
BACHELORARBEIT

ENTWURF UND BAU EINER VARIABLEN AKUSTIK

Entwurf und Bau einer variablen Akustik im Besprechungsraum
IEEG136, Inffeldgasse 16 unter Zuhilfenahme akustischer Messung,
akustischer Simulation und Messung im Impedanzrohr

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

von
Stefan Zieseimer, 1131279

Betreuerin:
Dipl.-Ing. Jamilla Balint

Graz, 13. Oktober 2016

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am

(Unterschrift)

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der raumakustischen Optimierung eines Besprechungs- und Pausenraumes des Instituts SPSC im Gebäude Inffeldgasse 16 der Technischen Universität Graz.

Zunächst wird dabei der Ausgangszustand des Raumes in Messung und Simulation festgestellt. Die Konzeption der neuen Akustik erfolgt dann anhand der ÖNORM B 8115-3 „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 3: Raumakustik“ durch das Einbringen von Schallabsorbern. Ein wichtiges Kriterium bei der Planung ist, dass diese Absorber variabel montierbar sind, um für die weitere Entwicklung des im Raum installierten DIRHA-Systems (eine Sprachsteuerung für Smart Home Anwendungen) verschiedene raumakustische Szenarien schaffen zu können. Der Absorptionsgrad der Absorber wird mit Hilfe einer Messreihe im Impedanzrohr untersucht. Die Ergebnisse der verschiedenen Messungen dienen der Planung, Konstruktion und Montage der Absorber. Abschließend erfolgt eine erneute Messung und Simulation des akustischen Zustands des Raumes zur Bewertung der erzielten Veränderung.

Abstract

This thesis deals with the room acoustical improvement of a conference and break room of the SPSC laboratory, located at Inffeldgasse 16, University of Technology Graz.

At first, the actual state is determined by measuring the room impulse response and creating a simulation model. The concept of the new acoustic is acquired by placing sound absorbers in the room, using the Austrian standard ÖNORM B 8115-3 as a guideline. An important criterion for the absorbers is, that they can be mounted variable, to provide different room acoustic scenarios for the developers of the DIRHA-system (a speech interaction system for smart home applications), which is also installed in that very room. The absorption coefficient of the absorber is measured in the impedance tube. With those results the absorbers are designed, build and installed. Finally room acoustical measurements and simulations of the new situation are repeated, to evaluate the achieved improvements.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	9
1.1 Allgemeines	9
1.2 Ziel und Motivation	9
2 Ausgangszustand des Raumes	11
2.1 Erste Begutachtung des Raumes IEEG136	11
2.2 Messung der Nachhallzeit	12
2.2.1 Messaufbau	12
2.2.2 Ergebnisse der Messung	14
2.3 Simulation der Raumakustik in CATT-Acoustic	19
2.3.1 Geometrische Vermessung des Raumes	19
2.3.2 Berechnung des mittleren Absorptionsgrades	19
2.3.3 Ergebnisse der Simulation	20
2.4 Qualitative Einschätzung der Ergebnisse von Messung und Simulation	21
3 Erarbeitung eines raumakustischen Konzepts	23
3.1 Allgemeine Anforderungen an das Konzept	23
3.1.1 Wahl des Absorbertyps	23
3.1.2 Abschätzung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche	24
3.1.3 Positionierung der Absorber im Raum IEEG136	25
3.2 Entwurf der Absorber	26
3.2.1 Wahl des Absorbermaterials	26
3.2.2 Entwurf der Rahmenkonstruktion	26
3.2.3 Wahl des Deckstoffes	27
3.3 Bau und Montage der Absorber	27
3.3.1 Zusammenbau der Absorber	27
3.3.2 Montage der Absorber	29
4 Messungen im Impedanzrohr	31
4.1 Vermessung der Mineralwolle	31
4.1.1 Vorbereitungen und Messaufbau	31
4.1.2 Erste Messung	32
4.1.3 Zweite Messung: verringerter Probendurchmesser	34
4.1.4 Dritte Messung: Einfluss der Vlieskaschierung	36
4.1.5 Wahl der Schichtung	39
4.2 Vermessung des Deckstoffes	40
4.2.1 Vorbereitungen und Messaufbau	40
4.2.2 Vermessung der Mineralwolle mit Molton	40
4.2.3 Vergleichsmessung verschiedener Stoffe	42
4.2.4 Wahl des Deckstoffes, Endergebnis	44
5 Neue akustische Situation im Raum IEEG136	49
5.1 Erörterung der verschiedenen Absorberkonfigurationen	49
5.2 Simulation der neuen Raumakustiken	50
5.2.1 Anpassung der alten Simulation	50
5.2.2 Ergebnisse der Simulation	51

5.3	Erneute Messung der Nachhallzeit	52
5.3.1	Messaufbau	52
5.3.2	Ergebnisse der Messung	54
5.3.3	Bewertung der Messergebnisse	57
5.3.4	Vergleich der Messung mit der Simulation	58
5.4	Subjektiver Eindruck der neuen Raumakustik	60
6	Abschlussbetrachtungen	61
6.1	Zusammenfassung	61
6.2	Ausblick	62
6.3	Fazit	62
7	Anhang	63
7.1	Raumakustische Steckbriefe der verschiedenen Absorber-Konfigurationen	63
7.2	Baupläne der Absorberrahmen	73
7.3	Datenblatt der verwendeten Mineralwolle TP435B 50mm von Knauf Insulation .	81
7.4	Zu Mineralwolle	85
7.4.1	Begriffsabgrenzung	85
7.4.2	Potenzielle Gesundheitsgefährdung	85
7.5	Messung der Nachhallzeit im Raum IEEG140	86
7.5.1	Messaufbau	86
7.5.2	Ergebnisse und qualitative Einordnung der Messung	86
	Geräteverzeichnis	91
	Abbildungsverzeichnis	92
	Tabellenverzeichnis	94
	Literaturverzeichnis	95
	Baumdiagramm der beigelegten CD	96

1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Arbeitsphilosophie im tertiären Wirtschaftssektor hat in den letzten Jahren einen bedeutenden Wandel erfahren: Im Zuge des Erfolges großer, meist amerikanischer IT-Dienstleister hat sich die Auffassung durchgesetzt, dass der Job nicht mehr nur Mittel zum Zweck sondern Bestandteil eines individuellen Lebensstils ist. Die zunehmende Verflechtung von Arbeits- und Privatleben durch ständige Erreichbarkeit und frei einteilbare Arbeitszeiten tun ihr Übriges. Im Sinne dieser Philosophie soll auch der Arbeitsplatz nicht mehr nur ein Ort sein, an dem die notwendige Zeit abgessen wird, sondern ein Ort, an dem sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wohlfühlen und ohne zusätzlichen Stress durch ihre Umwelt ihrer Arbeit nachgehen können.

Dies ist nur eines von vielen Beispielen, in denen der Raumakustik heutzutage in ganz alltäglichen Situationen eine immer größere Bedeutung zukommt: Gerade im Hinblick auf den oben erwähnten, zusätzlichen Stress durch die Umwelt stellt die Raumakustik einen entscheidenden Faktor dar, da sie wesentlichen Einfluss auf das psychische Wohlbefinden hat. Auch wenn - oder gerade weil - sie meist nur unterbewusst wahrgenommen wird.

Besonders wichtig ist die raumakustische Ausstattung natürlich dort, wo sich viele Menschen auf kleinem Raum treffen, kommunizieren, also häufig viele Schallereignisse auftreten. Genau dies trifft auf den Raum IEEG136 zu, der im Rahmen dieser Arbeit raumakustisch vermessen, simuliert und optimiert werden soll.

1.2 Ziel und Motivation

Der Raum IEEG136 (oft einfach „SPSC kitchen“ genannt) im Gebäude Inffeldgasse 16 der Technischen Universität Graz hat derzeit mehrere Anforderungen zu erfüllen: Er dient sowohl als Pausen- und Besprechungsraum für die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts SPSC, als auch als Forschungsobjekt. Die Forschungen beziehen sich dabei auf das im Raum installierte DIRHA-System („Distant-speech Interaction for Robust Home Applications“), welches eine Sprachsteuerung für Smart Home-Anwendungen darstellt. Bestandteil dieses Systems sind zwei Mikrofonarrays mit jeweils drei Mikrofonen, mit Hilfe derer durch Beamforming die Schalleinfallrichtung erkannt werden kann. Diese Technologie reagiert jedoch empfindlich auf die Raumakustik. (Für weitere Informationen zum DIRHA-System siehe [SPSC, Web]).

Ziel dieser Arbeit ist also neben der allgemeinen Verbesserung der Raumakustik zur Steigerung des Wohlbefindens der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter die Schaffung verschiedener, variabler raumakustischer Situationen. Dies soll durch den Bau unterschiedlicher Absorber für den Raum erreicht werden. Das DIRHA-System kann so in einer Vielzahl neuer akustischer Rahmenbedingungen getestet und weiter verbessert werden.

2

Ausgangszustand des Raumes

Bevor mit der Erarbeitung eines raumakustischen Konzepts begonnen werden kann, muss der Zustand des zu optimierenden Raumes genau bekannt sein. Dazu gehört neben einer Messung der akustischen Parameter auch genaue Kenntnis über die Geometrie des Raumes, speziell im Hinblick auf die Durchführung einer Simulation.

2.1 Erste Begutachtung des Raumes IEEG136

Der Raum befindet sich in zentraler Lage im Erdgeschoss des Gebäudekomplexes Inffeldgasse 16/16a-c (s. Abb. 2.1). Auf den ersten Blick wirkt er mit $22,94m^2$ Grundfläche relativ klein, ist aber sehr funktional eingerichtet. Neben einem großen Holztisch mit Platz für etwa acht bis zehn Personen befindet sich an seiner südlichen Wand, gegenüber der Fensterfront, ein großes Whiteboard. Dominiert wird die Einrichtung jedoch von der Küchenzeile gegenüber der Eingangstür. Es kann daher mit zusätzlichem Lärmaufkommen durch Küchengeräte und Geschirr gerechnet werden, welches den subjektiven akustischen Eindruck zusätzlich verschlechtert. An der westlichen Wand gegenüber der Küchenzeile sowie zwischen den beiden Fenstern befindet sich ein Mikrofonarray für das DIRHA-System in etwa $2m - 3m$ Höhe. Die nördlich gelegene Fensterfront erstreckt sich über die gesamte Raumhöhe, wird aber von einem Fenstersturz und einem Kabelkanal aus Aluminium durchbrochen (s. Abb. 2.2).

Für eine erste optische Beurteilung der zu erwartenden Raumakustik fällt zunächst auf, dass der Raum, wie meist üblich, viele plane Flächen aufweist. Besonders hervorzuheben ist dabei die Decke, die zu etwa drei Vierteln aus Sichtbeton besteht, ebenso wie die Wand rechts der Eingangstür, auf der sich auch das Whiteboard befindet. Die Türen selbst sind schwere Metalltüren. Die größte Wandfläche im Raum ist in Trockenbauweise unbekanntem Aufbaus ausgeführt, ebenso wie die Flankierung der großen Fensterfront. Der Bodenbelag ist aus PVC. Auch wenn die genaue Beschaffenheit all dieser Oberflächen nicht bekannt ist, kann davon ausgegangen werden, dass sie, von einem akustischen Standpunkt aus gesehen, schallharte Eigenschaften besitzen, d.h. mit erheblicher Reflexion zu rechnen ist. Die Beschaffenheit der niedrigen Decke zwischen den beiden Türen des Raumes ist ebenfalls nicht bekannt, es wird jedoch vermutet, dass sich hinter dem dort angebrachten Gitter eine akustisch wirksame Struktur befindet (abgehängte Metallkassetten mit dahinter liegender Mineralwolle).

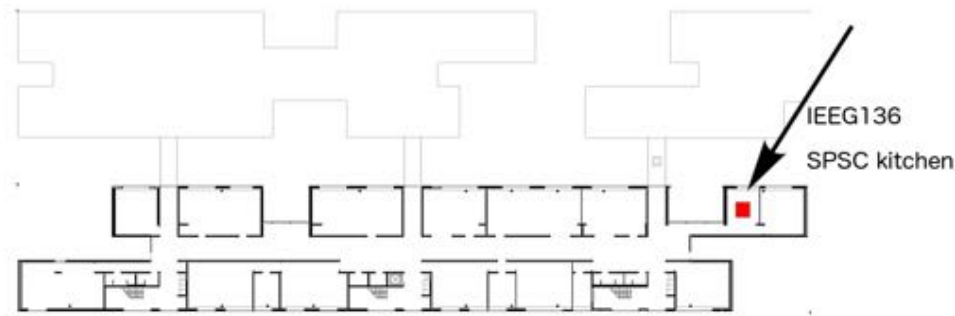


Abbildung 2.1: Lage des Raumes IEEG136 im Gebäude Inffeldgasse 16



(a) Türansicht



(b) Fensteransicht

Abbildung 2.2: Der Raum IEEG136

2.2 Messung der Nachhallzeit

2.2.1 Messaufbau

Die erste Vermessung der Raumakustik fand am 27.02.2016 statt. Hierfür stellte das Institut SPSC einen Dodekaeder-Messlautsprecher von Norsonic an einer Endstufe des gleichen Herstellers, ein NTI Messmikrofon, ein RME Audiointerface sowie die Software WinMLS auf einem PC unter Windows XP zur Verfügung (s. Abb. 2.4; genaue Angaben zum verwendeten Equipment siehe „Geräteverzeichnis“, S.91). Der Lautsprecher wurde, bespielt mit einem 20-sekündigen exponentiellen Sweep (ein Sinuston, dessen Frequenz mit der Zeit exponentiell zunimmt, der Ton also „höher“ wird), an zwei verschiedenen Positionen aufgestellt: zunächst vor dem Whiteboard (als „Vortragender“) sowie, in einem weiteren Messdurchlauf, in einer Raumecke in der Nähe des Fensters. Das Messmikrofon wurde an sechs Messpositionen je Lautsprecherposition rund um den großen Tisch in verschiedenen Höhen aufgestellt (1,7m als Ohrhöhe einer stehenden Person, 1,2m sitzend; s. Abb. 2.3) . Zur Mittelung zum Gesamtergebnis konnten jedoch nicht alle Mikrofonpositionen berücksichtigt werden, weil sich einige Positionen zu nahe am Lautsprecher und somit in dessen Nahfeld befanden. Es bleiben mit $4 + 5 = 9$ Messpositionen dennoch genügend verwertbare Ergebnisse für eine aussagekräftige Messung. Der vermessene Frequenzbereich betrug $63\text{Hz} - 16\text{kHz}$, in den folgenden Abbildungen zur Nachhallzeit bleibt die 16kHz -Oktave jedoch unberücksichtigt, da diese für die Bewertung der Raumakustik praktisch keine Bedeutung hat. Die Temperatur zum Messzeitpunkt betrug $22,1^\circ\text{C}$, die relative Luftfeuchtigkeit $36,4\%$.

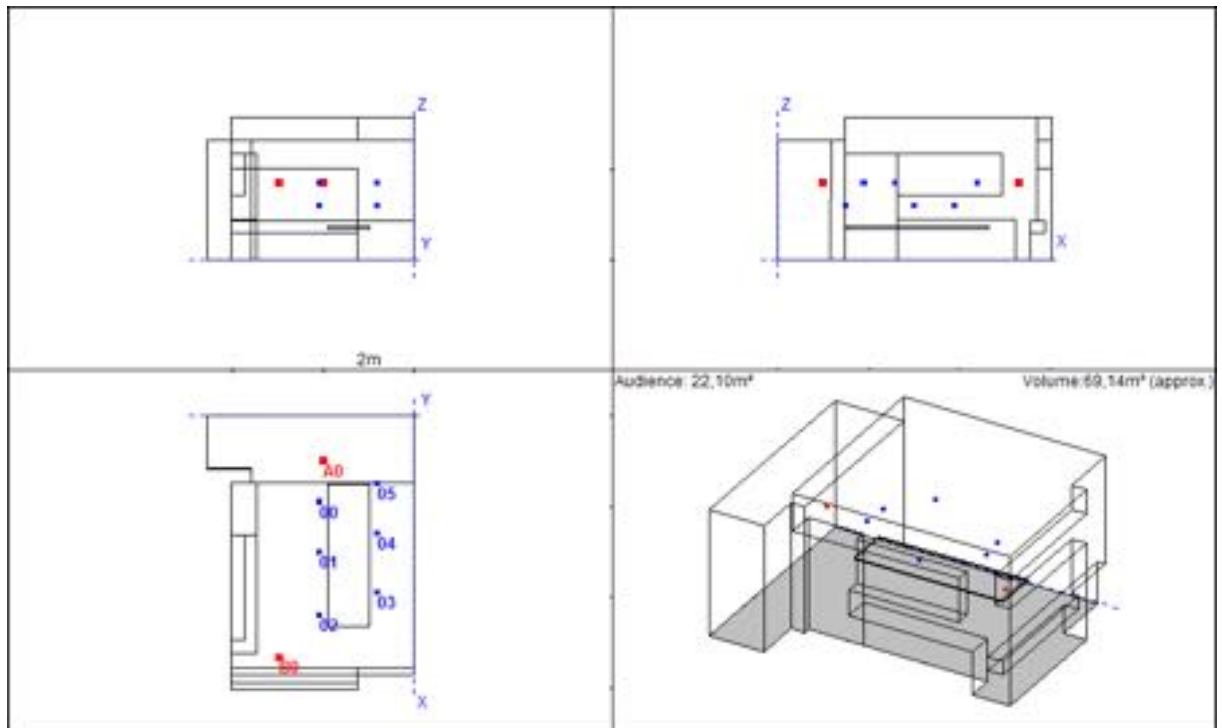
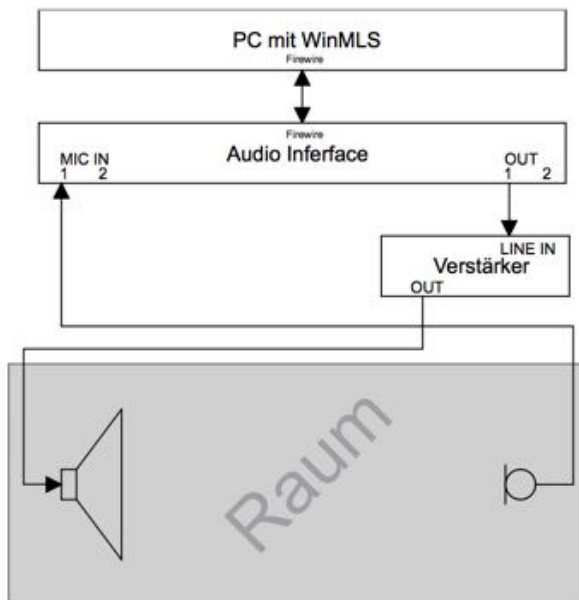


Abbildung 2.3: Messpositionen der raumakustischen Messung (aus Simulationsprogramm), rot: Lautsprecher, blau: Mikrofon



(a) Blockschaltbild des Messaufbaus



(b) Foto des Messaufbaus, im Hintergrund sind die beiden Mikrofonarrays des DIRHA-Systems gut zu erkennen

Abbildung 2.4: Messaufbau

2.2.2 Ergebnisse der Messung

Nachhallzeit T_{30}

Die gemessene Nachhallzeit T_{30} zeigt ab 125Hz einen überraschend gleichmäßigen Verlauf (s. Abb. 2.5), es ist eine Überhöhung im Bereich von $1\text{kHz} - 2\text{kHz}$ feststellbar. Der Abfall der Nachhallzeit hin zu 63Hz äußert sich auch in einem großen Wert der Standardabweichung $\sigma_{T_{30}}$ zwischen den Messpositionen, welcher einerseits auf einen zu geringen Signal-Rausch-Abstand („signal-to-noise ratio“, kurz „SNR“; s. Tab. 2.1) zurückzuführen ist: die kleinen - und damit bandbegrenzten - Membranen des Messlautsprechers rufen im Tieffrequenten nur eine unzureichende Anregung des Schallfeldes hervor. Andererseits kommt durch die relativ geringe Anzahl an Messpositionen und dem damit recht großen Abstand derer zueinander die Modenproblematik zum tragen. Diese äußert sich dadurch, dass durch stehende Wellen der gemessene Schalldruckpegel im tieffrequenten Bereich stark ortsabhängig ist.

Aufschluss darüber, ab welcher Frequenz eine ausreichende Modendichte für statistisch aussagekräftige Nachhallzeitmessungen vorliegt, gibt die *Schröderfrequenz*. Unterhalb dieser Frequenz führen Raummoden zu hörbaren Verzerrungen, die die Messung entsprechend verfälschen. Sie berechnet sich zu

$$f_{\text{Schröder}} = 2000 * \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.1)$$

Das Raumvolumen V beträgt $72,13\text{m}^3$, die Nachhallzeit T beträgt über alle Oktaven gemittelt $T_{30} = 0,56\text{s}$

$$f_{\text{Schröder}} = 2000 * \sqrt{\frac{0,56\text{s}}{72,13\text{m}^3}} = 176,22\text{Hz} \quad (2.2)$$

In der 63Hz - und 125Hz -Oktave sind damit Verfälschungen der Messergebnisse durch stehende Wellen zu berücksichtigen.

<i>Freq.</i> (Hz)	T_{30} (s)	$\sigma_{T_{30}}$ (s)	<i>SNR</i> (dB)	σ_{SNR} (dB)
63	0.43	±0.07	19.50	±4.57
125	0.56	±0.03	36.94	±6.20
250	0.55	±0.03	55.27	±5.43
500	0.57	±0.02	55.26	±3.88
1000	0.62	±0.02	57.23	±2.11
2000	0.63	±0.02	60.81	±1.82
4000	0.60	±0.02	54.03	±1.20
8000	0.54	±0.01	48.52	±1.14
16000	0.50	±0.01	33.73	±1.60

Tabelle 2.1: Gemittelte Nachhallzeit T_{30} , Standardabweichung $\sigma_{T_{30}}$ und gemittelte *SNR*

Ergebnisverfälschung der Nachhallzeit T_{30} durch Extrapolation und Ermittlung einer repräsentativen Impulsantwort

Die Nachhallzeit T ist allgemein definiert als die Zeit, die unmittelbar nach Ausschalten eines Impuls-Signals vergeht, bis die Schallenergie im angeregten Raum um 60dB gesunken ist (T_{60}). In aller Regel wird heutzutage statt einem Impuls ein Sweep oder pseudo-zufälliges Rauschen (MLS-Signal) verwendet, woraus dann wiederum die Impulsantwort berechnet werden kann. Dies

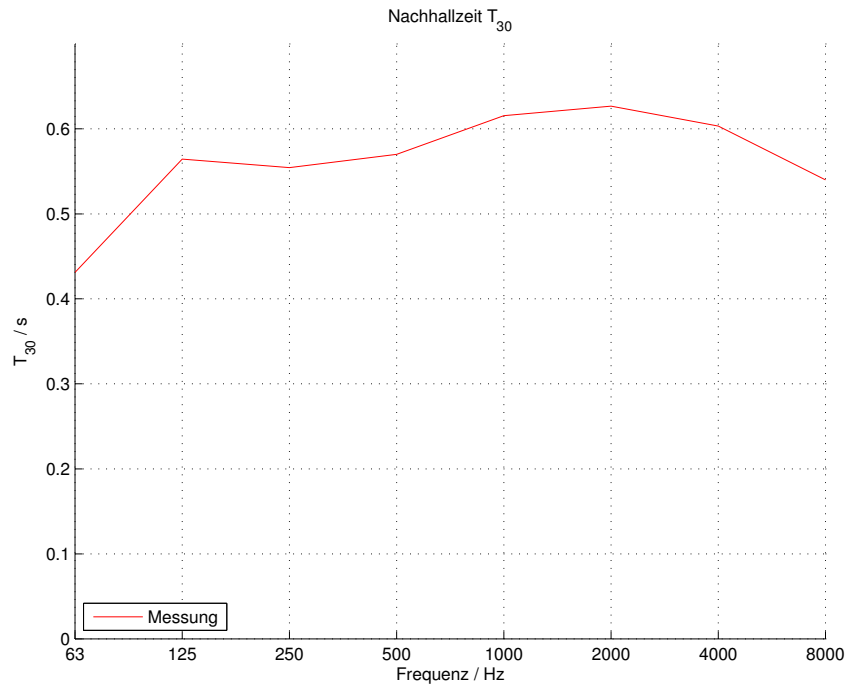


Abbildung 2.5: Nachhallzeit T_{30} , gemittelt über alle neun Messpositionen bei zwei Quellpositionen

hat den Vorteil, dass so eine deutlich höhere SNR als mit einem einzelnen Impuls erreicht werden kann. Eine SNR von (mehr als) $60dB$, um einen entsprechenden Pegelabfall messen zu können, ist dennoch nur schwer realisierbar. Es wird daher ein Abfall von nur $-30dB$ gemessen und die dort festgestellte Nachhallzeit auf $-60dB$ extrapoliert, um weiterhin eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Messmethoden zu gewährleisten. Je nach Form der Abklingkurve kann es daher zu mehr oder weniger starken Verfälschungen des Ergebnisses der Nachhallzeitberechnung kommen.

Hierfür gilt es zunächst einen repräsentativen Messpunkt zu finden, dessen Impulsantwort am ehesten der Charakteristik des gesamten Raumes entspricht. Im Gegensatz zur Nachhallzeit macht es bei der Impulsantwort nämlich keinen Sinn den Mittelwert zu bilden, da die örtlichen Abhängigkeiten zu stark sind und so nur ein sehr ungenaues Abbild entsteht.

Die Nachhallzeit wird direkt aus den Impulsantworten berechnet, sie kann daher als Vergleichsgröße der einzelnen Messungen dienen: Mit Hilfe eines Matlab-Skripts wurde der Messpunkt bestimmt, dessen Nachhallzeit der gemittelten Nachhallzeit über alle Messpunkte am nächsten kommt. Im ersten Schritt wird dabei die Abweichung jeder Einzelmessung vom arithmetischen Mittelwert für jede Oktave berechnet. Es bleiben also für jeden Messpunkt neun Werte, jeweils für $63Hz$, $125Hz$... $16kHz$. Im zweiten Schritt werden dann die Abweichungen der Oktaven einer Messung durch Bildung der Standardabweichung untereinander verglichen („Abweichung der Abweichung“). Es bleibt ein Wert pro Messung, je niedriger dieser Wert ist, desto eher entspricht die Einzelmessung dem arithmetischen Mittelwert. So konnte ein einzelner Messpunkt ausgemacht werden, der dem Charakter des gesamten Raumes am nächsten kommt (s.Abb. 2.6 & 2.7).

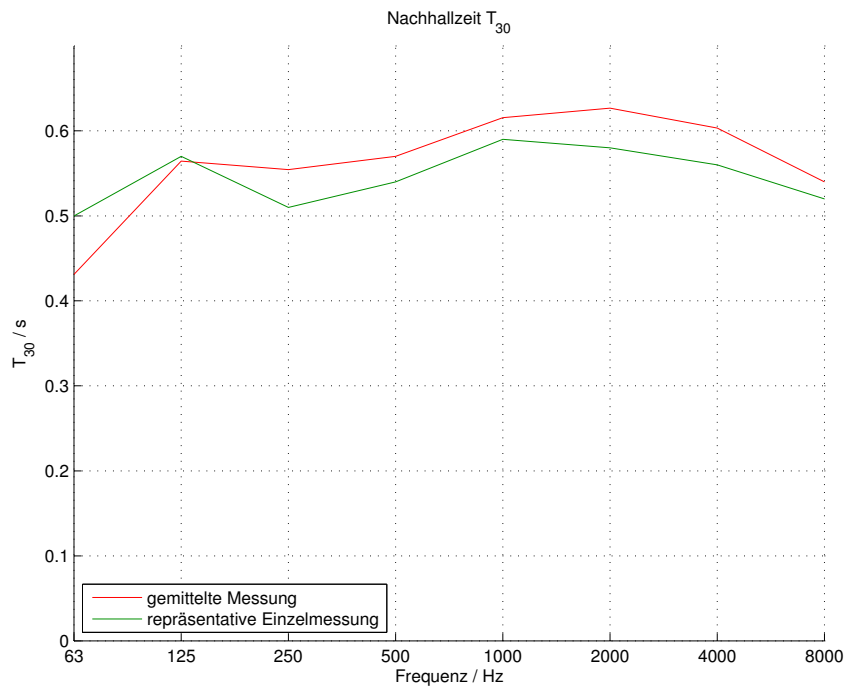
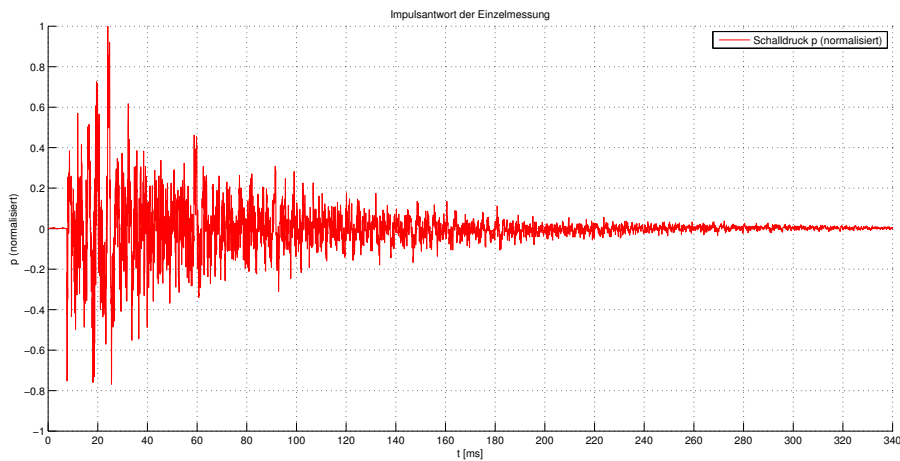
Abbildung 2.6: Gemittelte und repräsentative Nachhallzeit T_{30} 

Abbildung 2.7: Impulsantwort der repräsentativen Einzelmessung

Die Ordinate der Impulsantwort ist deswegen normalisiert, weil die Abbildungen zur Impulsantwort erst nachträglich, auf einem anderen PC erstellt wurden. Bei diesem Systemwechsel gingen leider die Kalibrierungsinformationen verloren, weshalb eine quantitative Beschriftung der Achse nicht möglich ist. Bei der Bewertung der Impulsantwort geht es aber ohnehin nur um deren qualitative Einschätzung.

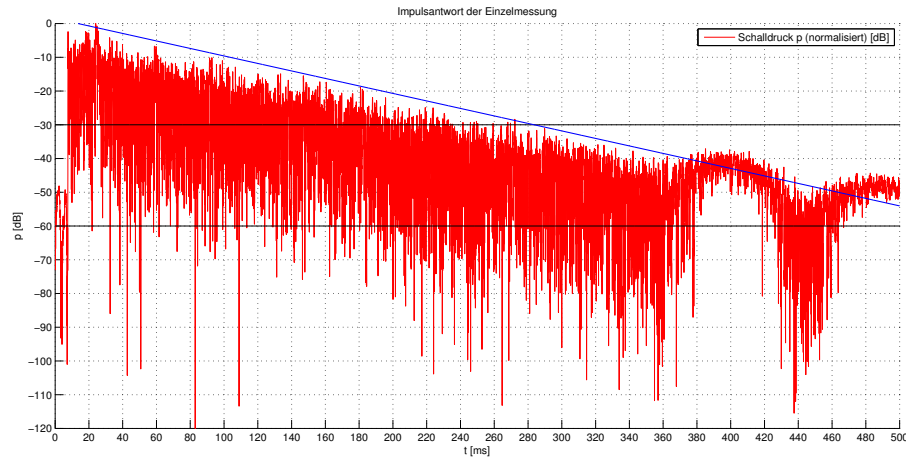


Abbildung 2.8: Impulsantwort der repräsentativen Einzelmessung, logarithmische Ansicht

Man erkennt in Abb. 2.8 dass auch nach Erreichen der -30dB -Linie die Einhüllende (blaue Linie) weiter geradlinig sinkt, ehe die Impulsantwort bei ca. -45dB ins Grundrauschen (Welligkeit) über geht. Es ist daher unwahrscheinlich, dass es durch Extrapolation zu einer Ergebnisverfälschung der Nachhallzeit kommt.

Deutlichkeitsgrad D_{50}

Da im vermessenen Raum eine gute Sprachverständlichkeit im Vordergrund steht, kann zusätzlich zur Nachhallzeit der Deutlichkeitsgrad nach THIELE zur Bewertung der Raumakustik herangezogen werden (s. Abb. 2.9). Dieser sollte im günstigen Fall einen Wert von 50% nicht unterschreiten, d.h. mehr als die Hälfte der gesamten Schallenergie trifft in den ersten 50ms bei der Zuhöherin/beim Zuhörer ein.

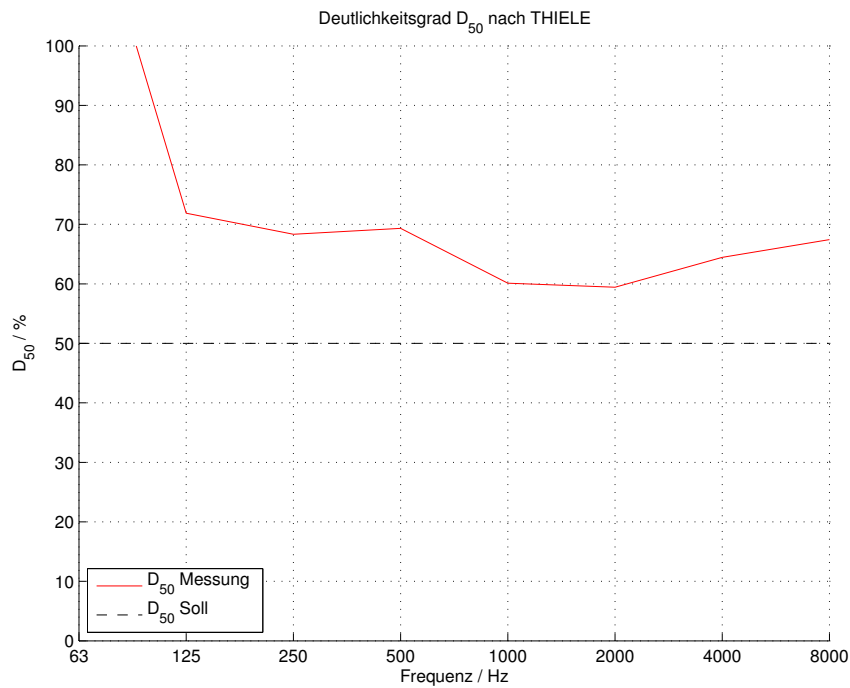
Frq. (Hz)	D_{50} (%)	$\sigma_{D_{50}}$ (%)
63	132.30	± 67.98
125	71.89	± 28.29
250	68.33	± 26.11
500	69.33	± 26.16
1000	60.11	± 23.04
2000	59.44	± 22.49
4000	64.44	± 24.31
8000	67.44	± 25.40
16000	74.89	± 28.25

Tabelle 2.2: Gemittelter Deutlichkeitsgrad D_{50} und Standardabweichung $\sigma_{D_{50}}$

Das Messergebnis in der 63Hz -Oktave (s. Tab. 2.2) ist dabei in jedem Fall fehlerhaft: Der Deutlichkeitsgrad ist definiert zu

$$D_{50} = \frac{\int_{0\text{ms}}^{50\text{ms}} p^2 dt}{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p^2 dt} * 100\% \quad (2.3)$$

Diese Definition findet sich so auch im Handbuch der Software *WinMLS* [WinMLS, Manual, S. 399]. Ist der Wert von D_{50} nun $> 100\%$, d.h. > 1 , würde das bedeuten, dass der quadrierte Schalldruckpegel p^2 in den ersten 50ms negativ ist:

Abbildung 2.9: Gemittelter, gemessener Deutlichkeitsgrad D_{50}

$$D_{50} \stackrel{!}{>} 100\% \implies \int_{0ms}^{50ms} p^2 dt > \int_{0ms}^{\infty} p^2 dt$$

$$\int_{0ms}^{50ms} p^2 dt > \int_{0ms}^{50ms} p^2 dt + \int_{50ms}^{\infty} p^2 dt \quad | - \int_{0ms}^{50ms} p^2 dt$$

$$\int_{50ms}^{\infty} p^2 dt < 0$$

Da der Schalldruck jedoch quadriert wird, ist ein negativer Wert ausgeschlossen. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich hierbei um einen Bug der Messsoftware handelt, etwa durch falsche Fensterung des Frequenzabbildes, da der Fehler nicht reproduzierbar an verschiedenen Messpositionen und dabei aber immer nur im $63Hz$ -Band auftritt. Gestützt wird diese Vermutung dadurch, dass in einer kurzen Konversation in einem Onlineforum zwischen einem anderen User und einem Entwickler der Software ein ganz ähnliches Problem als möglicher Softwarefehler geschildert wird [WinMLS, Web].

Im restlichen Frequenzverlauf weist der Deutlichkeitsgrad hingegen relativ gute Werte auf, wobei sich die erhöhte Nachhallzeit bei $1kHz - 2kHz$ auch in diesem Gütemaß als deutlicher Einbruch niederschlägt. Insgesamt kann aber gesagt werden, dass mit der Pauschalangabe von 50% als „guter“ Wert in einem - wie hier - eher kleinen Raum mit Vorsicht umzugehen ist, da sich der subjektive Raumeindruck mit dem einer guten Verständlichkeit nicht wirklich deckt.

2.3 Simulation der Raumakustik in CATT-Acoustic

Um verschiedene Konzepte einer Optimierung bereits im Vorfeld bewerten zu können, ist eine Simulation des Raumes in der Software *CATT – Acoustic* Bestandteil dieser Arbeit. Dabei wird zunächst für den Ausgangszustand des Raumes ein Simulationsprojekt angelegt, das später um das erarbeitete Akustikkonzept erweitert wird.

2.3.1 Geometrische Vermessung des Raumes

Für die Erstellung des sog. „GEO-Files“ der Simulation, in dem ein exaktes Modell des Raumes angelegt wird, ist es notwendig, dessen genaue geometrische Abmessungen zu kennen. Diese wurden vor Ort mittels einem Laser-Distanzmessgerät und einem Meterstab ermittelt. Kleinere Objekte wurden dabei vernachlässigt, da sie durch Beugungseffekte ab einer bestimmten Größe relativ zur Frequenz kaum mehr Einfluss auf das Schallfeld haben (Abmessung $x \ll \frac{c}{2\pi * f}$, $2\pi \frac{x}{\lambda} = He \dots Helmholtzzahl$). Eine Abbildung des Simulationsmodells ist in Abb. 2.10 dargestellt.

Die simulierten Lautsprecher- und Mikrofonpositionen werden entsprechend der realen Messung gewählt (s. Abb. 2.3, S. 13). Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit werden mit 22, 1°C/36, 4% gleich der Messsituation aus Abschnitt 2.2, S. 12 angenommen.

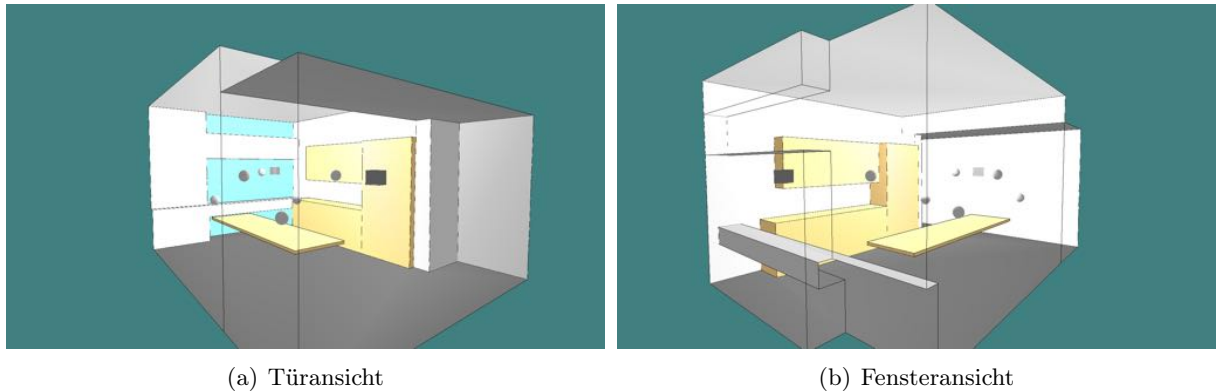


Abbildung 2.10: 3D-Modell des programmierten Raumes

2.3.2 Berechnung des mittleren Absorptionsgrades

Der Aufbau der Wände und Oberflächen im Raum ist weitestgehend unbekannt, eine Abschätzung der Absorptionseigenschaften mittels literarischer Tabellen ist daher nicht möglich. Die Kenntnis der Absorptionsgrade der Flächen ist jedoch notwendig, um eine Simulation vornehmen zu können (zwingendes Attribut der programmierten Flächen). Daher wird nach [ÖNORM B 8115-3, S. 4] ein mittlerer Absorptionsgrad α_m für die gesamte Raumbofläche aus den gemessenen Nachhallzeiten je Oktave ermittelt. Dies geschieht durch Umformen der SABINESchen Nachhallformel:

$$T = 0,161 * \frac{V}{\sum S_i * \alpha_m} \implies \alpha_m = \frac{0,161 * V}{T * \sum S_i} \quad (2.4)$$

mit $T = T_{30, mess}$, $V = 72,13m^3$ und $\sum S_i = 129,04m^2$ ergeben sich die in Tab. 2.3 dargestellten Werte:

<i>Frq.</i> (Hz)	$T_{30,meas}$ (s)	α_m
63	0.43	0.21
125	0.56	0.16
250	0.55	0.16
500	0.57	0.16
1000	0.62	0.15
2000	0.63	0.14
4000	0.60	0.15
8000	0.54	0.17
16000	0.50	0.18

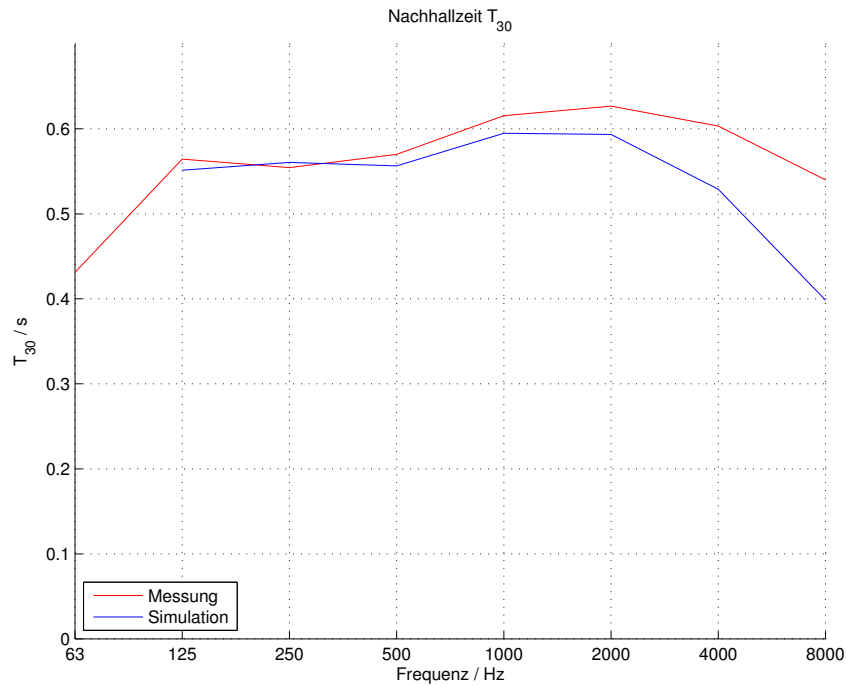
Tabelle 2.3: Berechneter Absorptionsgrad α_m

Für die Simulation sind softwarebedingt nur die Werte von $125\text{Hz} - 4\text{kHz}$ von Relevanz. Diese können nun im GEO-File des Simulationsprojekts für alle Flächen eingegeben werden.

2.3.3 Ergebnisse der Simulation

Der Verlauf der simulierten Nachhallzeit T_{30} (s. Abb. 2.11) steht insgesamt in guter Näherung zu den gemessenen Werten. Die auftretenden Abweichungen um $500\text{Hz} - 2\text{kHz}$ sind vermutlich durch Resonanzeffekte in den Kästen der Küchenzeile bedingt, die im Simulationsprogramm nur als starre Flächen programmiert werden können. Die weitere Diskrepanz der Kurven zueinander hin zu hohen Frequenzen lässt sich durch die Algorithmik der Software erklären: Während im unteren Frequenzbereich bis 4kHz numerisch ein exaktes Ergebnis berechnet wird, stellt der Verlauf der Nachhallzeit über 4kHz lediglich einen angenommenen, extrapolierten Ergebnisverlauf der vorhergehenden Frequenzbänder dar.

Prinzipiell wäre es zwar möglich, durch Variation des Absorptionsgrades der programmierten Flächen eine bessere Korrelation zwischen Messung und Simulation zu erreichen. Es wird jedoch bewusst darauf verzichtet, um die Transparenz der vollzogenen Arbeitsschritte zu wahren.

Abbildung 2.11: Simulierte und gemessene Nachhallzeit T_{30}

2.4 Qualitative Einschätzung der Ergebnisse von Messung und Simulation

Ohne entsprechende Vergleichs- oder Erfahrungswerte fällt es schwer, die gemessenen bzw. simulierten Nachhallzeiten qualitativ sinnvoll einzuordnen. Diese Vergleichswerte gibt nun wiederum die Norm [ÖNORM B 8115-3, S. 5f] vor, mit Hilfe derer sich bei Kenntnis des Raumvolumens und der gewünschten Nutzung des Raumes (Kategorie „Kommunikation“) über eine empirische Formel eine ideale Nachhallzeit T_{soll} berechnen lässt:

$$T_{soll, Kommunikation} = 0,32 * \log(V) - 0,17 \quad (2.5)$$

mit $V = 72,13m^3$:

$$T_{soll} = 0,32 * \log(72,13m^3) - 0,17 = 0,425s \quad (2.6)$$

Dieser Orientierungspunkt zur Nachhallzeit gilt für den Frequenzbereich von $63Hz - 8kHz$, es ist nach der Norm jedoch eine Toleranz von $\pm 20\%$ über den gesamten Frequenzbereich vorgesehen, welche unter $250Hz$ sowie über $2kHz$ nochmals nach unten erweitert ist. Siehe hierzu die gestrichelte schwarze Linie in Abbildung 2.12.

Man erkennt, dass die Nachhallzeit über den gesamten Frequenzbereich deutlich zu hoch ist, im Bereich von $1kHz - 2kHz$ sogar bis zu 50% gegenüber T_{soll} (schwarze, durchgezogene Linie in Abbildung 2.12). Im Ergebnis klingt der Raum also zu laut, zu aufdringlich, wie es bereits in der ersten Begutachtung erkennbar war. Es gilt also nun, in einem entsprechenden Konzept die Nachhallzeit zu verringern und sie möglichst nahe an die von der Norm vorgegebene Soll-Nachhallzeit anzunähern.

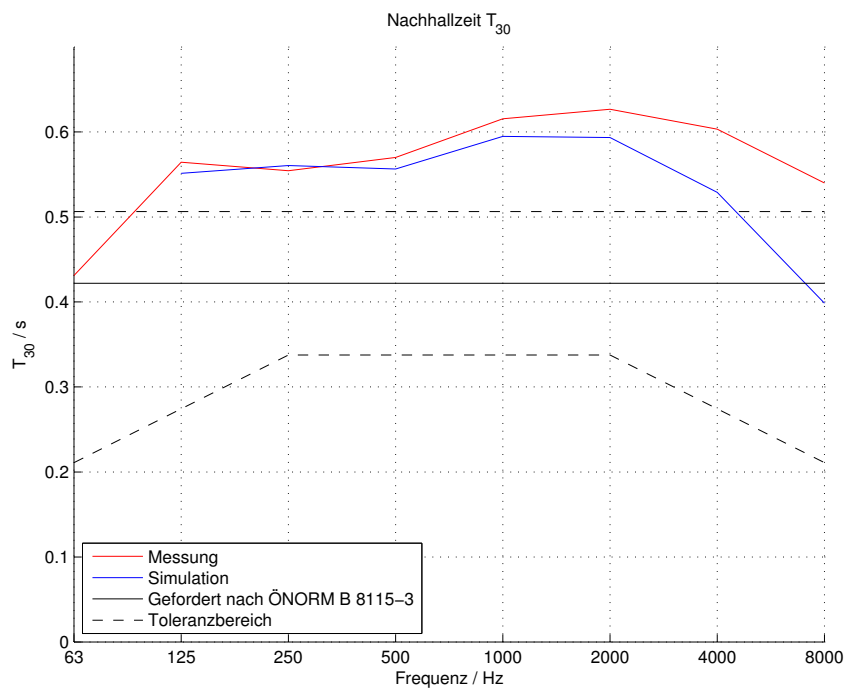


Abbildung 2.12: Geforderte, gemessene und simulierte Nachhallzeit T_{30}

3

Erarbeitung eines raumakustischen Konzepts

Nachdem nun die genauen Eigenschaften des Raumes bekannt sind und weiters das Ziel der raumakustischen Optimierung aufgestellt ist, kann mit der Erarbeitung eines Konzepts begonnen werden. Dabei werden zunächst ganz allgemein mögliche Veränderungen und deren Eigenheiten diskutiert, die dann zugeschnitten auf den vorliegenden Raum geplant werden.

3.1 Allgemeine Anforderungen an das Konzept

3.1.1 Wahl des Absorbertyps

Man unterscheidet grundsätzlich drei Arten von Absorbern: Poröse Absorber, Plattenabsorber und Resonanzabsorber (Für weitere Informationen zur genauen physikalischen Funktionsweise siehe [FUCHS, 2010]). Weiters treten auch Hybride auf, die eine Kombination der Grundtypen darstellen. Die Wahl des Absorbertyps hängt nun von verschiedenen Faktoren ab:

- Bereich der zu absorbierenden Frequenzen
- Platzangebot im Raum
- Mechanische Anforderungen (Gewicht, Robustheit)
- Budget

Wie die Messung des Ausgangszustandes (s.Abb. 2.5, S. 15) zeigte, liegt die Nachhallzeit über den gesamten Frequenzbereich bei ca. $0,55s - 0,6s$, es sind keine besonders ausgeprägten Spitzen zu erkennen. Eine schmalbandige Absorption eines bestimmten Frequenzbandes ist daher nicht notwendig. Vielmehr gilt es, die Nachhallzeit möglichst breitbandig zu senken. Dies ist am einfachsten mit porösen Absorbern zu bewerkstelligen. Auch in Bezug auf die Variabilität erweist sich dieser Absorbertyp als sinnvollste Variante, weil sich große Absorptionsflächen durch einfaches Aufteilen in einzelne Teilflächen aufbrechen lassen, ohne dass die Anordnung nennenswert an Wirkung einbüßt.

Im Gegensatz dazu müssen Plattenabsorber eine fixe, zusammenhängende Fläche aufweisen, die sich nur schwer im vorliegenden, kleinen Raum unterbringen lässt. Dabei weisen sie zusätzlich ein sehr hohes Gewicht auf.

Auch Helmholtzresonatoren sind durch die nötige Starrheit des Materials üblicherweise sehr schwer und widersprechen damit der geforderten einfachen Variabilität. Ferner lassen sich Helmholtzresonatoren sowie Plattenabsorber zwar gut auf einen bestimmten, sehr schmalen Frequenzbereich justieren, dies ist hier aufgrund der geforderten breitbandigen Absorption aber ohnehin nicht nötig.

Nicht zuletzt ist natürlich das Budget ein wichtiger Faktor bei der Planung. Auch in diesem Punkt ist der poröse Absorber die beste Wahl, da als dessen akustisch wirksames Material Mineralwolle verwendet werden kann. Diese wird für eine Vielzahl weiterer Anwendungen in großem Maßstab produziert und ist dementsprechend günstig im Preis.

3.1.2 Abschätzung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche

Wie im Abschnitt 2.4 „Qualitative Einschätzung der Ergebnisse von Messung und Simulation“, Gleichung 2.5 bzw. 2.6 gesehen, beträgt die Soll-Nachhallzeit $T_{soll} = 0,425s$. Um diese zu erreichen, lässt sich die zusätzlich in den Raum einzubringende, äquivalente Absorptionsfläche $A_{Zusatz} = S_{Abs} * \alpha_{Abs}$ mittels der SABINEschen Nachhallformel abschätzen:

$$T = 0,161 * \frac{V}{A_{ges}} = 0,161 * \frac{V}{A_{vorhanden} + A_{Zusatz}} \quad (3.1)$$

$$A_{Zusatz} = \frac{0,161 * V}{T} - A_{vorhanden} \quad (3.2)$$

mit $V = 72,13m^3$, $T = T_{soll} = 0,425$ und $A_{vorhanden} = S_{ges} * \bar{\alpha}_m = 129,04m^2 * 0,14 = 18,066m^2$ ($\bar{\alpha}_m$ ist der mittlere Absorptionsgrad aus Abschnitt 2.3.2, Seite 19 über die Oktaven verlässlicher Messergebnisse von $125Hz - 16kHz$ gemittelt):

$$A_{Zusatz} = \frac{0,161 * 72,13m^3}{0,425s} - 18,066m^2 = 9,26m^2 \quad (3.3)$$

Die Norm [ÖNORM B 8115-3] bietet, wie in 2.4 gesehen, die Möglichkeit einer 20 prozentigen Toleranz der Nachhallzeit. Die minimal einzubringende Fläche ergibt sich dann mit $T_{Toleranz} = T_{soll} * 1,20$ zu

$$A_{Zusatz} = \frac{0,161 * 72,13m^3}{0,425s * 1,20} - 18,066m^2 = 4,70m^2 \quad (3.4)$$

Diese Werte geben nur eine grobe Richtung an. Dadurch, dass der reale Absorptionsgrad α_{Abs} des einzubringenden Absorbers im Mittel kaum den Wert 1 erreichen wird, würde die tatsächliche Absorberfläche $S_{Abs} = \frac{A_{Abs}}{\alpha_{Abs}}$ steigen. Zusätzlich überdeckt in der Realität der Absorber einen Teil der bereits vorhandenen (wenig) absorbierenden Fläche. Zur groben Einschätzung des zu erwartenden Materialaufwandes soll diese Abschätzung jedoch genügen.

Alternative Abschätzung

In Räumen, in denen die Kommunikation im Vordergrund steht und die einzelnen Quellen (d.h. die sprechenden Personen) im Raum verteilt sind (also vor allem Restaurants, Cafés, ...) kann zur Abschätzung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche nach [MÖSER, 2015, S. 247f] auch eine Adaption des Hallradius, der sog. *Individualitätsradius* r_I herangezogen werden. Dieser beruht darauf, dass das von N Personen mit einer jeweils abgestrahlten Schalleistung P erzeugte diffuse Schallfeld nicht größer als das von *einer* Person erzeugte Direktschallfeld im Abstand r_I sein darf, um eine entsprechende Verständlichkeit zu wahren:

$$p_{diffus}^2 \leq p_{direkt}^2 \quad (3.5)$$

Der Schalldruck des erzeugten Diffusschallfeldes berechnet sich zu (ohne Herleitung)

$$p_{diffus}^2 = \frac{4 \cdot \rho \cdot c \cdot N \cdot P}{A_{ges}} \quad (3.6)$$

Der direkt abgestrahlte Schalldruck eines Individuums berechnet sich zu (ohne Herleitung)

$$p_{\text{direkt}}^2 = \frac{\rho \cdot c \cdot P}{4 \cdot \pi r_I^2} \quad (3.7)$$

Gleichsetzen ergibt den Individualitätsradius r_I

$$r_I \approx \frac{1}{7} \sqrt{\frac{A_{\text{ges}}}{N}} \quad (3.8)$$

Nimmt man für den hier vorliegenden, kleinen Raum einen Individualitätsradius von $r_I = 0,3m$ bei $N = 8$ Personen im Raum (voll besetzter Konferenztisch) an, so berechnet sich die zusätzliche einzubringende äquivalente Absorptionsfläche $A_{\text{Zusatz}} = A_{\text{ges}} - A_{\text{vorhanden}}$ zu

$$A_{\text{Zusatz}} = (r_I \cdot 7 \cdot \sqrt{N})^2 - A_{\text{vorhanden}} \quad (3.9)$$

$$A_{\text{Zusatz}} = (0,3m \cdot 7 \cdot \sqrt{8})^2 - 18,066m^2$$

$$A_{\text{Zusatz}} = 17,214m^2 \quad (3.10)$$

Die Verwendung des Individualitätsradius ist zur Bestimmung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche im vorliegenden Fall jedoch aus zwei Gründen nicht zielführend: Erstens ist der Raum zu klein, als dass sich in ihm ein hinreichend diffuses Schallfeld ausbilden kann. Zweitens beruht die Annahme des Individualitätsradius darauf, dass sich die Personen im Raum unabhängig voneinander unterhalten. Im Sinne einer Besprechung trifft dies jedoch nicht zu, da üblicherweise die teilnehmenden Personen nacheinander ihre Wortmeldungen vorbringen.

3.1.3 Positionierung der Absorber im Raum IEEG136

Der Raum bietet kaum weite Flächen, um Absorber anzubringen (außer natürlich die Decke, die jedoch nicht verwendet werden kann, da eine variable Lösung entstehen soll). Es finden sich aber einige Nischen im Raum, die eine große Tiefe der Absorber von bis zu 30cm zulassen würden: Über der Küchenzeile sowie in der Kante des Deckensprungs. Eine große Einbautiefe ist deswegen von Vorteil, da die Absorptionswirkung eines porösen Absorbers am Ort des Maximums der Schallschnelle am größten ist. Die Schallschnelle v beträgt an der schallharten Wand immer $v(x=0) = 0$, das erste Maximum liegt damit bei $x = \frac{\lambda}{4}$. Optimale Absorption wird bei einer Einbautiefe von $d = 0,3m$ somit bei Frequenzen ab $f = \frac{c}{d \cdot 4} = \frac{340 \frac{m}{s}}{0,3m \cdot 4} \approx 290Hz$ erreicht.

Die einzige plane Wand im Raum, an der Seite der Eingangstür, kann nun zusätzlich mit flachen Absorbern ausgestattet werden, um dem Gesprächslärm am Tisch entgegenzuwirken. Das Platzangebot im Raum wird dadurch kaum verringert. Um Variabilität zu gewährleisten, ist keiner der Absorber breiter als $1,30m$, sodass die Anordnung von ein bis zwei Personen verändert bzw. abgenommen werden kann.

Mit diesem Konzept lassen sich $6m^2$ zusätzliche Absorptionsfläche im Raum unterbringen, ohne das Platzangebot wesentlich zu beeinträchtigen (s.Abb. 3.1). Dieser Wert steht auch in guter Relation zu der im Abschnitt 3.1.2, Formel 3.4 berechneten Fläche von mindestens $4,7m^2$. Es sollte so durchaus möglich sein, die Nachhallzeit an T_{soll} anzunähern oder zumindest den Toleranzbereich der Norm zu erreichen.



(a) Türansicht

(b) Fensteransicht

Abbildung 3.1: Qualitative Skizze der Positionen der Absorber

3.2 Entwurf der Absorber

3.2.1 Wahl des Absorbermaterials¹

Bei der Online-Recherche über die Produktpalette namhafter Mineralwollehersteller fiel zunächst das Modell *SSP2* von *Isover* ins Auge, da es sich dabei explizit um Glaswolle für den Akustikbau handelt (*Isover* ist Teil der *Saint-Gobain*-Gruppe, der erste Hersteller, der Mineralwolle im industriellen Stil Anfang des 20. Jahrhundert zu produzieren begann). Praktischerweise ist im Produktdatenblatt des Modells *SSP2* bereits dessen Absorptionsgrad α vermerkt. Die Oberfläche dieser in Plattenform vorgeschneittenen Mineralwolle ist mit einem Vlies kaschier, welche ihren Einbau ohne zusätzliches Einsacken (um Staubbildung zu vermeiden) ermöglicht. Ein weiterer Vorteil dieser Mineralwolle liegt in den praktischen Abmessungen: Die Platten bieten mit $125\text{cm} * 60\text{cm} * 5\text{cm}$ eine recht große Fläche, benötigen wenig Zuschnitt und sind dabei noch gut handhabbar. Auch der Preis von rund $7\text{€}/\text{m}^2$ erschien durchaus attraktiv.

Die schwierige Liefersituation der gewünschten Glaswolle machte es jedoch nötig, nach einer geeigneten Alternative zu suchen, die möglichst die gleichen akustischen- sowie geometrischen Eigenschaften bietet. Anhand des längenbezogenen Strömungswiderstandes Ξ , welcher ein Hauptmerkmal eines porösen Materials bzgl. seiner Schallabsorptionseigenschaften ist, konnte mit der Glaswolle *TP435B 50mm* des Herstellers *Knauf Insulation* eine den technischen Daten nach (Abmessungen, Strömungswiderstand, Vlieskaschierung; siehe Datenblatt im Anhang, S.81) gleichwertige Glaswolle gefunden werden, die ein Baustoff-Großhändler in Graz Seiersberg lagernd verfügbar hatte. Deren Preis lag mit $3,29\text{€}/\text{m}^2$ exkl. MwSt. nochmals deutlich unter dem des *Isover*-Modells.

Leider gibt der Hersteller *Knauf Insulation* für diese Mineralwolle keinen Absorptionsgrad an, dessen Kenntnis ist für die Simulation jedoch zwingend notwendig. Es war daher nötig, den Absorptionsgrad mittels einer Messung im Messrohr selbst zu bestimmen. Weil dabei einige interessante Phänomene auftraten, ist der Messung das anschließende Kapitel 4 „Messungen im Impedanzrohr“ gewidmet.

3.2.2 Entwurf der Rahmenkonstruktion

Da nun endgültig das genaue Modell der Mineralwolle, und damit deren genaue Maße bekannt waren, konnten nun geeignete Rahmenkonstruktionen entworfen werden. Die Rahmen sollten

¹ Zur Begriffsabgrenzung Mineralwolle/Glaswolle/Steinwolle siehe Punkt 7.4 „Zu Mineralwolle“ im Anhang

dabei so konzipiert sein, dass sie eine möglichst große Oberfläche für einfallenden Schall sowie eine große Tiefe für Absorption im tieffrequenten Bereich bieten. Weiters ist darauf zu achten, dass es zu möglichst wenig Verschnitt der Glaswolle kommt.

Für die plane Wand wurden zwei identische, flache Rahmen entworfen, die Platz für eine Schicht Mineralwolle bei einer Fläche von jeweils $1,5m^2$ bieten. Da die Absorber ohnehin komplett mit Stoff bespannt werden sollen, die Optik des Holzes also unwichtig ist, besteht der seitliche Rahmen aus Pressspan. Um Gewicht zu sparen ist die Rückwand aus einer Hartfaserplatte gefertigt. Dieser Werkstoff ist relativ flexibel und ähnelt in seinen Biegeeigenschaften denen von akustischen Plattenschwingern, was möglicherweise die Absorption in tiefere Frequenzen nochmals erweitert. Klarheit schafft jedoch erst die Abschlussmessung nach Montage der Absorber.

Die Küchenzeile, auf der ebenfalls Absorber angebracht werden sollen, besitzt eine Einbautiefe von $30cm$. Diese werden aber nicht ganz genutzt, damit die Türen der Küchenschränke weiterhin problemlos zu öffnen und zu schließen sind. Es werden zwei gleiche Rahmen entworfen, die eine Tiefe von maximal $25cm$, d.h. 5 Lagen Mineralwolle, bei einer Fläche von jeweils $0,75m^2$ bieten. Es wird das gleiche Material verwendet, wie für die Rahmen der Wandabsorber: seitliche Einfassung aus Pressspan, die Rückwand ist eine Hartfaserplatte.

Nach Rücksprache mit der Betreuerin dieser Arbeit, Fr. DI Balint, und Hr. Lässer, der handwerklich beratend zur Seite stand, wurde die Übereinkunft getroffen, die Absorber an der Decke im Sinne der Personensicherheit nicht variabel, sondern fix zu installieren. Auch hier werden zwei identische Rahmen entworfen, die - da nun nicht mehr auf das Gewicht geachtet werden muss - komplett aus Pressspan gefertigt werden. Sie besitzen die Form eines Prismas mit gleichschenkelig dreieckiger Grundform, deren offene Seite eine Fläche von jeweils $0,75m^2$ bietet. Ein sich verjüngender Zuschnitt der Glaswolleplatten lässt maximal $29cm$ Schichtungstiefe zu (s. Abb. 3.2(b)).

Die originalen Baupläne der Rahmen, die mittels der Open Source CAD-Software *FreeCAD* erstellt wurden, finden sich in Kap. 7 auf Seite 73 dieser Arbeit. Die ursprüngliche Idee, die Rahmen selbst zu bauen, wurde ob des zu erwartenden Materialaufwandes in Absprache mit Fr. DI Balint, verworfen. Stattdessen wurde die Tischlerei *Kompacher* mit dem Bau beauftragt.

3.2.3 Wahl des Deckstoffes

Die Stoffbespannung erfüllt mehrere Funktionen: sie verhindert das Herausfallen der Mineralwolle nach vorne, beugt einer Materialablösung und damit einer Verschmutzung durch die Glaswolle vor, und sorgt, zu guter Letzt, für eine passende, möglichst unauffällige Optik der Absorber. Der Stoff darf dabei nicht allzu dehnbar sein und muss akustisch möglichst transparent, jedoch dennoch blickdicht sein, um die anthrazitfarbene Vlieskaschierung der Glaswolle zu verstecken. Zunächst fiel die Wahl auf einen Bühnenmolton in cremeweiß. Bei Molton handelt es sich um einen schweren Stoff, der vor allem in der Theater- und Veranstaltungsbranche (daher auch der Name „Bühnenmolton“) Verwendung findet. Dass er für diese Anwendung jedoch alles andere als geeignet ist, zeigten die Messungen, die im folgenden Kapitel 4 „Messungen im Impedanzrohr“ ausführlich dargelegt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden weitere Stoffproben aus Baumwolle, Polyester und Viskose gekauft und vermessen. Die Wahl fiel letztlich auf einen akustisch transparenten Baumwollstoff.

3.3 Bau und Montage der Absorber

3.3.1 Zusammenbau der Absorber

Nachdem alle Materialien eingekauft und die Rahmen von der Tischlerei *Kompacher* geliefert wurden, konnte mit dem Zusammenbau begonnen werden. Das Anfüllen der Rahmen mit der

Mineralwolle ging dabei sehr leicht von der Hand und erforderte nur wenig Zuschnitt, da die Innenmaße der Rahmen exakt auf die Abmessungen der vorgeschneittenen Glaswolleplatten geplant worden sind. Da die Tiefe der Absorber auf der Küchenzeile nicht vollständig ausgenutzt wird (die Erweiterung der Schichtung bringt im Bereich 3/4/5 Lagen keine nennenswerte Verbesserung der Absorption, s. Kap. 4), wurde ein Drahtgitter in die Absorber montiert, um ein Verrutschen der aufrecht stehenden Platten zu verhindern (s. Abb. 3.2 & Abb. 3.3). Auf diesem Gitter wurden nun die Mineralwolleplatten angebracht und die Rahmen mit Stoff bezogen.

Der ursprüngliche Plan, den Deckstoff mit einer elektrischen Tackermaschine zu befestigen, ging nur bei den komplett aus Pressspan gefertigten Rahmen auf (Kantenabsorber). Für die Hartfaserrückwand der anderen Rahmen war der Tacker zu schwach. Alternativ wurde der Stoff daher mit Nägeln fixiert. Die überstehenden Stoffränder wurden auf der Rückseite mit Holzleim verklebt.

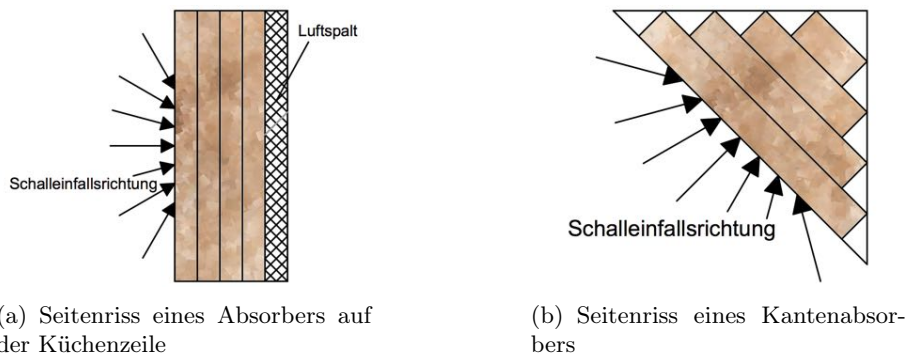


Abbildung 3.2: Skizzen des Absorberaufbaus



(a) Rahmen mit Distanzgitter



(b) gefüllter Rahmen



(c) fertige Kantenabsorber

Abbildung 3.3: Fotos des Absorberbaus

3.3.2 Montage der Absorber

Die Wandabsorber weisen in den oberen beiden Ecken Löcher auf, an denen die Absorber an Wandhaken aufgehängt werden (s. Abb. 3.5(b)). Beim Zusammenbau wurde dabei das Loch von innen mit einem Streifen Gaffa-Tape abgedichtet, um eine mögliche Staubablösung zu vermeiden (s. Abb. 3.4).



(a) Loch für Aufhängung



(b) abgedichtetes Loch

Abbildung 3.4: Aufhängung der Wandabsorber

Die Absorber in der Deckenkante sind ebenfalls an Haken im Wandvorsprung befestigt, zusätzlich gesichert mit jeweils zwei fix verschraubten Montageplatten (s. Abb. 3.5).



(a) Montage der Deckenabsorber



(b) montierte Absorber

Abbildung 3.5: Montagearbeiten

Die Absorber auf der Küchenzeile werden zur Montage nur auf die Kästen gelegt. Die Rahmen sind jedoch mit je einem Winkel in der Wand verschraubt, was ein Verrutschen und das etwaige Herunterfallen verhindert (s. Abb. 3.6(a) & Abb. 3.6(b)).

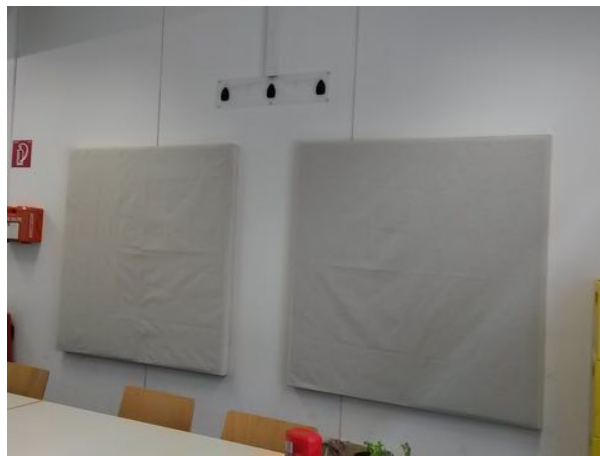
Die Montagearbeiten wurden vom Gebäude und Technik Service der TU Graz am 15.07.2016 durchgeführt.



(a) Absorber auf Küchenzeile



(b) Detailansicht der Sicherung



(c) montierte Wandabsorber

Abbildung 3.6: fertig montierte Absorber

4

Messungen im Impedanzrohr

4.1 Vermessung der Mineralwolle

Nur wenige Mineralwollehersteller weisen für ihre Produkte den Schallabsorptionsgrad aus, und das meist auch nur dann, wenn das Modell speziell für Akustikanwendungen entwickelt wurde, etwa zur Hinterfütterung akustischer Deckenabhängungen. Dies bedeutet nicht, dass andere Mineralwollen nicht für Akustikzwecke geeignet sind, es erspart den Herstellern jedoch den finanziellen Mehraufwand einer normgerechten akustischen Vermessung all ihrer Produkte. Die für die Absorber verwendete Mineralwolle *TP435B 50mm* von *Knauf Insulation* ist primär zur Wärme- und Schalldämmung hinterlüfteter Fassaden konzipiert, sie genügt aufgrund ihres längenbezogenen Strömungswiderstandes von $\Xi \geq 10 \frac{\text{kPa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$ aber durchaus auch raumakustischen Anforderungen. Da sich jedoch aus dem längenbezogenen Strömungswiderstand deren Absorptionsgrad α nicht direkt berechnen lässt, ist eine Messung im Messrohr notwendig. Desweiteren handelt es sich bei der verwendeten Glaswolle mit ihrer Vlieskaschierung und dem applizierten Deckstoff um einen - insgesamt betrachtet - inhomogenen porösen Absorber, was die Berechnung der akustischen Eigenschaften nochmals deutlich erschwert.

Die theoretischen Grundlagen zum Messrohr sowie die praktischen Handlungsanweisungen zur Messung und Bedienung der Messsoftware *CATS8* in diesem Kapitel unterliegen [MÖSER, 2015] und [DENDA, 2010]. Die Messungen wurden von 01.07.2016 - 03.07.2016 sowie am 30.07.2016 im Akustiklabor des Instituts SPSC durchgeführt.

4.1.1 Vorbereitungen und Messaufbau

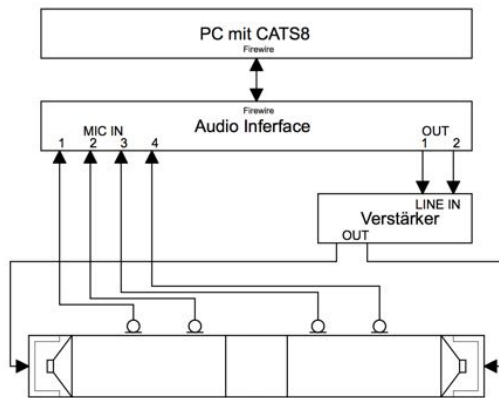
Zunächst mussten Messproben aus dem Material geschnitten werden. Die maximale Probenlänge im Messrohr des SPSC beträgt 20cm . Die Glaswolle weist eine Stärke von 50mm auf, es wurden also vier scheibenförmige Proben mit einem Durchmesser von je 10cm angefertigt (s. Abb. 4.1).



Abbildung 4.1: Einzelne Messprobe

Messaufbau, Einpegelung und Kalibrierung geschahen entsprechend [DENDA, 2010]: Die vier Mikrofone des Messrohres waren dabei mit einem RME Audiointerface verbunden, welches über Firewire an einem Laptop des SPSC angeschlossen war (s. Abb. 4.2). Die Anregung der Lautsprecher geschah über einen Leistungsverstärker von Parasound. Genaue Angaben zum verwendeten Equipment finden sich auf Seite 91 im Anhang dieser Arbeit.

Jede Messung wurde jeweils mit kurzem und weitem Mikrofonabstand durchgeführt, die Kombination dieser beiden Teilmessungen ergibt dann einen maximal gültigen Frequenzbereich von $85,75\text{Hz} - 1373,3\text{Hz}$.



(a) Blockschaubild des Messaufbaus



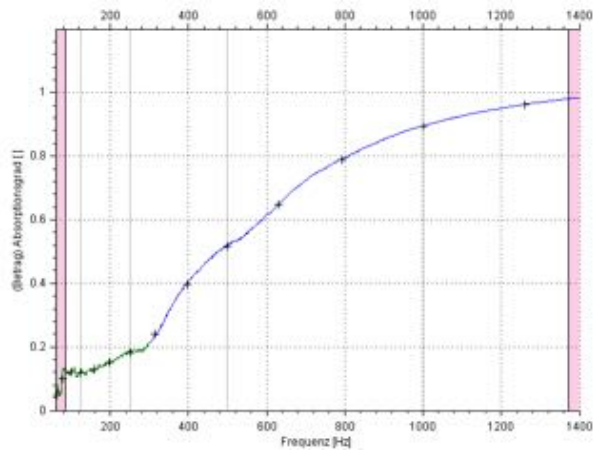
(b) Foto des Messaufbaus

Abbildung 4.2: Messaufbau

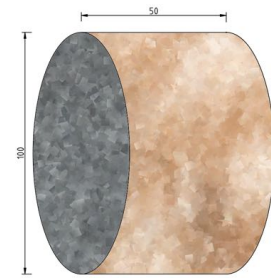
4.1.2 Erste Messung

Der erste Messdurchgang (s. Abb. 4.3 bis Abb. 4.7) förderte äußerst merkwürdige Ergebnisse zutage, der Verdacht eines systematischen Fehlers liegt nahe. Besonders auffällig ist dabei die stark ausgeprägte Welligkeit der Kurven unterhalb von 500Hz , gut zu erkennen in Abb. 4.7. Eine gewisse Welligkeit im Frequenzgang des Absorptionsgrades kommt bei porösen Absorbentien endlicher Dicke durchaus vor, nämlich dann, wenn die einfallende Schallwelle nicht vollständig absorbiert und zum Teil an einer rückwärtig angrenzenden, schallharten Wand reflektiert wird und so, nach erneutem Durchqueren des absorbierenden Materials, an dessen Oberfläche Interferenzerscheinungen mit der ursprünglichen Welle hervorruft. Die hier vorliegende Welligkeit ist für diesen Effekt jedoch zu unregelmäßig und zu stark ausgeprägt.

Eine weitere mögliche Erklärung ist, dass die Messproben selbst zum Schwingen angeregt werden und damit, quasi als „Membran“, Schall abstrahlen. Um diesem Effekt vorzubeugen dürfen die Proben nicht fest eingespannt, d.h. nicht zu groß sein. In der folgenden Messung im Abschnitt 4.1.3 wurden daher die Glaswolleproben ringsherum um mehrere Millimeter verkleinert.

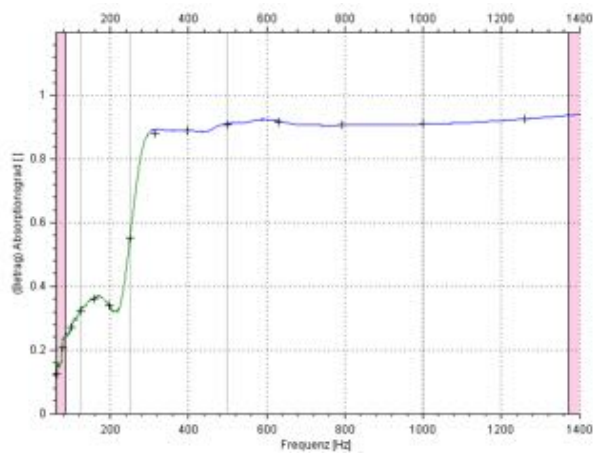


(a) 50mm Schichtung (einlagig)

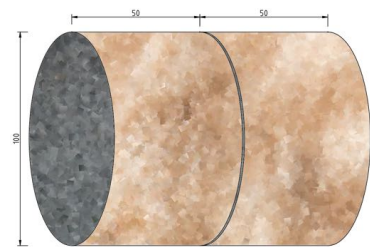


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.3: Messergebnis und Skizze der 50mm Schicht

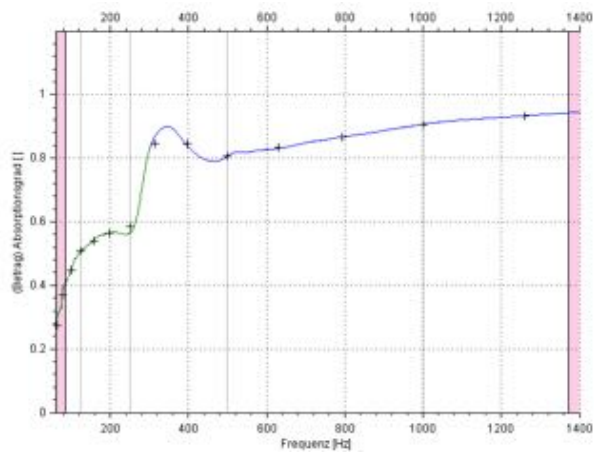


(a) 100mm Schichtung (zweilagig)

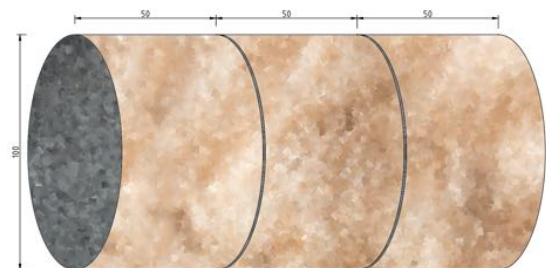


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.4: Messergebnis und Skizze der 100mm Schicht

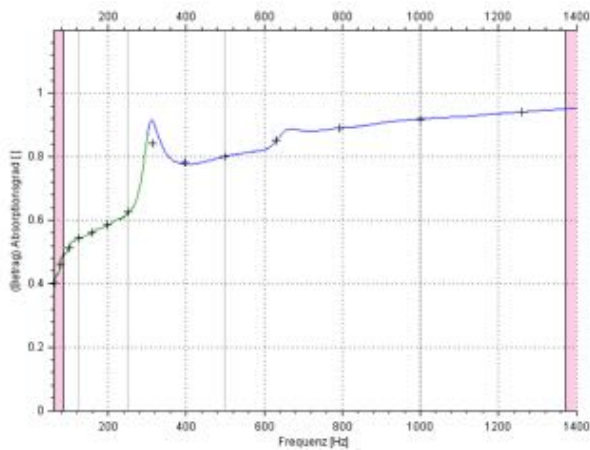


(a) 150mm Schichtung (dreilagig)

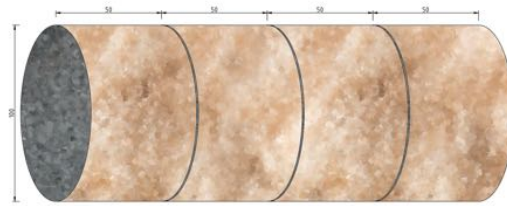


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.5: Messergebnis und Skizze der 150mm Schicht

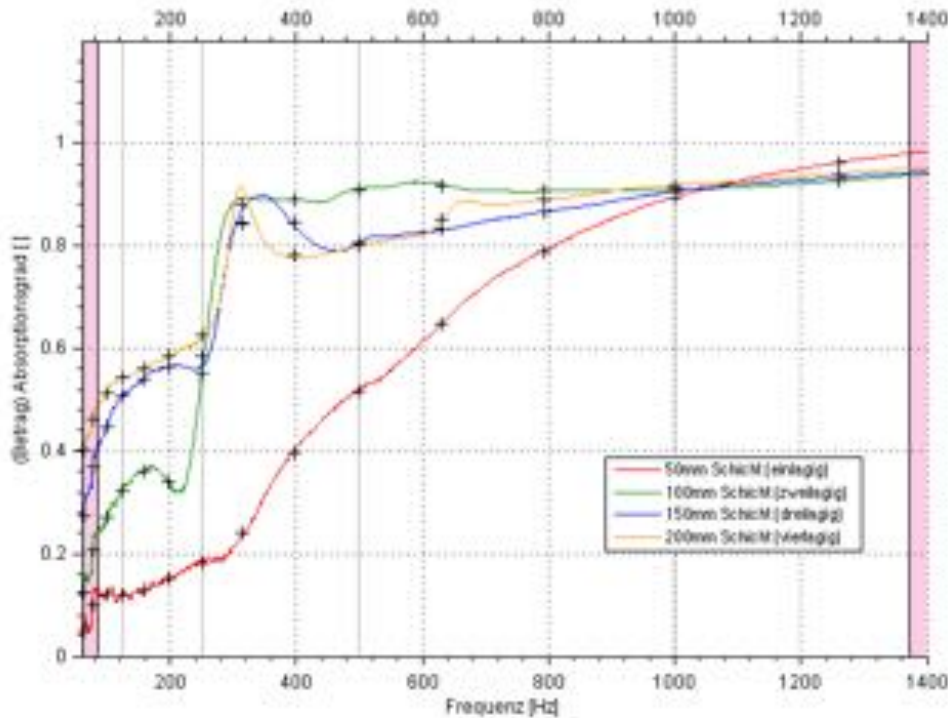


(a) 200mm Schichtung (vierlagig)



(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.6: Messergebnis und Skizze der 200mm Schicht

Abbildung 4.7: Vergleich des Absorptionsgrads α_0 für verschiedene Schichtungen

4.1.3 Zweite Messung: verringerter Probendurchmesser

Die Schichtung der Proben blieb gleich, siehe hierzu die Skizzen zur vorherigen Messung (s. Abb. 4.3(b), 4.4(b), Abb. 4.5(b) sowie Abb. 4.6(b)).

Die neue Messung (s. Abb. 4.8 & Abb. 4.9) zeigt einen deutlichen Rückgang der Welligkeit der Messkurven unter 500Hz (s. Abb. 4.10), die vorher recht feste Einspannung der Proben bewirkte also tatsächlich Schallabstrahlung. Im Vergleich der neuen Kurven verbleiben dennoch zwei markante Auffälligkeiten: Ein ausgeprägter Peak kurz vor einem starken Abfall des Absorptionsgrades im Bereich von 200Hz bis 300Hz (blau strichlierter Kreis in Abb. 4.10), besonders bei 3- und 4 lagiger Schichtung, sowie ein weiterer Peak im Abfall der Kurven bei 2-, 3-, und 4 lagiger Schichtung bei etwa 100Hz (rot strichlierter Kreis in Abb. 4.10).

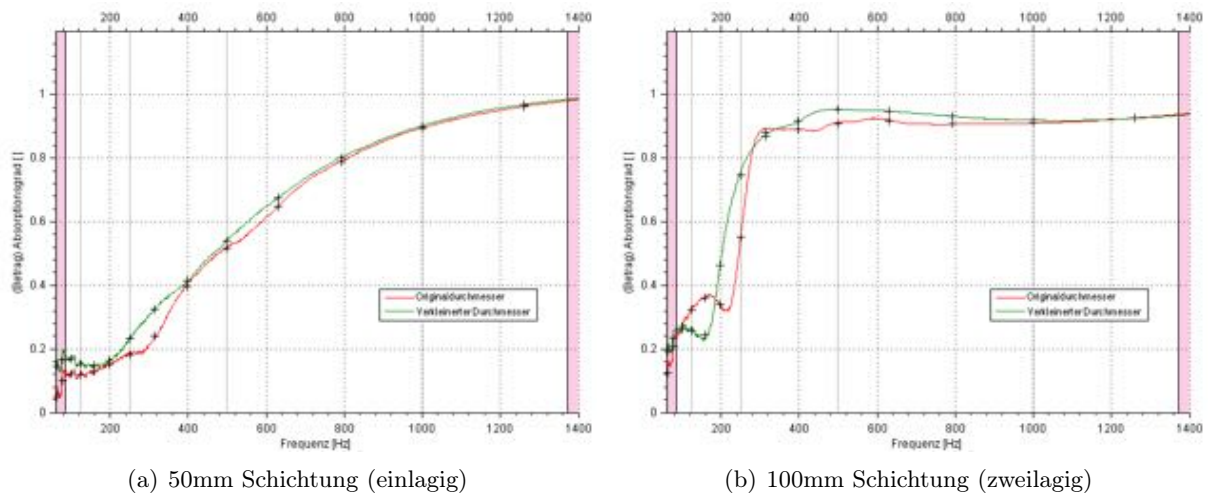


Abbildung 4.8: Messergebnis der 50mm und 100mm Schicht; ursprünglicher Durchmesser (rot) und neuer, verkleinerter Probendurchmesser (grün)

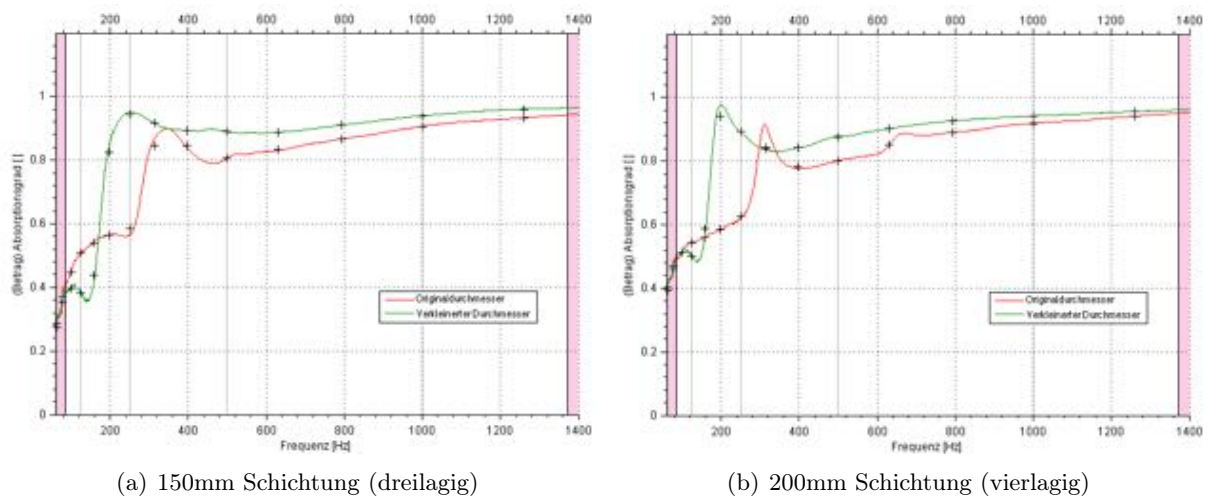


Abbildung 4.9: Messergebnis der 150mm und 200mm Schicht; ursprünglicher Durchmesser (rot) und neuer, verkleinerter Probendurchmesser (grün)

Einen weiteren Ansatz zur Erklärung der Welligkeit bietet die Inhomogenität des Materials. Wie Abb. 4.1 zeigt, sind die Messproben nicht homogen, der Aufbau mit mehreren Schichten wird in regelmäßigen Abständen von jeweils 50mm (entspricht der Dicke der Mineralwolle) von der festeren Vlieskaschierung durchbrochen. Für einen weiteren Messdurchgang im Abschnitt 4.1.4 wurde sie daher vorsichtig von den Proben entfernt.

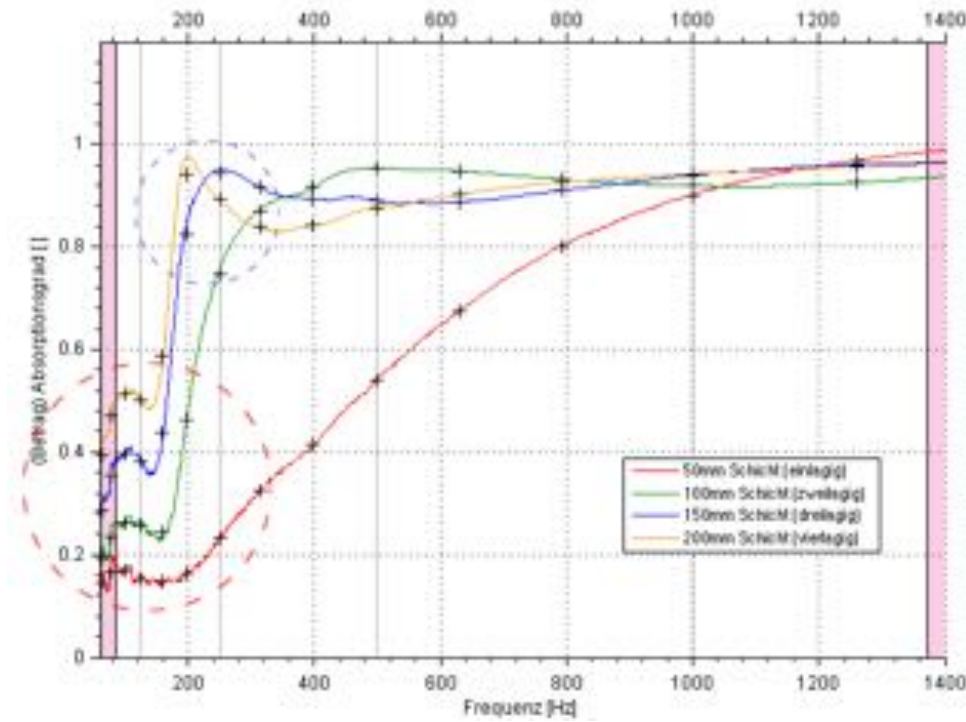
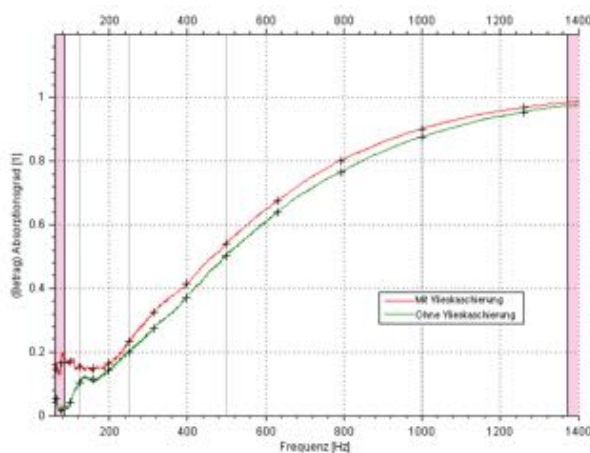


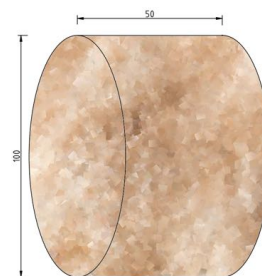
Abbildung 4.10: Vergleich des Absorptionsgrads α_0 für verschiedene Schichtungen bei leicht verkleinertem Probendurchmesser

4.1.4 Dritte Messung: Einfluss der Vlieskaschierung

Der in Abb. 4.10 rot markierte Peak bei etwa 100Hz ist in der neuen Messung (s. Abb. 4.11 bis Abb. 4.15) verschwunden. Die großflächige Entfernung der Vlieskaschierung für den Einbau in die Rahmen ist dennoch nicht sinnvoll: Zum einen wurde die Mineralwolle speziell nach ihrer Kaschierung ausgesucht, um eine Schmutz- und Staubablösung zu verhindern. Zum anderen ist das Vlies fest mit der Glaswolle verklebt (s. Abb. 4.16(a)), eine Entfernung war bereits an den kleinen Messproben nur schwer möglich, ohne dabei auch Mineralwolle mit abzulösen. Eine Entfernung der Vlieskaschierung über die gesamte Plattenfläche würde das direkt darunterliegende Material stark in Mitleidenschaft ziehen.

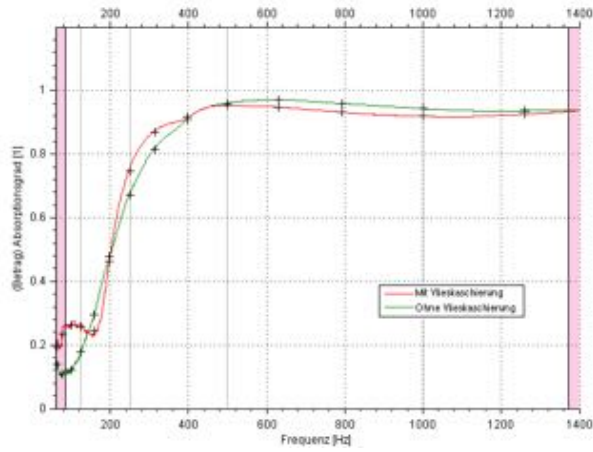


(a) 50mm Schichtung (einlagig)

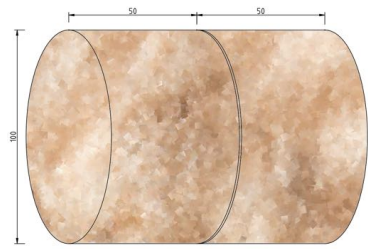


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.11: Messergebnis und Skizze der 50mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies

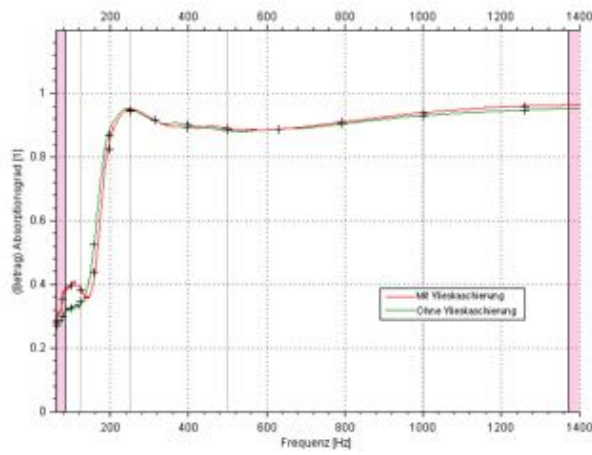


(a) 100mm Schichtung (zweilagig)

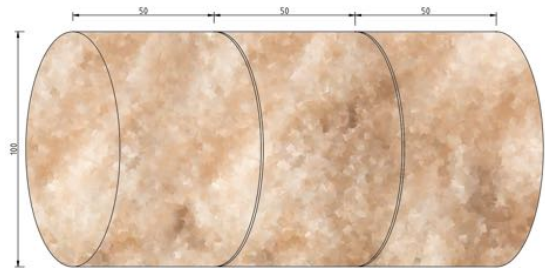


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.12: Messergebnis und Skizze der 100mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies

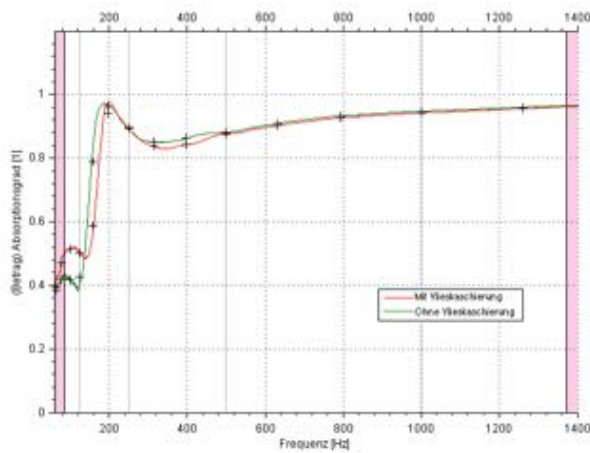


(a) 150mm Schichtung (dreilagig)

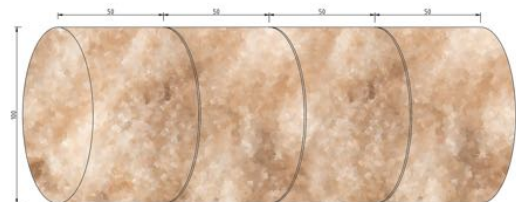


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.13: Messergebnis und Skizze der 150mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies



(a) 200mm Schichtung (vierlagig)



(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.14: Messergebnis und Skizze der 200mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies

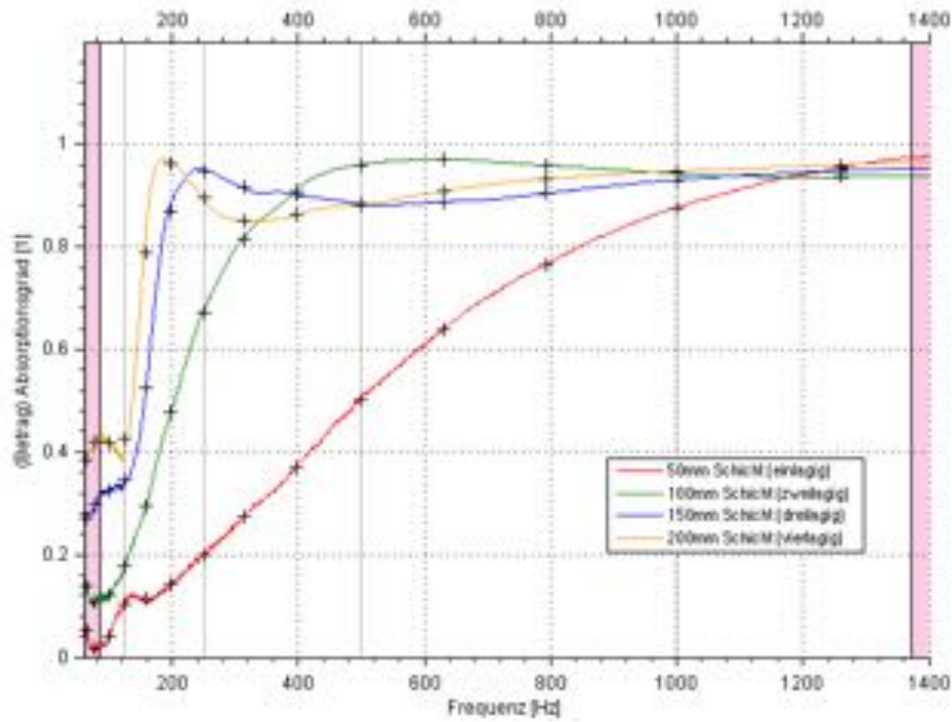


Abbildung 4.15: Vergleich des Absorptionsgrads α_0 für verschiedene Schichtungen bei entfernter Vlieskaschierung

Das blau markierte Maximum aus Abb. 4.10 ist immer noch vorhanden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Anordnung im Messrohr immer noch schwingt. Hierzu sei nochmals die zweite Messung in 4.1.3 betrachtet: die Verringerung des Probendurchmessers kommt einer Lockerung der Einspannkraft gleich, was bei (annähernd) gleichem Eigengewicht eine Senkung der Resonanzfrequenz bewirkt, der Peak bewegt sich in einen niedrigeren Frequenzbereich. Dieser Effekt ist speziell in Abb. 4.9(a) und Abb. 4.9(b) gut zu sehen. Die Eigenschwingung ist allerdings stark von der Geometrie des Messaufbaus abhängig. In den fertigen Absorbern, die natürlich völlig andere Abmessungen aufweisen als die Messproben, ist dieser Effekte nicht zu erwarten.



(a) Klebestelle der Vlieskaschierung auf einer Messprobe



(b) Ansicht des Messaufbaus ohne Vlieskaschierung

Abbildung 4.16: Mineralwolle ohne Vlieskaschierung

4.1.5 Wahl der Schichtung

Wie der Vergleich der verschiedenen Schichtungen in Abb. 4.10 und 4.15 zeigt, lässt sich der Absorptionsgrad des porösen Absorbers im Bereich der Schichtdicke von 150mm bis 200mm nicht mehr wesentlich in den tieffrequenten Bereich erweitern. Die Änderung der Absorption bei einer Vergrößerung der Schichtdicke von 200mm (vier Lagen) auf 250mm (fünf Lagen) fiel voraussichtlich noch geringer aus, da sich das Verhältnis von Materialaufwand zu Absorptionwirkung bei porösen Absorbern nicht linear verhält. Eine Messung einer 250mm Probe ist aufgrund der Limitierung durch das Messrohr nicht möglich.

Die Rahmenabmessungen der Absorber ließen zwar eine Schichtung von bis zu fünf Lagen Mineralwolle zu, angesichts der aus den Messungen gewonnenen Erkenntnissen ist dies aber nur bedingt sinnvoll, zumal es den Einkauf einer weiteren Verpackungseinheit der Glaswolle wegen zwei (von zehn enthaltenen) Platten bedeuten würde. Der finanzielle Mehraufwand steht in keiner Relation zu der zu erwartenden Verbesserung der Absorption. Es bleibt daher bei einlagiger Schichtung der Mineralwolle in den flachen Wandabsorbern und einer vierlagigen Schichtung in den Absorbern auf der Küchenzeile und in der Deckenkante (Vgl. Skizzen in Abb. 3.2 auf Seite 28).

4.2 Vermessung des Deckstoffes

4.2.1 Vorbereitungen und Messaufbau

Der Messaufbau der vorherigen Messungen bleibt analog zu Kap. 4.1 bestehen, aus den verfügbaren Stoffen werden kreisförmige Proben von 10cm Durchmesser geschnitten. Die zu vermessenden Stoffe sind (s. Abb. 4.17):

- Polyesterstoff „Trevira“, Faser aus Kunststoff, $6,36 \text{ €/m}^2$
- „Rips“ Dekorstoff aus Viskose, chemisch hergestellte Faser aus natürlichem Grundstoff, $5,32 \text{ €/m}^2$
- Leinwandbezug, Faser aus Baumwolle, $4,64 \text{ €/m}^2$
- Segeltuch, Faser aus Baumwolle, $4,32 \text{ €/m}^2$
- Bühnenmolton, Faser aus Baumwolle, $5,63 \text{ €/m}^2$

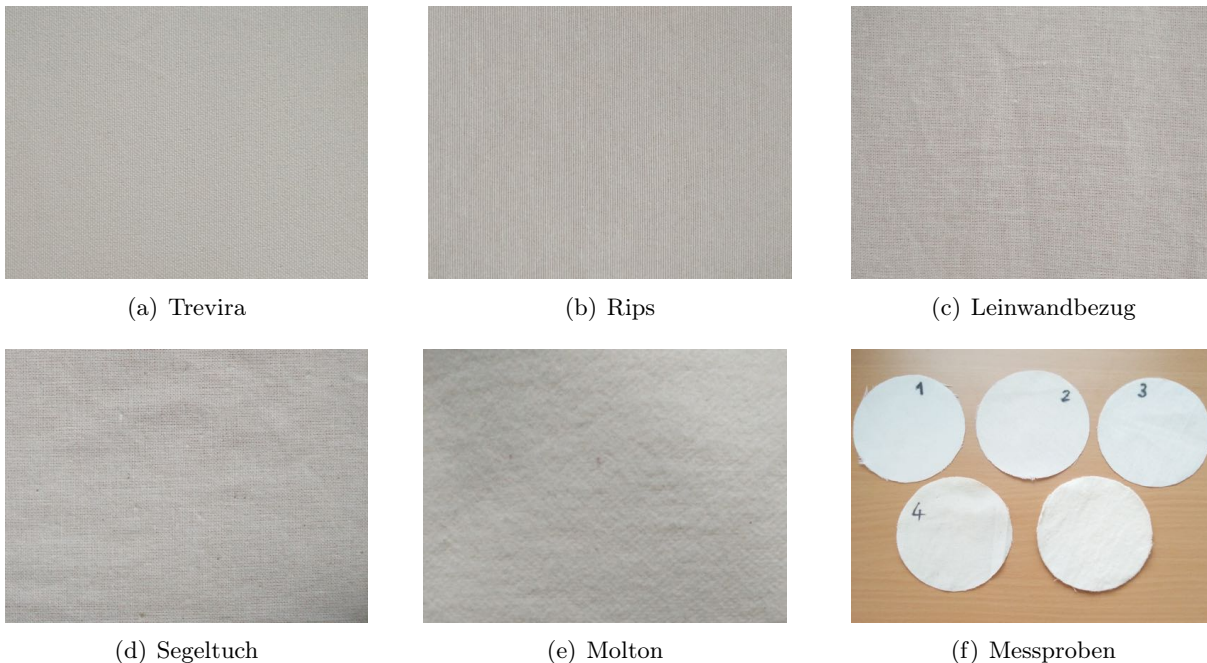
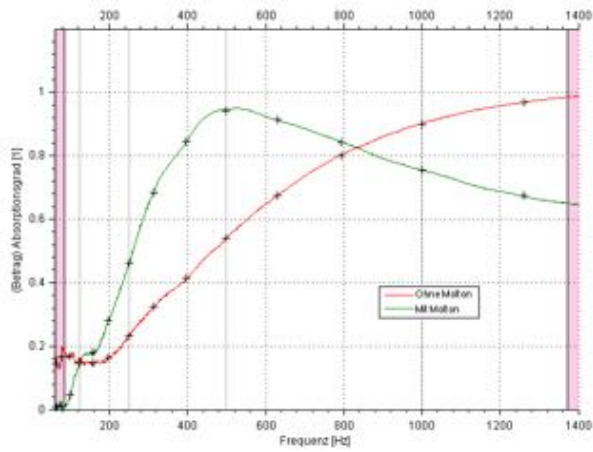


Abbildung 4.17: Die verschiedenen Stoffe

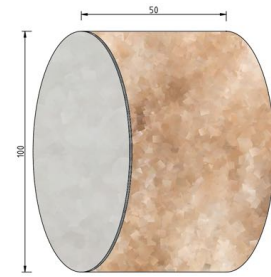
4.2.2 Vermessung der Mineralwolle mit Molton

Bühnenmolton stellt in der Veranstaltungs- und Theaterbranche den Standard dar, wenn es um schnelle, unkomplizierte Akustikanwendungen geht. Die Wahl für den Deckstoff der Absorber fiel demnach auch zunächst auf einen Solchen. Eine erste Messreihe, in der die Glaswolle zusammen mit dem Stoff vermessen wurde (also so, wie es in den Absorbern Anwendung finden soll), lieferte jedoch höchst überraschende Ergebnisse (s. Abb. 4.18 bis Abb. 4.22):

Man erkennt, dass der Bühnenmolton die Absorptionseigenschaften der Glaswolle zu den hohen Frequenzen hin massiv verringert. Im Tieffrequenten verbessert sich α_0 der einlagigen Mineralwolle durch den Molton zwar sichtlich, im mehrlagigen Fall wird dieser Effekt aber von der ohnehin hohen Absorption der darunterliegenden Glaswolle beinahe überdeckt und es bleibt nur

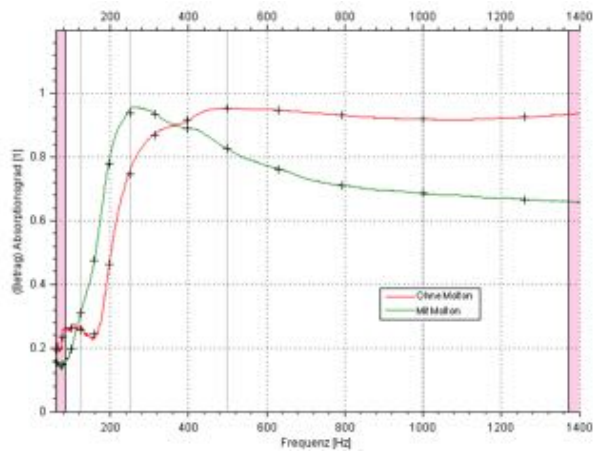


(a) 50mm Schichtung (einlagig)

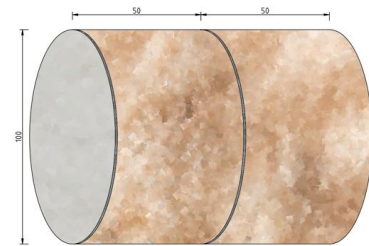


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.18: Messergebnis und Skizze der 50mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht

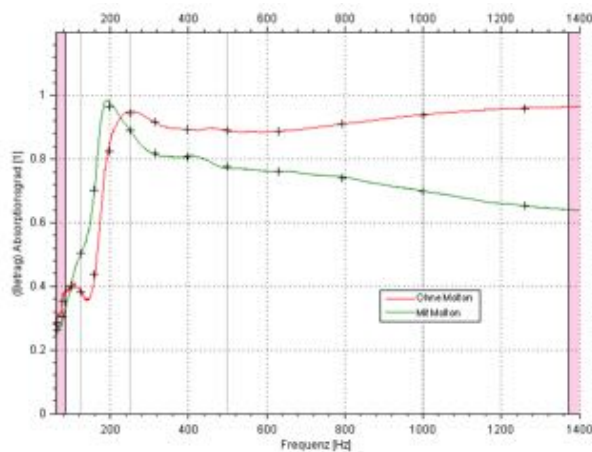


(a) 100mm Schichtung (zweilagig)

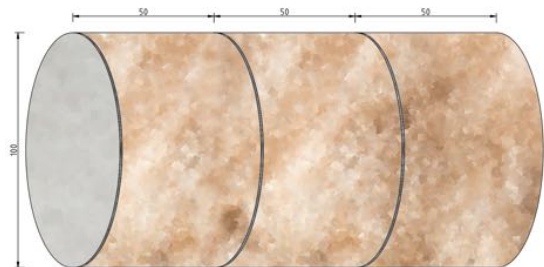


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.19: Messergebnis und Skizze der 100mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht

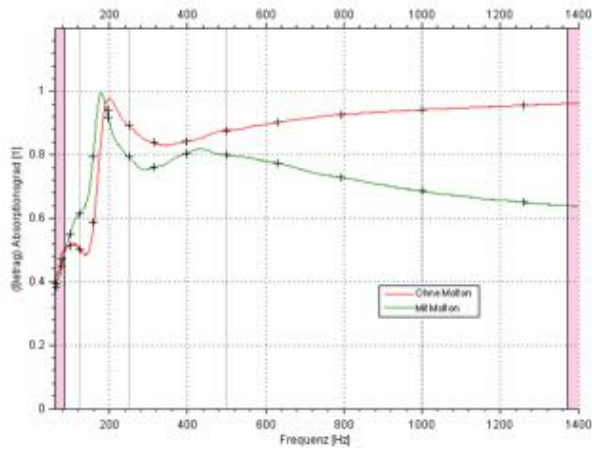


(a) 150mm Schichtung (dreilagig)

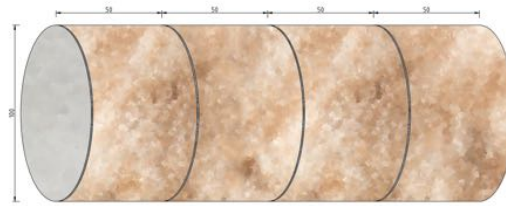


(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.20: Messergebnis und Skizze der 150mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht



(a) 200mm Schichtung (vierlagig)



(b) Skizze der Probe

Abbildung 4.21: Messergebnis und Skizze der 200mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht

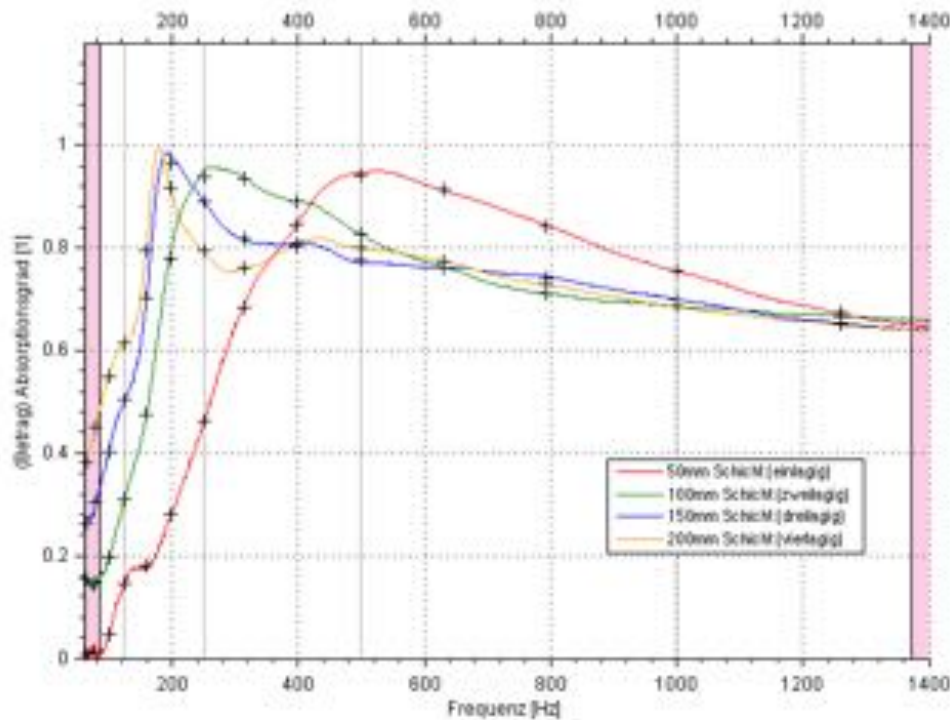


Abbildung 4.22: Absorptionsgrad α_0 der verschiedenen Schichtungen mit Vlieskaschierung und Molton-Deckschicht

noch die deutliche Verringerung der Absorption überhalb von 200Hz . Eine denkbare Erklärung dafür, dass die Absorption der 100mm - bis 200mm Schicht mit Molton bei tiefen Frequenzen immer noch etwas höher ausfällt, ist, dass die Frequenz der Eigenschwingung der Proben (Vgl. Abschnitt 4.1.4) durch das zusätzliche Gewicht des Molton weiter abnimmt.

4.2.3 Vergleichsmessung verschiedener Stoffe

Die - für diese Zwecke - schlechten Ergebnisse des Moltons gaben den Anlass, dem Deckstoff doch deutlich mehr Bedeutung zukommen zu lassen, als anfangs angenommen. Zur Beurteilung

der starken Reflexionseigenschaften wurden die Stoffe nun ohne Mineralwolle vermessen. Dafür waren die Stoffe mit kleinen Klebebandstreifen am Rand des Probenhalters befestigt. Für die Messungen, bei denen der Stoff zusammen mit Mineralwolle vermessen wurde, waren die verschiedenen Stoffproben mit Stecknadeln in der Glaswolle fixiert (s. Abb. 4.23).



(a) Befestigung mit Stecknadeln



(b) Befestigung mit Klebebandstreifen

Abbildung 4.23: Fixierung der Stoffproben

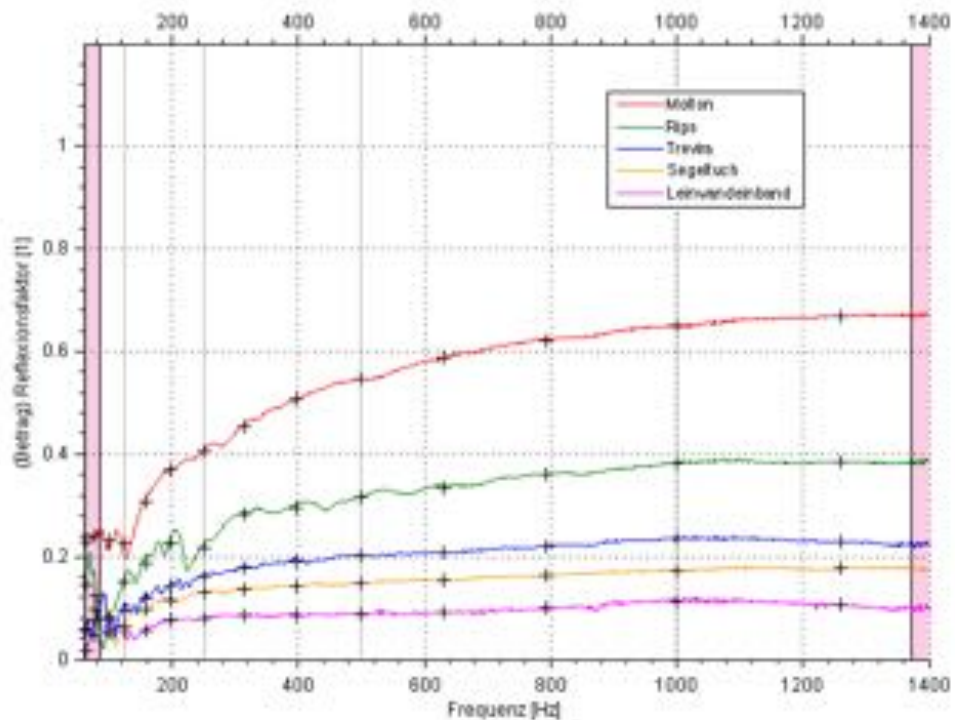


Abbildung 4.24: Vergleich der Reflexionsfaktoren der verschiedenen Stoffe

Der Reflexionsfaktor r (s. Abb. 4.24) des Molton deckt sich genau mit der zuvor festgestellten Verringerung der Absorption der Gesamtanordnung: Während r in den sehr tiefen Frequenzen recht konstant niedrig ist, steigt der Wert ab etwa 160Hz rapide an. Alle anderen Stoffe weisen hingegen weit weniger stark ausgeprägte Reflexion auf.

Als weiteren Parameter zur Beurteilung der akustischen Transparenz kann ferner die Durchgangsdämpfung herangezogen werden: je niedriger dieser Wert, desto mehr Schall durchdringt ungehindert den Stoff und kann so in der dahinter liegenden Mineralwolle absorbiert werden.

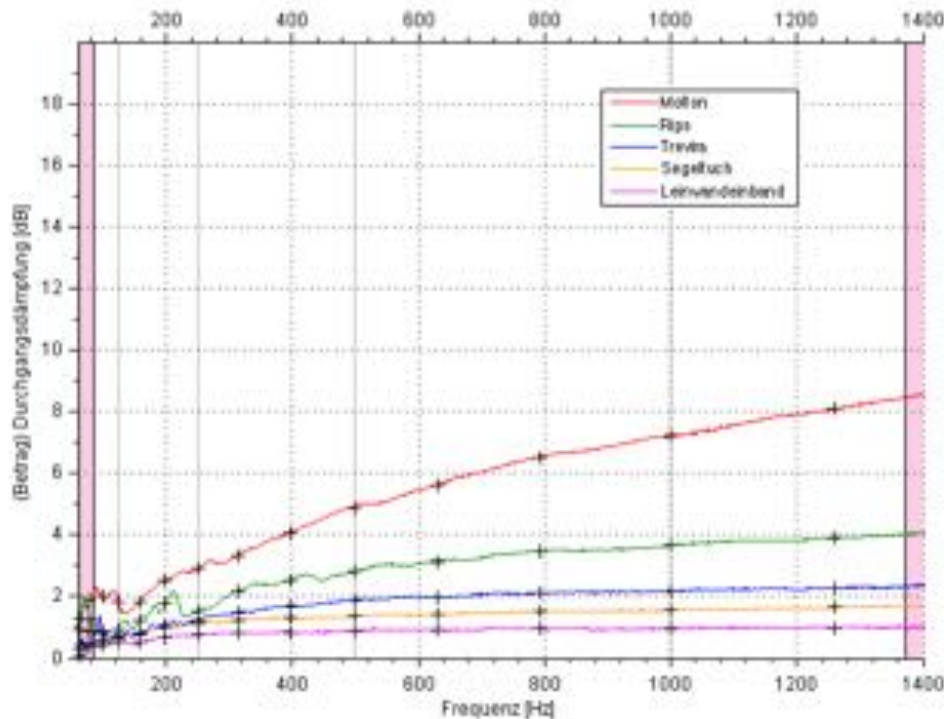


Abbildung 4.25: Vergleich der Durchgangsdämpfungen der verschiedenen Stoffe

Auch in dieser Messung (s. Abb. 4.25) zeigt sich ein ähnliches Bild: Ab etwa 160Hz steigt die Dämpfung des Moltons stetig an und erreicht ab $1,2\text{kHz}$ Werte von über 8dB . Man beachte auch den Trend der Messkurve: es deutet sich an, dass die Dämpfung außerhalb des Messbereichs über $1,4\text{kHz}$ noch weiter steigt.

4.2.4 Wahl des Deckstoffes, Endergebnis

Die besten Eigenschaften für die hier vorgesehene Anwendung (niedrige Durchgangsdämpfung, niedrige Reflexion) liefert der Leinwandeinband aus Baumwolle. Dennoch wurde letztlich das Segeltuch, ebenfalls aus Baumwolle, als Deckstoff gewählt, da es durch seinen dickeren Garn eine größere Robustheit und eine geringere Dehnbarkeit aufweist, dabei trotzdem ähnliche akustische Eigenschaften wie der Leinwandeinband besitzt.

Die letzte Messung im Messrohr wurde mit einem Schichtaufbau durchgeführt, wie er auch in den Absorbern zu finden ist: Die Glaswolleproben behalten ihre Vlieskaschierung und als Deckstoff wurde das Segeltuch angebracht (Analog zu Abb. 4.18(b), Abb. 4.19(b), 4.20(b) sowie 4.21(b)).

Der Absorptionsgrad der Mineralwolle ist bei 100mm - bis 200mm -Schichtung (s. Abb. 4.26 bis 4.28) durch den Deckstoff erwartungsgemäß leicht verringert, für den 50mm Fall ist er aber überraschenderweise etwas erhöht. Eine denkbare Ursache für diesen Effekt wäre etwa die lockere Fixierung des Deckstoffes: Dieser ist nicht gespannt, sondern nur locker mit Stecknadeln in der Mineralwolle befestigt, woraus sich möglicherweise Messabweichungen durch Unregelmäßigkeiten ergeben. Da sich diese Arbeit jedoch primär mit der raumakustischen Optimierung und nicht mit den speziellen Eigenschaften inhomogener poröser Absorber befasst, bleibt eine Erklärung für dieses Phänomen ausstehend.

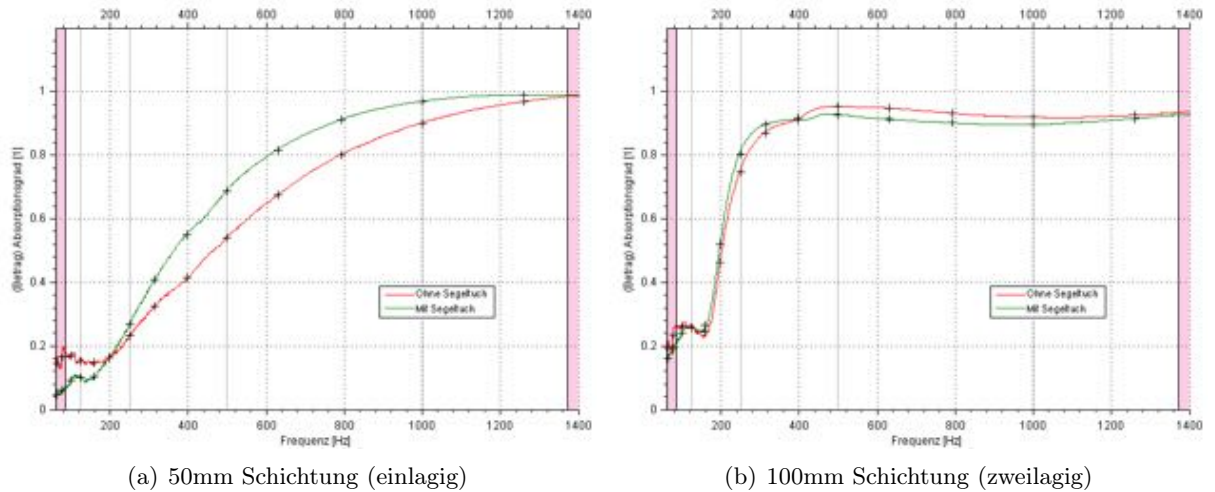


Abbildung 4.26: Messergebnis der 50mm und 100mm Schicht; jeweils mit (grün) und ohne (rot) Segeltuch-Deckschicht

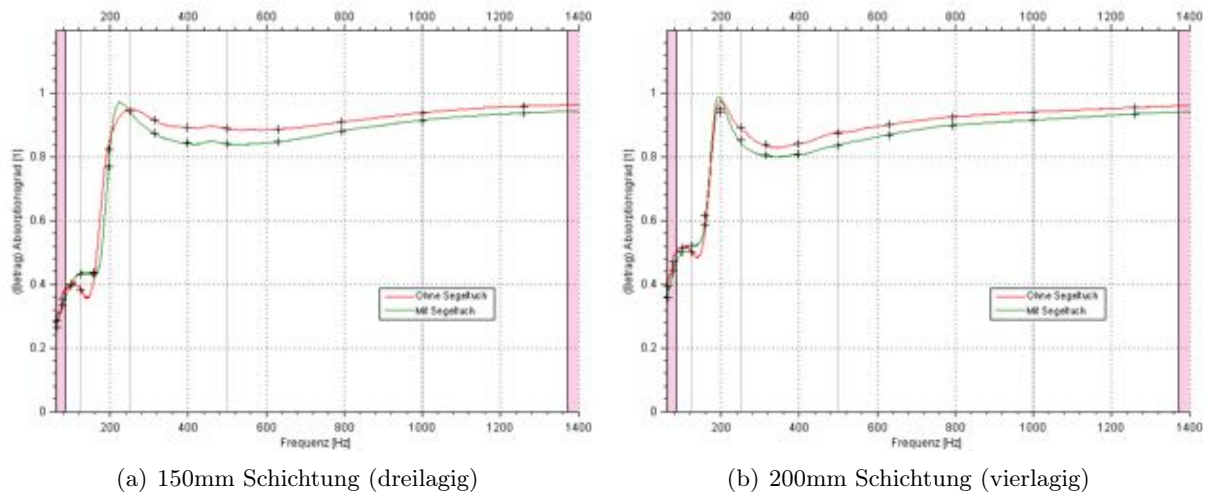


Abbildung 4.27: Messergebnis der 150mm und 200mm Schicht; jeweils mit (grün) und ohne (rot) Segeltuch-Deckschicht

Bestimmung des Absorptionsgrades für diffusen Schalleinfall α_{diffus}

Der Absorptionsgrad α_0 charakterisiert die Absorptionseigenschaften eines Materials bei senkrechtem Schalleinfall. Die Absorption eines porösen Absorbers ist jedoch stark vom Einfallswinkel ϑ abhängig: $\alpha_0 = f(\vartheta) \implies \alpha_0(\vartheta)$. In der Realität, d.h. im Raum fällt der Schall aus allen Winkeln von 0° bis 90° zur Normalen der Absorberoberfläche ein (diffuses Schallfeld). Es macht daher Sinn, für die Simulation den Absorptionsgrad α_{diffus} des Materials zu verwenden, welcher eine Mittelung von α_0 über alle Einfallswinkel ϑ darstellt [CREMER, 1961, S. 47ff]:

$$\alpha_{diffus} = 2 * \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_0(\vartheta) * \cos(\vartheta) * \sin(\vartheta) d\vartheta \quad (4.1)$$

Die Berechnung der Werte erfolgte durch die Messsoftware *CATS8* (s. Abb. 4.29, Abb. 4.30 sowie Tab. 4.1). Die Absorptionsgrade können nun in das um die Absorber modifizierte GEO-File der Simulation eingetragen werden.

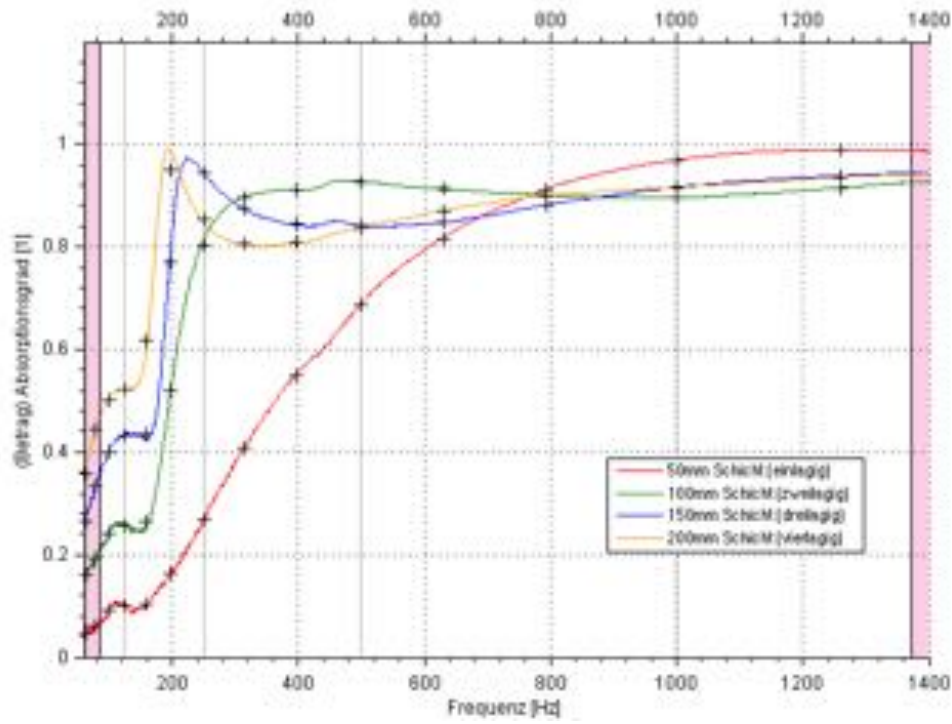


Abbildung 4.28: Absorptionsgrad α_0 der finalen Anordnung (mit Vlieskaschierung und Segeltuch) für alle Schichtungen

Frq. (Hz)	α_{diffus} (50mm Mineralwolle)	α_{diffus} (200mm Mineralwolle)
63	0.09	0.52
80	0.11	0.61
100	0.16	0.67
125	0.18	0.69
160	0.18	0.77
200	0.27	0.95
250	0.41	0.92
315	0.58	0.90
400	0.71	0.90
500	0.82	0.92
630	0.91	0.94
800	0.94	0.94
1000	0.95	0.95
1250	0.94	0.95
1600	0.94	0.94

Tabelle 4.1: Gemessener Absorptionsgrad α_{diffus}

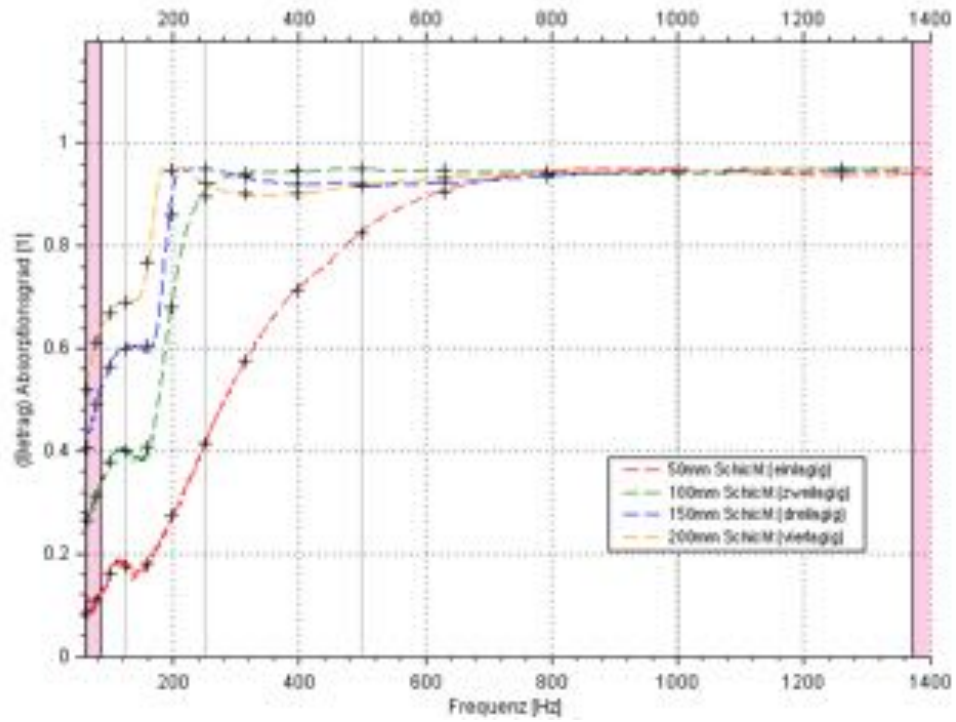


Abbildung 4.29: Absorptionsgrad α_{diffus} der finalen Anordnung (mit Vlieskaschierung und Segeltuch) für alle Schichtungen

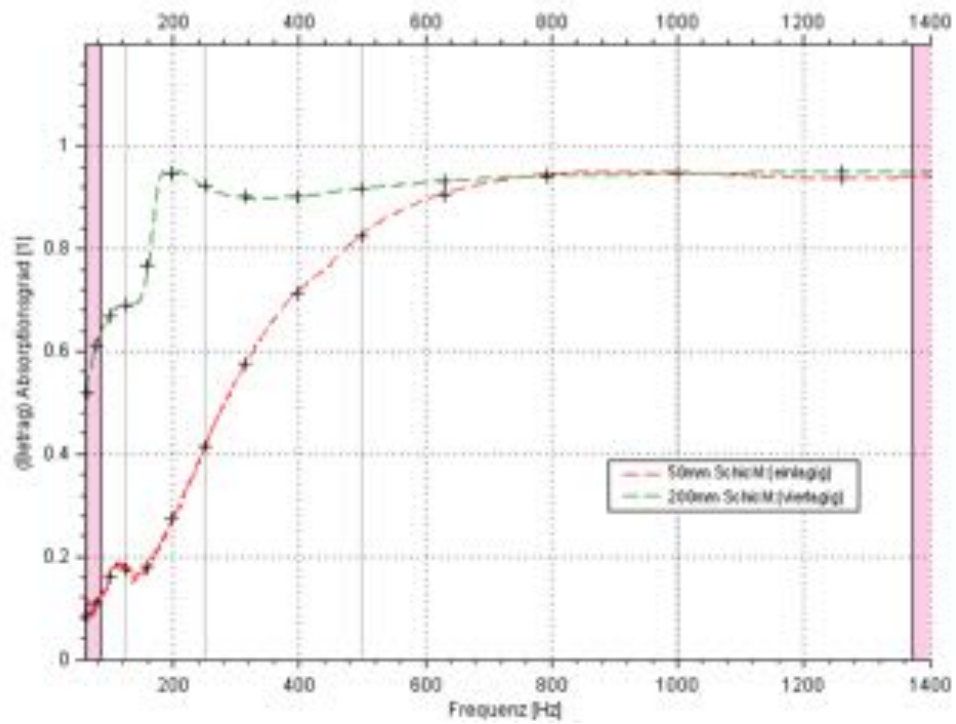


Abbildung 4.30: Absorptionsgrad α_{diffus} der finalen Anordnung (mit Vlieskaschierung und Segeltuch) für die verwendeten Schichtungen 50mm & 200mm

5

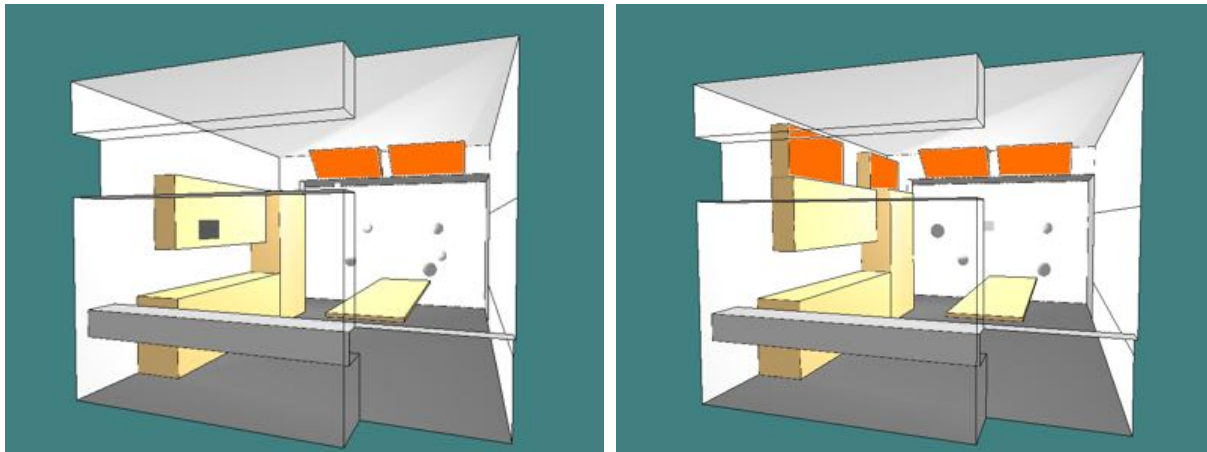
Neue akustische Situation im Raum IEEG136

Da nun der Planungsvorgang, der Bau und die Montage der Absorber abgeschlossen ist, soll im folgenden das Ergebnis der Optimierung unter Zuhilfenahme einer erneuten Simulation und Messung analysiert und bewertet werden.

5.1 Erörterung der verschiedenen Absorberkonfigurationen

Durch die Aufteilung der absorbierenden Fläche in mehrere Teilflächen ist es möglich verschiedene raumakustische Situationen zu schaffen. Im Folgenden werden vier verschiedene Grundkonfigurationen behandelt, die sich durch die Art der eingebrachten Absorber voneinander unterscheiden (Wandabsorber, Kantenabsorber, Absorber auf der Küchenzeile; jeweils zwei Stück). Es werden dabei aber immer *beide* Absorber eines bestimmten Typs in den Raum eingebracht (s. Abb. 5.1 und Abb. 5.2). Grundsätzlich ist es zwar auch möglich nur einen Absorber einer bestimmten Bauart zu verwenden, durch das recht kleine Volumen des Raumes würde die Abstufung der verschiedenen Nachhallzeiten jedoch so gering ausfallen, dass dies nur bedingt sinnvoll erscheint.

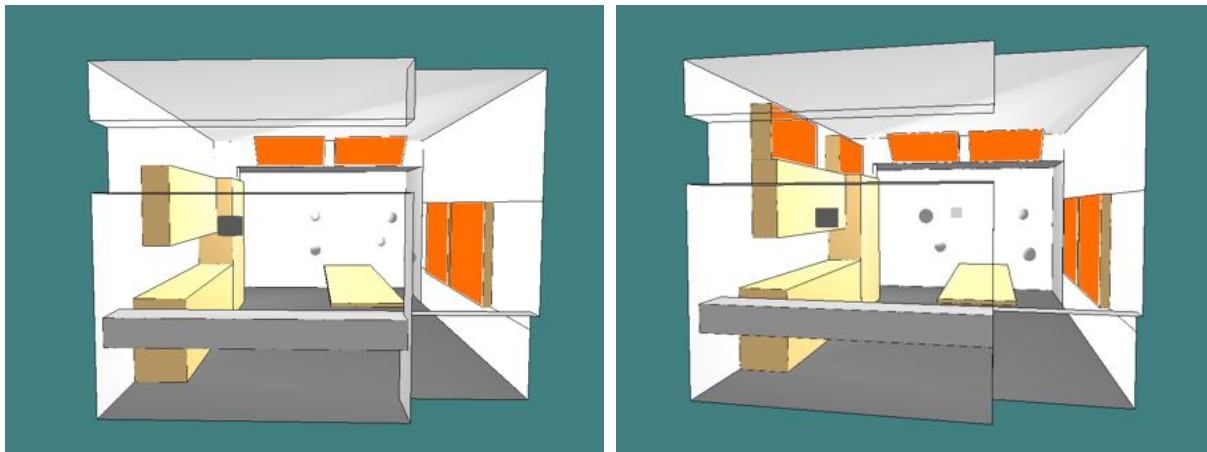
- Konfiguration A: Nur die Kantenabsorber in der Deckenkante sind im Raum montiert, gesamte Absorberfläche $S_A = 1,5m^2$.
- Konfiguration B: Die Kantenabsorber und die Absorber auf dem Küchenkasten sind im Raum montiert, gesamte Absorberfläche $S_B = 3,0m^2$.
- Konfiguration C: Die Kantenabsorber und die Wandabsorber sind im Raum montiert, gesamte Absorberfläche $S_C = 4,5m^2$.
- Konfiguration D: Alle Absorber (Kanten-, Wand-, Küchenkastenabsorber) sind im Raum montiert, gesamte Absorberfläche $S_D = 6,0m^2$.



(a) Konfiguration A

(b) Konfiguration B

Abbildung 5.1: Die Absorberkonfigurationen A & B (aus Simulationsprogramm)



(a) Konfiguration C

(b) Konfiguration D

Abbildung 5.2: Die Absorberkonfigurationen C & D (aus Simulationsprogramm)

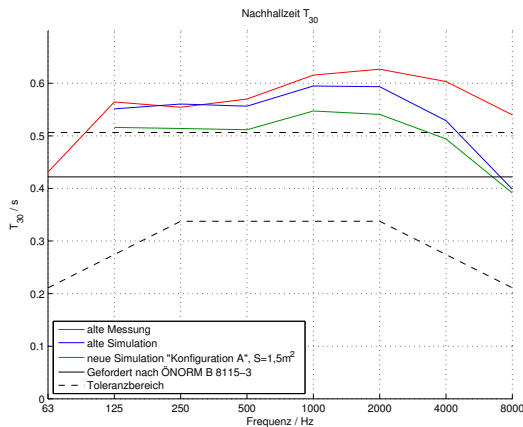
5.2 Simulation der neuen Raumakustiken

5.2.1 Anpassung der alten Simulation

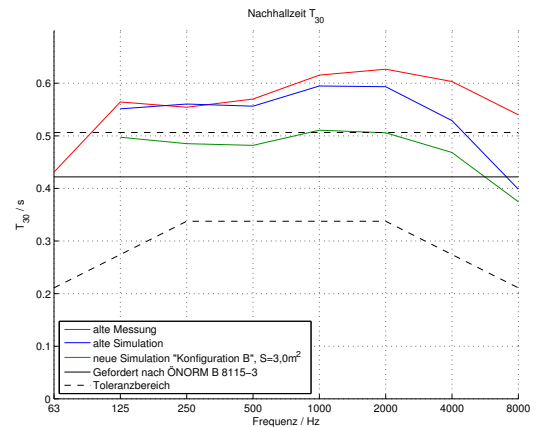
Mit Hilfe der in Kapitel 4, Tabelle 4.1 gemessenen Absorptionsgrade sowie der Kenntnis der Abmessungen und Positionen der Absorber kann nun eine Simulation der neuen akustischen Situationen in *CATT – Acoustic* durchgeführt werden. Dafür wurde für alle zuvor in Abschnitt 5.1 beschriebenen Konfigurationen das ursprüngliche GEO-File des unbehandelten Raumes jeweils um die neu eingebrachten Absorber erweitert. Die Absorptionsgrade in den Oktavbändern 2kHz und 4kHz , die aus der Messung im Impedanzrohr nicht hervorgehen, aber dennoch für die Simulation bekannt sein müssen, wurden dabei gleich dem höchsten Wert der in Tabelle 4.1 angeführten Absorptionsgrade für die jeweilige Schichtung angenommen (d.h. für die Wandabsorber mit einlagiger Mineralwolle $\alpha_{\text{einlagig},2\text{kHz}} = \alpha_{\text{einlagig},4\text{kHz}} = 0,95$ und für die anderen Absorber mit mehrlagiger Mineralwolle ebenfalls $\alpha_{\text{vierlagig},2\text{kHz}} = \alpha_{\text{vierlagig},4\text{kHz}} = 0,95$). Dies ist deswegen möglich, weil es ein typisches Merkmal poröser Materialien ist, dass diese zu hohen Frequenzen hin auch immer höhere Absorption aufweisen.

5.2.2 Ergebnisse der Simulation

Man erkennt in Abb. 5.3 und Abb. 5.4, dass sich durch die eingebrachten Absorber die Nachhallzeit erwartungsgemäß breitbandig verringert. Sie nimmt dabei umgekehrt proportional zur eingebrachten Absorberfläche ab (größere Absorberfläche \implies kleinere Nachhallzeit).

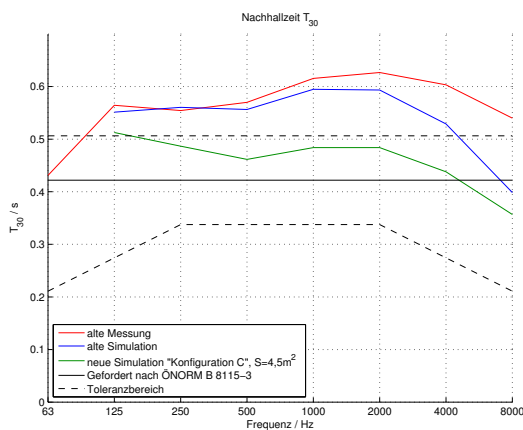


(a) Konfiguration A, $S_A = 1,5 \text{ m}^2$

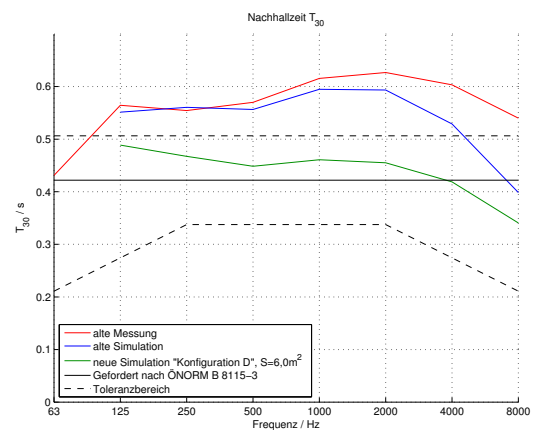


(b) Konfiguration B, $S_B = 3,0 \text{ m}^2$.

Abbildung 5.3: Simulierte Nachhallzeit mit den neuen Konfigurationen (grün), simulierte (blau) und gemessene (rot) Nachhallzeit des unbehandelten Raumes sowie nach ÖNORM B 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)



(a) Konfiguration C, $S_C = 4,5 \text{ m}^2$.



(b) Konfiguration D, $S_D = 6,0 \text{ m}^2$.

Abbildung 5.4: Simulierte Nachhallzeit mit den neuen Konfigurationen (grün), simulierte (blau) und gemessene (rot) Nachhallzeit des unbehandelten Raumes sowie nach ÖNORM 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)

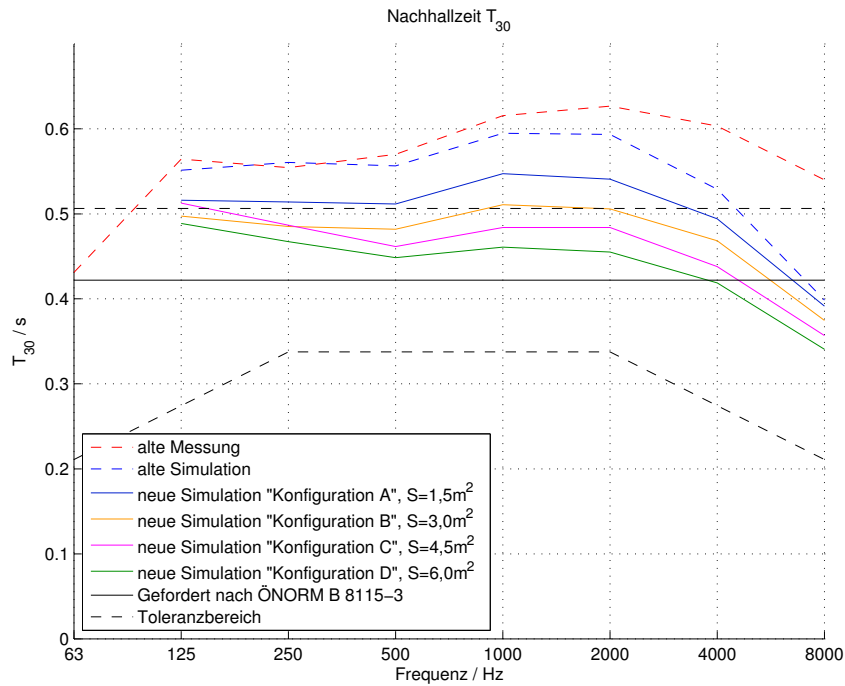


Abbildung 5.5: Vergleich der verschiedenen Absorberkonfigurationen

Interessant in Abbildung 5.5 ist jedoch die Überschneidung der gelben (Konfiguration B, $S_B = 3,0m^2$) mit der magentafarbenen (Konfiguration C, $S_C = 4,5m^2$) Kurve, denn obwohl die Konfiguration C eine um 50% größere Absorptionsfläche bietet, ist ihre Nachhallzeit unter $250Hz$ höher als die der Konfiguration B. Dies lässt sich aber ganz einfach dadurch erklären, dass die äquivalente Absorptionsfläche der Konfiguration B in der $125Hz$ -Oktave größer ist als die der Konfiguration C:

$$A_{B,125Hz} = \alpha_{vierlagig,125Hz} * (S_{Kuechenkastenabsorber} + S_{Kantenabsorber})$$

$$= 0,6899 * 3m^2 = 2,07m^2$$

$$A_{C,125Hz} = \alpha_{einlagig,125Hz} * S_{Wandabsorber} + \alpha_{vierlagig,125Hz} * S_{Kantenabsorber}$$

$$= 0,1761 * 3,0m^2 + 0,6899 * 1,5m^2 = 1,56m^2$$

5.3 Erneute Messung der Nachhallzeit

5.3.1 Messaufbau

Im Gegensatz zur ersten Vermessung der Raumakustik im Raum IEEG136 in Kapitel 2 konnte bei der Abschlussmessung zweikanalig gearbeitet werden, d.h. Erfassung der Impulsantwort an zwei Orten mit nur einem Messdurchgang (s. Abb. 5.7). Ferner wurde ein anderes, deutlich schnelleres Notebook verwendet. Durch diese Effizienzsteigerung konnten nun an allen Messpunkten zwei verschiedene Höhen der Messmikrofone ($1,10m$ als „sitzende“ und $1,55m$ als „stehende“ Ohrhöhe) aufgezeichnet werden. Die Positionen der Mikrofone und des Messlautsprechers waren dabei

die selben, wie bei der ersten Messung. Es ergeben sich also $(5 + 4) * 2 = 18$ Messpunkte für jeden Durchgang (s. Abb. 5.6). Die Messdurchgänge unterscheiden sich jeweils in der Art der verwendeten Absorberkonfiguration. Als Anregungssignal wurde - ebenfalls wie in der ersten Messung - ein Sweep von 20 Sekunden verwendet. Temperatur und Luftfeuchtigkeit lagen mit $26,7^{\circ}\text{C}$ bei 70% rel. Luftfeuchte zwar deutlich höher als bei der ersten Messung und in der Simulation angenommen, da der Raum jedoch recht klein ist, d.h. die zurückgelegte Weglänge des Schalles gering ist, sollte sich auch die veränderte Schallabsorption der Luft entsprechend in Grenzen halten. Die Messung fand am 23.07.2016 statt.

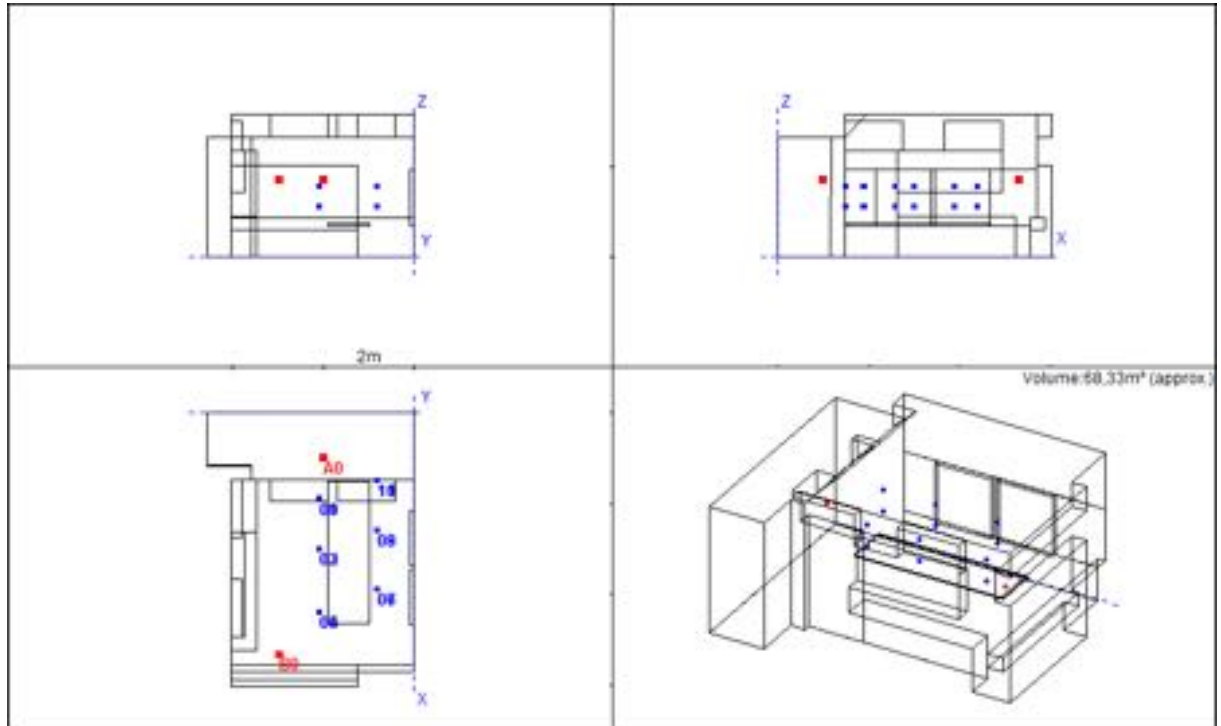


Abbildung 5.6: Positionen der Messmikrofone (blau) und des Messlautsprechers (rot)

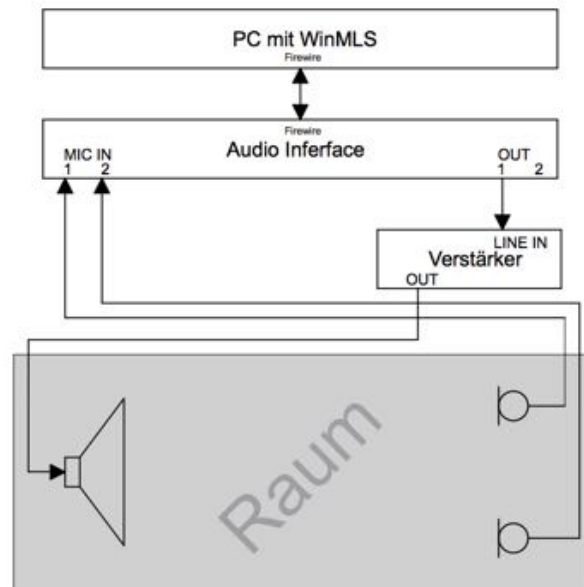


Abbildung 5.7: Blockschaltbild des Messaufbaus

5.3.2 Ergebnisse der Messung

Wie erwartet und bereits durch die Simulation suggeriert, konnte die Nachhallzeit durch Einbringen der Absorber breitbandig abgesenkt werden. Aus der neuen Messung geht aber auch hervor, dass bei Unterschreiten der Schröderfrequenz (s. Gl. 2.1, S. 14) eine konsistente bzw. repräsentative Messung in der 63Hz - und 125Hz -Oktave nur dann möglich ist, wenn über eine ausreichende Anzahl an Messpunkten gemittelt wird und so örtliche Modeneffekte in der Nachhallzeitmessung eliminiert werden. Bei Betrachtung der neuen Messung kann daher gesagt werden, dass in der ersten Messung der Nachhallzeit (Kap. 2.2 „Messung der Nachhallzeit“, S. 12) zu wenig Messpunkte für eine aussagekräftige Messung im tieffrequenten Bereich verwendet wurden.

Eine mögliche Erklärung der Überschneidung der Kurven in Abb. 5.8(a) zwischen 4kHz und 8kHz ist die Dissipation der Luft: Durch unterschiedliche thermische Gegebenheiten (Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit) zu den verschiedenen Messzeitpunkten weist das Ausbreitungsmedium unterschiedliches Verhalten auf. So kommt es bei $22,1^\circ\text{C}$, $36,4\%$ rel. Luftfeuchte (erste Messung, Kap. 2.2) nach [ISO 9613-1] zu einer zusätzlichen Luftdämpfung von $0,055\text{dB}/\text{m}$ (ohne Herleitung; [NPL, Web]). Bei $26,7^\circ\text{C}$, 70% rel. Luftfeuchte (zweite Messung) beträgt diese $0,03\text{dB}/\text{m}$, also nur noch etwa 55% der ursprünglichen Dämpfung. Da die zurückgelegte Weglänge des Schalls im vorliegenden, kleinen Raum jedoch nur wenige Meter beträgt, scheint der Wert der Dissipation zu klein, um allein für die Erhöhung der Nachhallzeit trotz Absorbern im Raum verantwortlich zu sein.

Beim Vergleich der alten und neuen Messsituation bleibt als vorgenommene Änderung nur noch Anzahl und Position der Messpunkte: Die örtlichen Änderungen (andere Höhe des Messmikrofons) könnten ebenfalls zur Änderung des Messergebnisses - etwa durch stärkere Aufnahme von Reflexionen der höheren Frequenzen am schallharten Tisch - beitragen.

Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass durch Erhöhung der Messpunktdichte sowie der ebenfalls vorgenommenen Erhöhung der Lautstärke des Anregungssignals (höhere SNR) die Messgenauigkeit gegenüber der ersten Messung in Kapitel 2 erhöht werden konnte.

Vergleicht man die Nachhallzeiten der verschiedenen Absorberkonfigurationen (s. Abb. 5.10) zeigt sich in der 63Hz -Oktave eine Überraschung: Die Konfiguration B mit $S_B = 3,0\text{m}^2$ weist

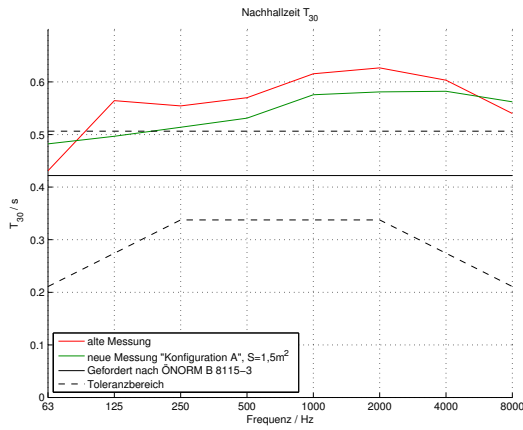
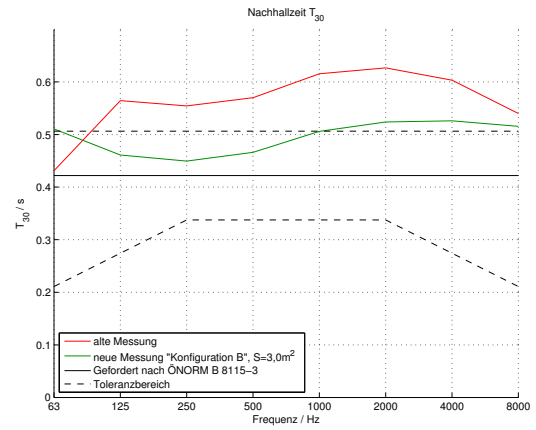
(a) Konfiguration A, $S_A = 1,5m^2$ (b) Konfiguration B, $S_B = 3,0m^2$.

Abbildung 5.8: Gemessene Nachhallzeit der Konfiguration A bzw. B (grün), gemessene Nachhallzeit des unbehandelten Raumes (rot) sowie nach ÖNORM 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)

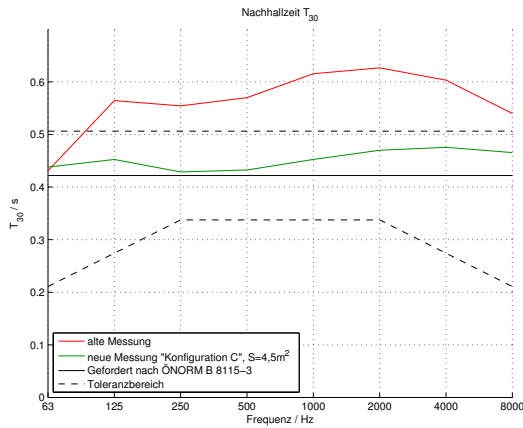
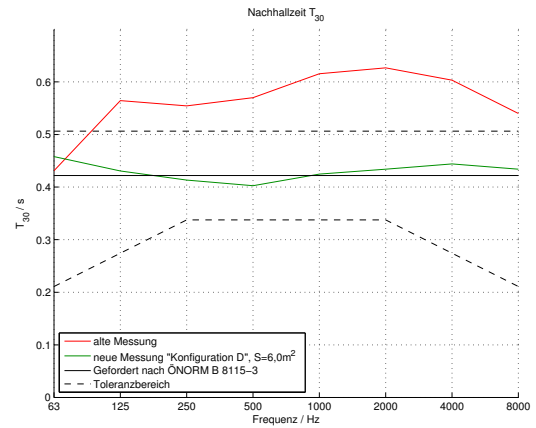
(a) Konfiguration C, $S_C = 4,5m^2$.(b) Konfiguration D, $S_D = 6,0m^2$.

Abbildung 5.9: Gemessene Nachhallzeit der Konfiguration C bzw. D (grün), gemessene Nachhallzeit des unbehandelten Raumes (rot) sowie nach ÖNORM 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)

eine höhere Nachhallzeit auf als Konfiguration A mit $S_A = 1,5m^2$, ebenso die Anordnung D mit $S_D = 6,0m^2$ gegenüber Konfiguration C mit $S_C = 4,5m^2$. Die Überschneidung ist nicht konsistent mit der zuvor in der Simulation festgestellten Korrelation (Überschneidung der Nachhallzeitkurven durch unterschiedliche äquivalente Absorptionsfläche der betreffenden Oktavbänder, s. Kap. 5.2.2).

In diesen beiden Vergleichen der Messung weist immer die Konfiguration die höhere Nachhallzeit auf, bei der sich die Absorber auf dem Küchenkasten im Raum befinden. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die flexible Hartfaserrückwand dieses Absorbertyps akustisch wirksam ist, jedoch nicht im Sinne einer verbesserten Absorption, sondern - im Gegenteil - einer Verlängerung der Nachhallzeit im Tieffrequenten durch Ausschwingen.

<i>Frq.</i> (Hz)	T_{30} (s)	$\sigma_{T_{30}}$ (s)	SNR (dB)	σ_{SNR} (dB)
63	0.48	± 0.08	30.58	± 3.94
125	0.50	± 0.05	48.33	± 8.22
250	0.51	± 0.04	61.01	± 8.53
500	0.53	± 0.02	57.85	± 5.00
1000	0.58	± 0.02	53.62	± 3.93
2000	0.58	± 0.01	56.24	± 5.17
4000	0.58	± 0.01	53.79	± 1.96
8000	0.56	± 0.01	46.34	± 1.96
16000	0.53	± 0.01	29.54	± 2.69

Tabelle 5.1: Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration A, $S_A = 1,5m^2$

<i>Frq.</i> (Hz)	T_{30} (s)	$\sigma_{T_{30}}$ (s)	SNR (dB)	σ_{SNR} (dB)
63	0.51	± 0.10	34.08	± 4.01
125	0.46	± 0.04	53.57	± 4.66
250	0.45	± 0.03	64.84	± 5.24
500	0.47	± 0.02	60.15	± 2.63
1000	0.51	± 0.01	55.40	± 1.10
2000	0.52	± 0.01	58.81	± 1.17
4000	0.53	± 0.01	54.03	± 1.49
8000	0.52	± 0.01	46.61	± 1.89
16000	0.49	± 0.01	33.15	± 1.45

Tabelle 5.2: Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration B, $S_B = 3,0m^2$

<i>Frq.</i> (Hz)	T_{30} (s)	$\sigma_{T_{30}}$ (s)	SNR (dB)	σ_{SNR} (dB)
63	0.44	± 0.07	28.35	± 6.06
125	0.45	± 0.03	48.77	± 6.68
250	0.43	± 0.04	63.14	± 6.20
500	0.43	± 0.02	57.49	± 8.37
1000	0.45	± 0.01	54.90	± 1.35
2000	0.47	± 0.01	57.56	± 1.36
4000	0.48	± 0.01	53.66	± 1.33
8000	0.47	± 0.01	46.22	± 1.26
16000	0.45	± 0.01	30.51	± 2.36

Tabelle 5.3: Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration C, $S_C = 4,5m^2$

<i>Frq.</i> (Hz)	T_{30} (s)	$\sigma_{T_{30}}$ (s)	SNR (dB)	σ_{SNR} (dB)
63	0.46	± 0.09	35.02	± 4.37
125	0.43	± 0.04	54.44	± 3.50
250	0.41	± 0.03	63.99	± 9.69
500	0.40	± 0.02	58.87	± 7.47
1000	0.42	± 0.01	54.33	± 5.08
2000	0.43	± 0.01	57.78	± 4.77
4000	0.44	± 0.02	54.41	± 1.19
8000	0.43	± 0.01	47.16	± 1.01
16000	0.41	± 0.01	33.40	± 1.29

Tabelle 5.4: Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration D, $S_D = 6,0m^2$

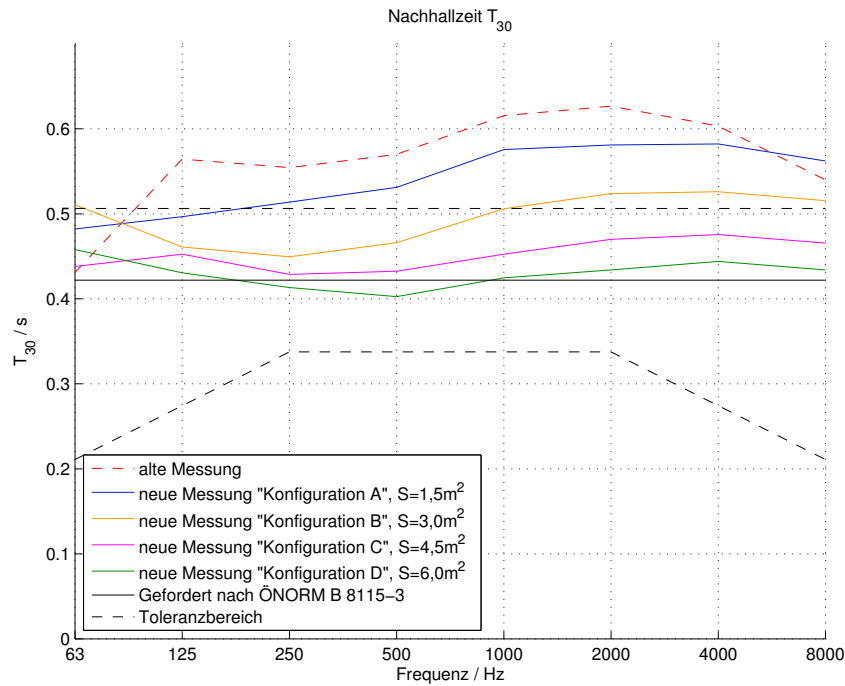


Abbildung 5.10: Vergleich der verschiedenen Absorberkonfigurationen

5.3.3 Bewertung der Messergebnisse

Insgesamt konnte eine enorme Verbesserung der Raumakustik erzielt werden. Während die Nachhallzeit des unbehandelten Raumes beinahe im gesamten relevanten Frequenzbereich über der nach ÖNORM B 8115-3 geforderten Nachhallzeit für das Anforderungskriterium „Kommunikation“ lag, wird der Toleranzbereich nun bereits mit der Konfiguration B mit $S_B = 3,0m^2$ Absorberfläche erreicht. Bei Einbringung aller Absorber in den Raum mit einer Gesamtfläche von $S_D = 6,0m^2$ wird sogar über den gesamten Frequenzbereich eine ideale Nachhallzeit erzielt, die der Norm voll entspricht.

Bezüglich der ersten Abschätzung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche aus Abschnitt 3.1.2 im Kapitel „Erarbeitung eines raumakustischen Konzepts“ zeigt sich, dass die effektiv benötigte Fläche deutlich kleiner ist, als zunächst durch Umstellen der SABINESchen Nachhallformel erwartet. Zur Erklärung hierfür sei nochmals entsprechende Formel betrachtet:

$$T = 0,161 * \frac{V}{A_{ges}} = 0,161 * \frac{V}{A_{vorhanden} + AZusatz} \quad (5.1)$$

$$AZusatz = \frac{0,161 * V}{T} - A_{vorhanden} \quad (5.2)$$

Durch Einbringen der Absorber verkleinert sich das Raumvolumen, es verkleinert sich jedoch auch die vorhandene äquivalente Absorption $A_{vorhanden}$ durch Überdeckung. Die erneute Durchführung der Rechnung mit den angepassten Werten zeigt, dass die zusätzlich aufzubringende Absorptionsfläche A_{Zusatz} sogar noch steigt (vgl. alte Berechnung, Gleichung 3.3 auf Seite 24: $A_{Zusatz,alt} = 9,26m^2$):

$V = V_{neu} = 70,75m^3$ (aus *CATT - Acoustic*), $T = T_{soll} = 0,425s$ und

$$A_{vorhanden} = (S_{ges} - S_{abs,hoch}) * \bar{\alpha}_m = (129,04m^2 - 6,0m^2) * 0,14 = 17,226m^2$$

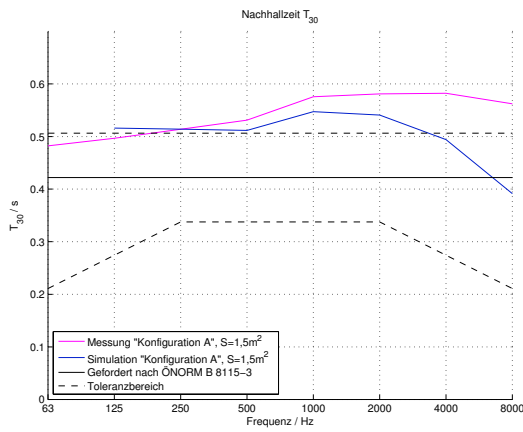
$$A_{Zusatz} = \frac{0,161 * 70,75m^3}{0,425s} - 17,226m^2 = 9,576m^2 \quad (5.3)$$

Als Ursache des Phänomens bleibt nur noch der gemittelte Absorptionsgrad α_m übrig: Die neu eingebrachten Absorber überdecken Flächen, deren Absorptionsgrad α deutlich kleiner ist als der für den gesamten Raum berechnete Wert von α_m aus 2.3.2. Dies bedeutet im Umkehrschluss aber auch, dass andere, nicht überdeckte Oberflächen einen Wert α deutlich größer dem gemittelten Absorptionsgrad α_m besitzen. Dafür käme etwa die Gitterstruktur an der Decke zwischen den beiden Durchgangstüren des Raumes in Frage (siehe 2.1, Seite 11), aber etwa auch die vorhandene Einrichtung wie die Küchenzeile oder der Bodenbelag.

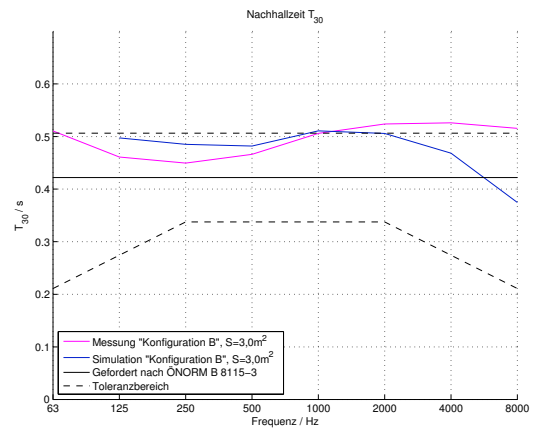
Für die Evaluierung eines bestehenden Raumes sollten daher die Absorptionseigenschaften der vorhandenen Oberflächen zumindest grob bekannt sein. So kann einerseits vermieden werden, dass etwaige, ohnehin (teil-)absorbierende Flächen im Zuge raumakustischer Umbaumaßnahmen durch Verdeckung unwirksam werden. Andererseits kann dadurch die Gesamtabsorption $\alpha_m = \frac{A_{ges}}{S_{ges}}$ des Raumes bei Überbauung besonders schallharter Flächen mit Absorbern deutlich verbessert werden.

5.3.4 Vergleich der Messung mit der Simulation

Wie bereits beim ersten Vergleich zwischen Simulation und Messung der alten Akustik des unbehandelten Raumes gesehen, fallen auch die neuen, simulierten Nachhallzeiten gegenüber den Messungen zu hohen Frequenzen hin zu stark ab (s. Abb. 5.11 & 5.12), was wohl - erneut - der Ungenauigkeit der Simulationssoftware durch Extrapolation geschuldet ist (siehe hierzu auch „2.3 Simulation der Raumakustik in CATT-Acoustic“ auf Seite 19). Wo jedoch anfangs die gemessene Nachhallzeit der Konfiguration A mit $S_A = 1,5m^2$ über der Simulierten lag (Abb. 5.11(a)), dreht sich dieses Bild bei Konfiguration B mit $S_B = 3,0m^2$ (Abb. 5.11(b)), bis bei Konfiguration C mit $S_C = 4,5m^2$ (Abb. 5.12(a)) der umgekehrte Fall eintritt, nämlich dass die simulierte Nachhallzeit überhalb der Gemessenen liegt. Auch das bestätigt die zuvor in 5.3.3 gefasste Annahme, dass die neuen Absorber Flächen überdecken, deren Absorptionsgrad α deutlich unter dem berechneten, gemittelten Wert α_m des gesamten Raumes liegt. Insgesamt bildet die Simulation den Trend der Messung aber in guter Näherung ab.

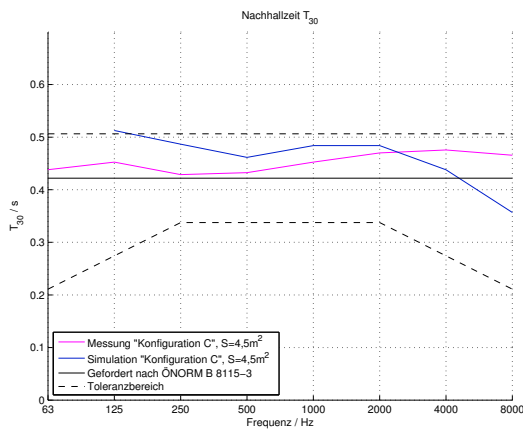


(a) Konfiguration A, $S_A = 1,5m^2$

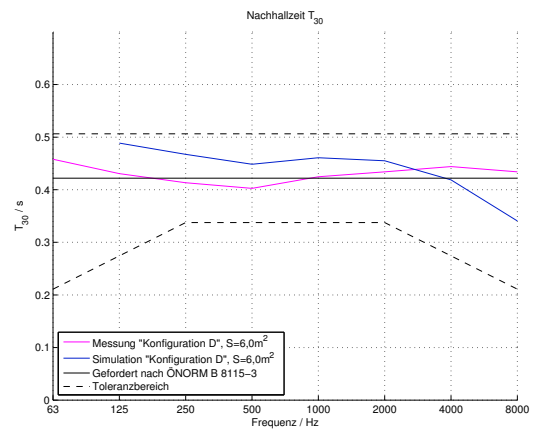


(b) Konfiguration B $S_B = 3,0m^2$.

Abbildung 5.11: Simulierte- (dunkelblau) und gemessene Nachhallzeit (magenta) der Konfiguration A bzw. B sowie nach ÖNORM B 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)



(a) Konfiguration C, $S_C = 4,5m^2$.



(b) Konfiguration D, $S_D = 6,0m^2$.

Abbildung 5.12: Simulierte- (dunkelblau) und gemessene Nachhallzeit (magenta) der Konfiguration C bzw. D sowie nach ÖNORM B 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)

5.4 Subjektiver Eindruck der neuen Raumakustik

Die neue Raumakustik stellt auch rein subjektiv eine enorme Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Zustand dar. Der Raum erscheint deutlich ruhiger, die ursprüngliche Aufdringlichkeit ist vollständig verschwunden. In Gesprächen ermöglicht dies ein erleichtertes, verbessertes Zuhören der Gesprächspartnerin/des Gesprächspartners, Arbeitspausen (der Raum fungiert ja primär als Pausenraum) werden spürbar entspannter. Auch die auftretenden Geräusche der Elektrogeräte (Kaffeemaschine, Geschirrspüler, Kühlschrank) erscheinen nicht mehr so störend.

Besonders auffällig ist die Wirkung der Wandabsorber, denn sie unterdrücken sehr effektiv die ansonsten zu stark ausgeprägten frühen Reflexionen sowie Flatterechos, die sich sonst zwischen der planen Wand, an der sie angebracht sind, und den gegenüberliegenden, planen Flächen der Kücheneinrichtung ausgebildet haben. Als die Wandabsorber für die Abschlussmessung kurzzeitig abgenommen wurden, stellte sich im direkten Vergleich sofort ein völlig anderer Raumeindruck ein. Durch ihre Montagehöhe direkt in Ohrhöhe ist ihre Wirkung von allen Absorbern am ausgeprägtesten wahrnehmbar, obwohl sie nicht sehr tieffrequent absorbieren.



Abschlussbetrachtungen

6.1 Zusammenfassung

Bereits bei der ersten Begehung des Raumes IEEG136 war die Problematik deutlich zu erkennen: Der Raum klang laut, aufdringlich und dröhnend, was ihn für seinen eigentlich vorgesehenen Zweck als Besprechungs- und Pausenraum nur eingeschränkt nutzbar machte. Die erste messtechnische Begutachtung stützte genau dieses Bild: Die Nachhallzeit, das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Akustik eines Raumes, lag mit $T_{30} = 0,56s$ knapp 50% über der nach ÖNORM B 8115-3 vorgegebenen Nachhallzeit für den vorliegenden Verwendungszweck „Kommunikation“. Eine Simulation der Raumakustik mittels der Software *Catt-Acoustic* bestätigte die Messung.

Es galt also ein Konzept zu entwickeln, mit dem die Nachhallzeit breitbandig abgesenkt werden kann. Dies sollte durch Einbringen mehrerer poröser Absorber erreicht werden. Da die für die Absorber ursprünglich vorgesehene Glaswolle für Akustikanwendungen jedoch nicht verfügbar war, wurde die Glaswolle eines anderen Herstellers zusammen mit verschiedenen Stoffen, mit dem die Absorber überzogen werden sollten, in einer Messreihe im Impedanzrohr untersucht. Es traten dabei jedoch zwei interessante Phänomene auf: Einerseits führte eine zu feste Einspannung der Messprobe sowie deren Inhomogenität zu einer ausgeprägten Welligkeit des Verlaufs des Absorptionsgrades, andererseits stellte sich Bühnenmolton, der ursprünglich als Deckstoff verwendet werden sollte, als gänzlich ungeeignet für die vorliegende Anwendung heraus, da dieser zu schwer und zu dicht gewebt ist.

Anschließend wurden die Absorber geplant und die Tischlerei *Kompacher* wurde mit dem Bau der Rahmenkonstruktionen aus Holz beauftragt. Mit dem gefassten Konzept können bis zu $6m^2$ zusätzliche Absorberfläche im Raum eingebracht werden. Um die vorgegebene Variabilität zu wahren sind diese $6m^2$ auf insgesamt sechs Absorber aufgeteilt (drei verschiedene Typen: Kanten-, Wand-, Kastenabsorber; jeweils zwei Stück). Da nun weiters aus der Messung im Impedanzrohr die Absorptionseigenschaften der Absorber bekannt waren, konnte erneut eine Simulation der zu erwartenden Raumakustik durchgeführt werden. Diese prognostizierte bereits eine deutliche Verbesserung.

Nach Anlieferung der Rahmen wurden die Absorber fertig zusammengebaut und montiert. Messung, subjektiver Eindruck und nicht zuletzt das Feedback der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des SPSC zeigen, dass die Raumakustik deutlich verbessert werden konnte. Bei Einbringung aller Absorber in den Raum wird die von der Norm vorgegebene Nachhallzeit beinahe exakt erreicht. Es kam jedoch zu einer nicht unerheblichen Diskrepanz zwischen Simulation und Messung: Die Simulation zeigte einen deutlich höheren, d.h. schlechteren Wert der Nachhallzeit, als er dann in der Messung tatsächlich auftrat. Die Ursache dafür liegt vermutlich in der mangelhaften, wenn auch normkonformen Abschätzung *eines* mittleren Absorptionsgrades für alle Oberflächen außer der Absorber. Es kann daher wohl als glücklicher Zufall angesehen werden, dass aus Platzgründen nicht mehr als die letztendlich installierten $6m^2$ Absorberfläche untergebracht werden konnten. Wären die gesamten $9,26m^2$, wie sie in 3.1.2 „Abschätzung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche“ berechnet wurden, als absorbierende Fläche in den Raum eingebracht worden, wäre er wohl deutlich zu trocken geworden. Der akustische Eindruck hätte den Raum noch kleiner gemacht, als er ohnehin schon ist.

Besonders diese Abweichung zeigte, dass mit pauschalen, ggf. auch vereinfachten Formeln beim Planungsprozess stets bedacht und in Verbindung mit entsprechender Erfahrung umgegangen werden sollte, um letztlich gar nicht benötigte Ein- oder Umbauten (und damit verbundene Mehrkosten) zu vermeiden.

Für das DIRHA-System und dessen Entwicklerteam bedeutet die neue variable Akustik eine Vielzahl unterschiedlicher, anpassbarer Raumsituationen, mit denen vom privaten Wohnraum (geringe Beachtung der Raumakustik, eher mittlere bis lange Nachhallzeit) bis hin zu beispielsweise einem Seminarraum eines Hotels oder einer öffentlichen Einrichtung (hohe Beachtung der Raumakustik, meist eher trocken) verschiedene Anwendungsmöglichkeiten simuliert werden können. So sind realitätsnahe Funktionstests im selben Raum und mit vergleichsweise geringem Umbauaufwand möglich.

6.2 Ausblick

Der Eindruck einer Raumakustik ist zumeist ein sehr subjektiver. Man spricht etwa von einem „aufdringlichen“, „drückenden“ Eindruck bei einem zu lauten, kleinen Raum, oder auch von einem „beklemmenden“ Eindruck, wenn der Raum zu trocken ist, oder aber - im Idealfall - auch von einem „angenehmen“ oder „warmen“ Raumeindruck. Dieser Eindruck stellt sich selbst dann ein, wenn nur minimale Schallereignisse auftreten (Atmung, Elektrogeräte, Heizung...). Hier eine Verbindung zu schaffen, zwischen messbaren Parametern und der subjektiven Bewertung, zwischen Raum- und Psychoakustik, scheint ein durchaus interessanter Ansatz zu sein, der eine mögliche Option für weitere Arbeiten darstellt. Denn wie beispielsweise in 2.2.2 zum Deutlichkeitsgrad D_{50} gesehen, werden die vorhandenen Gütemaße diesem Kriterium nur teilweise gerecht.

6.3 Fazit

Die Durchführung dieser Arbeit zeigte mir, dass der raumakustische Planungsprozess viel Erfahrung erfordert und man sich nicht ausschließlich auf Messungen und Formeln verlassen kann. Dabei konnte ich selbst jedoch sehr viel von ebendieser Erfahrung sammeln, und zwar nicht nur fachlich, sondern auch administrativ, etwa bezüglich Materialrecherche und -beschaffung. Durch die tiefe Einarbeitung in die (praktische) Raumakustik und die Notwendigkeit, detailliert zu arbeiten, wurde mein Interesse an dieser Thematik nicht nur bestätigt, sondern sogar weiter gesteigert.

Abschließend möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich bei dieser Bachelorarbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei Fr. DI Jamilla Balint, die mir als kompetente Betreuerin dieser Arbeit jederzeit ihre Unterstützung bot, sowie Hr. Andreas Läufer, der mir besonders mit seinem handwerklichen Know-how zur Seite stand. Weiterer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des SPSC, die mir bei allen Begegnungen, etwa bei Messungen oder auch nur bei administrativen Vorgängen, stets herzlich begegnet sind.

Graz, Oktober 2016

Stefan Ziesemer

7

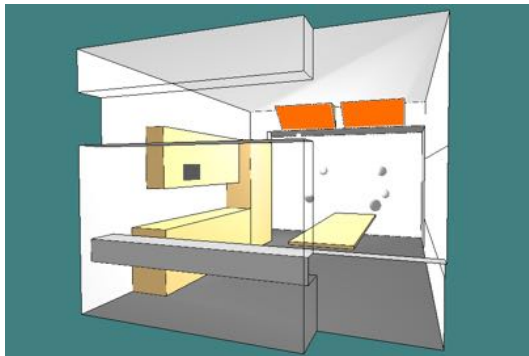
Anhang

7.1 Raumakustische Steckbriefe der verschiedenen Absorber-Konfigurationen

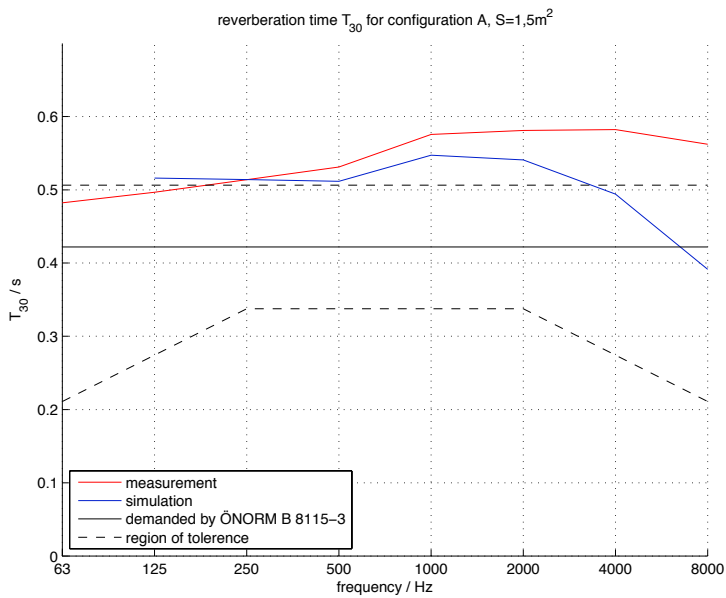
Auf den folgenden Seiten finden sich die Datenblätter der verschiedenen Absorberkonfigurationen (in englischer Sprache). Die repräsentativen Messpositionen der abgebildeten Impulsantworten wurden dabei analog zu 2.2.2 „Ergebnisverfälschung der Nachhallzeit T_{30} durch Extrapolation und Ermittlung einer repräsentativen Impulsantwort“ auf Seite 14 bestimmt.

Configuration A: little absorption

The two corner absorbers on the ceiling are mounted in the room; total absorber surface $S_A = 1.5\text{m}^2$

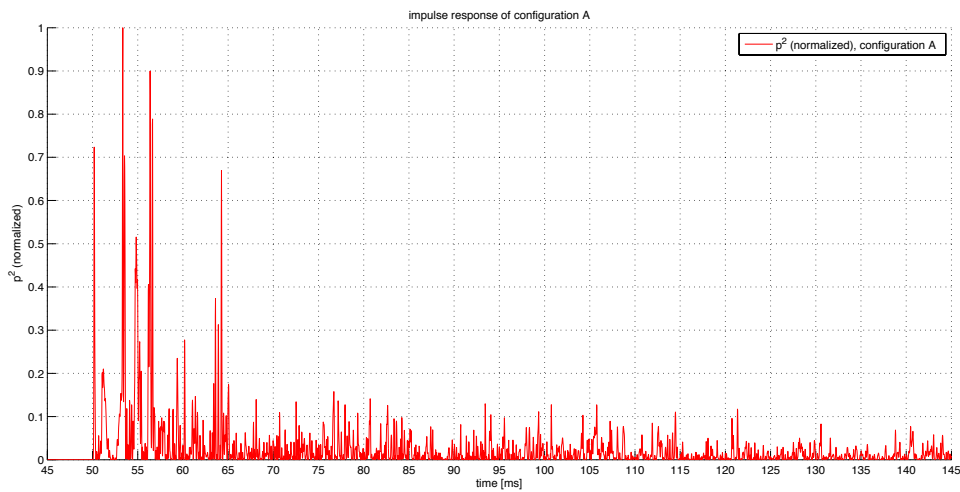


configuration A



freq. (Hz)	T_{30} (s)
63	0.48
125	0.50
250	0.51
500	0.53
1000	0.58
2000	0.58
4000	0.58
8000	0.56
16000	0.53

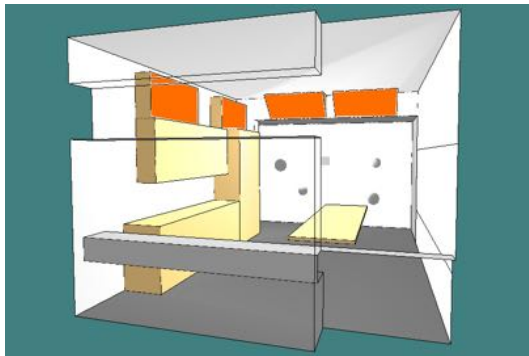
reverberation time T_{30} of configuration A



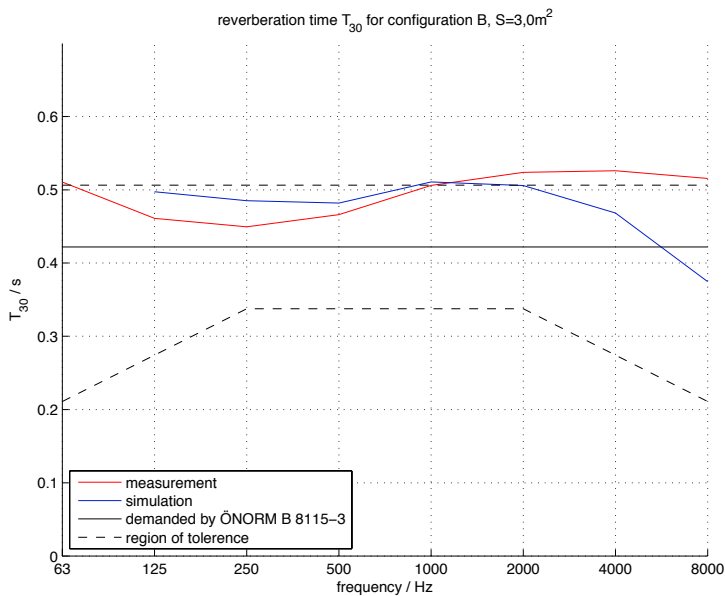
impulse response for configuration A

Configuration B: a little more absorption

The two corner absorbers on the ceiling and the two absorbers on the kitchen cabinet are mounted in the room; total absorber surface $S_B = 3.0\text{m}^2$

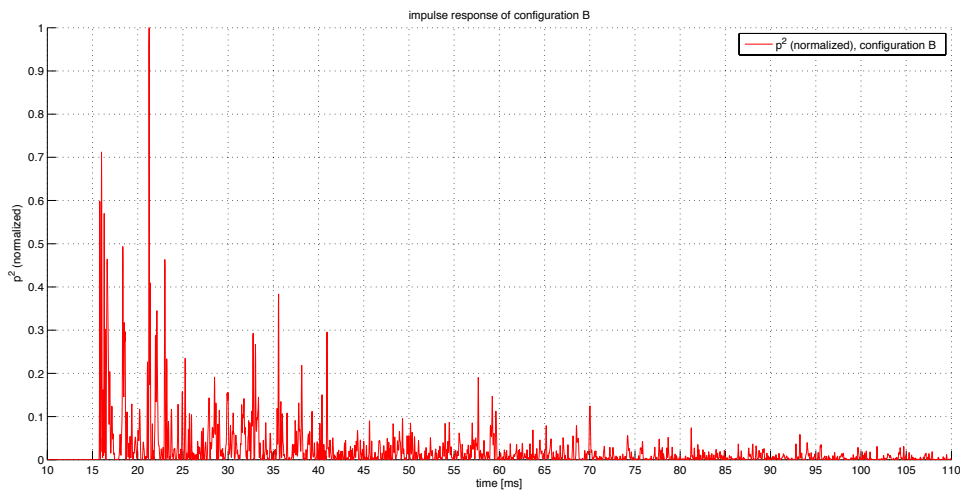


configuration B



freq. (Hz)	T_{30} (s)
63	0.51
125	0.46
250	0.45
500	0.47
1000	0.51
2000	0.52
4000	0.53
8000	0.52
16000	0.49

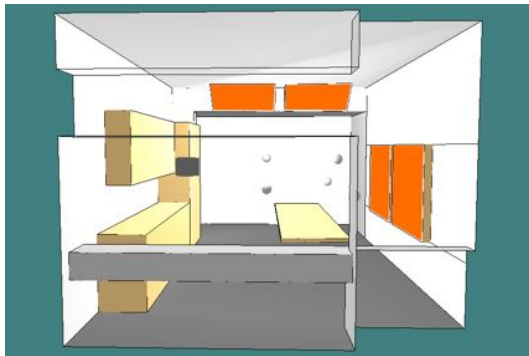
reverberation time T_{30} of configuration B



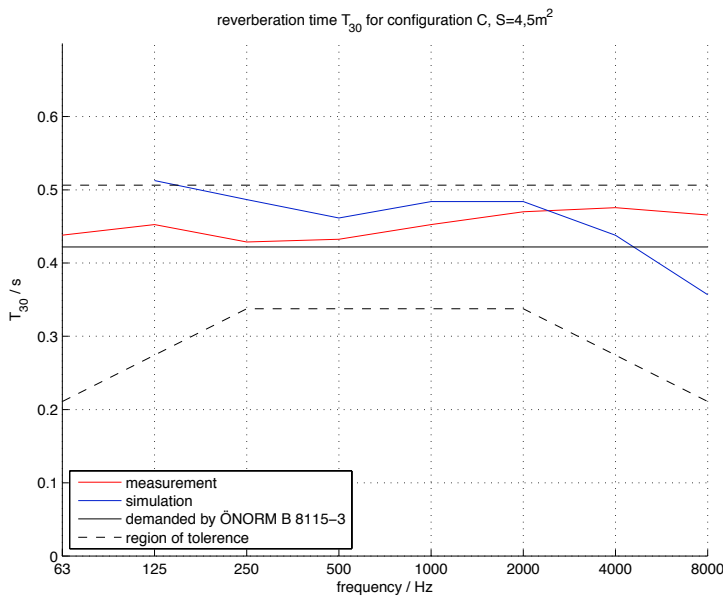
impulse response for configuration B

Configuration C: even more absorption

The two corner absorbers on the ceiling and the two absorbers on the wall are mounted in the room; total absorber surface $S_C = 4.5\text{m}^2$

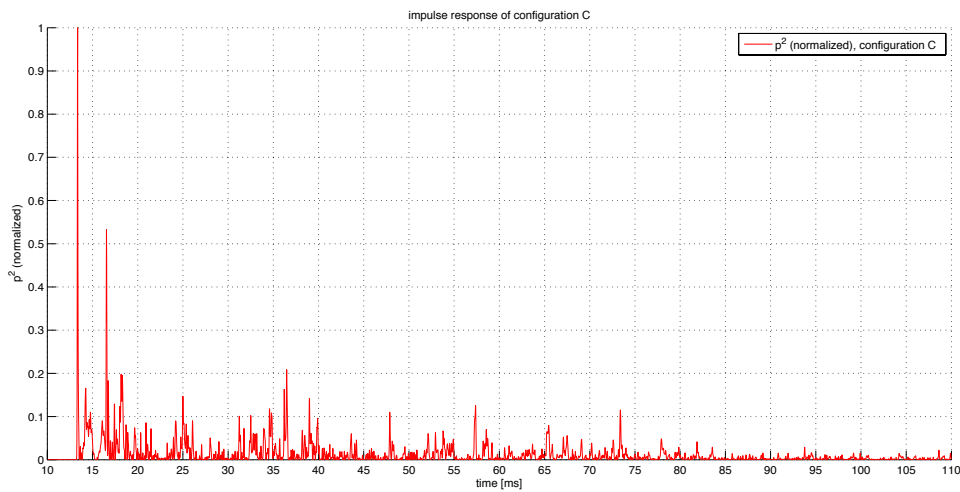


configuration C



freq. (Hz)	T_{30} (s)
63	0.44
125	0.45
250	0.43
500	0.43
1000	0.45
2000	0.47
4000	0.48
8000	0.47
16000	0.45

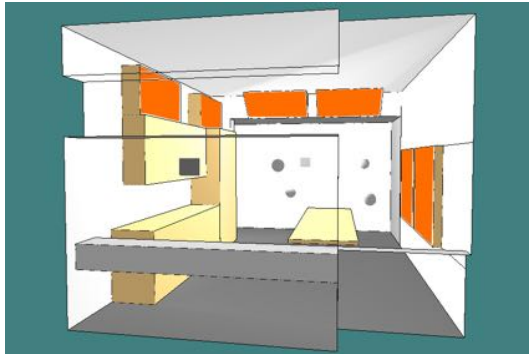
reverberation time T_{30} of configuration C



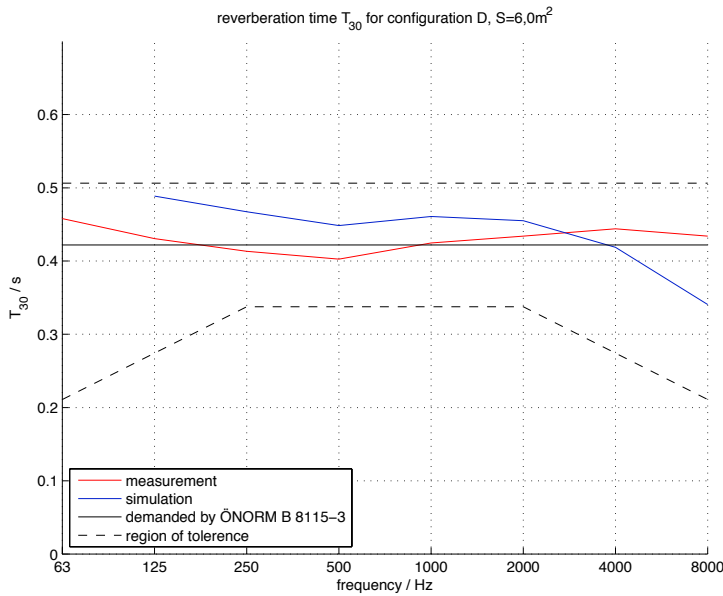
impulse response for configuration C

Configuration D: massive absorption

The two corner absorbers on the ceiling, the two absorbers on the kitchen cabinet and the two absorbers on the wall are mounted in the room; total absorber surface $S_D = 6.0m^2$

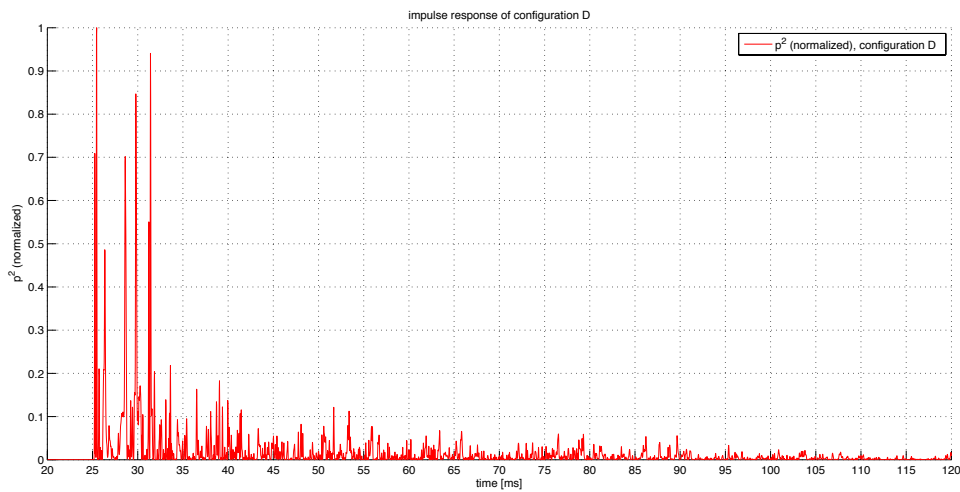


configuration D



freq. (Hz)	T_{30} (s)
63	0.46
125	0.43
250	0.41
500	0.40
1000	0.42
2000	0.43
4000	0.44
8000	0.43
16000	0.41

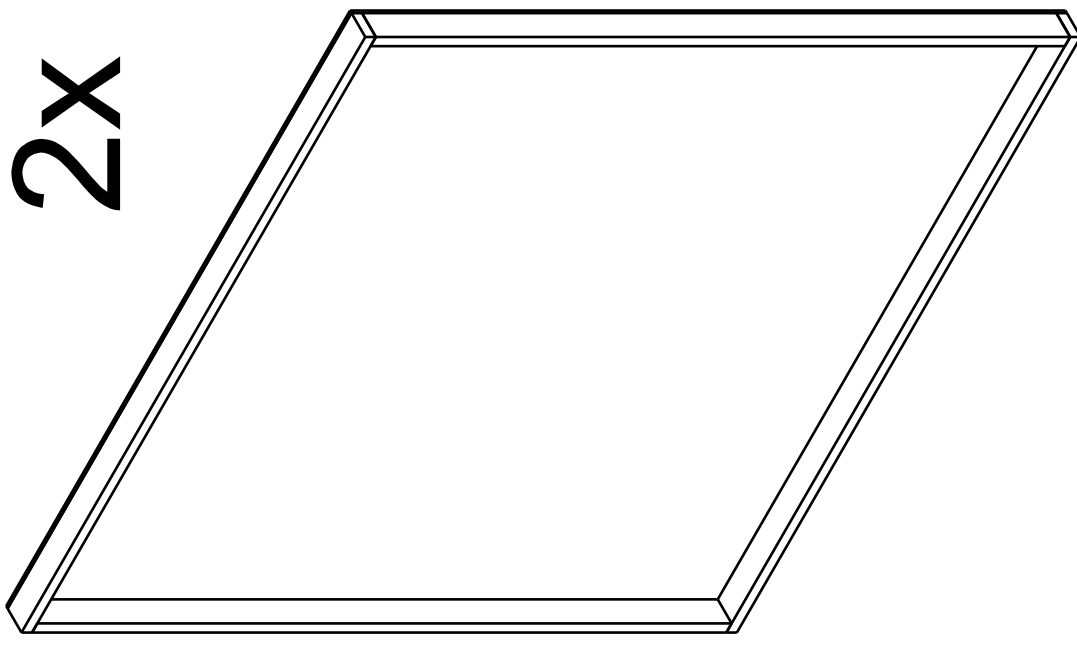
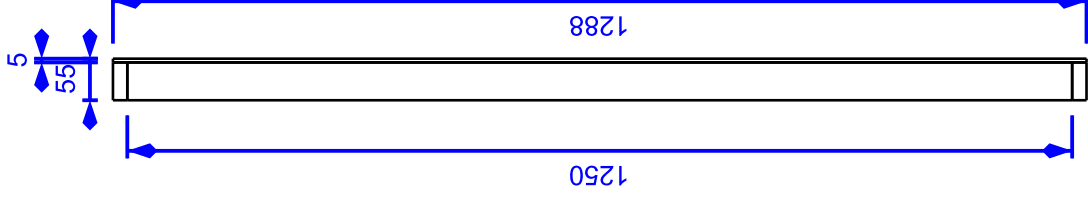
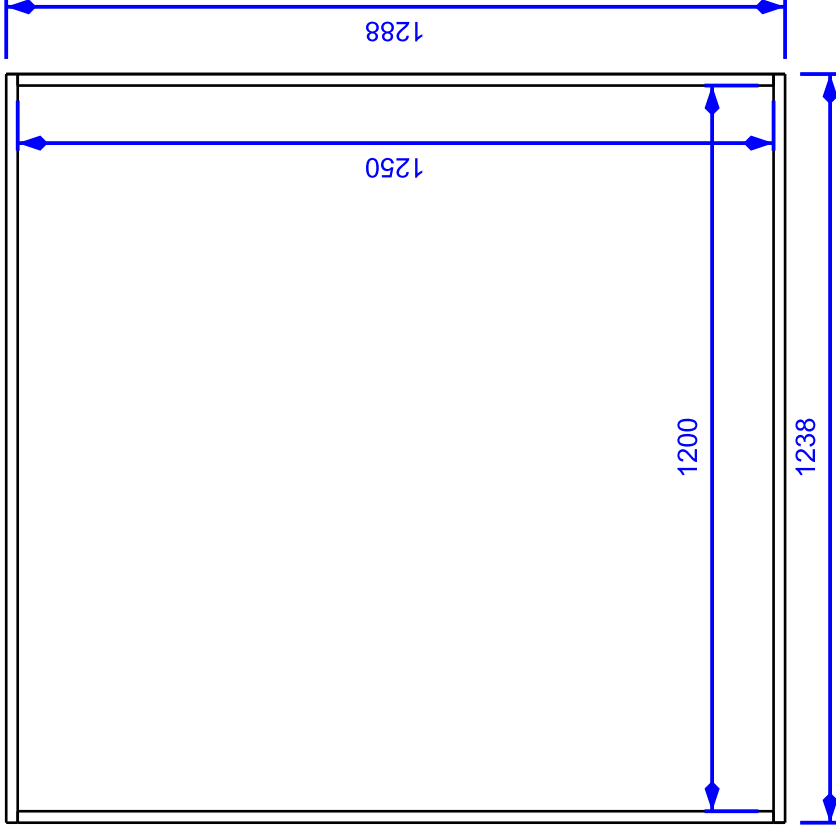
reverberation time T_{30} of configuration D



impulse response for configuration D

7.2 Baupläne der Absorberrahmen

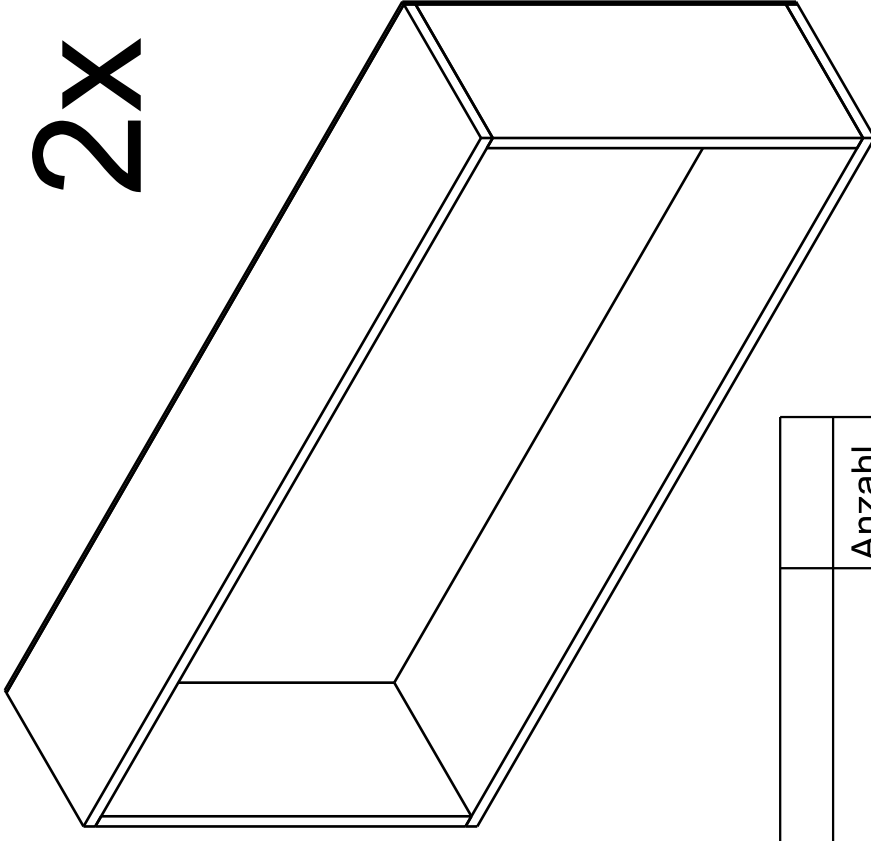
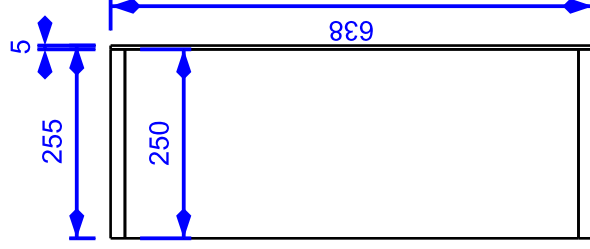
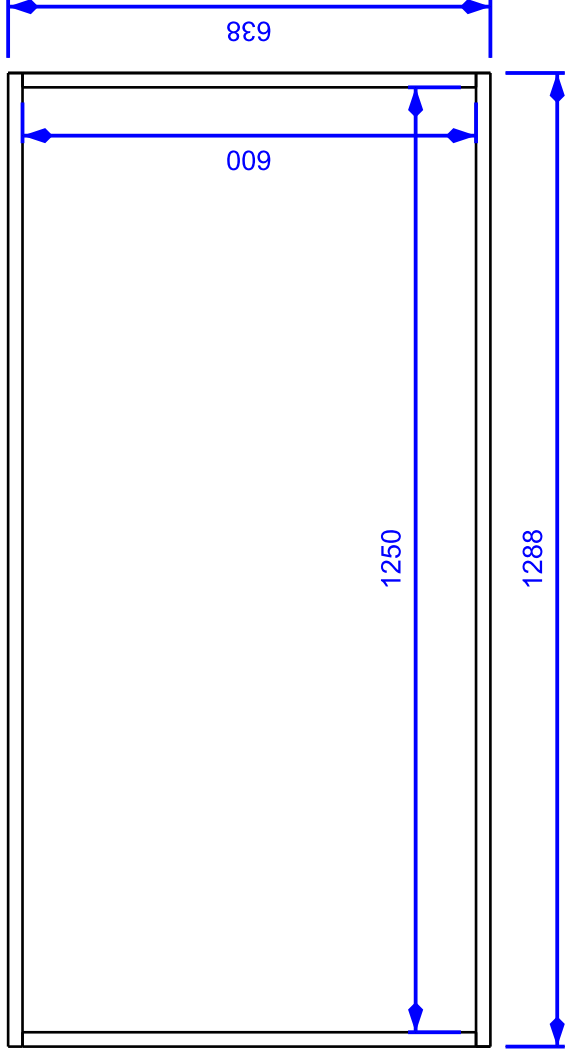
Auf den folgenden Seiten finden sich die mittels der Open Source 3D-CAD-Software *FreeCAD* erstellten Konstruktionspläne der Absorberrahmen. Diese Pläne wurden so auch der Tischlerei *Kompacher* zum Bau übermittelt. Die Rahmen sind dabei, wie im Abschnitt 3.2.2 „Entwurf der Rahmenkonstruktion“ auf Seite 26 ausgeführt entsprechend der vorgegebenen Maße der Glaswolleplatten geplant.



Material	Anzahl
Pressspan 19mm x 1250mm x 50mm	4
Pressspan 19mm x 1238mm x 50mm	4
Hartfaserplatte, vernagelt 5mm x 1238mm x 1288mm	2

Created by:	Ziesemer, Stefan		
Title:	Wandabsorber RahmenkonstrA4		
Size:	Sheet:	Scale:	
	3 / 3	-	
Supplementary information:			
BA Arbeit			
IEEG136			
Betreuerin: DI Balint			
		Part number:	-
		Drawing no.:	-
		Date:	08/05/2016
		Revision:	-

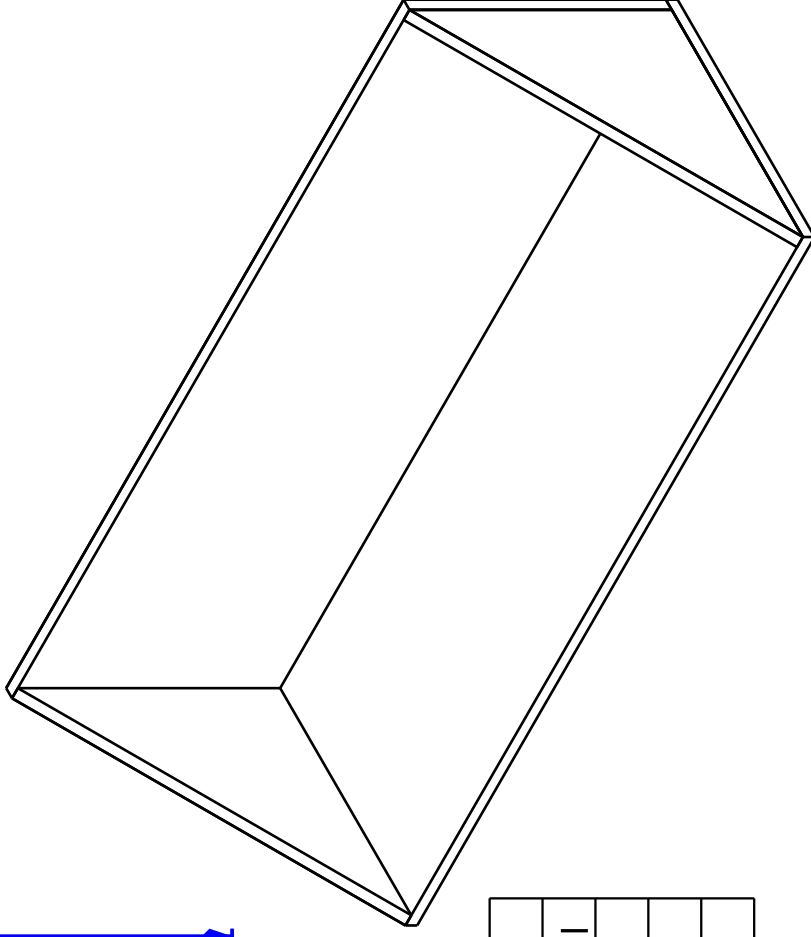
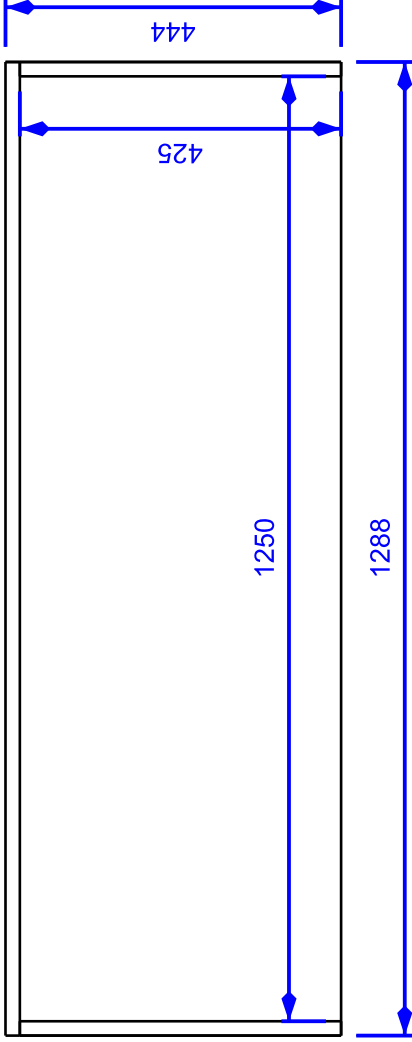




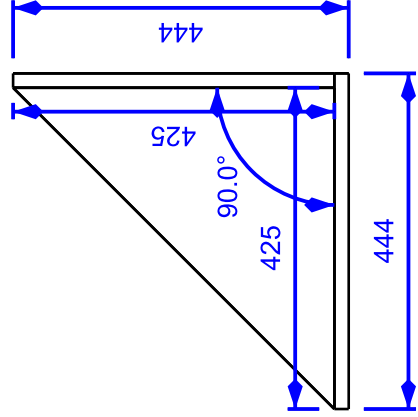
Material	Anzahl
Art	
Pressspan 19mm x 1288mm x 250mm	4
Pressspan 19mm x 600mm x 250mm	4
Hartfaserplatte vernagelt 5mm x 1288mm x 638mm	2

Created by: Zieseimer, Stefan	Title: Absorber Rahmenkonstr.	Size: A4	Sheet: 2 / 3	Scale: 1:10
Supplementary information: BA Arbeit IEEG136 Betreuerin: DI Balint		Part number: -	Drawing no.: -	Revision: -
			Date: 08/05/2016	

2x



Material	Anzahl
Pressspan 19mm x 1288mm x 425mm	2
Pressspan 19mm x 1288mm x 444mm	2
Pressspan Dreieck 19mm x 425mm (90°) 425mm	4



Created by:

Ziesemer, Stefan

Title:

Deckenabsorber RahmenkonstA4

Sheet:

1 / 3

Scale:

1:10

Supplementary information:

BA Arbeit

IEEG136

Betreuerin: DI Balint



Part number:

-

Drawing no.:

-

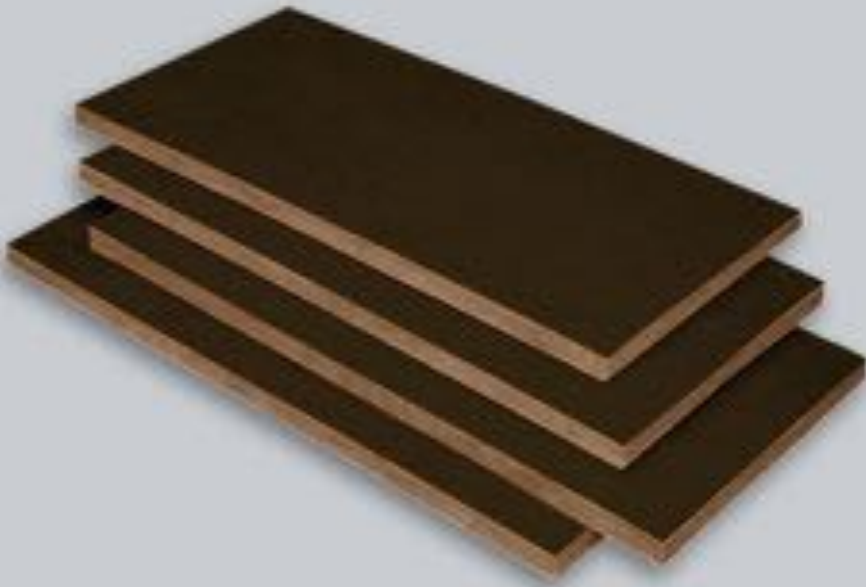
Date:

08/05/2016

Revision:

-

7.3 Datenblatt der verwendeten Mineralwolle TP435B 50mm von Knauf Insulation



Fassaden-Dämmplatte TP 435 B

Mineralwolle gemäß ÖNORM EN 13162

MW-EN 13162-T4-WS-WL(P)-AF_r10

Produktart nach ÖNORM B 6000 MW-W

Produktbeschreibung

Gebundene Glaswolle mit schwarzem Glasvlies kaschiert, nichtbrennbar, wärme- und schalldämmend, wasserabweisend, unverrottbar, formbeständig, alterungsbeständig.

Anwendung

Nicht belastbare Wärme- und Schalldämmung speziell für hinterlüftete Fassaden und zweischaliges Mauerwerk sowie für Stahlkassettenträgerwände.

Verarbeitung

Bitte beachten Sie die jeweiligen Verarbeitungsrichtlinien. Darüber hinaus gelten die einschlägigen Normen und die anerkannten Regeln der Technik.

Fassaden-Dämmplatte TP 435 B

Technische Daten

Dicke [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	Nennwert des Wärmedurchlasswiderstandes R_D [m ² K/W]
40	600	1250	1,15
50	600	1250	1,45
60	600	1250	1,75
80	600	1250	2,35
100	600	1250	2,90
120	600	1250	3,50
140	600	1250	4,10
160	600	1250	4,70
180	600	1250	5,25
200	600	1250	5,85
220	600	1250	6,45
240	600	1250	7,05

Lieferform: Plattenpakete bzw. Großverpackung (Plattenpakete auf Einwegpalette). Verpackung: Schrumpffolie.

Eigenschaften	Zeichen	Beschreibung / Daten	Einheit	Norm	Stufe gemäß EN 13162
Brandverhalten	--	A1	[-]	EN 13501-1	
Anwendungstemperatur	--	bis 150	[°C]		
Nennwert der Wärmeleitfähigkeit	λ_D	0,034	[W/mK]	EN 13162	
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	μ	1	[-]	ÖNORM B 8110-7	
Längenbezogener Strömungswiderstand	-	≥ 10	kPa.s/m ²	EN 29053	AF _r 10



Der Vertrieb erfolgt über den Fachhandel.

Knauf Insulation GmbH
 Industriestraße 18
 A-9586 Fürnitz
 Telefon: + 43 4257 3370-0
 Telefax: + 43 4257 3370-2300
 info.at@knaufinsulation.com
 Österreich

www.knaufinsulation.at

7.4 Zu Mineralwolle

Da sich beim Begriff „Mineralwolle“ häufig umgangssprachlich bedingte Unklarheiten ergeben, sei an dieser Stelle der Versuch unternommen, über die Begrifflichkeit sowie weiters über die potentielle Gesundheitsgefährdung durch Produkte aus Mineralwolle in Kürze aufzuklären.

7.4.1 Begriffsabgrenzung

Zunächst sei gesagt, dass es sich bei „Mineralwolle“ um einen Oberbegriff handelt. Mineralwolle ist ein anorganisches, wolleartiges Material, das durch Zerfaserung durch Blas- oder Schleuderverfahren aus einer Schmelze hergestellt wird. „Mineralwolle“ ist wiederum unterteilt in „Steinwolle“, „Glaswolle“ und „Schlackenwolle“:

- Steinwolle besteht zum größten Teil aus Substanzen steinernen Ursprungs (u.A. Spat, Dolomit, Basalt...), aber auch zu einem gewissen Anteil (Alt-)Glas. Sie ist im Allgemeinen durch Tröpfchenbildung in der Wolle dichter und schwerer als Glaswolle, durch die Materialzusammensetzung weist sie eine höhere Feuerfestigkeit auf.
- Glaswolle besteht zum größten Teil aus (Alt-)Glas, enthält aber auch andere mineralische Komponenten. Sie ist üblicherweise leichter (geringere Dichte) als Steinwolle, je nach Modell und Hersteller kann sie aber durch Produktionsprozesse auch in sehr dichter Form vorliegen.
- Schlackenwolle besteht aus zerfaserten, metallurgischen Schlacken. Aufgrund ihrer Belastung durch Schwermetalle wird sie heute als Dämmstoff (Wärme und/oder Schalldämmung) praktisch nicht mehr verwendet und sei nur der Vollständigkeit halber angeführt.

Es gibt keine klare Vorgabe, ob ein bestimmter Anteil eines bestimmten Ursprungsmaterials in der Stein- bzw. Glaswolle vorliegen muss, der Übergang ist daher fließend.

7.4.2 Potenzielle Gesundheitsgefährdung

Mineralwolle, insbesondere Glaswolle genießt unter gesundheitlichen Gesichtspunkten keinen guten Ruf: Der Staub des Materials lagere sich in der Lunge ab und sei somit potentiell krebserregend. Für lange Zeit war diese Behauptung auch richtig: beim Herstellungsprozess entstanden Fasern, die derart klein waren, dass sie tief in die Bronchien, sogar bis in die Lungenbläschen vordringen konnten (man spricht von „Lungengängigkeit“; Größenordnung im Bereich weniger μm). Seit Dezember 1999 verbietet die EU-Richtlinie 97/69/EG jedoch Verkauf und Verwendung solcher Mineralwollen. Da durch die Brüchigkeit der Fasern aber dennoch Partikel in lungengängiger Größenordnung entstehen können, basiert diese Regelung nicht auf der Größe der Fasern, sondern auf deren Biolöslichkeit: Das Material muss innerhalb einer bestimmten Halbwertszeit vom Körper abgebaut werden können, ein erhöhtes Krebsrisiko ist somit nicht mehr zu befürchten. Erkennbar ist eine solche richtlinienkonforme Mineralwolle am einfachsten an der RAL-Zertifizierung „Erzeugnisse aus Mineralwolle“ (RAL: „Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung“, historische Abkürzung „Reichsausschuss für Lieferbedingungen“), die auch auf den allermeisten Verpackungen der in Österreich vertriebenen Mineralwollen zu finden ist. Besondere Vorsicht ist beim Umgang mit Mineralwolle dennoch geboten, wenn deren Alter (und damit deren heutige Vertriebszulassung) unbekannt ist, etwa bei Sanierungen.

7.5 Messung der Nachhallzeit im Raum IEEG140

Im Zuge der ersten raumakustischen Messung im Raum IEEG136 am 27.02.2016 wurde auch dessen Nebenraum, der Raum IEEG140, einem Besprechungs- und Konferenzraum des SPSC, in dem ebenfalls das DIRHA-System installiert ist, einer Messung unterzogen. Da sich diese Arbeit jedoch hauptsächlich auf den Raum IEEG136 bezieht, wurde diese Messung entsprechend einfacher gehalten.

7.5.1 Messaufbau

Das Messsystem gleicht dem der ersten Messung im Raum IEEG136, für eine genaue Auflistung der verwendeten Gerätschaften siehe Abschnitt „Geräteverzeichnis“ auf S.91. Es wurden drei Positionen für das Messmikrofon rund um den gläsernen, zentralen Konferenztisch gewählt, der Dodekaeder befand sich - soweit möglich - in einer Raumecke, um eine erhöhte Anregung im Tieffrequenten zu erreichen. Die Temperatur betrug $21,3^{\circ}\text{C}$ bei 41% rel. Luftfeuchte.

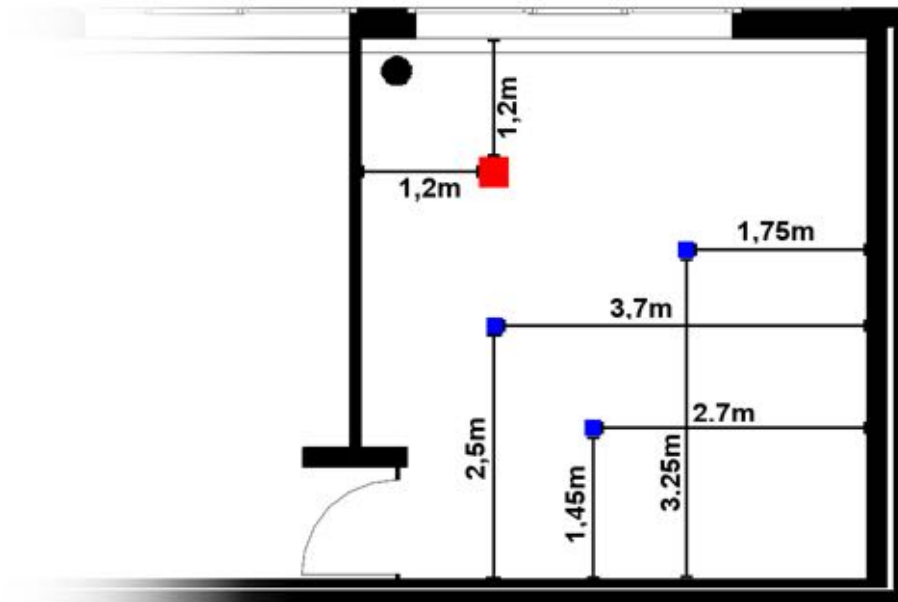


Abbildung 7.1: Messpositionen der raumakustischen Messung; blau: Mikrofonpositionen, rot: Lautsprecherposition

7.5.2 Ergebnisse und qualitative Einordnung der Messung

Da der Raum IEEG140 vorzugsweise für Besprechungen genutzt wird, findet - wie auch bereits im Raum IEEG136 - die Anforderungskategorie „Kommunikation“ aus [ÖNORM B 8115-3] Anwendung. Die Grundfläche des Raumes beträgt $28,97\text{m}^2$, die Deckenhöhe $3,15\text{m}$. Es ergibt sich ein Raumvolumen von $V = 28,97\text{m}^2 * 3,15\text{m} = 91,26\text{m}^3$. Die idealerweise zu erreichende Nachhallzeit T_{soll} beträgt damit

$$T_{soll} = 0,32 * \log(V) - 0,17 = 0,32 * \log(91,26\text{m}^3) - 0,17 = 0,457\text{s}. \quad (7.1)$$

Wie bereits in 2.4, „Qualitative Einschätzung der Ergebnisse von Messung und Simulation“ auf Seite 21 dieser Arbeit erwähnt, bietet die Norm einen gewissen Toleranzbereich. Dieser gilt natürlich auch für diese Messung.

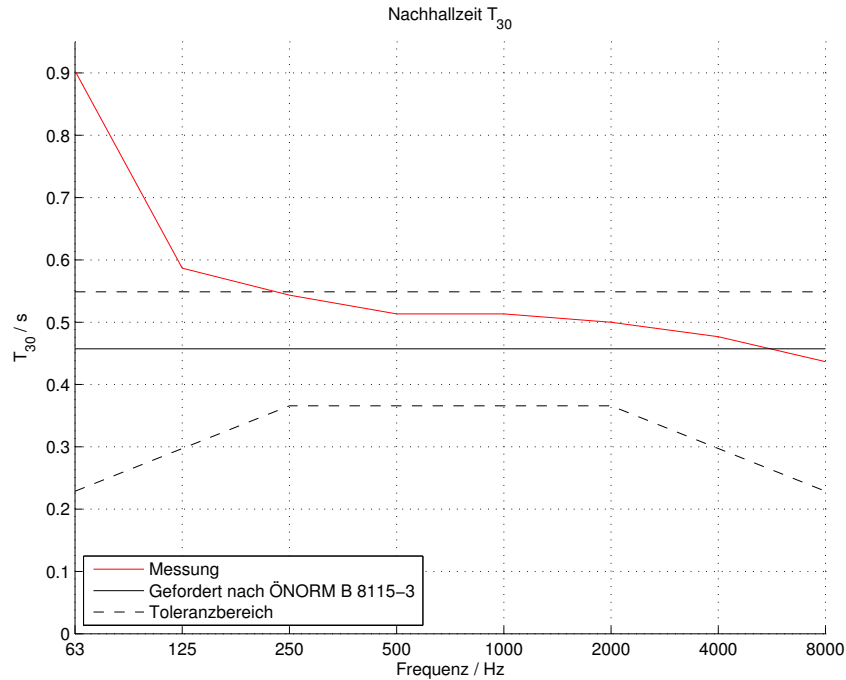


Abbildung 7.2: Nachhallzeit T_{30} im Nebenraum IEEG140

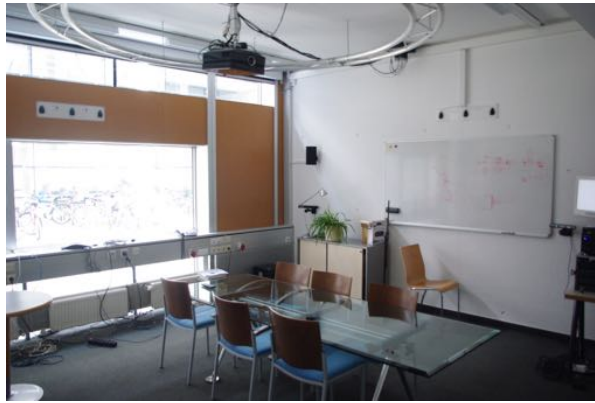
Frq. (Hz)	T_{30} (s)	$\sigma_{T_{30}}$ (s)	SNR (dB)	σ_{SNR} (dB)
63	0.90	± 0.11	18.63	± 3.32
125	0.59	± 0.03	42.33	± 3.91
250	0.54	± 0.03	55.87	± 3.73
500	0.51	± 0.01	54.67	± 1.23
1000	0.51	± 0.01	52.63	± 1.41
2000	0.50	± 0.01	58.37	± 0.40
4000	0.48	± 0.02	61.70	± 1.50
8000	0.44	± 0.01	53.67	± 0.85
16000	0.41	± 0.01	36.90	± 1.35

Tabelle 7.1: Gemittelte Nachhallzeit T_{30} , Standardabweichung $\sigma_{T_{30}}$ und gemittelte SNR

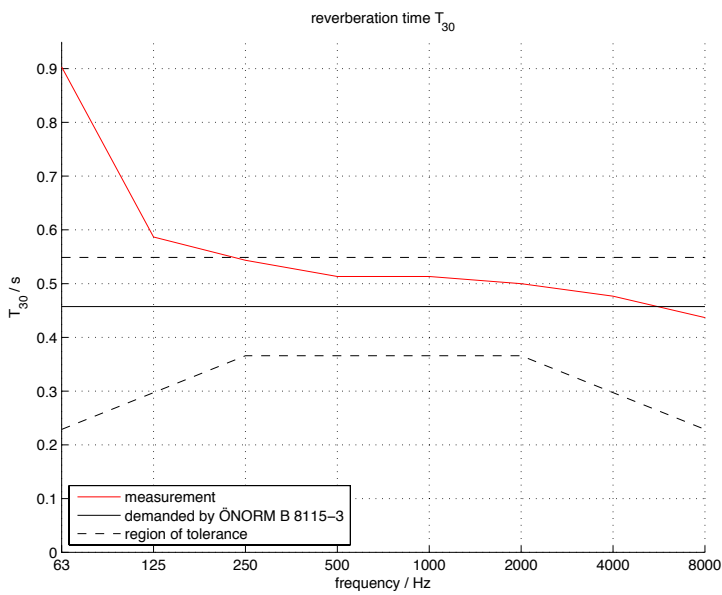
Die Messung zeigt, dass die Nachhallzeit über 250 Hz grundsätzlich gute Werte aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass als Bodenbelag ein Filzteppich verlegt ist, der - als Art poröser Absorber - schallabsorbierend wirkt. Da dieser Teppich jedoch sehr dünn ist, kann er tiefe Frequenzen praktisch nicht absorbieren, was auch die sehr lange Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich erklärt. Dort besteht aber zusätzlich das bekannte Problem, dass Modeneffekte in Verbindung mit der geringen Anzahl der Messpunkte im tieffrequenten Bereich keine repräsentative Messung zulassen.

Auf der folgenden Seite befindet sich - wie für den Raum IEEG136 ebenfalls erstellt - ein raumakustisches Datenblatt des Raumes IEEG140.

IEEG140: Room acoustics

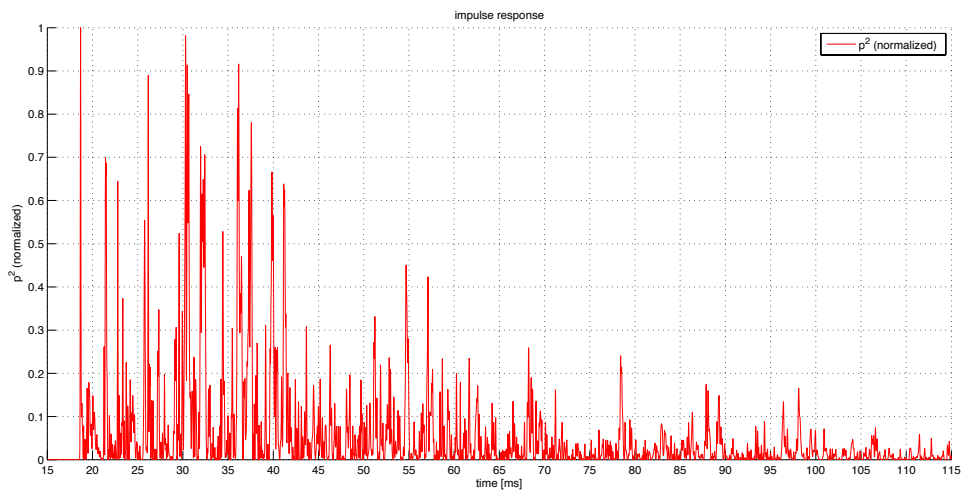


IEEG140



freq. (Hz)	T ₃₀ (s)
63	0.90
125	0.59
250	0.54
500	0.51
1000	0.51
2000	0.50
4000	0.48
8000	0.44
16000	0.41

reverberation time T₃₀ of IEEG140



impulse response of IEEG140

Geräteverzeichnis

Alphabetisch nach Hersteller

<i>Art</i>	<i>Hersteller</i>	<i>Modell</i>	<i>Anmerkung</i>
Messmikrofon	Beyerdynamic	MM1	4x, Messrohrmessungen
Distanzmesser	Bosch	DLE70	
Kalibrator	Brühl & Kjaer	4231	Raumakustikmessungen
Software	CATT-Acoustic	v9	akustische Simulation
Notebook	HP	Elitebook WinXP	erste Raumakustikmessung & Messrohrmessungen
Notebook	Lenovo	Thinkpad T60 Win7	zweite Raumakustikmessung
Messlautsprecher	Norsonic	Nor276	Raumakustikmessungen
Endstufe	Norsonic	Nor280	Raumakustikmessungen
Messmikrofon	NTI	MA2211	1x, erste Raumakustikmessung 2x, zweite Raumakustikmessung
Endstufe	Parasound	HCA-800II	Messrohrmessungen
Interface	RME	Fireface 400	erste Raumakustikmessung
Interface	RME	Fireface 800	Messrohrmessungen
Interface	RME	Fireface UCX	zweite Raumakustikmessung
Software	SPSC	CATS8	Messrohrmessungen
Messrohr	SPSC	Viermikrofon	Messrohrmessungen
Thermometer	testo	610	Raumakustikmessungen
Thermometer	testo	608-H1	Messrohrmessungen
Software	WinMLS	2004	Raumakustikmessungen

Tabelle 8.1: Geräteverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lage des Raumes IEEG136 im Gebäude Inffeldgasse 16	12
2.2	Der Raum IEEG136	12
2.3	Messpositionen der raumakustischen Messung (aus Simulationsprogramm), rot: Lautsprecher, blau: Mikrofon	13
2.4	Messaufbau	13
2.5	Nachhallzeit T_{30} , gemittelt über alle neun Messpositionen bei zwei Quellpositionen	15
2.6	Gemittelte und repräsentative Nachhallzeit T_{30}	16
2.7	Impulsantwort der repräsentativen Einzelmessung	16
2.8	Impulsantwort der repräsentativen Einzelmessung, logarithmische Ansicht	17
2.9	Gemittelter, gemessener Deutlichkeitsgrad D_{50}	18
2.10	3D-Modell des programmierten Raumes	19
2.11	Simulierte und gemessene Nachhallzeit T_{30}	21
2.12	Geforderte, gemessene und simulierte Nachhallzeit T_{30}	22
3.1	Qualitative Skizze der Positionen der Absorber	26
3.2	Skizzen des Absorberaufbaus	28
3.3	Fotos des Absorberbaus	28
3.4	Aufhängung der Wandabsorber	29
3.5	Montagearbeiten	29
3.6	fertig montierte Absorber	30
4.1	Einzelne Messprobe	31
4.2	Messaufbau	32
4.3	Messergebnis und Skizze der 50mm Schicht	33
4.4	Messergebnis und Skizze der 100mm Schicht	33
4.5	Messergebnis und Skizze der 150mm Schicht	33
4.6	Messergebnis und Skizze der 200mm Schicht	34
4.7	Vergleich des Absorptionsgrads α_0 für verschiedene Schichtungen	34
4.8	Messergebnis der 50mm und 100mm Schicht; ursprünglicher Durchmesser (rot) und neuer, verkleinerter Probendurchmesser (grün)	35
4.9	Messergebnis der 150mm und 200mm Schicht; ursprünglicher Durchmesser (rot) und neuer, verkleinerter Probendurchmesser (grün)	35
4.10	Vergleich des Absorptionsgrads α_0 für verschiedene Schichtungen bei leicht ver- kleinertem Probendurchmesser	36
4.11	Messergebnis und Skizze der 50mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies . . .	36
4.12	Messergebnis und Skizze der 100mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies . .	37
4.13	Messergebnis und Skizze der 150mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies . .	37
4.14	Messergebnis und Skizze der 200mm Schicht; mit (rot) und ohne (grün) Vlies . .	37
4.15	Vergleich des Absorptionsgrads α_0 für verschiedene Schichtungen bei entfernter Vlieskaschierung	38
4.16	Mineralwolle ohne Vlieskaschierung	38
4.17	Die verschiedenen Stoffe	40
4.18	Messergebnis und Skizze der 50mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht	41
4.19	Messergebnis und Skizze der 100mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht	41
4.20	Messergebnis und Skizze der 150mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht	41

4.21	Messergebnis und Skizze der 200mm Schicht mit Vlieskaschierung, jeweils mit- (grün) und ohne (rot) Molton-Deckschicht	42
4.22	Absorptionsgrad α_0 der verschiedenen Schichtungen mit Vlieskaschierung und Molton-Deckschicht	42
4.23	Fixierung der Stoffproben	43
4.24	Vergleich der Reflexionsfaktoren der verschiedenen Stoffe	43
4.25	Vergleich der Durchgangsdämpfungen der verschiedenen Stoffe	44
4.26	Messergebnis der 50mm und 100mm Schicht; jeweils mit (grün) und ohne (rot) Segeltuch-Deckschicht	45
4.27	Messergebnis der 150mm und 200mm Schicht; jeweils mit (grün) und ohne (rot) Segeltuch-Deckschicht	45
4.28	Absorptionsgrad α_0 der finalen Anordnung (mit Vlieskaschierung und Segeltuch) für alle Schichtungen	46
4.29	Absorptionsgrad α_{diffus} der finalen Anordnung (mit Vlieskaschierung und Segeltuch) für alle Schichtungen	47
4.30	Absorptionsgrad α_{diffus} der finalen Anordnung (mit Vlieskaschierung und Segeltuch) für die verwendeten Schichtungen 50mm & 200mm	47
5.1	Die Absorberkonfigurationen A & B (aus Simulationsprogramm)	50
5.2	Die Absorberkonfigurationen C & D (aus Simulationsprogramm)	50
5.3	Simulierte Nachhallzeit mit den neuen Konfigurationen (grün) , simulierte (blau) und gemessene (rot) Nachhallzeit des unbehandelten Raumes sowie nach ÖNORM B 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)	51
5.4	Simulierte Nachhallzeit mit den neuen Konfigurationen (grün) , simulierte (blau) und gemessene (rot) Nachhallzeit des unbehandelten Raumes sowie nach ÖNORM 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)	51
5.5	Vergleich der verschiedenen Absorberkonfigurationen	52
5.6	Positionen der Messmikrofone (blau) und des Messlautsprechers (rot)	53
5.7	Blockschaltbild des Messaufbaus	54
5.8	Gemessene Nachhallzeit der Konfiguration A bzw. B (grün) , gemessene Nachhallzeit des unbehandelten Raumes (rot) sowie nach ÖNORM 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)	55
5.9	Gemessene Nachhallzeit der Konfiguration C bzw. D (grün) , gemessene Nachhallzeit des unbehandelten Raumes (rot) sowie nach ÖNORM 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)	55
5.10	Vergleich der verschiedenen Absorberkonfigurationen	57
5.11	Simulierte- (dunkelblau) und gemessene Nachhallzeit (magenta) der Konfiguration A bzw. B sowie nach ÖNORM B 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)	59
5.12	Simulierte- (dunkelblau) und gemessene Nachhallzeit (magenta) der Konfiguration C bzw. D sowie nach ÖNORM B 8115-3 geforderte Nachhallzeit (schwarz bzw. schwarz-strichliert)	59
7.1	Messpositionen der raumakustischen Messung; blau: Mikrofonpositionen, rot: Lautsprecherposition	86
7.2	Nachhallzeit T_{30} im Nebenraum IEEG140	87

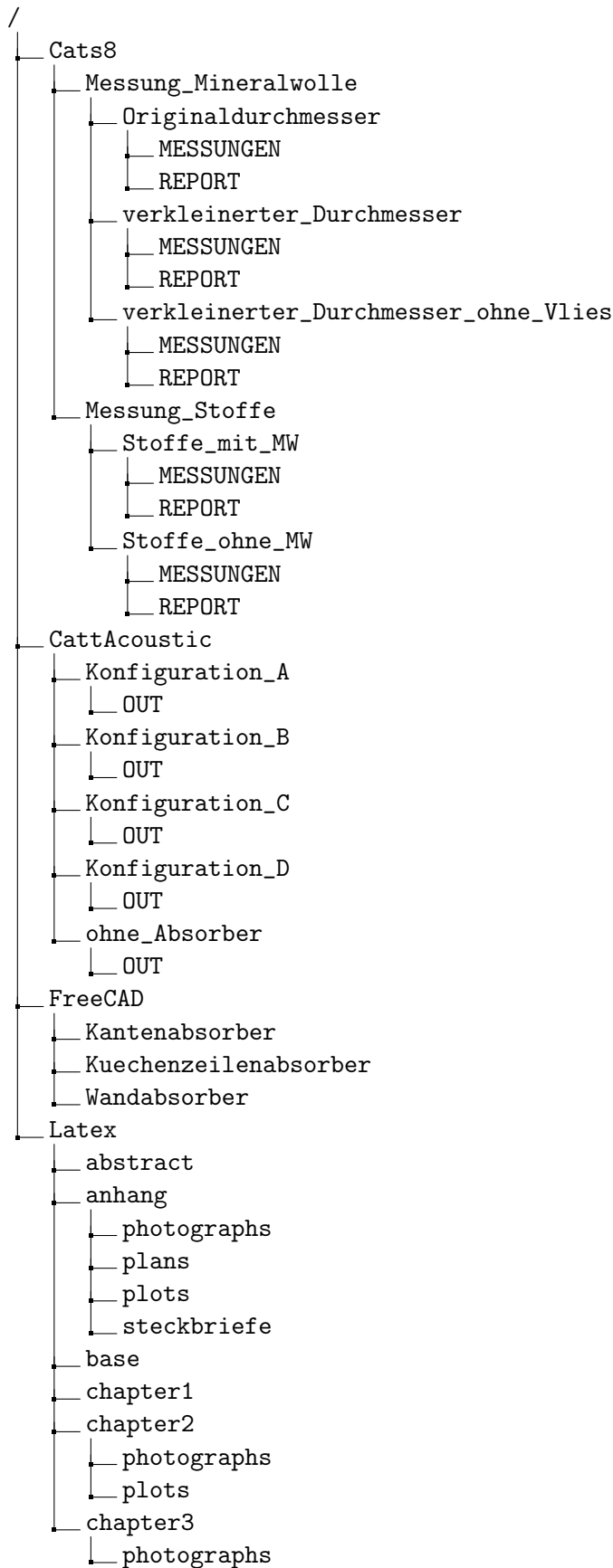
Tabellenverzeichnis

2.1	Gemittelte Nachhallzeit T_{30} , Standardabweichung $\sigma_{T_{30}}$ und gemittelte SNR . . .	14
2.2	Gemittelter Deutlichkeitsgrad D_{50} und Standardabweichung $\sigma_{D_{50}}$	17
2.3	Berechneter Absorptionsgrad α_m	20
4.1	Gemessener Absorptionsgrad α_{diffus}	46
5.1	Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration A, $S_A = 1,5m^2$	56
5.2	Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration B, $S_B = 3,0m^2$	56
5.3	Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration C, $S_C = 4,5m^2$	56
5.4	Gemessene Nachhallzeiten der Konfiguration D, $S_D = 6,0m^2$	56
7.1	Gemittelte Nachhallzeit T_{30} , Standardabweichung $\sigma_{T_{30}}$ und gemittelte SNR . . .	87
8.1	Geräteverzeichnis	91

Literaturverzeichnis

- [MÖSER, 2015] „Technische Akustik“, Springer, 2015
- [FUCHS, 2010] „Schallabsorber und Schalldämpfer“, Springer, 2010
- [CREMER, 1961] „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Band II: statistische Raumakustik“, Hirzel, 1961
- [ISO 9613-1] „Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere“, 1993
- [NPL, Web] Onlinerechner zur Bestimmung der Dissipation in Luft, <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/absorption/>, 09.09.2004
- [DENDA, 2010] „Messsystem für akustische Zweitore“, Bachelorarbeit, 2010
- [ÖNORM B 8115-3] „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 3: Raumakustik“, 01.11.2005
- [SPSC, Web] Projektwebsite DIRHA, <https://www.spsc.tugraz.at/research/projects/dirha>, 13.02.2012
- [WinMLS, Manual] Bedienungsanleitung und Spezifikationen der Software WinMLS 2004
- [WinMLS, Web] Onlineforum zur Software WinMLS, <http://www.nvo.com/winmls/nssfolder/discussionbugs/Problems%20in%20Build%2068.doc>, 22.06.2003

Baumdiagramm der beigelegten CD



- chapter4
 - photographs
 - skizzen
 - plots
 - final
 - molton
 - ov
 - stoffe
 - ur
 - vk
- chapter5
 - photographs
 - plots
 - mess
 - simul
 - simul-mess
- chapter6
- MATLAB
 - daten_abschlussmessung
 - daten_erste_messung
 - ir_rep
 - sim_konzept
- Pages
 - IEEG136_Konfiguration_A
 - IEEG136_Konfiguration_B
 - IEEG136_Konfiguration_C
 - IEEG136_Konfiguration_D
 - IEEG140
- PDF
- QCAD
- WinMLS
 - Messung_2016-02-27
 - IEEG136
 - IEEG140
 - Messung_2016-07-22
 - Konfiguration_A
 - bin
 - nicht_verwertbar
 - txt
 - Konfiguration_B
 - bin
 - nicht_verwertbar
 - txt
 - Konfiguration_C
 - bin
 - nicht_verwertbar
 - txt
 - Konfiguration_D
 - bin
 - nicht_verwertbar
 - m-files

