
Kabel	XLR 15 m	2
Kabel	XLR kurze Strippe in rot	1
Kabel	XLR Männchen zu Klinke	2

Tabelle 8.3: Nachhallzeitmessung i14 und i15

Abbildungsverzeichnis

2.1	Modell der Lautheitsspirale [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011, S. 4]	12
2.2	Kantenabsorber im Musikproberaum der Carlo-Schmid Oberschule in Berlin-Spandau: a) [Fuchs H. V.;Zha X., 2014, S. 6]; b) [Casa acustica, 2014]; c) [Casa acustica, 2014];	13
2.3	Gemittelter Absorptionsgrad von Kantenabsorbern in den Abmessungen 400 · 500 mm ² mit Mineralwolle-Füllung im Vergleich zur flächigen Anordnung desselben Materials mit umlaufenden Rahmen, jeweils bezogen auf die offene Fläche S _A . a) breite Seite mit GK-Platten, schmale mit GK-Lochplatten abgedeckt (strichliert); b) schmale Seite mit GK-Platten, breite mit GK-Lochplatten abgedeckt (punktiert); c) 12 m ² flächig ausgelegte Mineralwolle in Raum mit V = 220 m ³ (durchgezogen) [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011]	14
2.4	Gemittelter Absorptionsgrad eines Kantenabsorbers gemäß Abb. 2.3 a) mit unterschiedlich dicker Mineralwollefüllung (d _α), jeweils bezogen auf S _A = 2.59 m ² . a) 0 mm (durchgezogen); b) 160 mm (punktiert); c) 320 mm (strichliert); d) 500 mm (fett durchgezogen) [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011]	14
2.5	Prinzipiskizzen verschiedener Kantenabsorber [Fuchs H. V.;Lamprecht J.;Zha X., 2011]	15
3.1	Fotos von den Mikrofonen und Quellen	18
3.2	Skizze des Hallraumes mit Mikrofon- und Quellenpositionen	19
3.3	Foto und Skizze des Hallraumes im leeren Zustand	20
3.4	Nachhallzeit T ₃₀ der einzelnen Leermessungen	21
3.5	Nachhallzeit T ₃₀ der gemittelten Leermessungen	22
3.6	Foto der MPA-Platte SoundMicro	23
3.7	Fotos und Skizzen der Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)	24
3.8	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)	25
3.9	Fotos und Skizzen der Anordnung 'Kante'	26
3.10	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Kante'	27
3.11	Fotos und Skizzen der Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)	28
3.12	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)	29
3.13	Foto und Skizze der Anordnung 'L-Form hoch' (SoundMicro), h = 70 cm, d = 35 cm	29
3.14	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form hoch' (SoundMicro)	30
3.15	Fotos und Skizzen der Anordnung 'Baffles'	31
3.16	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Baffles'	32
3.17	Foto und Skizze der Anordnung '45°-Winkel'	33
3.18	Absorptionsgrad α der Anordnung '45°-Winkel'	33
3.19	Foto der MPA-Platte SonoPerf A	34
3.20	Fotos und Skizzen der Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)	35
3.21	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)	36
3.22	Fotos und Skizzen der Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)	36
3.23	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)	37
3.24	Foto und Skizze der Anordnung 'Ecke'	37
3.25	Nachhallzeit T ₃₀ der Platten angeordnet nach Abb. 3.24 und T ₃₀ der gemittelten Leermessung (s. Abb. 3.5 bzw. Tab. 3.3)	38

3.26	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Ecke'	39
3.27	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Mitte' (SoundMicro und SonoPerf A)	40
3.28	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro und SonoPerf A)	41
3.29	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form hoch und niedrig' für $d = 35$ cm (SoundMicro)	42
3.30	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' und 'Mitte' (SoundMicro)	43
3.31	Absorptionsgrad α der Anordnung 'L-Form niedrig' und 'Mitte' (SonoPerf A)	43
3.32	Absorptionsgrad α der Anordnungen 'Kante', 'L-Form niedrig' und '45°-Winkel' (SoundMicro)	44
4.1	Zum Prinzip Mikroperforierter Absorber MPA [Fuchs, 2010, S. 104]	46
4.2	Skizze zum Prinzip eines Helmholtzresonators	48
4.3	Stehwelleneinhüllende jeweils vom Schalldruck p und von der Schallschnelle v	51
4.4	Verhältnis von berechneten zu gemessenen Resonanzfrequenzen; h, d in cm	53
5.1	Optimale Nachhallzeit T für unterschiedliche Nutzungen	56
5.2	Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit T auf T_{soll} normiert in Abhängigkeit von der Frequenz für Sprache, Kommunikation und Musikproberäume	56
5.3	Grundriss vom Nordteil des Kellergeschosses in der Inffeldgasse 18	57
5.4	Fensterfront der beiden Hörsäle	58
5.5	Eingangsfrent der beiden Hörsäle	58
5.6	Messequipment	60
5.7	Blockschaltbild des Messaufbaus	60
5.8	Mikrofon- und Quellpositionen des Hörsaals i15	61
5.9	Nachhallzeit T_{30} für Dodekaeder und Subwoofer vor und nach der Sanierung (i15)	62
5.10	Nachhallzeit T_{30} (i15)	64
5.11	Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} (i15)	64
5.12	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i15)	65
5.13	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i15)	65
5.14	Mikrofon- und Quellpositionen (i14)	67
5.15	Nachhallzeit T_{30} (i14)	68
5.16	Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} (i14)	69
5.17	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i14)	69
5.18	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i14)	69
6.1	Empirische Prognose der Nachhallzeit T_{30} nach der Sanierung laut Dr. Prof. Ing. Helmut V. Fuchs (grün markiert) im Vergleich zu T_{30} vor der Sanierung (i15)	71
6.2	Sketch-Up-Simulationen des Hörsaals i15 vor ((a),(b)) und nach ((c),(d)) der Sanierung	73
6.3	Nachhallzeit nach Akustiktool berechnet (i14)	74
6.4	Skizze des Hörsaals i14 mit den Positionen der anzubringenden Akustikpaneele	75
6.5	Fotos des Hörsaals i15 nach der Sanierung	76
6.6	Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung (i15) im Vergleich zur Prognose nach Fuchs (grün markiert)	78
6.7	Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} nach der Sanierung (i15)	78

6.8	Absorptionsgrad α (i15)	79
6.9	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i15)	79
6.10	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i15)	79
6.11	Fotos des Hörsaals i14 nach der Sanierung	80
6.12	Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung, gemessen und mit Akustiktool berechnet (i14)	82
6.13	Kastengrafik der Nachhallzeit T_{30} nach der Sanierung (i14)	83
6.14	Absorptionsgrad α (i14)	83
6.15	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_D1 (Dodekaeder) nach der Sanierung (i14)	84
6.16	Impulsantwort für Mikrofonposition M2_2 und Quellenposition Q_S1 (Subwoofer) nach der Sanierung (i14)	84
7.1	Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung beider Hörsäle	88

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der Messparameter der Leermessungen	20
3.2	Nachhallzeit T_{30} der einzelnen Leermessungen	21
3.3	Nachhallzeit T_{30} der gemittelten Leermessungen	22
3.4	Eigenschaften der MPA-Platte SoundMicro	23
3.5	Eigenschaften der MPA-Platte SonoPerf A	34
3.6	Übersicht der Messparameter	37
3.7	Nachhallzeit T_{30} der Platten angeordnet nach Abb. 3.24 und T_{30} der gemittelten Leermessung (s. Abb. 3.5 bzw. Tab. 3.3)	38
3.8	Absorptionsgrad α der Anordnung 'Ecke'	39
4.1	Übersicht der zu den Berechnungen nötigen Platteneigenschaften	45
4.2	berechnete und gemessene Plattenresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SoundMicro)	46
4.3	berechnete und gemessene Plattenresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander h,d in cm (SonoPerf A)	47
4.4	berechnete und gemessene Helmholtzresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SoundMicro)	49
4.5	berechnete und gemessene Helmholtzresonanzfrequenzen und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SonoPerf A)	49
4.6	berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der MPA-Formel und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SoundMicro)	50
4.7	berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der MPA-Formel und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SonoPerf A)	50
4.8	berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der $\frac{\lambda}{4}$ -Hypothese (bzw. $\frac{3\lambda}{4}$ -Hypothese) und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SoundMicro)	52
4.9	berechnete und gemessene Resonanzfrequenzen nach der $\frac{\lambda}{4}$ -Hypothese (bzw. $\frac{3\lambda}{4}$ -Hypothese) und deren Verhältnis zueinander; h,d in cm (SonoPerf A)	52
5.1	Mindestwerte für den mittleren Schallabsorptionsgrad α_m [ÖNORM B 8115-3, 2015, S. 7]	56
5.2	Daten zum Hörsaal i15	59
5.3	Nachhallzeit T_{30} für Dodekaeder und Subwoofer vor und nach der Sanierung (i15)	63
5.4	Nachhallzeit T_{30} (i15)	64
5.5	Daten zum Hörsaal i14	66
5.6	Nachhallzeit T_{30} (i14)	68
6.1	Parameter der Wandpaneele	75
6.2	Daten zur Nachhallzeitmessung nach der Sanierung (i15)	77
6.3	Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung (i15)	78
6.4	Absorptionsgrad α (i15)	79
6.5	Daten zur Nachhallzeitmessung nach der Sanierung (i14)	81
6.6	Nachhallzeit T_{30} vor und nach der Sanierung (i14)	82
6.7	Absorptionsgrad α (i14)	83
6.8	Mittlere Nachhallzeit T_m und Bassverhältnis BR vor und nach der Sanierung	85
8.1	Hallraummessung	101
8.2	Nachhallzeitmessung i14 und i15	102
8.3	Nachhallzeitmessung i14 und i15	102

Anhang A: Dateienverzeichnis

A.1 Schriftliche Bachelorarbeit (*.tex, *.pdf)

Datei-Name	Beschreibung
Main.tex	Latex-Hauptdokument, das alle Unterkapitel in externen .tex-Files aufruft und die gesamte Arbeit ausgibt
Bachelorarbeit.pdf	.pdf-Dokument, das die gesamte schriftliche Arbeit enthält

A.2 Präsentationen der Bachelorarbeit (*.pdf)

Datei-Name	Beschreibung
Zwischenpräsentation1.pdf	Vorstellung der Literatur und der Ergebnisse der Nachhallzeitmessung der Hörsäle i14 und i15 (Redezeit ca. 10 Minuten)
Zwischenpräsentation2.pdf	Vorstellung der Ergebnisse der Hallraummessungen von mikroperforierten Platten (Redezeit ca. 10 Minuten)
Abschlusspräsentation.pdf	Präsentation der Bachelorarbeit (Redezeit ca. 15 Minuten)

A.3.1 Bilddateien aus Kapitel 2 (*.png, *.jpg)

Abb.-Nr.	Datei-Name
Abb. 2.1	lautheitsspirale.jpg
Abb. 2.2(a)	KA1_CSchmid_Schule_Berlin.jpg
Abb. 2.2(b)	KA2_CSchmid_Schule_Berlin.jpg
Abb. 2.2(c)	KA3_CSchmid_Schule_Berlin.png
Abb. 2.3	KA_Grafik1.png
Abb. 2.4	KA_Grafik2.png
Abb. 2.5(a)	KA_Skizze_Licht.png
Abb. 2.5(b)	KA_Skizze_Sitzbank.png
Abb. 2.5(c)	KA_Skizze.png

A.3.2 Bilddateien aus Kapitel 3 (*.png, *.jpg)

Abb.-Nr.	Datei-Name
Abb. 3.1(a)	Foto_Mik.jpg
Abb. 3.1(b)	Foto_Src.jpg
Abb. 3.2	Skizze_HR_MikSrcPos.jpg
Abb. 3.3(a)	Foto_LeererHR.jpg
Abb. 3.3(b)	Skizze_LeererHR.jpg
Abb. 3.4	Leermessungen_alle.jpg

Abb. 3.5	Leermessungen_gemittelt.jpg
Abb. 3.6	Foto_SM.jpg
Abb. 3.7(a)	Skizze_HR_SMMitte.jpg
Abb. 3.7(b)	Foto_SMMitte20.png
Abb. 3.7(c)	Foto_SMMitte35.png
Abb. 3.8	plot_SMMitte.jpg
Abb. 3.9(a)	Foto_KanteSM.png
Abb. 3.9(b)	Skizze_HR_SMKante.jpg
Abb. 3.9(c)	Foto_KanteSMdop.png
Abb. 3.9(d)	Skizze_HR_SMKantedop.jpg
Abb. 3.10	plot_SMKante.jpg
Abb. 3.11(a)	Foto_SML17.png
Abb. 3.11(b)	Foto_SML35.png
Abb. 3.11(c)	Foto_SML52.png
Abb. 3.11(d)	Foto_SML70.png
Abb. 3.12	plot_SMLform.jpg
Abb. 3.13	Foto_SML35_hoch.png
Abb. 3.14	plot_SMLform_hoch.jpg
Abb. 3.15(a)	Skizze_HR_Baffles.jpg
Abb. 3.15(b)	Foto_SMBaffles_niedrig.jpg
Abb. 3.15(c)	Foto_SMBaffles_hoch.jpg
Abb. 3.16	plot_SMBaffles.jpg
Abb. 3.17	Foto_KanteSM45deg.png
Abb. 3.18	plot_SMKante45deg.jpg
Abb. 3.19	Foto_A.jpg
Abb. 3.20(a)	Skizze_HR_AMitte.jpg
Abb. 3.20(b)	Foto_AMitte20.png
Abb. 3.20(c)	Foto_AMitte35.png
Abb. 3.21	plot_AMitte.jpg
Abb. 3.22(a)	Foto_AL35.png
Abb. 3.22(b)	Foto_AL70.png
Abb. 3.23	plot_ALform.jpg
Abb. 3.24	Foto_direktEcke.png
Abb. 3.25	plot_T30_direktEcke_A_Leer1234.jpg
Abb. 3.26	plot_direktEcke_A.jpg
Abb. 3.27	plot_Mitte_SM_A.jpg
Abb. 3.28	plot_Lform_SM_A.jpg
Abb. 3.29	plot_SMLform_SMLformhoch.jpg
Abb. 3.30	plot_SMMitte_SMLform.jpg
Abb. 3.31	plot_AMitte_ALform.jpg
Abb. 3.32	plot_AufstellungenKanten.jpg

A.3.3 Bilddateien aus Kapitel 4 (*.png, *.jpg)

Abb.-Nr.	Datei-Name
Abb. 4.1(a)	PrinzipMPA_DraufsichtSchnitt.jpg
Abb. 4.1(b)	PrinzipMPA_Schnelleverteilung.jpg
Abb. 4.2	Skizze_Helmholtz.png
Abb. 4.3	Skizze_DruckSchnelle.png
Abb. 4.4	VglTheorienSMA.png

A.3.4 Bilddateien aus Kapitel 5 (*.png, *.jpg)

Abb.-Nr.	Datei-Name
Abb. 5.1	sollnachhallzeit.png
Abb. 5.2	toleranzband.png
Abb. 5.3	kg.png
Abb. 5.4(a)	hsfensteri14.png
Abb. 5.4(b)	hsfensteri15.png
Abb. 5.5(a)	eingangi14.png
Abb. 5.5(b)	eingangi15.png
Abb. 5.6(a)	quellen.jpg
Abb. 5.6(b)	mikro.jpg
Abb. 5.6(c)	verstaerker.jpg
Abb. 5.6(d)	interface.jpg
Abb. 5.7	blockschaltbild.png
Abb. 5.8	i15_Quellen_Mikro_Positionen.jpg
Abb. 5.9	nachhallzeiti15vorundnach.jpg
Abb. 5.10	nachhallzeiti15.png
Abb. 5.11	boxploti15.png
Abb. 5.12	i15ir_dod1.png
Abb. 5.13	i15ir_sub1.png
Abb. 5.14	i14_Quellen_Mikro_Positionen.jpg
Abb. 5.15	nachhallzeiti14.png
Abb. 5.16	boxploti14.png
Abb. 5.17	i14ir_dod1.png
Abb. 5.18	i14ir_sub1.png

A.3.5 Bilddateien aus Kapitel 6 (*.png, *.jpg)

Abb.-Nr.	Datei-Name
Abb. 6.1	fuchsprognose.jpg
Abb. 6.2(a)	Skizze_SU_Ansicht1_ohneKA.jpg
Abb. 6.2(b)	Skizze_SU_Ansicht5_ohneKA.jpg
Abb. 6.2(c)	Skizze_SU_Ansicht1_mitKA.jpg
Abb. 6.2(d)	Skizze_SU_Ansicht4_mitKA.jpg

Abb. 6.3	plot_Nachhallzeiti14_Tool.png
Abb. 6.4	Skizze_saniert_i14.png
Abb. 6.5(a)	Foto_i15_1.jpg
Abb. 6.5(b)	Foto_i15_2.jpg
Abb. 6.5(c)	Foto_i15_3.jpg
Abb. 6.5(d)	Foto_i15_4.jpg
Abb. 6.6	t30vornachsaniierung15.png
Abb. 6.7	plot_boxploti15_nachmessung.png
Abb. 6.8	absorptionsgradi15.png
Abb. 6.9	i15ir_dod.png
Abb. 6.10	i15ir_sub.png
Abb. 6.11(a)	Foto_i14_1.jpg
Abb. 6.11(b)	Foto_i14_2.jpg
Abb. 6.11(c)	Foto_i14_3.jpg
Abb. 6.11(d)	Foto_i14_4.jpg
Abb. 6.12	t30vornachsaniierung14.png
Abb. 6.13	plot_boxploti14_nachmessung.png
Abb. 6.14	absorptionsgradi14.png
Abb. 6.15	i14ir_dod.png
Abb. 6.16	i14ir_sub.png
Abb. ??	Nachhallzeiti14i15.png

A.4 Datenblätter der Messreihen im Hallraum (*.pdf)

Datei-Name	Beschreibung
Datenblatt_SMMitte.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'Mitte' (SoundMicro)
Datenblatt_SMKante.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'Kante' und '45°-Winkel' (SoundMicro)
Datenblatt_SMLform.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'L-Form niedrig' (SoundMicro)
Datenblatt_SMMitte_Lform.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'Mitte' ($h = 35$ cm) und 'L-Form niedrig' ($d = 35$ cm) (SoundMicro)
Datenblatt_Baffle.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'Baffles' und 'L-Form hoch' (SoundMicro)
Datenblatt_AMitte.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'Mitte' (SonoPerf A)
Datenblatt_ALform.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'L-Form niedrig' (SonoPerf A)
Datenblatt_AMitte_Lform.pdf	Datenblatt zur Anordnung 'Mitte' ($h = 35$ cm) und 'L-Form niedrig' ($d = 35$ cm) (SonoPerf A)

A.5 Matlab-Dateien (*.m)

Datei-Name	Beschreibung
toleranzband.m	Skript zum Erstellen von Abb. 5.1 und Abb. 5.2
fopen_terz.m	Funktion mit Matrix T als Rückgabewert, welche eingelesene .txt-Files beinhaltet
midpos_fopen_terz.m	Funktion mit einer Matrix T der gemittelten Nachhallzeitwerte als Rückgabewert, anwendbar für 12 Messpositionen; Aufruf der Funktion fopen_terz.m
midpos_fopen_terz_6.m	s. midpos_fopen_terz.m, anwendbar für 6 Messpositionen
midpos_fopen_terz_8.m	s. midpos_fopen_terz.m, anwendbar für 8 Messpositionen
midpos_fopen_terz_10.m	s. midpos_fopen_terz.m, anwendbar für 10 Messpositionen
midpos_fopen_terz_Ecke.m	s. midpos_fopen_terz.m, anwendbar für 14 Messpositionen (inkl. Eckmessung)
midpos_fopen_terz_limitTi15.m	s. midpos_fopen_terz.m, Ausgabe der limitierten Nachhallzeitwerte vor der Sanierung (HS i15) unter Berücksichtigung der Ausreißer
midpos_fopen_terz_limitTi14.m	s. midpos_fopen_terz.m, Ausgabe der limitierten Nachhallzeitwerte nach der Sanierung (HS i14) unter Berücksichtigung der Ausreißer
matrix2latex.m	Funktion zur Erstellung einer Tabelle als .tex-Datei von einer Matrix
Mittelung_RT60_Di15.m	Skript zum Erstellen von Abb. 5.10 und Tab. 5.4; Aufruf der Funktionen midpos_fopen_terz_limitTi15.m, fopen_terz.m und matrix2latex.m
Mittelung_RT60_D.m	Skript zum Erstellen von Abb. 5.15 und Tab. 5.6; Aufruf der Funktionen midpos_fopen_terz.m, fopen_terz.m und matrix2latex.m
Boxplot_RT60.m	Skript zum Erstellen der Kastengrafiken von Abb. 5.11, 5.16, 6.7 und 6.13; Aufruf der Funktionen fopen_terz.m und midpos_boxplot_fopen_terz.m
midpos_boxplot_fopen_terz.m	Aufruf der Funktion fopen_terz.m zum Einlesen der .txt-Files; Ausgabe der Nachhallzeitwerte in einer Matrix T

Mittelungi15_RT60_DS_mitKAohneKA.m	Skript zum Erstellen von Abb. 5.9 und Tab. 5.3 zur Gegenüberstellung der Messergebnisse von Subwoofer und Dodekaeder vor und nach der Sanierung mit Kantenabsorbern; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi15.m</code> <code>fopen_terz.m</code> und <code>matrix2latex.m</code>
Mittelung_RT60_D_vornachSanierung.m	Skript zum Erstellen von Abb. 6.6 und Tab. 6.3; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi15.m</code> , <code>fopen_terz.m</code> und <code>matrix2latex.m</code>
Mittelungi14_RT60_DS_mitTool.m	Skript zum Erstellen von Abb. 6.12 und Tab. 6.6; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi14.m</code> , <code>fopen_terz.m</code> und <code>matrix2latex.m</code>
impulsantwort_i15i14.m	Skript zum Erstellen von Abb. 5.12, 5.13, 5.17, 5.18, 6.9, 6.10, 6.15 und 6.16; Zugriff auf zwei .wav-Dateien und anschließendes Erzeugen ihrer Impulsantworten
matlab2tikz.m	Funktion zur Umwandlung von Matlab-Diagrammen in Latex-Vektorgrafiken; Ausgabe als .tikz-Datei
Absorptionsgrad_i15.m	Skript zum Erstellen von Abb. 6.8 und Tab. 6.4; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi15.m</code> und <code>fopen_terz.m</code>
Absorptionsgrad_i14.m	Skript zum Erstellen von Abb. 6.14 und Tab. 6.7; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi14.m</code> , und <code>fopen_terz.m</code>
dissipation.m	Funktion zur Berechnung des Dämpfungskoeffizienten α in $\frac{\text{dB}}{\text{m}}$ zur Bestimmung des Einflusses der Dissipation
X_Achse.m	Skript mit den Einstellungen der Abszisse für die jeweiligen Plots
Mittelung_Leer.m	Skript, welches die gemittelten Nachhallzeiten der verschiedenen Leerraummessungen im Hallraum liefert; zum Erstellen von Abb. 3.4, 3.5 und Tab. 3.2, 3.3; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_Ecke.m</code> , <code>dissipation.m</code> , <code>X_Achse.m</code> und <code>matrix2latex.m</code>

Mittlung_SM20SM35.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.8; Aufruf des Skripts <code>Mittlung_Leer.m</code> und der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_Ecke.m</code> , <code>dissipation.m</code> , <code>X_Achse.m</code> und <code>matrix2latex.m</code>
Mittlung_KanteSM.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.10; Aufruf des Skripts <code>Mittlung_Leer.m</code> und der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_6.m</code> , <code>dissipation.m</code> und <code>X_Achse.m</code>
Mittlung_LformSM.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.12; Aufruf des Skripts <code>Mittlung_Leer.m</code> und der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_6.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_8.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_Ecke.m</code> , <code>dissipation.m</code> und <code>X_Achse.m</code>
Mittlung_Lformhoch.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.14; Aufruf des Skripts <code>Mittlung_Leer.m</code> und der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>dissipation.m</code> und <code>X_Achse.m</code>
Mittlung_Baffles.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.16; Aufruf des Skripts <code>Mittlung_Leer.m</code> und der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_8.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_10.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_Ecke.m</code> , <code>dissipation.m</code> und <code>X_Achse.m</code>
Mittlung_45deg.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.18; Aufruf s. <code>Mittlung_Lformhoch.m</code>
Mittlung_A20A35.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.21; Aufruf s. <code>Mittlung_SM20SM35.m</code>
Mittlung_LformA.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.23; Aufruf s. <code>Mittlung_SM20SM35.m</code>
Mittlung_AEcke.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.25, 3.26 und Tab. 3.7, 3.8; Aufruf s. <code>Mittlung_SM20SM35.m</code>
Mittlung_SM_A.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.27; Aufruf s. <code>Mittlung_SM20SM35.m</code>
Mittlung_Lform_SM_A.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.28; Aufruf s. <code>Mittlung_LformSM.m</code>
Mittlung_parzurWandSML35Mitte35KanteSM.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.29; Aufruf s. <code>Mittlung_LformSM.m</code>
Mittlung_SM35LformSM.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.30; Aufruf s. <code>Mittlung_LformSM.m</code>
Mittlung_A35LformA.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.31; Aufruf s. <code>Mittlung_SM20SM35.m</code>

Mittlung_KanteSM_45deg_Lform.m	Skript zum Erstellen von Abb. 3.32; Aufruf des Skripts <code>Mittlung_Leer.m</code> und der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_6.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_8.m</code> , <code>dissipation.m</code> , <code>X_Achse.m</code> und <code>matrix2latex.m</code>
SM_Res_mit_Schleife.m	Skript zum Erstellen von Abb. 4.4(a) und Tab. 4.2, 4.4, 4.6, 4.8
A_Res_mit_Schleife.m	Skript zum Erstellen von Abb. 4.4(b) und Tab. 4.3, 4.5, 4.7, 4.9
MittlungT_Ausblick.m	Skript zum Erstellen von Abb. ??; Aufruf der Funktionen <code>midpos_fopen_terz.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi14.m</code> , <code>midpos_fopen_terz_limitTi15.m</code> und <code>fopen_terz.m</code>

A.6 Messdaten (*.txt, *.wav)

Die Messsoftware WinMLS ließ die gemessenen Nachhallzeitwerte in Form von .txt-Files bzw. die Impulsantworten in Form von .wav-Files exportieren.

Die Benennung der .txt- bzw. .wav-Dateien erfolgte für die Hallraummessungen nach dem Schema **X_YChx_Z.txt** (respektive **X_YChx_Z.wav**), für die Messungen in den Hörsälen nach dem Schema **X_Chx_Z.txt** (respektive **X_Chx_Z.wav**) und die Benennung der Subwoofer-Vorhermessungen im Hörsaal i14 nach dem Schema **X_w_Chx_Z.txt** (respektive **X_w_Chx_Z.wav**), wobei **X** die Quellenposition (D1 oder D2 für den Dodekaeder, S1 oder S2 für den Subwoofer), **Y** das Mess-Setup im Hallraum (z.B. A20), **w** die Nummer der Wiederholung (1 - 3), **x** den Channel (1 oder 2) und **Z** die Mikrofonposition (0 - 4) beschreibt.

Beispiel zur Hallraummessung: D2_A20Ch1_1.txt

- D2: Verwendung des Dodekaeders, zweite Schallquellenposition
- A20: Anordnung 'Mitte', $h = 20$ cm, SonoPerf A
- Ch1: Messung über Channel 1
- 1: Mikrofonposition M1 (s. Abb. 3.2)

Beispiel zur Nachhallzeitmessung im Hörsaal i14 vor der Sanierung: S1_3_Ch2_4.txt

- S1: Verwendung des Subwoofers, erste Schallquellenposition
- 3: dritter Messdurchgang
- Ch2: Messung über Channel 2
- 4: Mikrofonposition M2_4 (s. Abb. 5.14)