

Toningenieur Projekt

**Absorbertheorien und
Materialforschung für den
raumakustischen
Anwendungsbereich**

Dominik Hemmer, BSc

Betreuerin:

Dipl.-Ing. Dr. Jamilla Balint

Graz, 28. Februar 2022

Version: 1.0

Zusammenfassung

Der akustische Designprozess von Räumen für die verschiedensten Nutzungsarten kennt mittlerweile eine Vielzahl an Absorberlösungen. Dabei werden auch der optischen Gestaltung immer weniger Grenzen gesetzt. Diese Arbeit kann in drei Teile gegliedert werden und widmet sich zuerst den raumakustischen Grundlagen und den **Absorbertheorien**, insbesondere der Theorie der porösen Absorber.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Untersuchung neuartiger, **nachhaltiger Materialien** auf ihre akustischen Eigenschaften. Dazu gehört die Untersuchung des Materials, die Herstellung geeigneter Absorberproben, Messungen und der Vergleich zu kommerziellen Lösungen. Die Bestimmung des Absorptionsgrades wird im Impedanzrohr durchgeführt. Der letzte Teil widmet sich der **akustischen Planung und Umsetzung eines Sanierungsprojekts**. Dabei soll ein Kellerraum für die Eignung als Tonregieraum optimiert werden und sämtliche Einbauten im Eigenbau umgesetzt werden. Als Basis der Sanierung kommen Kantenabsorber zum Einsatz und Probleme gerade bei kleineren Räumen im tiefen Frequenzbereich werden beleuchtet. Das Ziel dabei ist es, den gesetzten Anforderungen für ein Tonstudio so nahe wie möglich zu kommen und den Einbau so raumsparend wie möglich zu realisieren.

Abstract

The art of designing the acoustics of rooms and buildings nowadays knows a huge palette of absorber or diffusor elements. Hence the design component is less and less limited to material or geometrical restrictions. This thesis contains three different parts. In the first part, a basic overview of the **theories of room acoustics** and also porous absorbers is given.

The second part deals with **sustainable materials** and their usability for acoustic purposes. This includes researching the properties of the materials, creating samples for use as an absorber, measurements in an impedance tube and the comparison to commercial solutions that are available on the market.

The third part of the thesis shows a **practical example of acoustical optimization**. Therefore a control room of a recording studio should be planned and built outgoing an empty basement room. All absorber elements are DIY projects. For basic shortening of the reverberation time, edge absorbers are used. The thesis also describes occurring problems in the low frequency area in small rooms. The aim is to fulfill the necessary requirements of a recording studio and to save as much space as possible.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Kapitelübersicht	6
2	Akustische Grundlagen	8
2.1	Raumakustische Theorien	8
2.1.1	Geometrische Akustik	8
2.1.2	Statistische Raumakustik	9
2.1.3	Nachhallparameter	11
2.2	Probleme bei tiefen Frequenzen	12
2.2.1	Modendichte	12
2.2.2	Die Schröder-Frequenz	13
2.2.3	Beispiel Quaderraum	13
2.3	Raumakustische Maßnahmen	15
3	Poröse Absorber	16
3.1	Überblick	16
3.2	Materialkennwerte	17
3.3	Absorbereinsatz in Messräumen	21
3.4	Keilformen	21
4	Grundlagen der Horntheorie	23
4.1	Hornlautsprecher	23
4.2	Berechnungsbeispiel eines Exponentialtrichters	25
4.3	Erkenntnisse für den Absorberentwurf	26
5	Absorberentwurf als Trichterform	27
5.1	Design	27
5.2	Messung im Impedanzrohr	28
6	Weitere Absorbertypen	32
6.1	Mikroperforierte Absorber	32
6.1.1	Überblick	32
6.1.2	Berechnung des MPA	32
6.1.3	Breitbandige Erweiterung	33
6.2	Kantenabsorber	34
6.2.1	Überblick	34
6.2.2	Ausführung	35

7 Nachhaltige Materialien in der Akustik	37
7.1 Überblick und Stand der Forschung	37
7.2 Mikroperforierte Schichten aus Alginat	43
7.2.1 Überblick und Herstellung der Proben	43
7.2.2 Erste Messreihe im Impedanzrohr	44
7.2.3 Zweite Messreihe im Impedanzrohr	47
7.2.4 Fazit	51
7.3 Vermessung von Proben aus Mycelium	52
7.3.1 Fazit	52
8 Sanierung eine Projektstudios	54
8.1 Ausgangssituation	54
8.2 Messung der Impulsantworten	55
8.3 Messsetup	56
8.4 Messung im leeren Raum	57
8.5 Anforderungen an die Nachhallzeit und Optimierungskonzepte	60
8.6 Raumakustische Sanierung in der Praxis	65
8.6.1 Einbau der Kantenabsorber	65
8.6.2 Decke und Wände	67
8.7 Messung im sanierten Raum	71
8.7.1 Auswertung EDT, T20, T30	71
8.7.2 Deutlichkeitsmaß, Klarheitsmaß	75
8.7.3 Nach dem Einbau der Möbel	77
9 Zusammenfassung und Ausblick	79
9.1 Rückblick	79
9.2 Ausblick, Akustische Sanierung der Zukunft?	79
10 Anhang	80

1 Einleitung

Die raumakustische Gestaltung gewinnt mehr und mehr an Bedeutung. Dabei wird stets versucht, eine Symbiose aus subtilen architektonischen Konzepten und einem Mehrwert für die Akustik zu erzielen. Ein gesteigertes Wohlbefinden in Räumen geht damit ebenfalls einher. Als Werkzeug dienen dazu Absorber aller Art, wobei die größte Bedeutung auf *poröse Absorber* entfällt. Leichter Materialzugang, die einfache Handhabung und die hohe Effektivität tragen zur weiten Verbreitung bei. Da jedoch zunehmend Frequenzbereiche im gesamten Hörbereich ($\approx 20Hz - 20kHz$) von raumakustischen Sanierungskonzepten angesprochen werden, stößt man im tiefen Frequenzbereich aufgrund der unpraktikablen Größe der Abmessungen rasch an die Grenzen der sinnvollen Einsatzmöglichkeiten von porösen Absorbern.

1.1 Motivation

Die Motivation dieser Arbeit ist es nun, aufbauend auf einer Idee meiner Betreuerin **Dipl.-Ing. Dr. Jamilla Balint**, mittels Überlegungen für Design und Aufbau von porösen Absorbern, Verbesserungen in der Absorptionswirkung für tiefe Frequenzen zu erzielen. Diese sollen im Vergleich mit bekannten und gängigen Oberflächen wie Pyramiden, Dreiecken oder Keilen evaluiert werden. Insbesondere soll die Idee der verbesserten Impedanzanpassung durch exponentielle Trichterformen, entlehnt aus dem Lautsprecherbau bei geringerer Absorbertiefe untersucht werden. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Untersuchung neuartiger, nachhaltiger Materialien und die Überprüfung ob diese für Akustische Anwendungen geeignet sind. Die Materialien wurden im Rahmen von Projektarbeiten vom **Institut für Architektur und Medien** der TU Graz, insbesondere von **Frau Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Milena Stavric** und **Herrn Ivan Marjanovic, BSc** hergestellt. Außerdem werden einige bereits untersuchte *state-of-the-art* Materialien beleuchtet. Der praktische Teil beschäftigt sich mit der akustischen Planung und Sanierung eines Regieraumes und Messungen dazu. Das Ziel dafür ist das Erreichen von praxisrelevanten und normgerechten akustischen Kennwerten. Dabei sollen die Aufstellung, der Einbau und die Wirkungsweise von Kantenabsorbern untersucht werden. Kantenabsorber sind für ihre besonders gute Dämpfungswirkung im tiefen Frequenzbereich bekannt. In der Zusammenfassung wird ein Ausblick gegeben, wo neuartige Materialien anstelle von klassischen Lösungen eingesetzt werden können.

1.2 Kapitelübersicht

In Kapitel 1 wird zunächst die Aufgabenstellung und die Motivation der Arbeit vorgestellt, sowie die Gliederung der einzelnen Abschnitte näher beschrieben.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den raumakustischen Grundlagen und zeigt die Modenproblematik in kleinen Räumen auf.

In Kapitel 3 werden poröse Absorber, also Absorber durch deren Poren und Fasern Schallenergie in Wärme gewandelt wird, genauer betrachtet. Dabei wird ein Überblick über die Materialkennwerte und die Einsatzgebiete ausgearbeitet. Ebenso gibt dieses Kapitel einen Überblick über den Einsatz von Keilabsorbern in Messräumen.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Horntheorie aus dem Lautsprecherbau und wirft die Frage auf, ob Trichterformen die Impedanzanpassung zu tiefen Frequenzen bei porösen Absorbern verbessern können und dadurch zu einer geringeren Einbautiefe führen.

In Kapitel 5 werden Trichterentwürfe aus Akustikvlies entworfen, hergestellt und anschließend im Impedanzrohr vermessen.

Kapitel 6 beschreibt als Grundlage für die spätere Vermessung der Alginatfolien den mikroperforierten Absorber und den Kantenabsorber. Dieser stellt später die Basis für die akustische Sanierung im Praxisteil dar.

In Kapitel 7 wird zunächst recherchiert, welche nachhaltigen Materialien bereits auf ihre akustische Eignung überprüft wurden und wie die Ergebnisse dazu aussehen. Anschließend werden Folien aus Alginat sowie Absorberproben aus Mycelium im Impedanzrohr vermessen. Die Ergebnisse der Alginatfolien werden mit einem kommerziellen Folienabsorber verglichen.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit der akustischen Sanierung eines Kellerraumes für die Eignung als Tonregieraum. Dabei wird der Ist-Zustand ermittelt, Messungen der Nachhallzeit durchgeführt und Konzepte für die Reduktion der Nachhallzeit geplant. Im nächsten Schritt werden verschiedene Aufbauten von Mineralwollepaketen in den Raumkanten vermessen um zu ermitteln, welche Kanten entscheidenden Einfluss auf die Nachhallzeit haben. Diese Setups dienen als Basis für den Verbau der Kantenabsorber. Der Entwurf und die Umsetzung der einzelnen Absorberelemente wird beschrieben und zum Abschluss mit den Anforderungen an ein Tonstudio aus der Literatur verglichen. Dazu wird neuerlich die Nachhallzeit gemessen.

In Kapitel 9 wird die gesamte Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf die Umsetzung akustischer Sanierung mittels nachhaltiger Materialien, sowie weitere mögliche Untersuchungen gegeben.

Kapitel 10 enthält die Auflistung aller Abbildungen, das Literaturverzeichnis und diverse Datenblätter sowie Equipmentlisten.

2 Akustische Grundlagen

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die akustischen Grundlagen, raumakustische Größen und geltende Normen geben und beschreibt Ansätze und Theorien, die in der raumakustischen Planung eine Rolle spielen.

2.1 Raumakustische Theorien

Zunächst unterscheiden sich die Konzepte der Raumakustik nach dem adressierten Frequenzbereich:

- Für Frequenzen oberhalb der sog. Schröder Frequenz (Kap. 2.2) bedient man sich der Konzepte der *geometrischen-* und der *statistischen Raumakustik*.
- Die *wellentheoretische Raumakustik*: Sie wird für tiefe Frequenzen unterhalb der Schröder Frequenz angewandt, wenn die Wellenlängen in der Größenordnung der Raumabmessungen liegen. Zur Berechnung werden wellentheoretische Modelle wie FEM (Finite element method) und BEM (Boundary element method) benutzt.

2.1.1 Geometrische Akustik

In der *geometrischen Akustik* geht man von strahlenförmiger Schallausbreitung aus, die den Regeln der Optik unterliegt und an den Begrenzungsflächen reflektiert wird. Diese Gesetze sind dann anwendbar, wenn die Wellenlänge im Verhältnis klein gegenüber den räumlichen Abmessungen ist. Mit jeder Reflexion der Schallstrahlen wird das Beobachten komplexer, somit beschränkt man sich meist auf die Zeit unmittelbar nach der Schallabstrahlung (Direktschall und erste Reflexionen). Durch frequenzabhängige Absorption an Begrenzungsflächen wird den reflektierten Schallstrahlen Energie entzogen.

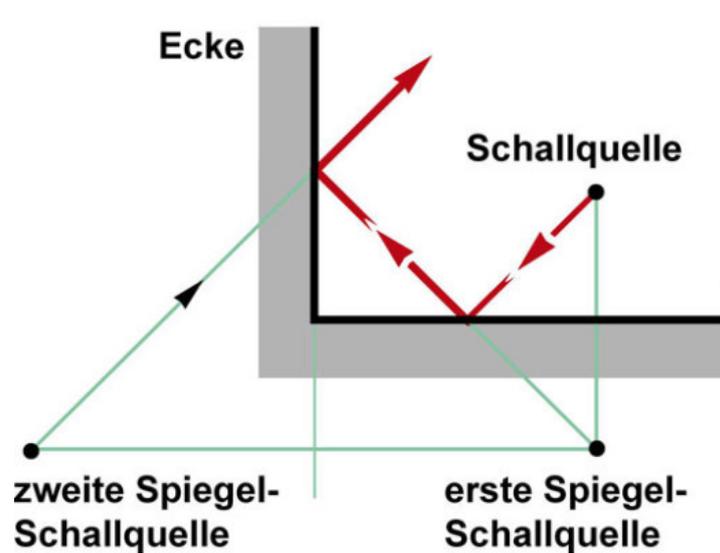


Abbildung 1: Konzept der Spiegelschallquellen, Reflexionen an Begrenzungsflächen.

Abb. 1 zeigt das Modell der Spiegelquellen. Bei Spiegelquellenmodellen höherer Ordnung steigt die Strahlendichte enorm. Die in allen Schallstrahlen steckende Gesamtenergie, wird sich im Idealfall in alle Richtungen gleichmäßig im Raum verteilen, und das Schallfeld wird diffus. Hier finden wir den Übergang zur *statistischen Raumakustik*.

2.1.2 Statistische Raumakustik

In der *statistischen Raumakustik* werden keine einzelnen Strahlen mehr betrachtet. Stattdessen werden statistische Aussagen zum zeitlichen Verlauf der Schallfeldparameter gemacht. Die wesentliche Größe ist hier die Nachhallzeit T , welche durch Absorption an Begrenzungsflächen beeinflusst werden kann. Je nach Nutzungsart der Räume ergeben sich unterschiedliche, frequenzabhängige Soll-Nachhallzeiten, die außerdem vom Raumvolumen (Abb. 2) abhängen:

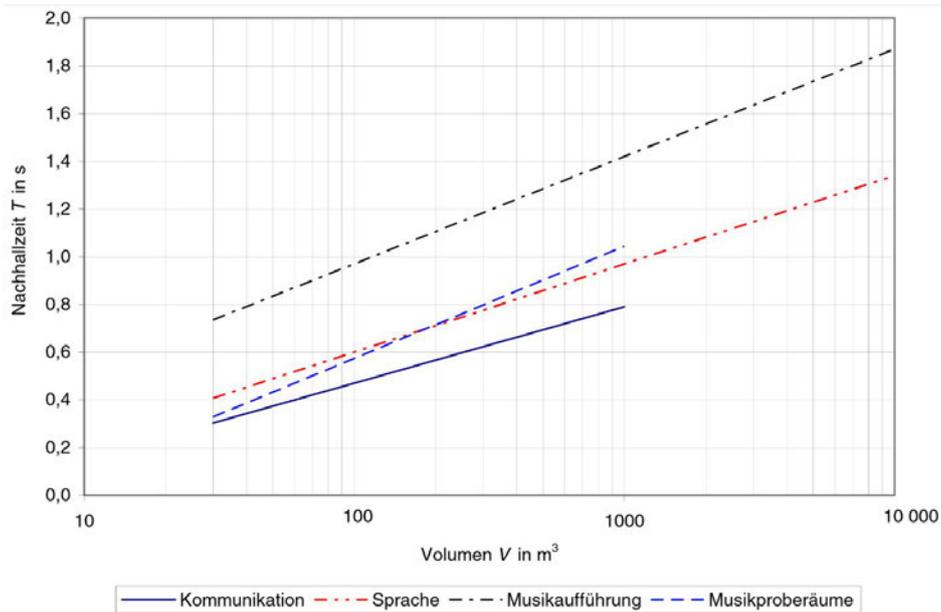


Abbildung 2: Optimale Nachhallzeit von Räumen in besetztem Zustand für unterschiedliche Nutzung aus ÖNORM B-8115-3, 2015

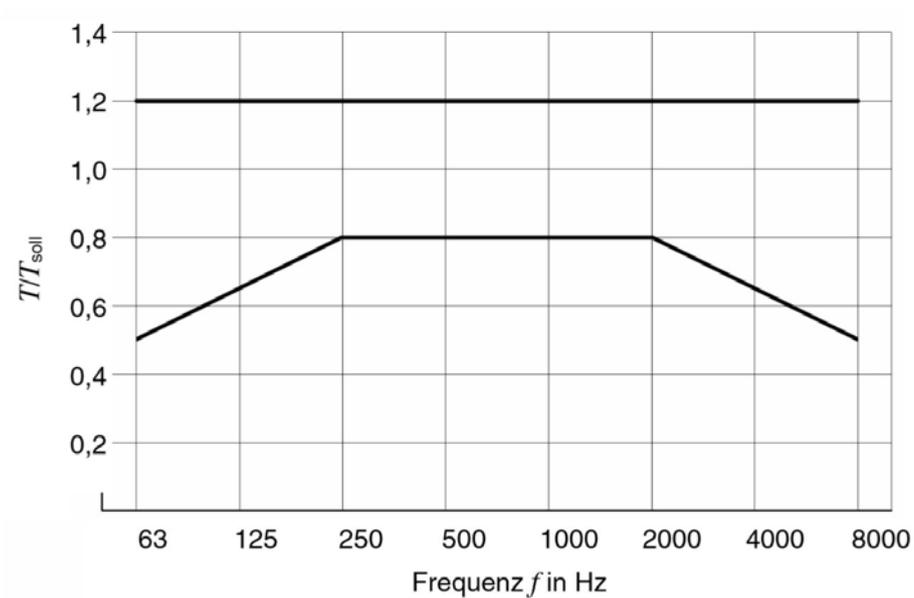


Abbildung 3: Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit der Frequenz für Sprache, Kommunikation, Musikproberäume aus ÖNORM B-8115-3, 2015

Der Frequenzverlauf der optimalen Nachhallzeiten für Sprache oder Musikdarbietungen und Multimedia soll möglichst linear sein, wie in Abb. 3 ersichtlich. In Räumen, die speziell für Musikdarbietungen geplant sind, ist laut ÖNORM B 8115-3 ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen (unter 250 Hz) erstrebenswert. Dieser Anstieg gleicht die geringere Empfindlichkeit des Gehörs bei tiefen Frequenzen aus und steigert die Empfindung von „Wärme“ im Klangbild.

2.1.3 Nachhallparameter

Die **Nachhallzeit** T ist die maßgebliche raumakustische Planungsgröße. Unter ihr wird die Zeit in Sekunden verstanden, welche der Schalldruckpegel benötigt, um nach dem Abschalten einer Schallquelle um 60 dB abzuklingen. Diese Definition ist unter anderem in ÖNORM EN ISO 354:2003, 2003 festgelegt und beruht auf der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Schalldruckpegelabfall und der Zeit besteht. Die Sabine'sche Gleichung zur Berechnung der Nachhallzeit T in s in einem Raum mit dem Volumen V in m^3 und der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A in m^2 lautet:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \quad (1)$$

Die schallabsorbierende Fläche A ist eine Fläche S im Raum mit einem zugehörigen Schallabsorptionsgrad α . Die Beziehung ist gegeben durch

$$A = S \cdot \alpha \quad (2)$$

Der Schallabsorptionsgrad α gibt als einheitenloser Faktor das Verhältnis zwischen der von einer Oberfläche absorbierten Schallenergie zur auftreffenden Schallenergie an und variiert dabei zwischen 0 (vollständige Reflexion) und 1 (vollständige Absorption). Je höher der Schallabsorptionsgrad, desto besser die absorbierende Wirkung des Materials. Diese Zusammenhänge zwischen den Raumeigenschaften erlauben bei Kenntnis der Größen von Raum, Material und Oberfläche eine Abschätzung der Nachhallzeit.

Da der Pegelabfall von 60 dB in den seltensten Fällen direkt bestimmt werden kann, werden die Parameter **EDT** (Early Decay Time), T_{20} und T_{30} über Interpolationsmethoden aus der Abklingkurve, der **EDC** (Energy Decay Curve), vgl. Kap. 8.4) gewonnen. Grund dafür ist der zu geringe Signal-Rauschabstand. Als EDT (Early Decay Time) wird die Zeit des frühen Nachhalls bezeichnet. Sie wird bestimmt, indem die Zeit gemessen wird bis der Pegel im Raum von 0 dB auf -10 dB abfällt. Weiters werden die Parameter **T₂₀** und **T₃₀** verwendet. Es wird die Zeit gemessen, indem der Pegel von -5 dB auf -25 dB bzw. -35 dB abfällt und anschließend mit dem Faktor 3 bzw. 2 multipliziert. Dadurch erhalten wir die lineare Interpolation zur Annäherung an den Pegelabfall von 60 dB.

Das diffuse Schallfeld beeinflusst unmittelbar die **Sprachverständlichkeit**:

In einem „halligen, lauten“ Raum mit großteils schallreflektierenden Oberflächen und längerer Nachhallzeit nimmt die Sprachverständlichkeit ab. Dies führt dazu, dass unbewusst lauter gesprochen wird und die Sprachverständlichkeit durch erhöhten Störschall noch weiter reduziert wird. Dieser Zusammenhang wird auch „Lombard-Effekt“ genannt und ist darauf zurückzuführen, dass alle Sprecher ihre Sprachleistung intuitiv auf das Hören ihrer eigenen Stimme einstellen. [Fuchs, 2010, S. 44]

2.2 Probleme bei tiefen Frequenzen

Ein problematischer Aspekt in der Akustik von kleinen bis mittleren Räumen ist die geringe Modendichte im tiefen Frequenzbereich. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz können Raummoden Klangerfärbungen hervorrufen, da sie isoliert auftreten und als einzelne Resonanzüberhöhungen hörbar werden.

2.2.1 Modendichte

Bei auftretenden Raummoden handelt es sich um Resonanzphänomene, die abhängig von der Geometrie eines Raumes sind. Sie entstehen durch konstruktive oder destruktive Interferenz zwischen direkt abgestrahlten und an Begrenzungsflächen reflektierten Schallwellen. Über einer bestimmten Grenzfrequenz ist die Modendichte so hoch, dass einzelne Resonanzspitzen nicht mehr hörbar sind.

In geschlossenen Räumen existiert theoretisch eine unendliche Anzahl an Raummoden. Wir betrachten den einfachen Fall eines Rechteckraumes mit den Kantenlängen l_x, l_y, l_z : Da an allen Begrenzungsflächen Druckmaxima vorliegen müssen, ergibt sich ein Schalldruck der Form: [Möser, 2015, S. 41]

$$p(x, y, z) = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} \sum_{n_z=0}^{\infty} p_{n_x, n_y, n_z} \cos \frac{n_x \pi x}{l_x} \cos \frac{n_y \pi y}{l_y} \cos \frac{n_z \pi z}{l_z} \quad (3)$$

Man spricht von „Eigenmoden“ eines Raumes, wenn sich nun räumlich verteilte Minima und Maxima des Schallfeldes ausbilden, sogenannte „stehende Wellen“.

Diese dreidimensionalen, örtlichen Moden werden:

- **Axialmoden** (zwischen zwei parallelen Flächen)
- **Tangentialmoden** (Reflexion an vier Flächen)
- **Diagonalmoden**, auch **Oblique-** oder **Schrägmoden** (an allen sechs Raumflächen reflektiert) genannt.

Jede dieser Moden hat eine eigene Resonanzfrequenz:

$$f_r = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (4)$$

2.2.2 Die Schröder-Frequenz

Mit steigender Frequenz nimmt die Anzahl der Moden stark zu. In kleinen Räumen ist die Modendichte bei tiefen Frequenzen deutlich geringer als in großen Räumen. Kennt man die Nachhallzeit T eines Raumes und sein Volumen V , so kann man die **Schröder-Frequenz** f_s berechnen. Sie wurde empirisch ermittelt und beschreibt den fließenden Übergang zwischen wellentheoretischer und geometrischer Raumakustik. [Schroeder, 1954]

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (5)$$

Unterhalb der Schröderfrequenz bewirkt die geringere Modendichte wahrnehmbare Klangverfärbungen. Diese betreffen die tiefen Töne, und werden als Dröhnen empfunden. Die Formeln zur Berechnung der Nachhallzeit sind nicht mehr gültig, da das Schallfeld nicht als diffus angenommen werden kann. Oberhalb dagegen verursachen sie z.B. in Wohnräumen keine hörbaren Verzerrungen der Wiedergabe, weil die Moden in Form von dichten Reflexionen und Nachhall ineinander übergehen.

2.2.3 Beispiel Quaderraum

Wir betrachten die Verteilung der Raummoden in unserem später für die akustische Sanierung gedachten Regieraum im Ausgangszustand. (Siehe Kap. 8) Es handelt sich um einen kleinen Quaderraum mit Parkettboden und gestrichenen Betonwänden:



Abbildung 4: Leerer Raum

Der Raum hat folgende Dimensionen: $L = 8,4\text{m}$, $B = 3,7\text{m}$, $H = 2,3\text{m}$
Damit ergibt sich die Schröder-Frequenz

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{1,981}{72,34}} \approx 331\text{Hz}.$$

wobei

$$T = 0,163 \cdot \frac{72,34}{119,02 \cdot 0,05} \approx 1,981\text{s} \quad (6)$$

mit

$$\mathbf{V} = 72,34\text{m}^3, \mathbf{S} = 119,02\text{m}^2$$

$\alpha_1 \approx 0,05$ z.B. für Parkettboden bei 200Hz

$\alpha_2 \approx 0,05$ z.B. für gestrichene Betonwände bei 200Hz ¹

Wir erwarten, dass ab einer Frequenz von $\approx 330\text{Hz}$ die Modendichte hoch genug ist, um Klangverfärbungen zu vermeiden. Abb. 5 zeigt die einzeln auftretenden Moden für tiefere Frequenzen.

¹“Absorptionswerte verschiedener Stoffe”, 2021

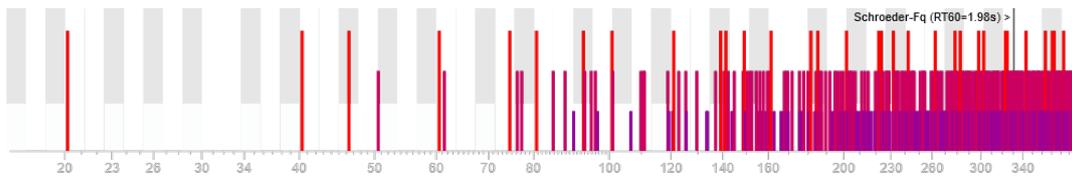


Abbildung 5: Für tiefe Frequenzen treten vereinzelt Raummoden auf, die Anzahl steigt mit der Frequenz stark. „Raummoden Rechner - Trikustik“, 2021

Die Höhe der senkrechten Balken beschreibt die Art der Mode. Bei den höchsten (ROT) handelt es sich um axiale Moden zwischen den Wänden, Balken mittlerer Höhe bedeuten Tangentialmoden und die kleinsten Obliquemoden. Man sieht, dass die Dichte mit steigender Frequenz zunimmt. Die Schröder-Frequenz liegt bei $\approx 331\text{ Hz}$ darum ist es hier sinnvoll, breitbandig den Frequenzbereich darunter zu bedämpfen. Nur so kann die Auswirkung, in Form von „Dröhnen“ oder „Booming“, der einzelnen Moden reduziert werden.

2.3 Raumakustische Maßnahmen

Um die Reflexionen und die Nachhallzeit eines Raumes zu beeinflussen werden nun akustisch wirksame Absorber verwendet. Den weitaus größten Teil macht die Gruppe der porösen Absorber (siehe Kap. 3) aus. Da diese sich jedoch auf die Schallschnelle v auswirken, erreichen sie ihre maximale Wirkung stets im Abstand von $\frac{\lambda}{4}$ zu einer Begrenzungsfläche.

Für die Schallgeschwindigkeit $c = 343\text{ m/s}$ und eine Frequenz $f = 80\text{ Hz}$ ergibt sich die Wellenlänge von $\lambda = 343/80 = 4,3\text{ m}$. Im Abstand zur Wand von $\frac{\lambda}{4} = 1,07\text{ m}$ müsste also poröses Material angebracht sein für maximale Absorption. Bei gegebenen Räumlichkeiten ist ein derart großer Verlust an Raumvolumen in der Praxis oft nicht möglich und man bedient sich alternativer Absorptionskonzepte an reaktiven Absorbern wie Plattenschwinger oder Helmholtz-Resonatoren. Die Anbringung von porösen Absorbern in Raumkanten (sog. Kantenabsorber) erhöht den Absorptionsgrad zu tiefen Frequenzen, auch bei grundsätzlich geringerer Einbautiefe. Dabei treten Interferenzeffekte in Raumbegrenzungsflächen und Kantenefekte am Absorber auf die jeweils zur Erhöhung des Absorptionsgrad beitragen. [Waterhouse, 1955] Einige Varianten in der Aufstellung und deren Auswirkung auf die Raumakustik in einem zu optimierenden Raum werden in Kap. 8 untersucht.

3 Poröse Absorber

3.1 Überblick

Man unterscheidet grundsätzlich drei Arten von Absorbern: **poröse Absorber**, **Plattenabsorber** und **Resonanzabsorber**. Zusätzlich gibt es einige Hybridmodelle, teilweise auch als Absorber und Diffuser konzipiert. Das nachfolgende Kapitel soll der am weitesten verbreiteten Gruppe, den porösen Absorbern, gewidmet werden.

Poröse Absorber sind generell alle Materialien, durch deren Poren und Fasern viskose Effekte auftreten, die Schallenergie in Wärme umwandeln. Dazu zählen Teppiche, Schaumstoffe, verschiedene Dämmstoffe wie Mineral- oder Steinwolle, Vorhänge etc.

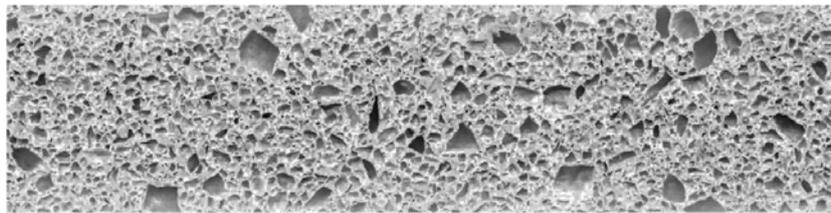


Abbildung 6: Struktur von porösem Material mit einer Vielzahl an Poren und Verzweigungen [Daubner, 2017]

Die Reibung innerhalb der porösen Struktur wie in Abb. 6 erzeugt Wärme und bremst die Luftteilchen ab. Man spricht in dieser Kategorie vom *passiven Absorber*, weil das Skelett der Struktur nicht vom Schallfeld zum Mitschwingen angeregt wird.

Die Absorptionswirkung eines porösen Absorbers ist am Ort des Maximums der Schallschnelle v am größten. An einer schallharten Wand herrscht jedoch ein Druckmaximum und die Schallschnelle $v(x=0) = 0$ wie in Abb. 7 ersichtlich. Somit liegt das erste Maximum bei einem Abstand $x = \frac{\lambda}{4}$, was bei tiefen Frequenzen z.B. 100Hz bereits einen Abstand von 85cm zu Raumbegrenzungsflächen erfordert für bestmögliche Wirkung.

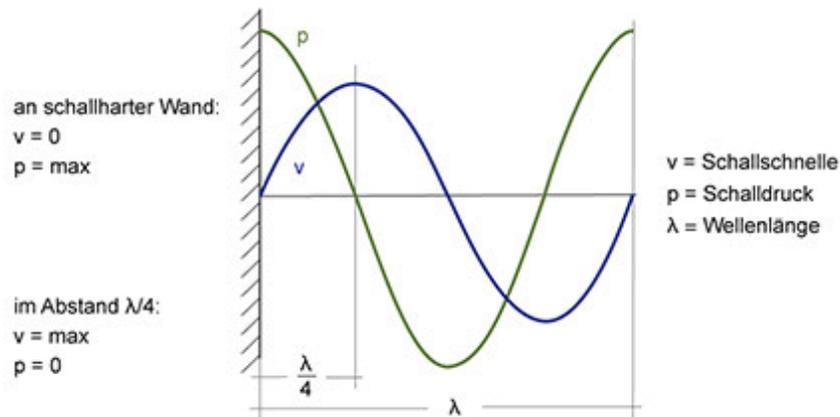


Abbildung 7: Verteilung von Schalldruck und Schallschnelle im Abstand zu einer Wand.

Fast alle porösen Materialien haben eine andere Schallkennimpedanz $Z_0 = \rho \cdot c$ als Luft. Damit wegen mangelhafter Anpassung das Schallfeld nicht an der Oberfläche von Absorbern reflektiert wird, muss die Absorberkennimpedanz an die der Luft angepasst sein.

3.2 Materialkennwerte

Bei Schichtdicke d des passiven Absorbers gegen ∞ , hängt die *Absorberkennimpedanz* Z_a nur von drei Materialkennwerten ab: [Fuchs, 2010, S. 31]

$$Z_a = \rho c_0 \frac{\sqrt{\chi}}{\sigma} \sqrt{1 - j \frac{\sigma \Xi}{2\pi f \rho_0 \chi}} \quad (7)$$

mit

$\rho \dots$ Dichte bei 20°C

$2\pi f \dots$ Kreisfrequenz

$c_0 \dots$ Schallgeschwindigkeit 343m/s

und

- *Porösität* σ , dem Verhältnis aus akustisch wirksamen Luftvolumen im Absorber (V_L) zum Gesamtvolumen des Absorbers (V_A)

$$\sigma = \frac{V_L}{V_A} < 1 \quad (8)$$

- *Strukturfaktor* χ mit dem an der Kompression (V_K) bzw. Beschleunigung (V_B) beteiligten Luftvolumen,

$$\chi = \frac{V_K}{V_B} \geq 1 \quad (9)$$

- *längenbezogener Strömungswiderstand* Ξ mit dem Druckabfall Δp bei gleichmäßigem Durchströmen einer Absorberschicht der Dicke Δx mit der Geschwindigkeit v ,

$$\Xi = \frac{\Delta p}{v\Delta x} \quad (10)$$

Der *längenbezogene Strömungswiderstand* spielt eine sehr wichtige Rolle. Einerseits soll dem Schall möglichst viel Energie auf kurzem Weg d durch Reibung entzogen werden, andererseits darf Ξ nicht zu groß gewählt sein da der Schall sonst nicht in den Absorber eindringen kann. Für die Bauteil-Kenngröße Strömungswiderstand (Ξ mal der Schichtdicke d) hat sich der Bereich

$$800 < \Xi d < 2400 Pasm^{-1} \quad (11)$$

als optimal herausgestellt. [Möser, 2015, S. 205]

Fasermaterialien, wie sie für akustische Zwecke eingesetzt werden, weisen für Strukturfaktor χ und Porösität σ Werte um 1 auf. Als Faustformel eignet sich folgender Zusammenhang zwischen einem Absorptionsgrad $\alpha \geq 80\%$, der Frequenz f in Hz und der Schichtdicke d in mm :

$$\alpha \geq 80\% \longrightarrow d \geq \frac{42.5}{f} 10^3 \quad (12)$$

Tab. 1 zeigt verschiedene Kenngrößen für den längenbezogenen Strömungswiderstand von gängigen Absorbermaterialien.

Absorbermaterial	längenbez. Strömungswiderstand Ξ
Mineralwolle	$5 - 50kPa * s/m^2$
Melaminharzschaumstoffe	$5 - 20kPa * s/m^2$
Thermo-Hanf	$3kPa * s/m^2$
Polyester	$5 - 50kPa * s/m^2$

Tabelle 1: Verschiedene Materialien und ihre Werte für Ξ . [Möser, 2015]

Je nach adressiertem Frequenzbereich des Absorbers und der Möglichkeit höhere Schichtdicken zu verwenden, ergeben sich folgende Zusammenhänge für den Einsatz der Materialien:

- Mit dünnen Materialstärken bis zu 10 cm Stärke kann durch einen hohen längenbezogenen Strömungswiderstand Ξ mehr Schallenergie absorbiert werden, jedoch nur für Frequenzen $\geq 450Hz$ (Abb. 8).
- Bei dickeren Absorbern ab 50 cm Stärke mit niedrigerem Strömungswiderstand werden auch tiefere Frequenzen bis zu $\geq 100Hz$ adäquat absorbiert. Das erschwerte Eindringen bei tiefen Frequenzen und hohem Strömungswiderstand macht sich bemerkbar.(Abb. 9)

Die folgenden Abbildungen zeigen außerdem die Auswirkungen des längenbezogenen Strömungswiderstand auf den Absorptionsgrad bei selber Schichtdicke des Materials. Wir sehen, dass bei kleiner Schichtdicke, im Beispiel 10 cm, ein höherer Strömungswiderstand verbesserte Absoprtionswirkung zu tiefen Frequenzen ermöglicht, allerdings das Maximum des Absorptionsgrad nicht mehr erreicht wird. Bei einer Materialstärke von 50 cm verschlechtert sich sogar der Absorptionsgrad bei tiefen Frequenzen gegenüber dem Material mit geringerem Strömungswiderstand, da die Schallwellen nicht mehr geeignet in die Absorberschicht eindringen können.

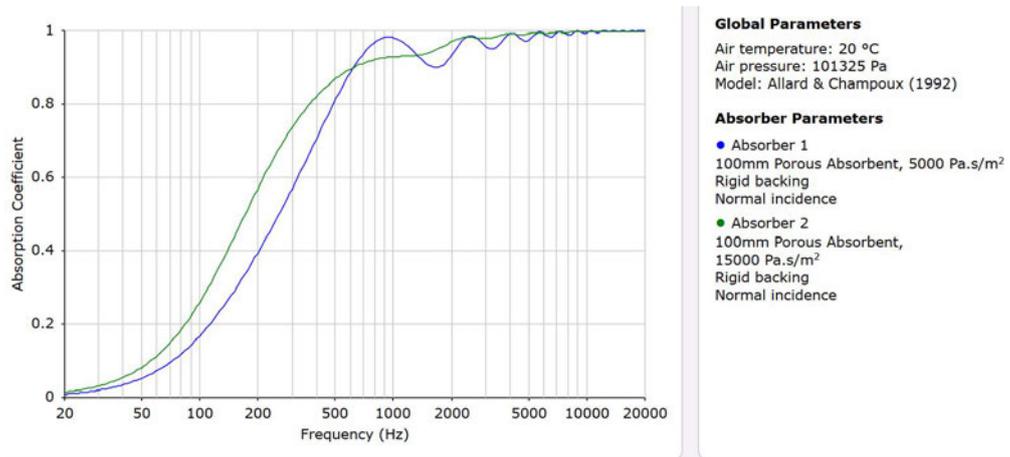


Abbildung 8: Vergleich von Absorbern aus z.B. Melaminharz ($5kPa \cdot s/m^2$, blau) und Mineralwolle ($15kPa \cdot s/m^2$, grün) bei einer Materialstärke von 10 cm. [PCal, 2021]

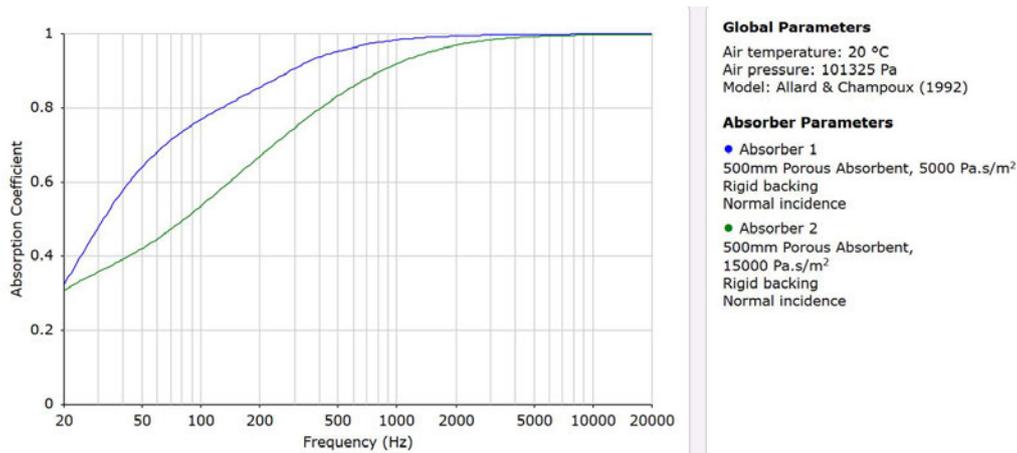


Abbildung 9: Vergleich von Absorbern aus z.B. Melaminharz ($5kPa \cdot s/m^2$, blau) und Mineralwolle ($15kPa \cdot s/m^2$, grün) bei einer Materialstärke von 50 cm. [PCal, 2021]

Sehr oft werden poröse Absorber mit einer dünnen Membran abgedeckt, zum Beispiel mit einem Vlies oder einem luftdurchlässigen Stoff. Da die akustische Masse der Membran z.B. aus Plastik für hohe Frequenzen sehr hoch sein kann, ergibt sich eine reduzierte Absorptionswirkung für diese. Bei der Abdeckung mit perforierten Platten kann durch den Masseneffekt der Löcher, die Wirkung bei tiefen Frequenzen verbessert werden. [Mehel, 1997]

3.3 Absorbereinsatz in Messräumen

Ein reflexionsarmer Raum ist ein akustischer Messraum, dessen Raumbegrenzungsflächen so beschaffen sind, dass daran kein Schall reflektiert wird. Durch das Fehlen von Reflexionen an den Wänden, der Decke und dem Boden entspricht das Schallfeld dem Freifeld. In Abb. 10 sieht man exemplarisch die Ausführung mit Keilabsorbern und einem Gitterboden, unter welchem ebenso absorbierendes Material angebracht wurde. Als alternativen Messraum gibt es auch den Halbfreifeldraum, bei welchem der Boden reflektierend bleibt und der dem Schallfeld im Freien in Bodenhöhe entspricht.

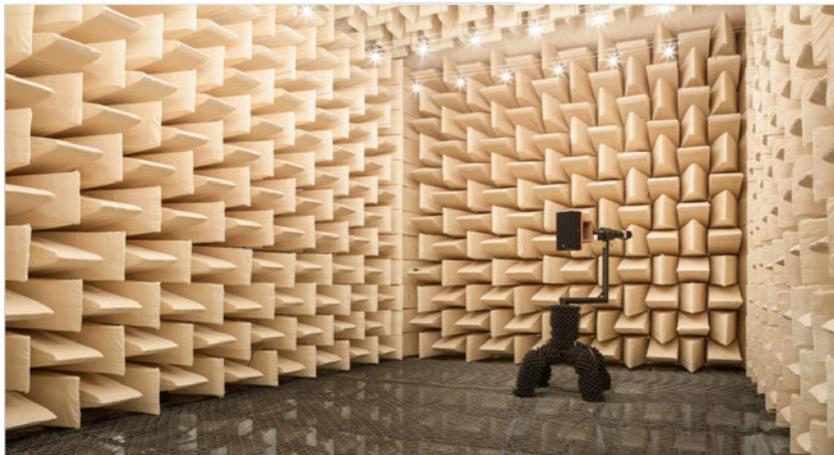


Abbildung 10: Reflexionsarmer Messraum des Fraunhofer-Instituts IDMT in Ilmenau

Diese „schalltoten“ Räume werden gemäß ISO 3745-2012 mit homogenen faserigen/porösen Dämpfungsmaterialien möglichst gleichmäßig ausgekleidet.[Fuchs, 2010, S. 137] Um zu Frequenzen unterhalb von 100Hz hohe Absorptionsgrade zu erhalten, sind hohe Bautiefen über 85cm nötig. Da nun aber auch noch eine optimale Anpassung des Strömungswiderstandes an den Kennwiderstand der Luft gefordert wird, empfehlen sich Absorberformen zunehmender Dichte und Größe. Als Beispiel ist ein Anwendungsgebiet reflexionsarmer Räume, die Bestimmung der Schalleistung von Geräten, Maschinen und Fahrzeugen.

3.4 Keilformen

Die meisten reflexionsarmen Räume werden mit pyramidenförmigen Absorbern oder Keilformen aus porösem Material wie Mineralwolle ausgeführt, um genau diese Impedanzanpassung bei tiefen Frequenzen zu erreichen und bestmöglichen Schalleintritt zu

ermöglichen. Dabei trifft man verschiedenste Anordnungen dieser Keilabsorber, wie in Abbildung 11 ersichtlich.



Abbildung 11: Reflexionsarmer Messraum mit horizontal und vertikal angeordneten Keilabsorbern

Bei diesen Anordnungen bleibt jedoch das Problem der hohen Einbautiefe. Diese Arbeit widmet sich nun folgender Frage:

Können durch geometrische Optimierung Verbesserungen für die Absorption im tiefen Frequenzbereich bei geringerer Einbautiefe erzielt werden?

Dabei sollen insbesondere Konstruktionskonzepte aus dem Lautsprecherbau (Thema Hörner zur Impedanzanpassung) genauer untersucht werden, deren Ziel es ebenfalls ist, verbesserte Anpassung der akustischen Impedanz der Membran an die Kennimpedanz der Luft zu erreichen.

4 Grundlagen der Horntheorie

4.1 Hornlautsprecher

Es ist bereits seit langem bekannt, dass sich bei Lautsprechern die Abstrahlung von Schall durch Trichter bzw. Trichterformen verbessern lässt. Ein Hornlautsprecher besteht dabei aus zwei Teilen: dem Treiber und dem eigentlichen Trichter oder Horn. Der Treiber ist ein dynamischer Wandler, dessen Membran über den Hals des Trichters und dessen Austrittsöffnung (Mund) an den umgebenden Raum akustisch gekoppelt ist. Als Trichter bezeichnen wir den Schallkanal von der Halsöffnung (am Treiber) bis zur Mundöffnung. Die Aufgabe des Trichters besteht nun darin, die kleine Membranfläche an den umgebenden Raum zu transformieren, d. h. den Strahlungswiderstand und damit die abgestrahlte akustische Leistung zu erhöhen. Der Trichter kann konischen, exponentiellen, parabolischen oder auch hyperbolischen Querschnitt aufweisen. Bei Lautsprechern wird als Treiber meist ein Konusschassis verwendet, das eine sehr kleine Strahlungsimpedanz im Bassbereich besitzt. Dadurch ergibt sich gegenüber dem Medium Luft eine Fehlanpassung die über das Horn verbessert wird. Abbildung 12 zeigt den schematischen Aufbau eines Exponentialtrichters: [Bernstein, 2019]

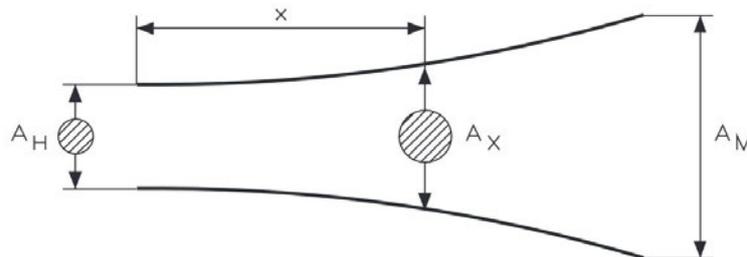


Abbildung 12: Aufbau eines Exponentialtrichters [Bernstein, 2019]

Dabei sind:

- A_H \longrightarrow Halsquerschnitt (m^2)
- $A_X = A_H \cdot e^{kX}$ \longrightarrow Flächenquerschnitt im Abstand X (m^2)
- k \longrightarrow Trichterkonstante oder Öffnungsmaß ($1/m$)
- x \longrightarrow Trichterlänge (m)

Die Mundfläche des Trichters muss für optimale Abstrahleigenschaft nach folgender Bedingung dimensioniert werden:

$$A_M \geq \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \quad (13)$$

wobei λ die längste abzustrahlende Wellenlänge bezeichnet. Die untere Grenzfrequenz f_g ab welcher der Trichter schallübertragend ist, ergibt sich aus dem Schalldruckverlauf und dessen Lösungen im Exponentialhorn. [Zollner und Zwicker, 2003]

$$f_g = \frac{k \cdot c}{4\pi} \quad (14)$$

Diese Grenzfrequenz bestimmt das Öffnungsmaß k des Exponentialhorns und die untere Frequenz, ab der das Horn funktioniert. Die Mündungsimpedanz Z_M soll an die Schallkennimpedanz $Z_F = \rho \cdot c$ angepasst sein. Damit die Mündungsimpedanz Z_M reell ist, muss beim Exponentialhorn der Umfang der kreisförmigen Mundfläche größer sein als die Wellenlänge der tiefsten abzustrahlenden Frequenz. Die Fläche der Mündungsöffnung berechnet sich dabei aus dem Mündungsradius.

$$A_M = \pi \cdot r_M^2 \quad (15)$$

Geht man von gegebener Halsfläche A_X und Mundfläche A_M aus, so ergibt sich die Trichterlänge x aus der Formel:

$$L = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{A_M}{A_H}\right) \quad (16)$$

wobei der Faktor des Öffnungsparamters

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_g}{c} \quad (17)$$

folgt. In der Praxis muss man das Horn kürzer konstruieren als es zur Erzielung idealer Übertragungseigenschaften sein muss. Der dadurch vorhandene unstetige Übergang zwischen Mündungsimpedanz Z_M und Schallkennimpedanz Z_F führt zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Reflexionen von Schallenergie zurück in den Trichter. [Bernstein, 2019, S. 433] Abbildung 13 zeigt ein typisches Hochtornhorn.



Abbildung 13: Beispiel eines Exponentialhorns mit $f_G = 600\text{Hz}$ "Exponentialhorn Bild", 2021

4.2 Berechnungsbeispiel eines Exponentialtrichters

Es soll nun ein Exponentialtrichter dimensioniert werden bei dem bis zu einer unteren Grenzfrequenz von $f_G = 70\text{Hz}$ abgestrahlt wird. Als Treiber dient ein Lautsprecherchassis mit einem Membrandurchmesser von $d_M = 25\text{cm}$.

Berechnung der Trichterhalsfläche A_H :

$$A_H = \pi \cdot r^2 = 0.049\text{m}^2 \quad (18)$$

Berechnung der Mündungsfläche A_M

$$A_M = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} = 1,88\text{m}^2 \quad (19)$$

Es zeigt sich, dass auch hier eine unpraktische Größe entsteht die in der Praxis willkürlich kleiner gewählt wird. Hier geht man einen Kompromiss ein. Wir nehmen als Wert für die Mundfläche $A_M = 1\text{m}^2$ an und untersuchen nun die Trichterkonstante k :

$$k = \frac{4 \cdot f_g}{c} = 2,21\text{m}^{-1} \quad (20)$$

Für die Trichterlänge x folgt:

$$x = \frac{2,94}{2,21} = 1,33\text{m} \quad (21)$$

Damit das Exponentialhorn also ideal bis etwa 70Hz abstrahlt, muss die Mundöffnung $1m^2$ und die Länge des Horns $1,33m$ betragen. Im Lautsprecherbau behilft man sich lange Trichter zu bauen, indem diese im Gehäuse so geführt werden dass der Raum optimal genutzt wird (sog. Faltrichter).

4.3 Erkenntnisse für den Absorberentwurf

- Trichter als Transformatoren der Impedanz sind im Lautsprecherbau sehr gut geeignet um die Schallabstrahlung von Lautsprechern zu verbessern.
- Ähnlich wie bei den porösen Absorbern existiert aber das Problem, dass bei tiefen Frequenzen die Abmessungen realer Bauteile unpraktische Größen annehmen im Fall von idealer Impedanzanpassung. Es werden Kompromisse eingegangen, die die Anpassung verschlechtern.
- Beim Trichter werden unterhalb der Grenzfrequenz Schallwellen in das Horn reflektiert. Darauf aufbauend soll nun aber auch untersucht werden, ob diese Rückreflexion durch Krümmung des „Absorbertrichters“ im Entwurf genutzt werden kann, um den Schall in die Absorbierende Schicht zu lenken und den Absorptionsgrad α eines Modells zu erhöhen.
- In der Literatur für Lautsprecherbau werden der Exponentialtrichter und der Hyperbolische Trichter als besonders geeignet für Anpassung bei tiefen Frequenzen angesehen. (Siehe Abb. 14) Diese Konstruktionsmodelle sollen für den Entwurf einer Absorberprobe angewandt werden. [Bernstein, 2019]

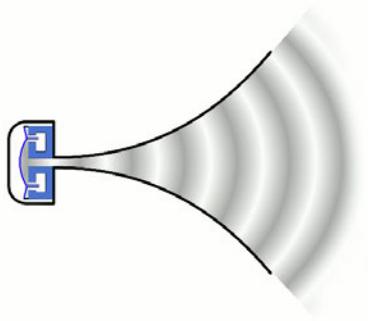


Abbildung 14: Exponentialhorn
(Schema)



Abbildung 15: Hyperbolisches
Lautsprecher-
horn (Schema)

5 Absorberentwurf als Trichterform

5.1 Design

In diesem Abschnitt sollen nun Trichterentwürfe aus porösem Material auf ihre Absorptionswirkung untersucht werden. Dafür werden Proben im Impedanzrohr vermessen. Die Proben werden aus Akustikvlies erstellt. Weiters wird untersucht, ob ein höherer Absorptionsgrad im Vergleich zu herkömmlichen Formen wie z.B. Pyramiden, bei selber Dimensionierung gemessen werden kann. Erste Ausführung dafür ist die Exponentialform, welche einen trichterförmigen Tunnel in das Absorbermaterial aufweist. Abb. 16 zeigt die Form des Entwurfs.

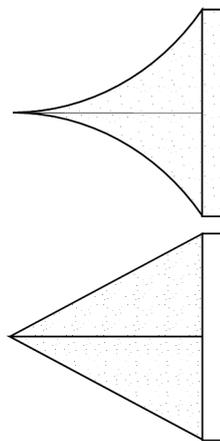


Abbildung 16: Probenentwurf als Exponentialtrichter und als Pyramide ausgeführt

Mittels Lasercutter, werden kreisrunde Schichten aus dem Akustikvlies geschnitten und die einzelnen Scheiben zu einer Gesamtdicke von 14cm verklebt. Im Impedanzrohr wird nun ohne Luftspalt der Absorptionsgrad der einzelnen Proben bestimmt. Die Entwürfe (Abb.17) wurden mit folgenden Parametern erstellt:



Abbildung 17: Drei Modelle aus Akustikvlies

- **Modell linear:**
Referenzmodell, welches der Form einer Pyramide sehr nahe kommt. Parameter der Außenlinie: $x = x$
- **Modell Kurve A:**
Trichteröffnung nach einer Exponentialkurve angenähert. Parameter der Außenlinie: $x = x^2$
- **Modell Kurve B:**
Trichteröffnung noch stärker gekrümmt als bei Kurve A. Parameter der Außenlinie: $x = x^3$

Außerdem wurde auch das ausgeschnittene Negativteilstück im Rohr mitvermessen. Es bleibt die Schwierigkeit, dass durch die Schichtdicke des Materials nur diskrete Stufen mit dem Lasercutter ausgeschnitten werden können und die Annäherung an die Kurve im Entwurf endliche Genauigkeit aufweist. In dieser Arbeit sollen qualitative Unterschiede untersucht werden, wobei man am *Entwurf linear* deutlich sieht, dass der Verlauf der Außenkante nicht ganz linear umgesetzt werden konnte.

5.2 Messung im Impedanzrohr

Im Impedanzrohr wird der Absorptionsgrad α_0 für ebenen Schalleinfall ermittelt. In einem weiteren Schritt werden die Entwürfe miteinander verglichen. Die Messung wurde

nach der Anleitung von Martin Denda [Denda, 2010] durchgeführt. Der Aufbau findet sich in Abb. 18.

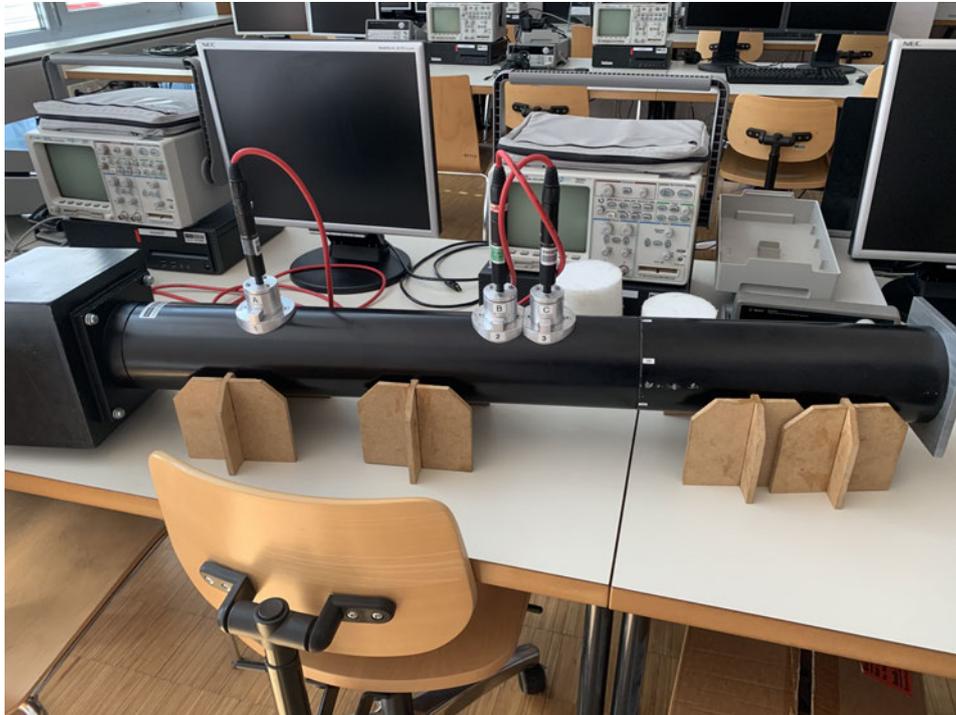


Abbildung 18: Messung im Impedanzrohr, Aufbau

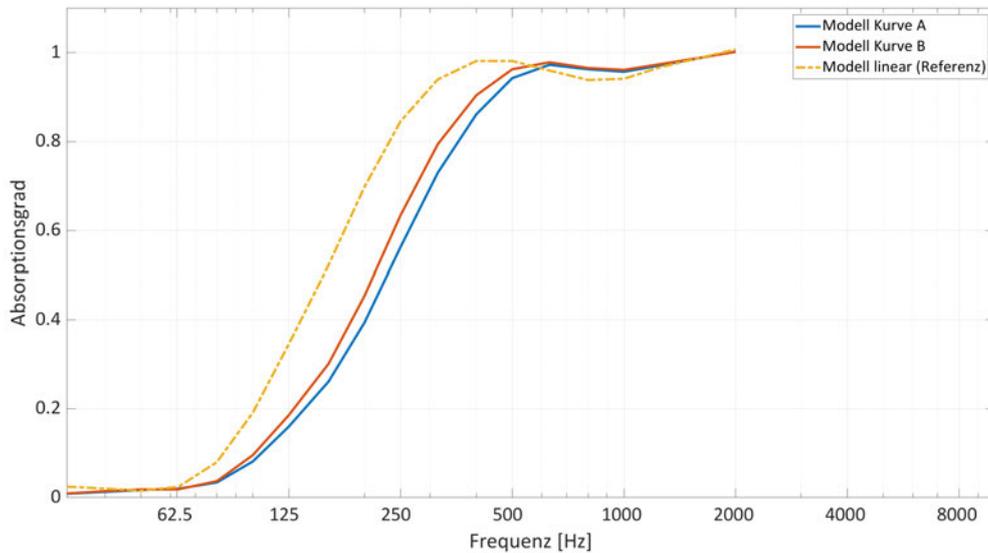


Abbildung 19: gemessene Absorptionsgrade

Generell muss vorausgeschickt werden, dass wie in den Theoriekapiteln erläutert, bei einer Probendicke von 14cm , die Grenzfrequenz bei 250Hz liegt. Darunter fällt die Absorptionwirkung stark ab. Daher betrachten wir hier quantitativ die Unterschiede, und beobachten Auswirkungen auf die untere Grenzfrequenz. Es zeigt sich in Abb. 19, dass sich das **Modell linear** gerade im tieferen Frequenzbereich besser schlägt als die beiden Exponentialentwürfe. Im Vergleich mit den Ergebnissen bei der Messung der Negative (Abb. 20) wird außerdem deutlich, dass **Modell Kurve A** ab 750Hz den höchsten Absorptionsgrad aufweist. Unter 250Hz gibt es keine Unterschiede. Insgesamt wurde gezeigt, dass sich die Form der Trichteröffnung auf den Absorptionsgrad zwar auswirkt, aber die beste Wirkung mit niedrigster unterer Grenzfrequenz bei linearem Materialverlauf gegeben ist. Dies kann dadurch erklärbar sein, dass die lineare Änderung der Absorberimpedanz für bestmögliches Eindringen in den Absorber sorgt. Somit bleibt die Keilform mit linearem Verlauf besser geeignet für Absorption im tiefen Frequenzbereich. Weiters sollte aber untersucht werden, ob Kombinationen mit Trichteröffnungen aus schallhartem Material und dahinterliegender Absorberschicht, die Idee mit Exponentialformen doch interessant machen. Wie eingangs erwähnt, gestaltet sich die Fertigung der Entwürfe schwierig, da die Materialstärke nicht beliebig dünn gewählt werden konnte und dadurch die Form von der idealisierten Kurve abweicht.

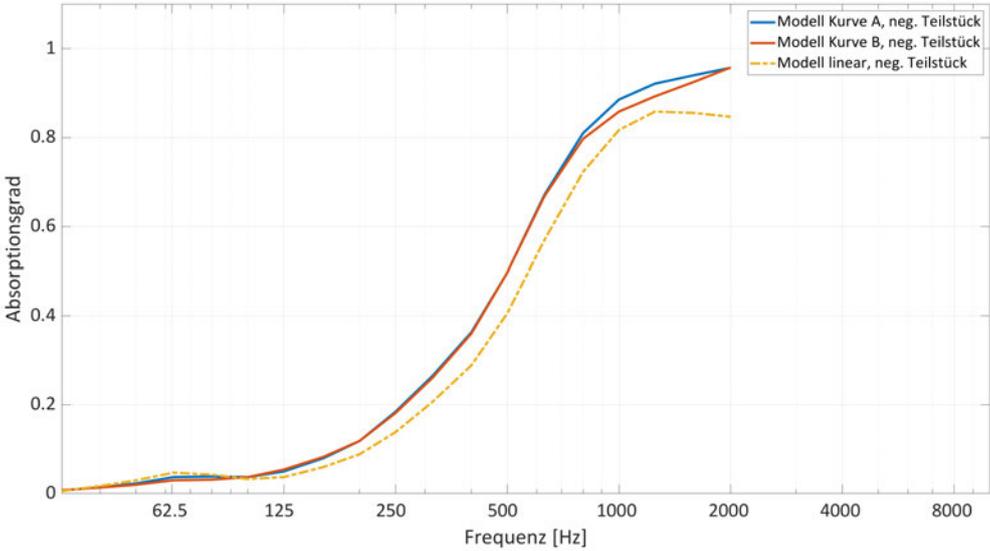


Abbildung 20: gemessene Absorptionsgrade der negativen Teilstücke

6 Weitere Absorbertypen

6.1 Mikroperforierte Absorber

6.1.1 Überblick

Neben den porös ausgeführten Faserabsorbern entwickelt sich auch die Gruppe sogenannter **ALFA** (alternative faserfreie Absorber) Schallabsorber ständig weiter. Dabei spielt die Mikroperforation eine große Rolle. Großflächige Bauteile aus Metall, Holz, Kunststoff oder Glas, die mit einer Vielzahl sehr kleiner Löcher ($\leq 1mm$) ausgeführt sind, weisen hervorragende Schallabsorptionseigenschaften auf. Es werden dünne perforierte Schichten nach dem Helmholtzresonator-Prinzip verwendet und die dabei auftretenden Reibungsverluste innerhalb der Löcher und Schlitze erzielen hohe Schallabsorptionsgrade. Ein hinter der mikroperforierten Absorberschicht angebrachtes Luftvolumen verschiebt das Absorptionsgradmaximum zu tiefen Frequenzen.

Der Mikroperforierte Absorber (**MPA**) besteht aus einer dünnen Platte oder Folie, in die kleine Löcher und Schlitze eingebracht sind. Typischerweise beträgt der Lochanteil ca. 0.5 bis 2%. Der Einsatz dieser MPAs ermöglicht neue Wege im Design - Stichwort transparente Folien, besonders robuste Metallplatten etc.



Abbildung 21: Frei abgehängte Bahnen mikroperforierter Folien im Forum des OIC (Office Innovation Center, Fraunhofer Institut) Wack, 2004

6.1.2 Berechnung des MPA

Die Theorie der mikroperforierten Absorber geht von der Schallausbreitung in einer einzelnen Pore aus. Die klassische Ableitung von Maa [Maa, 1975] gibt dabei eine gute

Näherung für die spezifische Impedanz Z_{MPP} einer mikroperforierten Folie der Dicke t , dem Lochdurchmesser d , der Poren mit einem Abstand p und einer Dicke D des Luftpolsters hinter der perforierten Schicht. Die Skizze in Abb. 22 verdeutlicht das Schema.

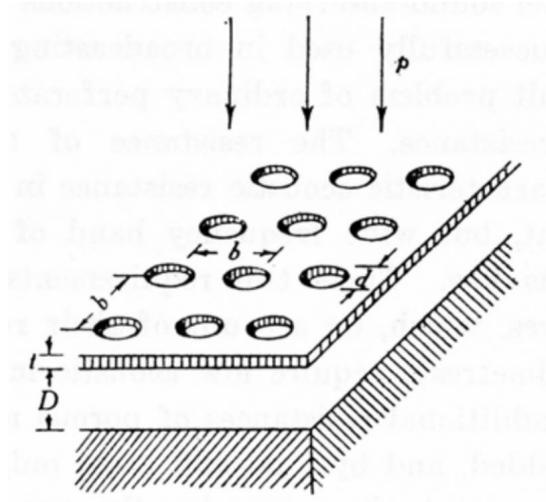


Abbildung 22: Prinzipskizze eines mikroperforierten Schallabsorbers mit den geometrischen Parametern t , d , b und D [Nocke und Hilge, 2004]

6.1.3 Breitbandige Erweiterung

Den vielen Möglichkeiten im Design steht die geringe Breitbandigkeit des Absorptionsgrades gegenüber. Ebenso wie bei allen Systemen im Resonatorprinzip existiert eine grundsätzlich schmalbandige Resonanzfrequenz, die je nach Aufbau nur einen Teil des Frequenzspektrums ausreichend absorbiert.

Es ergeben sich folgende Möglichkeiten zur Erweiterung der Bandbreite [Cox und D'Antonio, 2009]:

- **Anordnung in Schichten:**
Dabei werden mikroperforierte Schichten überlagert, die sich in Perforation und Abstimmung der Resonanzfrequenzen unterscheiden.
- **Wahl der eingeschlossenen Luftschicht**
Je größer das eingeschlossene Luftvolumen, desto mehr verschiebt sich das Absorptionsgradmaximum zu tiefen Frequenzen. Bei mehrschichtiger Anordnung hat es sich bewährt, die äußersten Schichten auf höhere Frequenzbereiche abzustimmen.
- **Geometrie, Design** [Zha et al., 1994]
Eine simple Methode, die Bandbreite eines mikroperforierten Absorbers zu erhö-

hen, ist die Ausführung als dünne Platte zum Raum hin gewölbt (**konvex**). Abb. 23 zeigt die Erweiterung der Bandbreite durch einen gewölbt ausgeführten MPA.

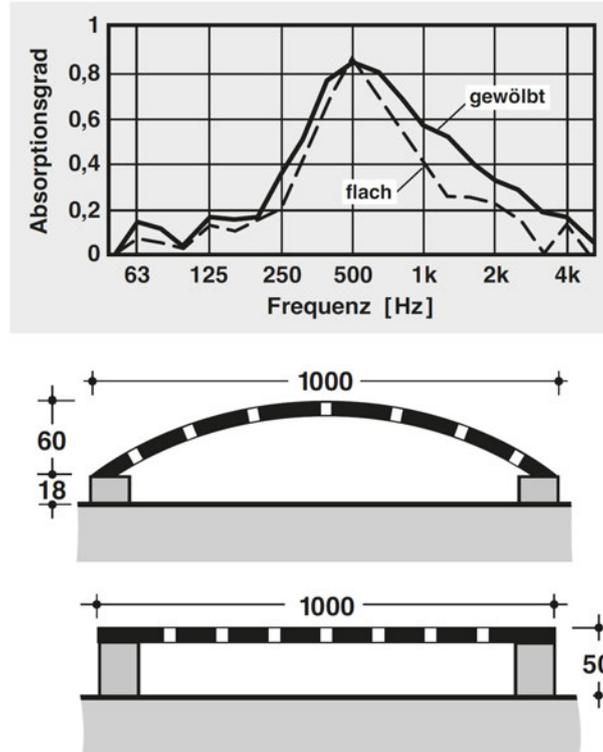


Abbildung 23: Absorptionsgrad eines leicht gewölbten MPA im Vergleich zu einem ebenen MPA. [Zha et al., 1994]

6.2 Kantenabsorber

6.2.1 Überblick

Eine Idee ist es, bei kleineren bis mittelgroßen Räumen die Kanten genauer zu betrachten und den Schall in ebendiesen zu schlucken. Herkömmliche poröse oder faserige Akustikpaneele welche vor einer schallharten Oberfläche angebracht werden, liefern bei hohen Frequenzen einen Absorptionsgrad $\alpha \approx 1$, zu tiefen Frequenzen jedoch fällt dieser stark ab. Wird nun entlang einer Raumkante von Ecke zu Ecke ein Kantenabsorber aus 9.5mm dicken Gipskartonplatten (GK-Platten, wobei eine der zwei Platten gelocht mit einem Lochanteil von 20 % ausgeführt wird), gefüllt mit Mineralwolle liefert bei Frequenzen oberhalb von 1 kHz einen Absorptionsgrad nahe 1. Zu den tiefen Frequenzen (125 Hz) dagegen steigt dieser auf den doppelten und zu den sehr tiefen(63 Hz) sogar auf den

sechsfachen Wert an. [Lamprecht und Fuchs, 2012] Die Wirkungsweise verschiedener Anordnungen wird praktisch in Kap. 8.5 vermessen. Außerdem dient der Kantenabsorber als Basis für die Sanierung des Regieraums eines Projektstudios in Kap. 8.

6.2.2 Ausführung

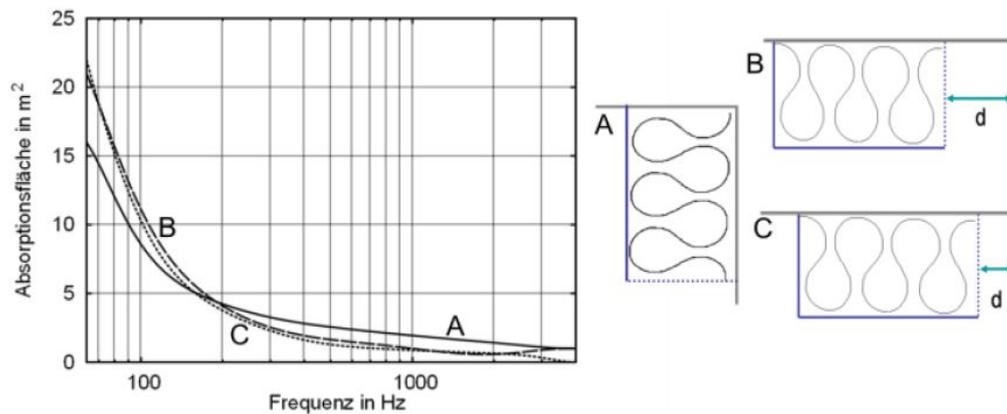


Abbildung 24: Charakteristischer Absorptionsgrad für Kantenabsorber mit verschiedener Mineralwolle-Füllung (A=0mm, B = 160mm, C = 320mm, D = 500mm) [Lamprecht und Fuchs, 2012]

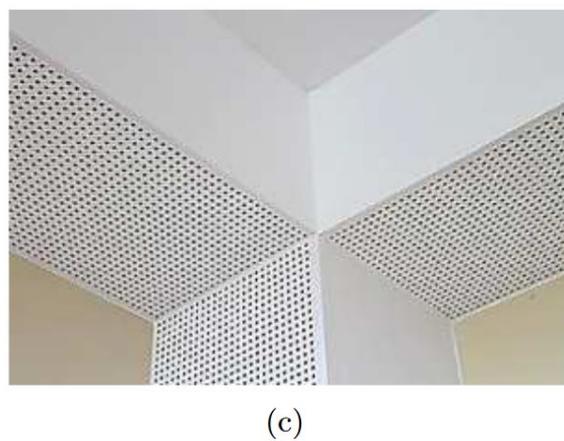


Abbildung 25: Beispielhaft Kantenabsorber in den Raumkanten [Fuchs, 2010]

7 Nachhaltige Materialien in der Akustik

7.1 Überblick und Stand der Forschung

In der Materialforschung wird der Fokus zunehmend auf neuartige und nachhaltige Ausgangsstoffe gelegt. Gleichzeitig ermöglichen es Werkzeuge wie der Lasercutter oder 3D Plotter, immer detailliertere und kleinere Perforationsmuster in Materialien einzubringen. Dadurch bieten sich für die Raumgestaltung und Architektur Möglichkeiten, akustisch wirksame Absorber nicht mehr ausschließlich aus bekannten Materialien wie Holz oder Faserstoffen herzustellen. Ein Überblick über aktuelle Ergebnisse bereits untersuchter Materialien werden im Folgenden vorgestellt:

Gepresste Faserplatten auf Basis der Yucca Pflanze [Soltani et al., 2020]

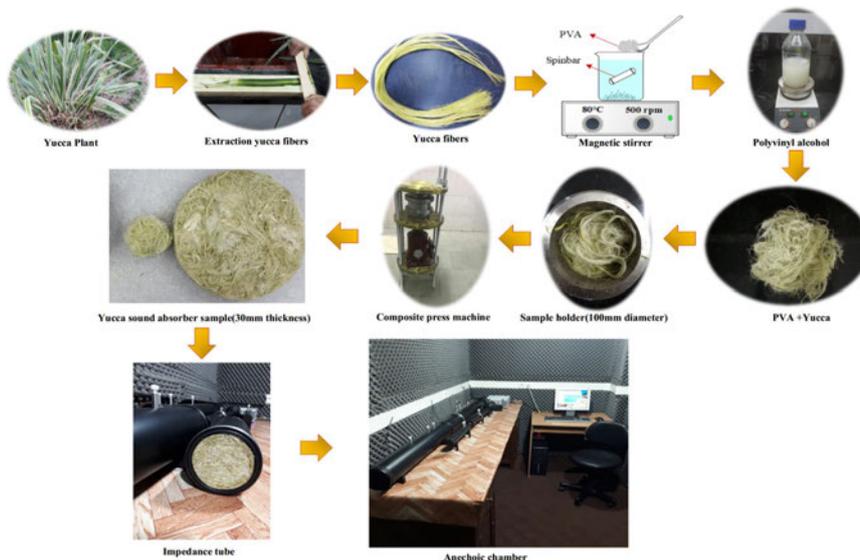


Abbildung 26: Herstellung einer Probe aus Fasern der Kerzen-Palmlilie. [Soltani et al., 2020]

- Beschäftigt sich mit Absorbern aus gepressten Fasern der Kerzen-Palmlilie. (Abb.26)
- Die Fasern wurden aus Abfallprodukten der Züchtung als Zierpflanze gewonnen. Die getrockneten kleinen Stücke werden mit einem Bindemittel, PVA (Polyvinyl Alkohol) getränkt.
- Die Arbeit liefert zugleich ein Berechnungsmodell um Parameter wie den Strömungswiderstand $[\sigma]$ einer Probe zu berechnen und erweitert damit bestehende Modellen von Faserabsorbern (z.B. Delany & Bazley, Attenborough...) Es wird

gezeigt, dass gemessene Werte sehr gut mit dem Modell übereinstimmen, wie in Abb. 27 gut zu sehen ist.

- **Vorteile:** Im Vergleich zu synthetisch hergestellten Faserstoffen, wird der Energieverbrauch in der Herstellung deutlich reduziert. Die Zierpflanze hat ein reichhaltiges Vorkommen und ist ein Naturprodukt mit hoher akustischer Wirksamkeit.
- **Nachteile:** Derzeit noch keine Möglichkeit zur Herstellung in Industriemenge, Berechnungsmodell für Planungszwecke deckt sich noch nicht mit den Messdaten, Schwankungsbreite in der Stärke der einzelnen Fasern. Noch keine Erfahrung zur Haltbarkeit / Schutz vor Zersetzung.
- **Einsatzgebiet** der Faserplatten kann überall dort sein, wo Dämmplatten aus Mineralwolle oder Steinwolle verwendet werden und liefern eine natürliche Alternative.

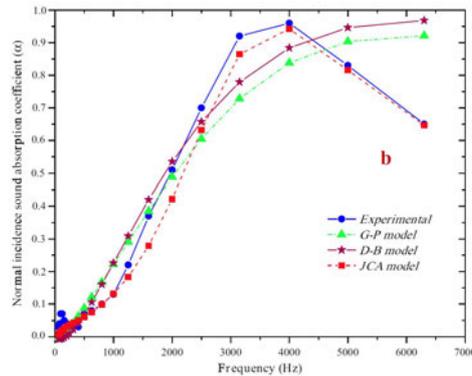


Abbildung 27: Absorptionsgradvergleich einer Probe, gemessen und berechnet. Das erweiterte JCA- Modell wird in der Arbeit vorgestellt.[Soltani et al., 2020]

Nachhaltige Schaumstoffmaterialien [Caniato et al., 2020]

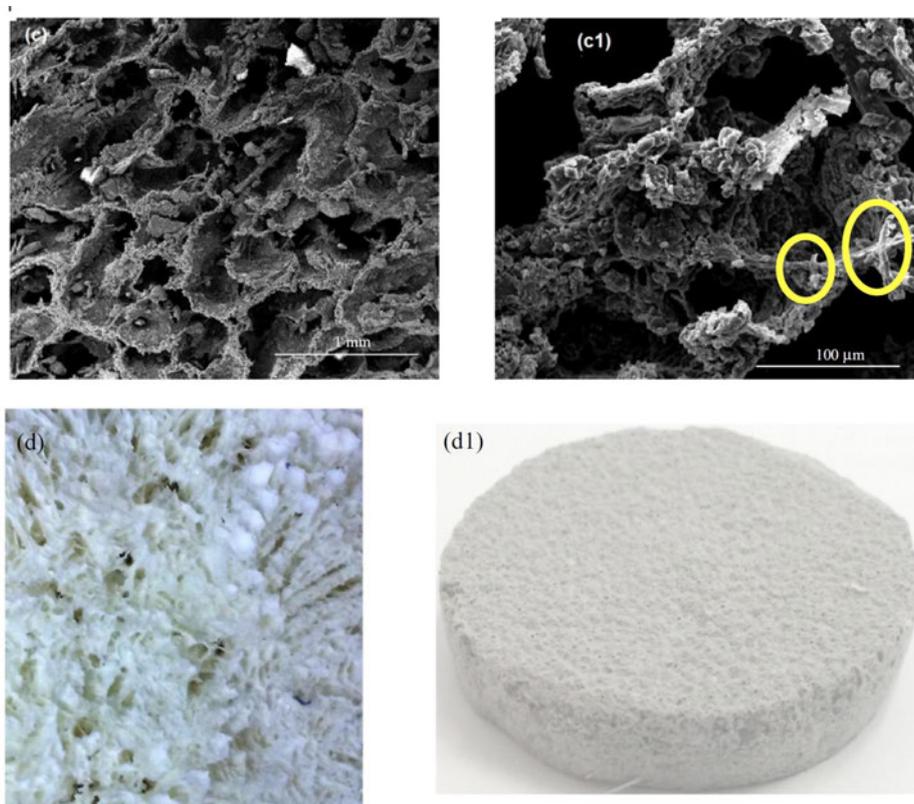


Abbildung 28: (c) Probe unter Mikroskop (50x), (c1) Detailaufnahme (500x) der Probe, eingeschlossene Glasfasern werden sichtbar, (d) Makrostruktur der Probe, (d1) Probe für das Impedanzrohr [Caniato et al., 2020]

- Beschäftigt sich mit der Herstellung nachhaltiger Schaumstoffe als Alternative zu petrochemischen Ausgangsstoffen in der Industrie. Offenporige Schaumstoffe werden durch ihre großartigen Absorptionseigenschaften zur Lärminderung eingesetzt.
- Synthetisierung aus Alginat und Altglas. Dabei werden offenporige Schaumstoffe bei Raumtemperatur aus einer anschwellenden Mischung aus einem Gel aus Alginat und Glaspulver hergestellt. Ein anschließender Dehydrationsprozess (*freeze-drying*) führt zur offenporigen Struktur. (Abb. 28). Verschiedene Konzentrationen von Glaspulver wurden untersucht.
- Liefert ein numerisches Modell um das akustische Verhalten der Schaumstoffe vorherzusagen und liefert Vergleiche mit bestehenden Modellen von Faserabsorbern (z.B. Delany & Bazley, Attenborough...)

- **Vorteile:** Schaumstoffe finden eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten, wobei ein Verzicht auf petrochemische Ausgangsstoffe die Ressourcen schont und um einiges umweltfreundlicher ist.
- **Nachteile:** Aufwendig in der Herstellung, derzeit noch keine Möglichkeit zur Herstellung in Industriemenge, Berechnungsmodell für Planungszwecke deckt sich noch nicht mit den Messdaten.
- **Einsatzgebiet** der Schaumstoffe kann überall dort sein, wo Schäume als Dämmstoff verwendet werden. Über die Haltbarkeit bzw. Robustheit auch als Einsatz in der Wärmedämmung wurde noch nichts dokumentiert.

Sound Absorber aus recyclebarem Denim- oder Jutestoff [Raj et al., 2020]

- Untersuchung von Jeansstoff und Jutefasern als recyclebarer Ersatz für Glaswolle, siehe Abb. 29.
- Vor allem der Jeansstoff konnte leicht mit denselben Materialeigenschaften (Dichte, Porösität...) wie eine Vergleichsprobe aus Mineralwolle hergestellt werden. Zum Zeitpunkt der Untersuchung erwies sich die Verwendung von altem Jeansstoff als 10 mal kostengünstiger als das kommerzielle Produkt. Die Ergebnisse einer Vermessung von Proben der selben Stärke im Impedanzrohr zeigt Abb. 30.
- **Vorteile:** Zeigt, dass Abfallprodukte der Textilindustrie hervorragend als Absorbergrundstoff und Recyclingmaterial genutzt werden können. Akustische Eigenschaften mit Vergleichsproben aus Mineralwolle identisch herstellbar. Kostengünstige Alternative.
- **Nachteile:** Aufwendig in der Herstellung, derzeit noch keine Möglichkeit zur Herstellung in Industriemenge, Berechnungsmodell für Planungszwecke muss noch erstellt werden. Schwierigkeiten die Stärke der einzelnen Fasern zu bestimmen.
- **Einsatzgebiet** Kann als Grundstoff für Absorber aus porösem Material verwendet werden und liefert nahezu identische Eigenschaften wie z.B. kommerzielle Mineralwolle.

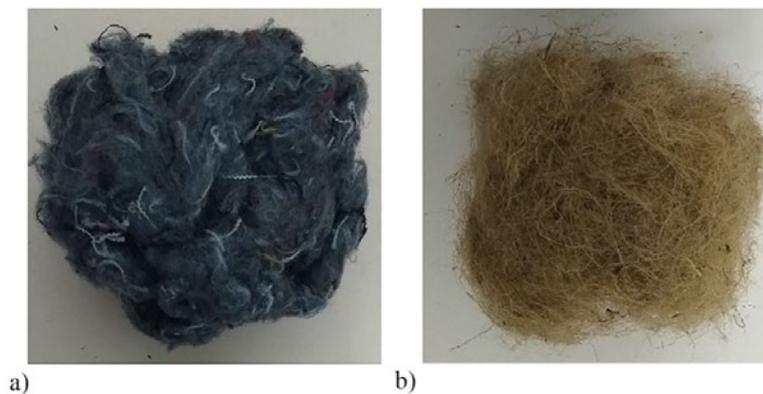


Abbildung 29: Ausgangsmaterial a) Jeansstoff b) Jutefasern. [Raj et al., 2020]

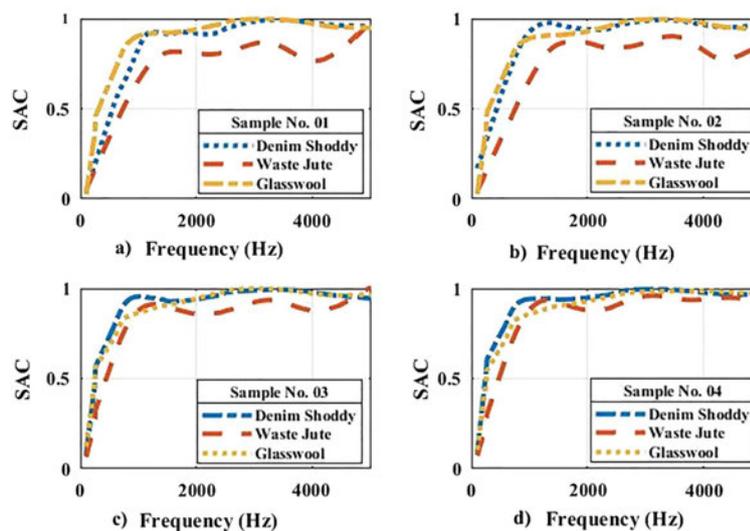


Abbildung 30: Messergebnisse im Impedanzrohr, Vergleich mit kommerzieller Glaswolle. Sample 01 und 02 haben eine Stärke von 5cm, 03 und 04 7cm [Raj et al., 2020]

Gepresste Akusiktplatten aus Mycelium, einem Abfallprodukt der Landwirtschaft [Pelletier et al., 2017]

- Untersuchung von akustischen Proben, die aus dem erneuerbaren Naturprodukt Mycelium erstellt werden. Mycelium basiert auf einem Pilz, der als landwirtschaftliches Nebenprodukt vorkommt.

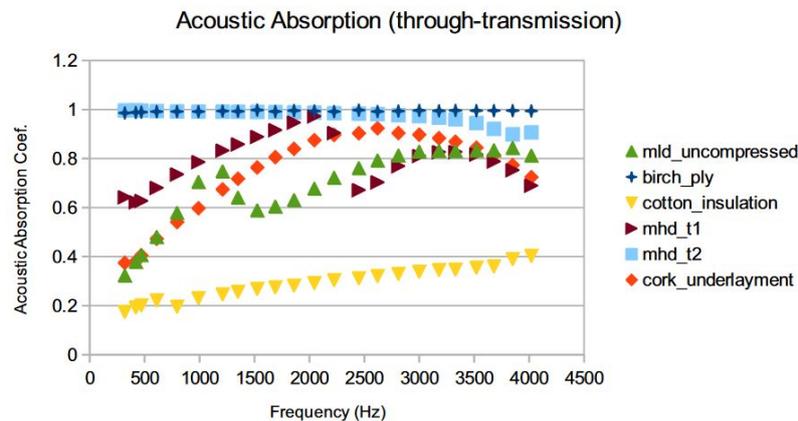


Abbildung 31: Absorptionsgradmessung im Impedanzrohr. [Pelletier et al., 2017]

- Abb. 31 zeigt mit den Proben **mld** und **mhd** unterschiedliche Absorptionsgrade bei variierendem Kompressionsgrad. Zum Thema Schalldämmung wurden die Proben mit bekannten Referenzprodukten wie Korkplatten, Sperrholz und Baumwollstoff verglichen. Auch als Trittschalldämmung können Myceliumplatten eingesetzt werden.
- **Vorteile:** Zeigt, dass Abfallprodukte der Landwirtschaft hervorragend als Absorbergrundstoff genutzt werden können. Akustische Eigenschaften mit bekannten porösen Materialien vergleichbar. Kann in der Herstellung stark verdichtet- und dadurch für verschiedene Einsatzzwecke angepasst werden. Kostengünstige Herstellung.
- **Nachteile:** Haltbarkeit problematisch, da es sich um ein Naturprodukt auf Pilzbasis handelt.
- Im Rahmen meiner Arbeit wurden vom Institut für Architektur hergestellte Proben aus Mycelium im Impedanzrohr auf ihre Akustische Wirkung vermessen. Die Ergebnisse finden sich in Kap. 7.3.

7.2 Mikroperforierte Schichten aus Alginat

7.2.1 Überblick und Herstellung der Proben

Ein praktischer Ansatz der in dieser Arbeit untersucht werden soll, ist das Verhalten von Folienabsorberschichten, die aus dem Grundstoff Alginat hergestellt werden. Die Messreihe basiert auf der Arbeit des **Instituts für Architektur und Medien** der TU Graz mit dem Titel **Alginat in der Architektur**. Insbesondere **Frau Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Milena Stavric** und **Herr Ivan Marjanovic, BSc** beschäftigten sich ausführlich mit dem nachhaltigen Grundstoff Alginat.

Bei den Akustikproben aus **Alginat** handelt es sich um eine Verbindung aus Algin, gewonnen von Braunalgen, das in Wasser aufgelöst wird. Ein besonderer Vorteil des organischen Ausgangsmaterials ist die Möglichkeit, dieses optisch transparent zu gestalten. Die Alginatfolien werden in verschiedenen Varianten ausgeführt und anschließend zum Vermessen zwischen zwei Finnappenkreisen (Ø 10cm) geklebt. Die akustische Wirksamkeit kann zusätzlich durch Einblasen von Luft im Herstellungsprozess beeinflusst werden. Zur besseren Unterscheidung wurden die Proben mit Lebensmittelfarbe eingefärbt.[Marjanovic, 2021] Die Proben aus Abb. 33 setzen sich wie folgt zusammen:

- Blaue Proben bestehen zu 93% aus Wasser, 2% Alginat und 5% Glycerin.
- Grüne Proben bestehen zu 77% aus Wasser, 4% Alginat und 19% Glycerin.
- Rote Proben bestehen zu 77% aus Wasser, 4% Alginat und 19% Glycerin. Zusätzlich wurde mithilfe einer Spritze Luft eingeblasen.
- Raue Strukturen entstehen durch das Aufgießen der Mischung auf eine Luftpolsterfolie. (Abb. 32)



Abbildung 32: Grüne Probe aus Alginat mit rauer Oberfläche.

7.2.2 Erste Messreihe im Impedanzrohr

Für die erste Messreihe sollen Proben mit unterschiedlicher Dicke und abweichendem Luftanteil qualitativ untersucht werden. Dabei wird der Absorptionsgrad im Impedanzrohr, möglichst ohne Luftspalt bestimmt. Abb. 33 gibt einen Überblick über die einzelnen Proben. Alle bewegen sich in der Stärke im Bereich von 1 mm - 4 mm, außer die rote Probe, in welche besonders viel Luft eingeblasen wurde. (Abb. 34)



Abbildung 33: Proben aus Alginat.



Abbildung 34: Rote Probe mit eingeschlossenem Luftvolumen.

Die **Auswertung** der Messung im Impedanzrohr zur Bestimmung des Absorptionsgrad zeigt Abbildung 35. Wie in der Legende (Tab. 2) ersichtlich, weisen die **grünen Proben** den höchsten Absorptionsgrad mit Resonanzfrequenzen unter 1000Hz auf. Insbesondere die Probe **G-001** hat die Resonanzfrequenz noch etwa eine Oktave tiefer, bei 550Hz . Im Vergleich zu den blauen Proben wurden hier gut zu erkennende Luftbläschen in variierender Anzahl und Größe hinzugefügt. Diese sind in Abbildung 36 deutlich zu sehen. Weitere Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Absorptionsgradmaximum, Schichtdicke, Luftanteil und Verhalten mit Luftpolster werden in der zweiten Messreihe fortgesetzt.

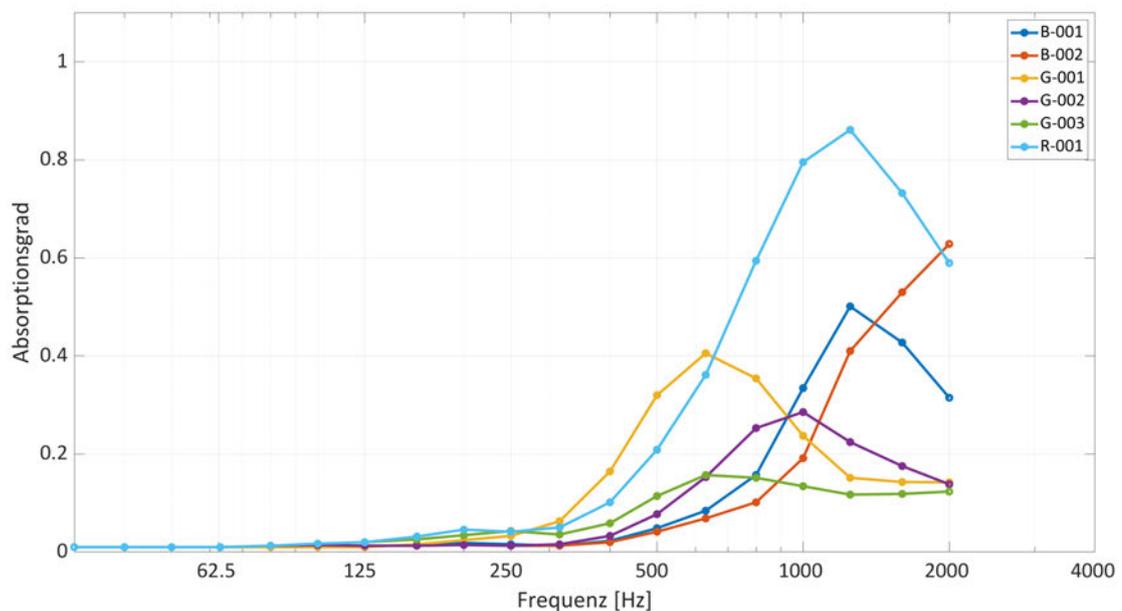


Abbildung 35: Absorptionsgrad nach Impedanzrohrmessung.

<u>Probe</u>	<u>Schichtdicke</u>	<u>Luft einschlüsse</u>
B-001	1mm	keine vorhanden, glatt
B-002	1mm	vereinzelt sehr kleine Bläschen
G-001	2mm	einzelne, kleine Luftbläschen
G-002	2mm	mittlere Anzahl an Luftbläschen, verschiedene Größen (0,5mm - 5mm)
G-003	2mm	viele große Luftpolster, (2mm - 8mm) erinnert an Luftpolsterfolie
R-001	25mm	Probe mit einer großer Luftblase, Gebilde ca. 2,5cm

Tabelle 2: Legende zur Impedanzrohrmessung

Abb. 36 zeigt die Verteilung der Luft einschlüsse auf der Probe, Abb.37 die Unterschiede der grünen Alginatproben.



Abbildung 36: Absorberprobe G-001 mit kleinen Lufteinschlüssen.



Abbildung 37: Probenserie G mit verschiedenem Luftanteil

7.2.3 Zweite Messreihe im Impedanzrohr

Diese Arbeit widmet sich speziell der Absorption im tieferen Frequenzbereich. In einer zweiten Messreihe wurden nun auf Basis der ersten Messungen das Verhalten der Lufteinschlüsse und Perforation genauer untersucht und versucht, die Resonanzfrequenz noch weiter zu tiefen Frequenzen zu verschieben. Die Schichtdicke variiert nur noch herstellungsbedingt zwischen 1 mm und 2 mm . Abb. 38 zeigt die weiteren Proben, die Eigenschaften finden sich in Tab. 3.



Abbildung 38: Probenserie der zweiten Messreihe.

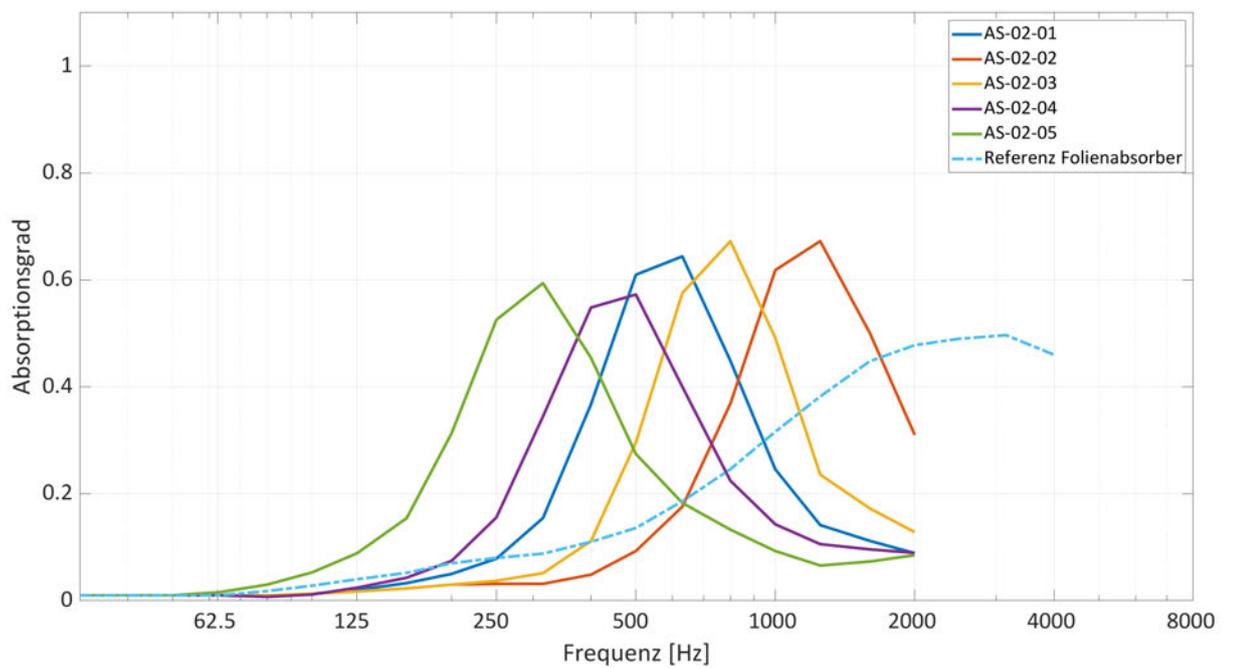


Abbildung 39: Absorptionsgrade der zweiten Messreihe.

<u>Probe</u>	<u>Schichtdicke</u>	<u>Luftspalt</u>	<u>Lufteinschlüsse</u>
AS-02-01	1mm	15mm	dünne, kleine Luftbläschen einzeln
AS-02-02	1mm	15mm	dünne, kleine Luftbläschen, zusätzlich mit Lasercutter runde Löcher (d=2mm) gestanzt
AS-02-03	2mm	15mm	wie AS-02-01, größere Luftbläschen
AS-02-04	1mm	15mm	wie AS-02-01, zusätzlich große Luftblasen (0,5-2cm)
AS-02-05	2mm	15mm	wie AS-02-03, höhere Anzahl an Luftbläschen
Referenz Folienabsorber	0.3mm	30mm	kommerzielle Lösung, Herstellerangabe

Tabelle 3: Legende zur zweiten Messreihe

Die **Auswertung** der zweiten Messreihe zeigt nun bei allen Proben deutlich eine Resonanzfrequenz mit Absorptionsgradmaximum (Abb. 39). Dabei wird die Bandbreite zu tieferen Frequenzen hin geringer. Um die Proben besser vergleichen zu können, wurde ein konstanter Luftspalt von 15 mm gewählt.

Wie in Abb. 40 gut erkennbar, führt die Perforierung mittels Lasers bei Probe **AS-02-02** zu einer etwas breitbandigeren Wirksamkeit, allerdings liegt das Absorptionsgradmaximum am höchsten, nämlich bei 1200 Hz.

Die tiefste Resonanzfrequenz erreicht Probe **AS-02-05**, mit 260Hz (Abb. 41). Auch die großen Luftblasen der Probe **AS-02-04** reduzieren die Resonanzfrequenz weiter. Im Vergleich sehen wir außerdem die Angaben zum Absorptionsgrad einer kommerziellen Folienabsorberlösung, wie sie z.B. in Büroräumen zum Einsatz kommt. Dabei werden zwei dünne, mikroperforierte Folien vor einen Luftspalt gespannt. Die Dicke der Folien beträgt nur 0.3 mm. Es zeigt sich, dass die kommerzielle Lösung zwar breitbandiger absorbiert, aber das Absorptionsgradmaximum ähnlich hoch wie bei den Alginatproben ist. Das Maximum befindet sich bei einer wesentlich höheren Frequenz von ca. 2200 Hz.

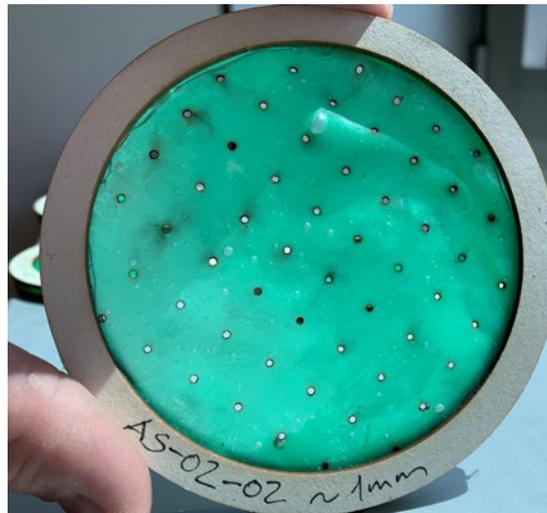


Abbildung 40: Probe AS-02-02, mit Laserperforierung.



Abbildung 41: Probe AS-02-05, tiefste Resonanzfrequenz.

Zur weiteren Optimierung der Resonanzfrequenz zu tiefen Frequenzen hin, wurde in einer Vergleichsmessung die Auswirkung eines hinter der Alginatfolie liegenden Luftpolsters untersucht. Dazu wurde nur noch Probe **AS-02-05** herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abb. 42 dargestellt. Bereits mit einem Luftspalt von 8 cm erreicht man ein Absorptionsgradmaximum bei 175 Hz. Bei der Messung mit einem Luftspalt von 10cm wurde der Spalt mit Schaumstoff gefüllt. Das Einbringen von porösem Material anstelle des Luftpolsters senkt die Resonanzfrequenz weiter auf ca. 120 Hz.

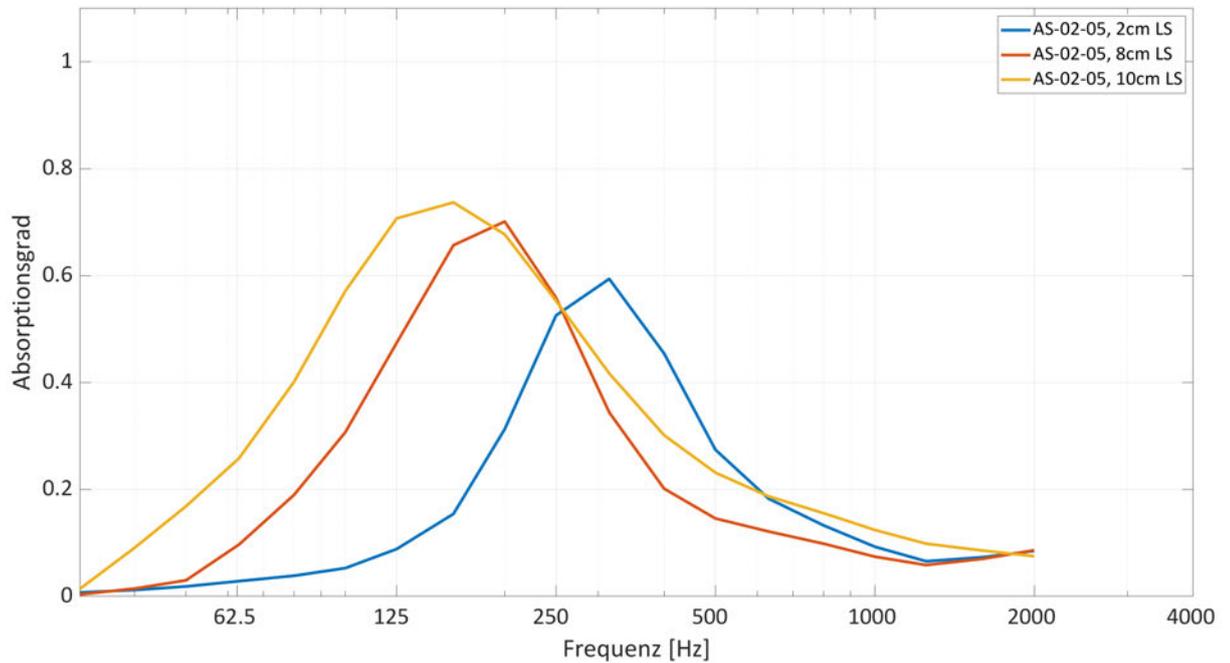


Abbildung 42: Absorptionsgrad mit Luftpolster 2cm, 8cm und 10cm.

<u>Probe</u>	<u>Schichtdicke</u>	<u>Luftspalt</u>	<u>Lufteinschlüsse</u>
AS-02-05	2mm	2cm	siehe Tab.2
AS-02-05	2mm	8cm	w.o.
AS-02-05	2mm	10cm	w.o., statt Luftpolster mit Schaumstoff gefüllt

7.2.4 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass sich Folien basierend auf dem Grundstoff **Algin** gut für akustische Anwendungen eignen. Vermessungen der Proben im Impedanzrohr zeigen im Vergleich zu mikroperforierten Folienlösungen sogar verbesserte Absorptionseffekte. Schon in der Herstellung ist Alginat sehr gut formbar und auch die optische Transparenz liefert zahlreiche Einsatzmöglichkeiten. Auch raue Strukturen können durch Aufgießen auf Luftpolsterfolien entstehen. Durch weitere Perforation oder das Einblasen von Luft kann zusätzlich die Frequenz des Absorptionsgradmaximums beeinflusst werden, wobei mehrere Luftbläschen das Maximum zu tieferen Frequenzen verschieben. Weitere Untersuchungen zu Schichtungen der Alginatfolien stehen noch aus und liefern eventuell Möglichkeiten zur Vergrößerung der Bandbreite, sowie gezielte Abstimmung auf bestimmte Frequenzbereiche. In der Herstellung kann außerdem noch Einfluss auf die

Foliendicke genommen werden, die Auswirkungen auf den Absorptionsgrad gerade bei Schichten ($\leq 1\text{mm}$) wären ein Thema für weitere Vermessungen. Das reichhaltige Vorkommen des Grundstoffs in Braunalgen ist ebenso ein positiver Faktor für akustische Lösungen aus Alginat.

7.3 Vermessung von Proben aus Mycelium

Als weiterer nachhaltiger Grundstoff wurde Mycelium untersucht, welcher aus Pilzen gezüchtet wird. Der Pilz wird mit Holzspänen gefüttert und es entsteht ein poröses, zusammenhaltendes Material das ohne zusätzlichen Kleber auskommt. Im Herstellungsprozess kann die Dichte beeinflusst werden. [Pelletier et al., 2017] Zwei Probenstücke aus Mycelium mit unterschiedlicher Dicke wurden ebenso wie das Alginat im Impedanzrohr vermessen:



Abbildung 43: Aus Holzspänen und Pilzsporen gewonnene Myceliumproben.

7.3.1 Fazit

Wir sehen in Abb. 44 den Absorptionsgrad zweier Proben aus Mycelium. Obwohl die Schichtdicken sehr gering ausfallen, kann am Beispiel der Probe mit einer Dicke von 2 cm gezeigt werden, dass sich das Absorptionsgradmaximum bei 1000 Hz befindet. Geht man im Vergleich von porösem Material wie Mineralwolle und gleicher Dicke aus, erreicht man nach der $\frac{\lambda}{4}$ Abstandsregel das Absorptionsgradmaximum erst bei ca. 4000 Hz. Somit wären Platten aus Mycelium gut geeignet als Rohmaterial für den Einbau in Absorbern.

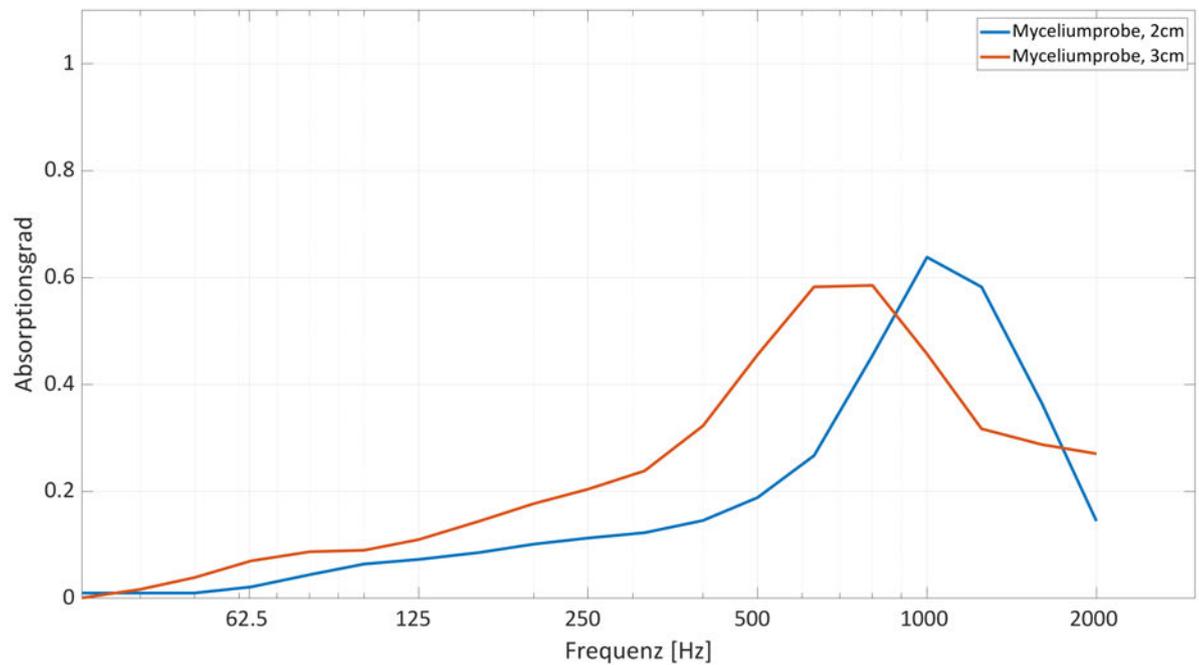


Abbildung 44: Absorptionsgrad der Myceliumproben, Dicke 2cm (Blau) und 3cm (Rot).

In der Handhabung und im Design können diese Platten beliebig zugeschnitten werden. Genauere Untersuchungen zur Haltbarkeit und Möglichkeiten zu weiterer Verdichtung des Materials sind jedoch noch notwendig.

8 Sanierung eine Projektstudios

8.1 Ausgangssituation

Verschiedene Anordnungen von Kantenabsorbern sollen in einem als Abhörraum angedachten Kellerraum untersucht werden. Dazu wird die Wirksamkeit im tiefen Frequenzbereich ($\leq 200\text{Hz}$) genauer betrachtet, um nach der Evaluierung der Aufbauten im Trockenbauverfahren eingebaut zu werden. Der Raum ist quaderförmig und hat den Grundriss und die Abmessungen nach Abb. 45. Die Raumhöhe beträgt $2,3\text{m}$:

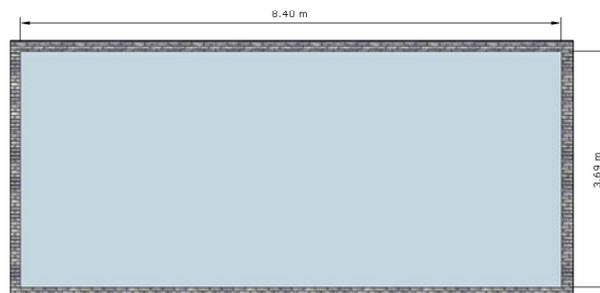


Abbildung 45: Grundriss Regieraum

Die Wände sind verputzt, ein Parkettboden eingebaut und zwei Fenster installiert, wobei eines als reines Sichtfenster zum Aufnahmerraum dient (Abb. 46). Das Fenster in der Abbildung wird in weiteren Schritten noch verkleinert, versetzt und gegen ein Schallschutzfenster ausgetauscht.



Abbildung 46: Leerer Raum

Zunächst geht es darum den Ausgangszustand zu ermitteln und die Nachhallzeit des leeren Raumes zu messen.

- Der Raum hat ein **Volumen** von $72m^3$
- **Zweck** ist die Nutzung als Abhörplatz in einem Regieraum. Dabei soll der Raum möglichst akustisch neutral sein und keine Klangverfärbungen aufweisen.
- **Ziel** ist ein linearer Verlauf der Nachhallzeit mit leichtem Anstieg im Bassbereich. Gewünscht ist ein Wert von T ca. $0.3s$. Außerdem soll so wenig Platz wie möglich verbaut werden.

Die Berücksichtigung der Betonwände und des Bodens sowie der zwei Fenster führt zu folgender grober Abschätzung der Nachhallzeit:

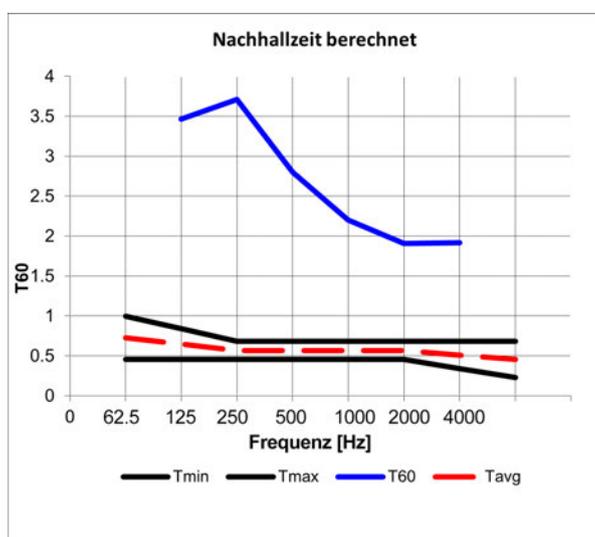


Abbildung 47: Errechneter Verlauf der Nachhallzeit

8.2 Messung der Impulsantworten

Nun wird die frequenzabhängige Nachhallzeit gemessen. Die Messung der Nachhallzeiten soll nach ISO 3382-2 als Standardmessung ausgeführt werden. Um eine gleichmäßige Anregung des Raumes zu erreichen, wird ein Kugelstrahler als Schallquelle verwendet.

- Laut Norm müssen mindestens zwei Quellpositionen und mindestens drei Mikrofonpositionen genutzt werden, um eine gute Abdeckung des Raumes zu erreichen.
- An jeder Position soll aus drei Messungen gemittelt werden.

- Weiters muss bei der Aufstellung beachtet werden, dass symmetrische Positionen zu vermeiden sind.
- Der Abstand jeder Mikrofonposition zur nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche soll $\frac{\lambda}{4}$ betragen, bei 100Hz also 85cm .

Zwischen einzelnen Mikrofonpositionen wird ein Abstand von $\frac{\lambda}{2}$ vorgeschrieben. Auch zur Schallquelle muss ein Mindestabstand eingehalten werden, um den Direktschall-Einfluss zu vermeiden. Dieser Mindestabstand d_{min} ergibt sich nach:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad (22)$$

wobei mit T ein Schätzwert für die erwartete Nachhallzeit in Sekunden beschrieben wird.

8.3 Messsetup

Der Messaufbau ist in Abb. 48 zu sehen. Abb. 49 zeigt die Verteilung der Quellpositionen und der Mikrofone im Raum. Es wurden zwei verschiedene Höhen gewählt, einerseits $1,25\text{m}$ was in etwa der späteren Ohrhöhe beim Abhören entspricht und $1,55\text{m}$. Die Messungen wurden mit einem Norsonic Dodekaeder-Lautsprecher und einem NTI Messmikrofon durchgeführt. Weiteres Messequipment findet sich im Anhang.

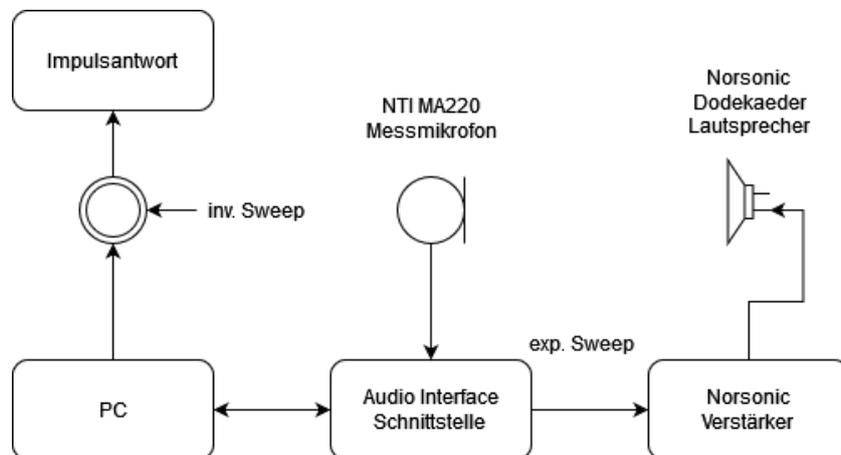


Abbildung 48: Schematischer Messaufbau

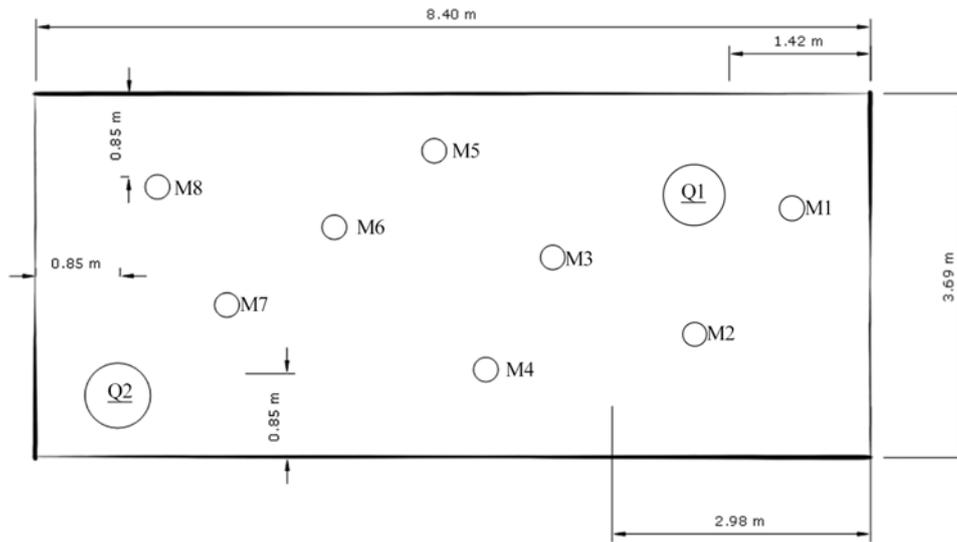


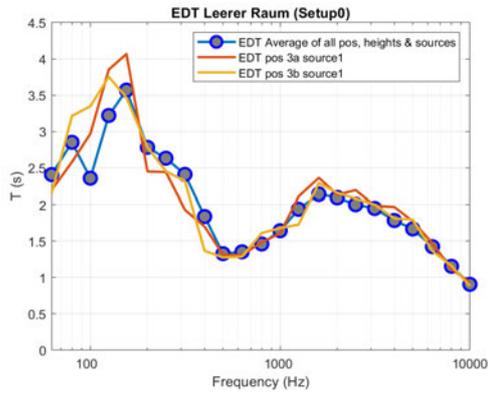
Abbildung 49: Verteilung der Quell- und Mikrofonpositionen

8.4 Messung im leeren Raum

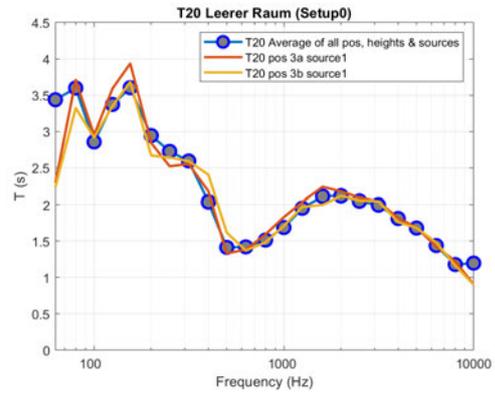
Als Anregungssignal dient ein exponentieller Sweep. Zur Aufnahme und ersten Auswertung wurde die Software *ARTA* benutzt. Weitere Verarbeitung findet mithilfe von *MATLAB* und der *ITA-Toolbox*² statt. Untersucht werden soll die **Nachhallzeit** des leeren Raumes. Dazu berechnet man zuerst die Abklingkurve (engl. EDC, Energy Decay Curve), welche durch Quadrieren und Rückwärtsintegrieren der Impulsantwort erhalten wird. Die Abklingkurve ist nun die Basis zur Bestimmung der Nachhallzeit. T_{60} wird nicht direkt berechnet, da der Signal-Rauschabstand zu gering wäre, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Wir betrachten T_{30} , T_{20} und EDT . Die Werte dafür unterscheiden sich geringfügig. Dabei erklären sich Abweichungen speziell in der EDT durch besonders steilen Pegelabfall bei frühen Reflexionen im Vergleich zum diffusen Nachhall. Das Einpassen von interpolierten Geraden führt oft zu Ungenauigkeiten wenn die EDC eine hohe Welligkeit aufweist. Besonders bei tiefen Frequenzen kann man diese Abweichungen durch höhere Welligkeit beobachten.

Wir betrachten nun die gemittelten Ergebnisse gesamt sowie ausschließlich an **Quellenposition 1** für T_{20} , T_{30} und EDT . Q1 wird später der Aufstellungsort für die Studioabhöre. Die Abbildungen 50 und 51 zeigen deutlich den stark hörbaren, langen Nachhall. Außerdem macht sich im Raum ein störendes Flatterecho bemerkbar. Einen Vergleich der Werte von T_{20} , T_{30} und EDT zeigt Abb. 52.

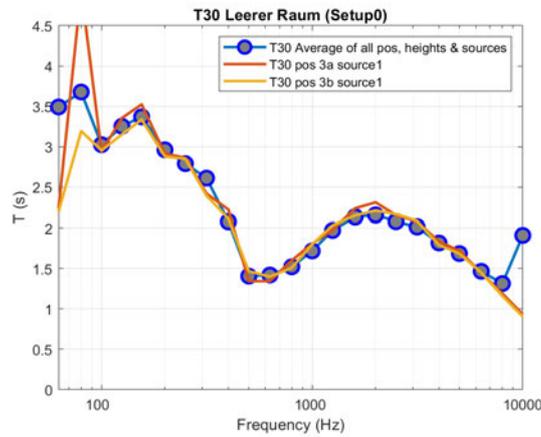
²“Institute of Technical Acoustics (ITA) / toolbox”, 2012.



(a) EDT



(b) T_{20}



(c) T_{30}

Abbildung 50: Nachhallzeit über alle Positionen und Quellen

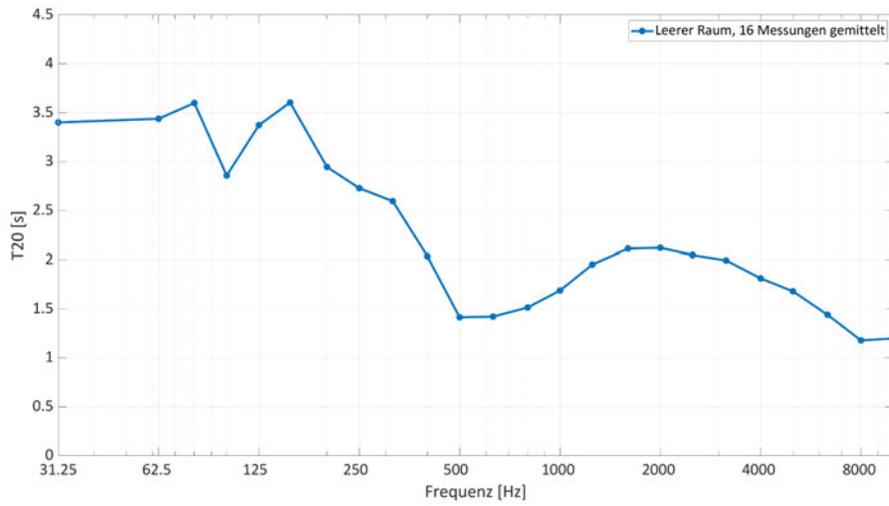


Abbildung 51: Nachhallzeit T_{20} gemittelt an Quellenposition 1

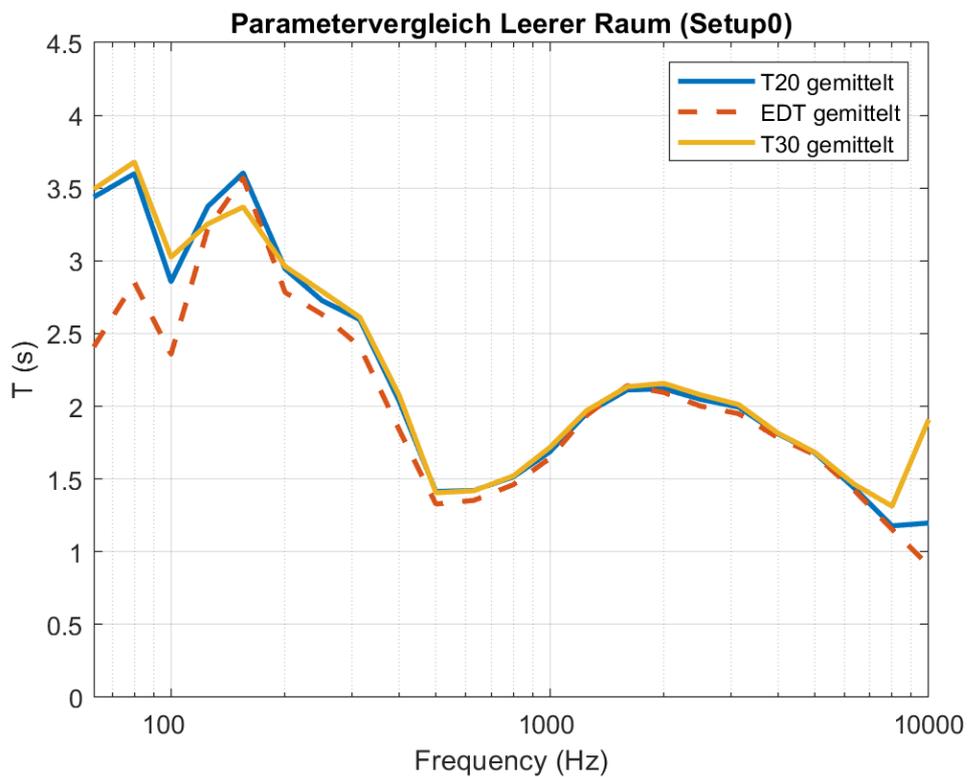


Abbildung 52: Vergleich EDT , T_{20} , T_{30}

8.5 Anforderungen an die Nachhallzeit und Optimierungskonzepte

"For small studios and control rooms, the preferred shape of the reverberation-time-versus-frequency curve is flat" [Long, 2006, p. 754]

"...wichtig ist aber, dass der Verlauf der Nachhallzeit zwischen 100Hz und 8000 Hz sehr gleichmäßig, wie für ein Referenz-Schallfeld anzustreben, ist..." [Fuchs, 2010, p. 297]

Wir sehen aus der Literatur, dass ein linearer Verlauf der Nachhallzeit für die Eignung als Tonregieraum gewünscht ist. Ziel der Sanierung ist es nun, genau diesen Verlauf über den gesamten Frequenzbereich zu erreichen. Aus eigener Hörerfahrung in diversen Regieräumen mit bekannten Messwerten, strebe ich eine Nachhallzeit von ca. **0,4s** an. Dabei soll die meiste Dämpfung mittels Kantenabsorbern realisiert werden. Zunächst soll überprüft werden, welche Raumkanten den meisten Einfluss haben, um möglichst wenig an Raum zu vergeuden. Um einen Überblick über die Wirkung zu bekommen, vergleiche ich verschiedene Aufstellungssetups von jeweils der gleichen Anzahl an Mineralwollepaketen im Raum.

Insgesamt 14 Pakete werden in den Raumkanten positioniert und in den Setups 1-5 (Abb.53 und Abb. 54) vermessen. Dabei haben 9 Pakete die Dicke von 55cm und weitere 5 eine Dicke von 62cm, in der Stärke 55cm sollen später die Kantenabsorber eingebaut werden. In der Raumecke links hinten (im Bild nicht ersichtlich) sind immer zwei Pakete mit einer Dicke von 62cm platziert. Setup 5 zeigt die Auswirkung auf die Nachhallzeit, wenn die Längskante ausgelassen- und mit weniger Material gearbeitet wird. Der längenbezogene Strömungswiderstand der Mineralwolle beträgt $\geq 6kPa \cdot s/m^2$. Weitere Eckdaten finden sich im Datenblatt im Anhang (Kap. 10)



Abbildung 53: Insgesamt 14 Mineralwollepakete sind im Raum verteilt. Dicke: zwischen 55cm und 62cm, hier: Setup 1



(a) Setup 2



(b) Setup 3



(c) Setup 4



(d) Setup 5

Abbildung 54: Aufstellung der Mineralwollepakete in den Raumkanten

Die Aufstellung nach dem Setup 3 entspricht am ehesten der Variante an Kantenabsorbieren, die später im Regieraum eingebaut werden soll. Dabei sind $2/3$ einer Längskante sowie drei Raumecken und die Querkante mit Kantenabsorbieren ausgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen und gemittelten Nachhallzeiten. Betrachtet wird die Größe T_{20} , da bei der Auswertung von T_{30} vereinzelt Ausreißer aufgrund des zu geringen Signal-Rauschabstands bei tiefen Frequenzen aufgefallen sind. Abbildung 55 zeigt T_{20} für Setup 3. Man sieht deutlich, dass durch das Einbringen der Mineralwolle die Nachhallzeit sehr gut optimiert wird. Gerade bei tiefen Frequenzen unter 150Hz werden die gewünschten $0,4\text{s}$ erreicht. Geplant sind später außerdem Breitbandabsorber an den Decken und Wänden, die über 250Hz für kurze Nachhallzeiten sorgen werden.

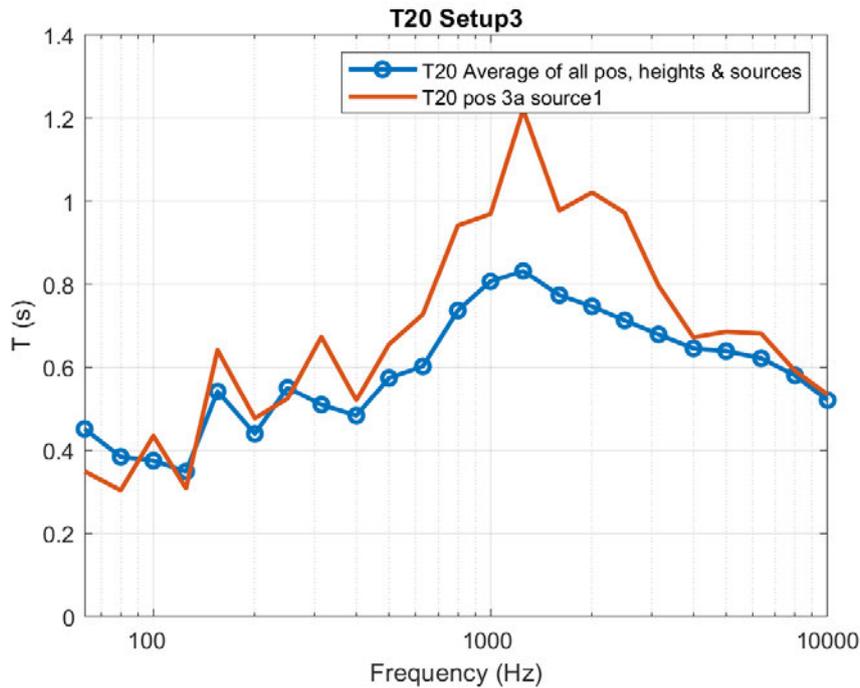
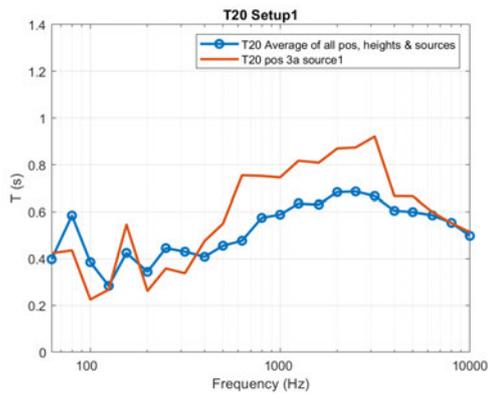
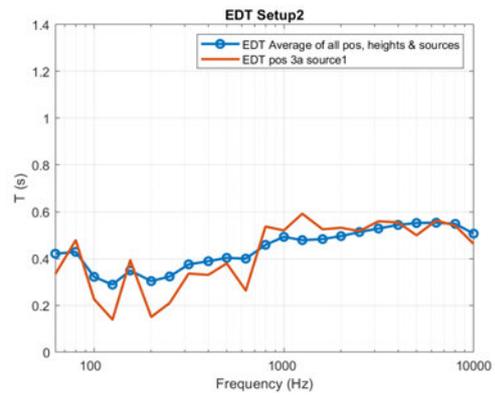


Abbildung 55: Auswertung für Setup 3, T_{20} räumlich gemittelt und an der späteren Abhörposition 3.

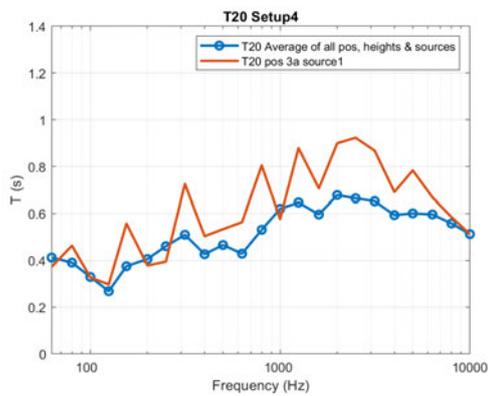
Abb. 56 vergleicht weitere Positionierungen der Pakete. Deutlich wird dabei die Verschlechterung bei fehlender Längskante. *Setup 2*, die Aufstellung mit Paketen entlang der vollständigen Längskante, dafür einer freien Ecke sorgt der Messung nach für den linearsten Verlauf der Nachhallzeit. Für den späteren Einbau ist diese Anordnung aber nicht möglich, da nur $2/3$ der Längskante verbaut werden können. Obwohl bis auf *Setup 5* immer die gleiche Menge an Mineralwolle im Raum eingebracht ist, sieht man trotzdem, dass beispielsweise *Setup 4* unter 150Hz noch geringere Nachhallzeiten hat. Das zeigt, dass je nach Aufstellung die Moden unterschiedlich stark erwischt und damit bedämpft werden. Einen Vergleich der gemittelten Nachhallzeiten der Setups finden sich in Abb. 57.



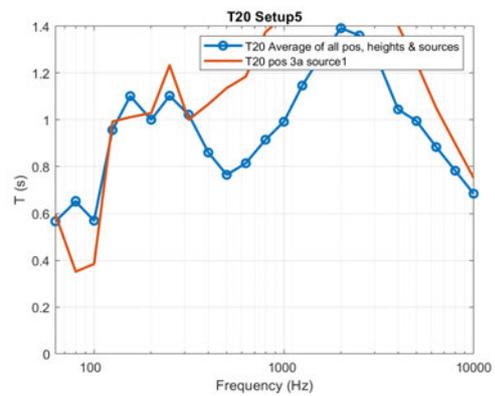
(a) Setup 1



(b) Setup 2



(c) Setup 4



(d) Setup 5

Abbildung 56: T_{20} , gemessen an den weiteren Setups [Eigene Darstellung]

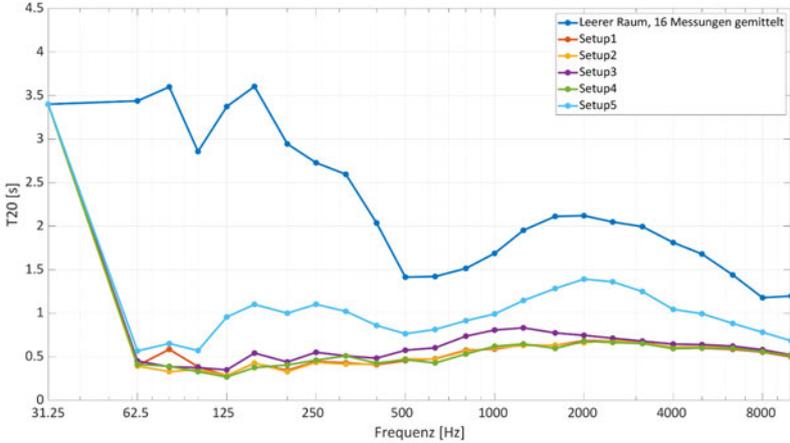


Abbildung 57: Gemittelte Nachhallzeit der einzelnen Setups im Vergleich

8.6 Raumakustische Sanierung in der Praxis

Da die im vorigen Kapitel besprochenen Mineralwollepakete in den Raumkanten eine hohe Wirksamkeit aufweisen, einfach zu verbauen und zudem auch noch kostenschonend sind, ist der Kantenabsorber die Basis der Sanierung. In der ersten groben Planungsphase wurde eine 3D Skizze des Regieraums angefertigt, dabei allerdings noch in der Absicht ohne Kantenabsorber in den Längskanten des Raumes auszukommen, dafür mit mehreren Breitbandabsorbern an den Wänden. Abbildung 58 zeigt die erste Idee:



Abbildung 58: 3D Skizze des Regieraums

8.6.1 Einbau der Kantenabsorber

Im ersten Schritt werden mit Mineralwolle befüllte Gipskartonkoffer in den Raumkanten installiert. Im Einklang mit Wirksamkeit und Optik weisen diese nun eine Höhe 70cm und eine Tiefe von 55cm auf. Eine Unterkonstruktion aus Holz trägt die Gipskartonplatten und soll später auch als Ablagefläche mit einer Abdeckung aus übrig gebliebenen Parkettelementen dienen. Bei den Gipskartonplatten wurden an allen dem Raum zugewandten Seiten *Knauf Cleaneo SK 8/18 R 12,5* mit Perforation und schützendem Vaservlies gewählt. Details und Kennwerte finden sich im Datenblatt im Anhang. Durch die Perforation wird die Wirksamkeit bei mittleren und hohen Frequenzen noch zusätzlich erhöht. Die Platten sind mit ungefähr 20% perforiert. Im Gegensatz zur 3D Skizze, verläuft der Absorber in der Querkante am Boden und nicht an der Decke, da dies im Einbau wesentlich leichter zu handhaben war. Die folgenden Abbildungen 60 und 61 zeigen die Umsetzung. Es wurde darauf geachtet, die Mineralwolleplatten nicht zu locker aber auch nicht stark verdichtet einzubauen. Aussparungen für Audio-, Strom- und Netzwerkleitungen wurden so weit möglich sparsam aus der Mineralwolle geschnitten.



Abbildung 59: Rahmenkonstruktion aus Holz für den Kantenabsorber



Abbildung 60: Mineralwolleplatten werden in die Unterkonstruktion mit leichtem Druck eingepasst.



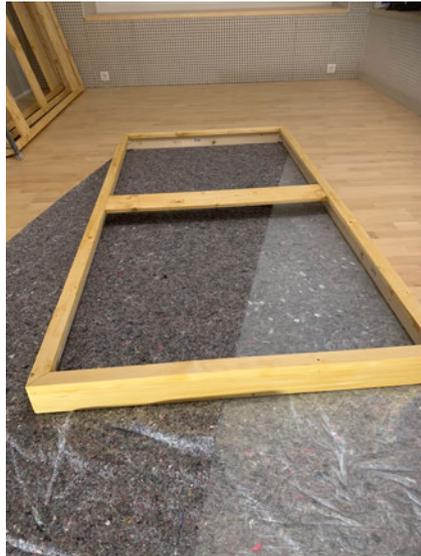
Abbildung 61: Die Abdeckung mit Parkettelementen soll später einige Ablageflächen ermöglichen

Wichtig ist, wie in Kap. 6.2 beschrieben, dass der Schall ins Innere des Absorbers gelangen kann. Im Gegensatz zu den Setup Messungen mit Mineralwolle aus Kap. 8.5 ist jetzt durch die Perforation, die Wirksamkeit zu mittleren und hohen Frequenzen erhöht. Ein erster Hörtest liefert ein wesentlich angenehmeres Ergebnis, der Nachhall wurde subjektiv bereits stark reduziert. Was jetzt auffällt, ist das metalische Flatterecho welches noch deutlicher zu hören ist und sogar einen tonalen Charakter hat.

8.6.2 Decke und Wände

Die Basisinstallation der Kantenabsorber hat bereits wesentlich zu einem angenehmeren Raumklang beigetragen. Jetzt geht es darum, noch störende Reflexionen zwischen den Wänden und Boden-Decke zu reduzieren. Da der Boden bereits als reflektierende Fläche

(Parkett) ausgeführt ist, soll eine Deckenkonstruktion aus Absorberpanelen aufgehängt werden. Die Deckenhöhe ist mit $2,3\text{m}$ bereits recht niedrig, darum soll darauf geachtet werden, dass die Deckenkonstruktion so wenig Platz wie möglich in Anspruch nimmt. Sie besteht aus hängenden absorbierenden Elementen aus einem Holzrahmen mit Aussparungen für Beleuchtung (LED Spots) und Mineralwolleplatten die mit einer Vliesschicht und einem Stoff überzogen wurden. Die Abb. 62 zeigt die Konstruktion.



(a) Rahmen aus Holz



(b) Einfassen der Mineralwolle



(c) Deckenelement

Abbildung 62: Konstruktion eines Deckenelements

Über Ketten werden diese Elemente an die Decke gehängt und können geneigt werden.

Durch den Luftspalt zwischen dem Element und der Decke, wird die Absorption zu tiefen Frequenzen noch verbessert und der Schall kann auch von der Rückseite gut eindringen. An der tiefsten Stelle beträgt der Abstand von der Decke bis zur Unterkante des Elements 30cm . Das absorbierende Element ist 10cm dick, wodurch bei 100Hz noch immer eine Absorption von ca. 60% erreicht wird.

Die Deckenelemente werden mit folgenden Abmessungen gebaut:

- Länge 180cm , Breite: 100cm
- Höhe des Holzrahmen: 12cm
- Mineralwolleplatte mit Dicke 10cm

Nach dem Einbau der LED Spots zur Beleuchtung wird das Element mit einem Stoff bespannt. Gerade im Bereich um die spätere Abhörposition, wird darauf geachtet Reflexionen so gut wie möglich zu vermeiden. Dazu kommen jetzt noch ähnliche Absorberelemente an die Seitenwände. Sie bestehen wie die Deckenabsorber aus einem Holzrahmen, porösem Material und einer entsprechenden Stoffabdeckung. Außerdem soll ein Akustikvlies helfen, Faserflug der Mineralwolle zu verhindern da die Auswirkungen auf die Gesundheit nicht eindeutig geklärt sind. Seit dem Jahr 2000 ist Mineralwolle mit zu kleinen Fasern verboten, sie müssen mehr als drei Mikrometer besitzen. Diese Größe gewährleistet, dass die Fasern nicht mehr in die Lunge gelangen können. [Baustoffwissen, 2014] Um sie optisch ein wenig interessanter zu gestalten, habe ich nach einer Möglichkeit gesucht diese an der Sichtseite abzurunden. Dazu wird ein Drahtgitter auf die Vorderseite getackert und mit einem dünnen Schaumstoff bespannt. Abb. 64 zeigt die Konstruktion im Detail, Abb. 63 die eingebaute Decke.



Abbildung 63: Eingebaute Deckenkonstruktion, Vorbereitung der Wandelemente.



(a) Mineralwolleplatte im Holzrahmen, Drahtgitterabdeckung



(b) Schaumstoffbezug



(c) Wandelement

Abbildung 64: Konstruktion der Wandabsorber

Die Wandelemente werden mit folgenden Abmessungen gebaut:

- Länge 120cm, Breite: 60cm
- Höhe des Holzrahmen: 12cm an dickster Stelle.
- Mineralwolleplatte mit Dicke 10cm

8.7 Messung im sanierten Raum

Nach dem fertigen Einbau der Kantenabsorber und anbringen von Decken- und Wandabsorber wird die Nachhallzeit noch einmal gemessen. Abb 65 zeigt auch das verkleinerte Schallschutzfenster, im Unterschied zum ursprünglichen Raum (Abb. 46). Gemessen wurde wieder mit der Verteilung der Quell- und Mikrofonpositionen nach Abb. 49.



Abbildung 65: Regieraum nach Einbau der Absorber

8.7.1 Auswertung EDT, T20, T30

Die folgenden Nachhallzeiten wurden für den Raum nach der Sanierung gemessen:

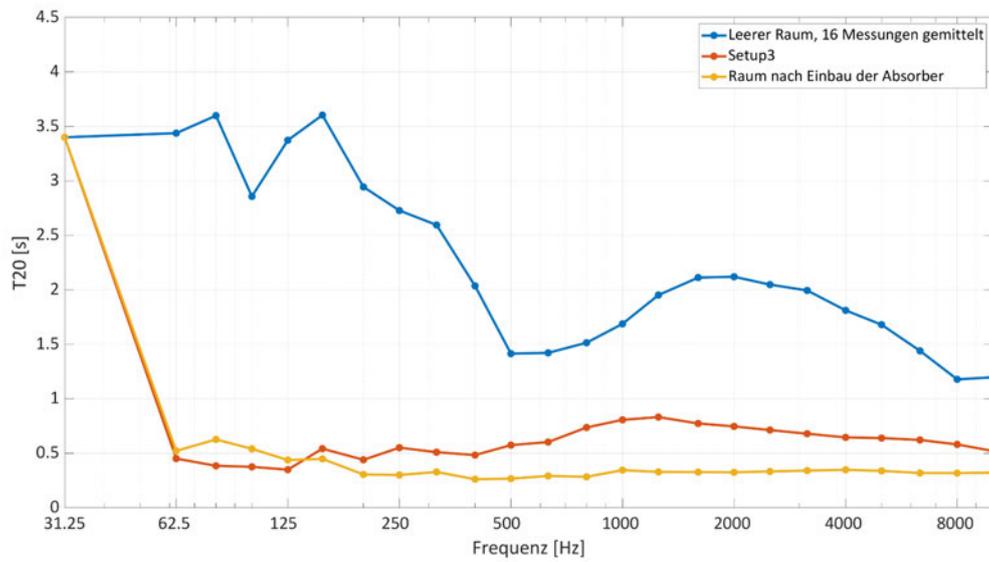
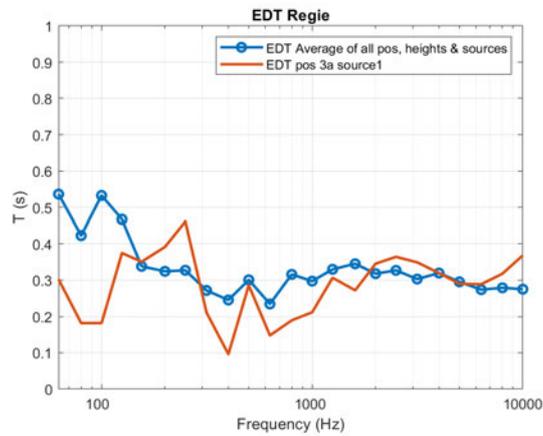
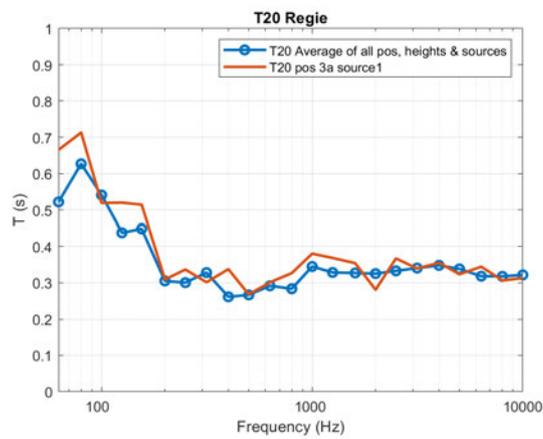


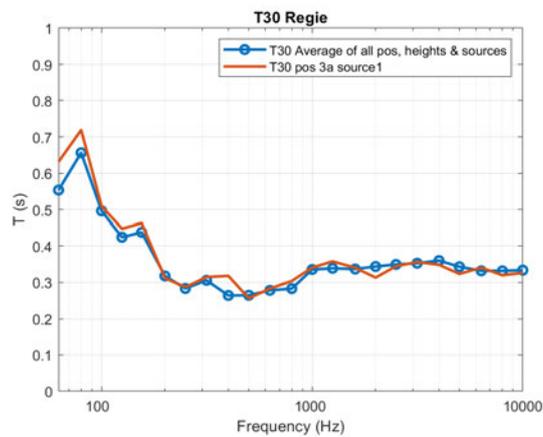
Abbildung 66: Gemittelte Nachhallzeit nach Einbau der Absorber



(a) EDT



(b) T20



(c) T30

Abbildung 67: Ergebnisse der Nachhallzeitmessung, Regieraum

Die angestrebte Nachhallzeit von **0,4s** kann über einen großen Frequenzbereich sehr gut erreicht werden, auch das störende Flatterecho ist verschwunden. Der Anstieg zu tiefen Frequenzen hin ist problematisch, dem kann aber gerade in diesem kleineren Regieraum schwer bzw. nur sehr aufwendig entgegengewirkt werden. Eine Möglichkeit wäre der Einsatz von gezielt auf die tiefen Modenfrequenzen abgestimmte Helmholtzresonatoren, wobei nur noch wenig Platz zur Verfügung steht. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, wird ein leichter Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen in Konzerthäusern als angenehm für das Ohr wahrgenommen. In kleinen Räumen kann sich das aber auch negativ auswirken da die Klarheit darunter leidet und zu einem mulmigen, „mumpfigen“Klang führen kann. Die ersten subjektiven Höreindrücke mit Referenzmaterial zeigen, dass der erhöhte Nachhall sich unwesentlich negativ auf den Bassbereich auswirkt, im Gegenteil die Aufnahmen klingen nicht vollständig steril und trotzdem detailliert aufgelöst. Eine an den Raum angepasste Korrektur der Abhöre verbessert dies noch weiter. Das Einbringen der Möbel wie Studiotisch, Sessel, Couch mit Tisch und einer kleiner Schrank haben vermutlich ebenso noch kleinere Auswirkungen auf die endgültige Nachhallzeit. Die Abbildung 68 zeigt den Vergleich zum Setup der Mineralwollepakete. Unter 125Hz ist ein deutlicher Anstieg der Nachhallzeit zu erkennen, was vermutlich auf eine um 8cm reduzierte Einbautiefe des Kantenabsorbers in der Längsseite des Raumes zurückzuführen ist.

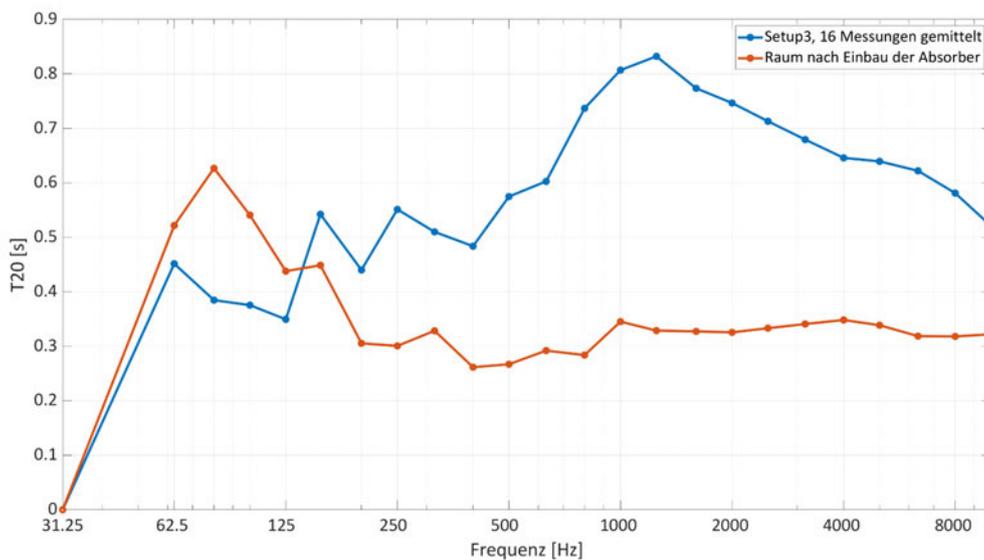


Abbildung 68: Gemittelte Nachhallzeit nach Einbau der Absorber

8.7.2 Deutlichkeitsmaß, Klarheitsmaß

Die Ergebnisse der Messung sollen nun auch im Hinblick auf die Raumakustischen Parameter Deutlichkeitsmaß C_{50} bzw. Klarheitsmaß C_{80} untersucht werden. Beide Parameter beurteilen die Deutlichkeit oder Klarheit in einem Raum.

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...50}}{W_{50...∞}} \quad (23)$$

C_{50} gibt die Pegeldifferenz zwischen der Schallenergie der ersten 50 ms und der Schallenergie nach 50 ms an. Mehr Energie innerhalb der ersten 50 ms bedeutet eine höhere Durchsichtigkeit bzw. Deutlichkeit von Sprache.

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}} \quad (24)$$

Im Gegenzug dazu gibt das Klarheitsmaß C_{80} die Pegeldifferenz zwischen der Schallenergie der ersten 80 ms und der Schallenergie nach 80 ms an. Es bezieht sich auf die Deutlichkeit von musikalischen Darbietungen.

Zur Betrachtung bleiben wir in der Software ARTA [“ARTA Software”, 2021], die auch zur Aufnahme der Impulsantworten verwendet wurde. ARTA bietet die Möglichkeit, über das Analysis-Tool eine Vielzahl an raumakustischer Parameter direkt zu berechnen. Abb. 69 zeigt die einzelnen Werte an jedem der 8 Messpunkte im Raum auf konstanter Höhe (1,20 m).



(a) C_{50}



(b) C_{80}

Abbildung 69: Analyse von C_{50} und C_{80}

Höhere Werte $\geq 2dB$ sind dadurch zu erklären, dass bei kurzen Nachhallzeiten die Pegeldifferenz zwischen der frühen und der späten Schallenergie entsprechend groß ist. Es

zeigt sich in den Diagrammen, dass der Raum im Mittel sehr hohe Werte (im Mittel ca. 10dB bzw. 20dB) erreicht. Einzelne Hörpositionen haben bei 63Hz reduzierte Deutlichkeit, hier machen sich wohl die Raummoden bemerkbar. Das Anbringen weiterer Absorber, abgestimmt für Frequenzen unter 250Hz kann als zusätzliche Verbesserung überlegt werden. Nach Meyer sind in Konzertsälen für C_{80} Werte zwischen $+4\text{ dB}$ und -2 dB anzustreben [Meyer, 1999, S. 156]. Um hohe Durchsichtigkeit zu erreichen werden Werte $C_{80} \geq 0\text{dB}$ empfohlen. Das Deutlichkeitsmaß C_{50} hingegen über 0 dB sorgt für gute Sprachverständlichkeit. Diese Empfehlungen beziehen sich jedoch auf große Räume wie z.B. Konzertsäle, in denen der Nachhall eine wichtige Rolle spielt. Für kleine Räume mit kurzen, gleichmäßigen Nachhallzeiten kann man ohnehin von einer hohen Deutlichkeit und Klarheit ausgehen. Das Deutlichkeitsmaß C_{50} ist vermutlich besser als akustischer Parameter geeignet, da es eine kürzere Zeitspanne gewichtet. Die niedrigsten Werte (-1dB bzw. -2dB) werden im Bereich der Raummoden und dem längsten Nachhall errechnet.

8.7.3 Nach dem Einbau der Möbel

Abb. 70 zeigt den eingerichteten Regieraum. Eine Vermessung der Nachhallzeiten nach Einbringen der Möbel wäre noch ein spannendes Thema und ist für die Zukunft noch angedacht. Probemessungen mit der Raumkorrektursoftware *Reference 4* der Firma *Sonarworks*³ und dem mitgelieferten Messmikrofon zur Korrektur von Abhörräumen zeigen leichte Überhöhungen im Abhörbereich zwischen 100Hz und 250Hz . Der Korrekturvorschlag wird per Equalizer in das Abhörsystem eingeschliffen und sorgt subjektiv für einen noch klareren Höreindruck. Im Bereich der Tür links hinten im Raum (im Bild nicht zu sehen) kann manchmal noch ganz leise das Flatterecho gehört werden. Das liegt wohl daran, dass die Deckenelemente in diesem Bereich ausgespart wurden, da sich die Abhörposition dort nicht befindet. Um trotz der niedrigeren Decke nicht das Gefühl von „Enge“ aufkommen zu lassen, wurden bewusst etwas niedrigere Möbel in den Raum gestellt.

³Sonarworks, 2021.

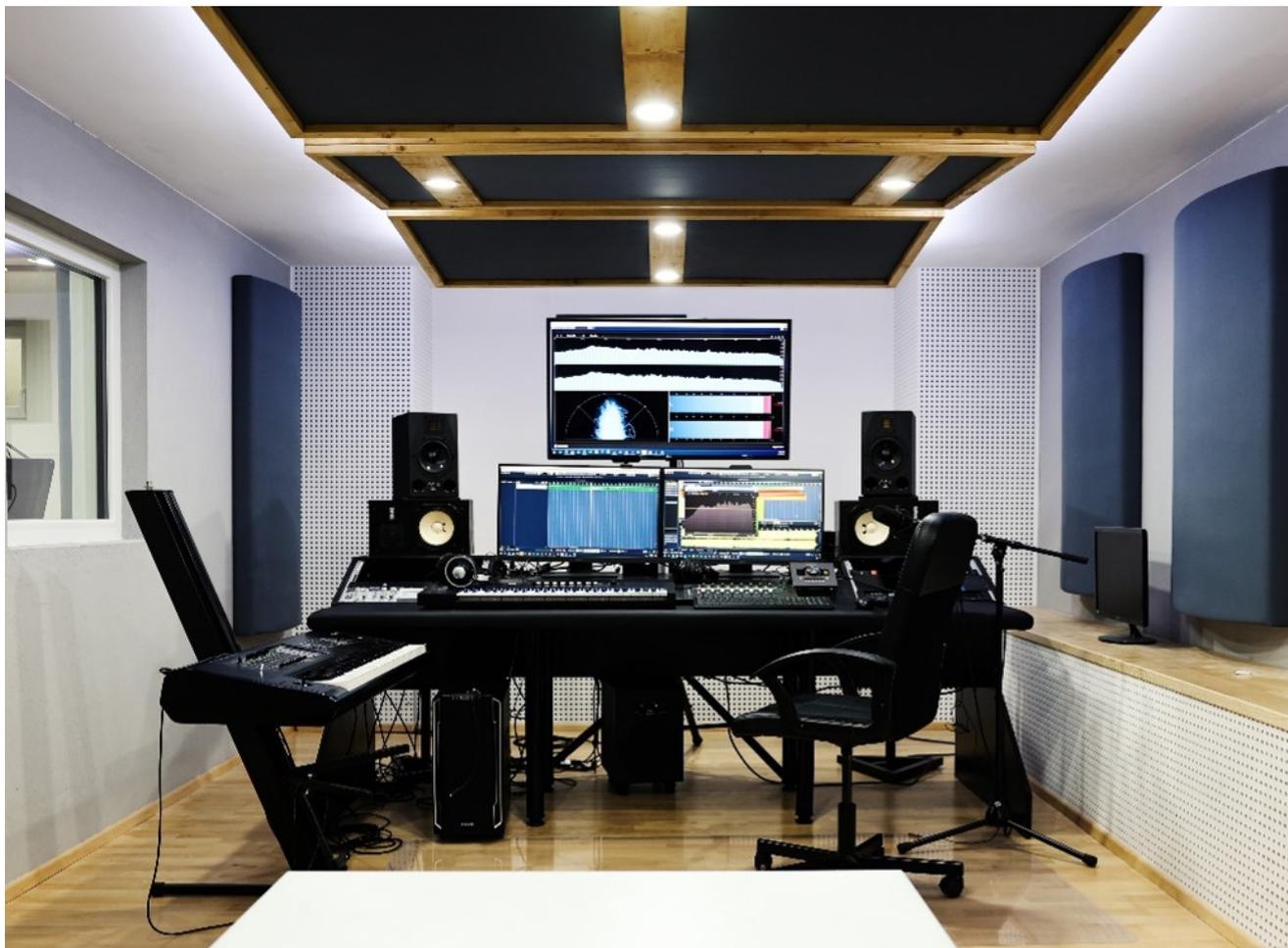


Abbildung 70: Regieraum möbliert

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Rückblick

Die Arbeit beschäftigt sich mit unterschiedlichen akustischen Absorberprinzipien und untersucht dazu Theorien, Materialforschung und die praktische Anwendung. Zunächst wurde die große Schwierigkeit aufgezeigt und untersucht, Absorberkonstruktionen aus porösem Material für den tiefen Frequenzbereich durch Änderung der Geometrie zu verbessern bzw. die Einbautiefe zu verringern. Hier konnte gezeigt werden, dass bei einer Messung im Impedanzrohr die klassische Keilform bei selber Materialmenge die beste Wirkung für tiefe Frequenzen erzielt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Untersuchung neuartiger, nachhaltiger Materialien auf ihre Eignung für den Einsatz in der Akustik. Es konnte gezeigt werden, dass sich Proben des Grundstoff Mycelium sehr gut als Ausgangsstoff für Absorber eignen. Ebenso sind Folien aus Alginat vielversprechend als Alternative zu gängigen Folienabsorbern. Hier erfordert der Herstellungsprozess noch weitere Untersuchungen um Auswirkungen auf den Absorptionsgrad kontrollierbar zu machen. Da beide Materialien leicht herzustellen sind, ist der industrielle Einsatz denkbar. Im letzten Abschnitt wurden die klassischen Absorberprinzipien angewandt und in einem Regieraum praktisch eingebaut und vermessen. Dabei werden die Planungsphase, unterschiedliche Setups von Kantenabsorbern und die damit einhergehende Dämpfung von Moden sowie der Einbau beschrieben. Die Messungen der Nachhallzeit wurden dabei nach den Vorgaben der Norm ausgeführt. Es konnten deutliche Verbesserungen der Akustik und ein sehr linearer Verlauf der Nachhallzeit für Frequenzen $\geq 200\text{Hz}$ realisiert werden. Der Anstieg hin zu tiefen Frequenzen ist nicht ganz optimal, aber weitere Sanierungsschritte erfordern einen erheblich größeren, auch finanziellen, Aufwand.

9.2 Ausblick, Akustische Sanierung der Zukunft?

Für die Zukunft ist es durchaus denkbar, ein Sanierungsprojekt wie in Kap. 8 aus nachhaltigen Materialien umzusetzen, sowohl im Sinne der akustischen Optimierung und um auch in Architektur und Design neue Möglichkeiten zu eröffnen. Der größte Teil der Absorber hat als Ausgangsstoff das poröse Material Mineralwolle. Problematisch bei diesem Grundstoff ist der hohe Energiebedarf in der Herstellung. Diese Platten können problemlos durch beispielsweise die in Kap.7 vorgestellten, gepressten Jeansstoff-Fasern ersetzt werden. Auch das Mycelium wäre geeignet, wobei hier die Lebensdauer an der Luft noch weiter untersucht werden müsste bzw. um Schimmel zu vermeiden die Platten weiter behandelt werden müssten. Folien aus Alginat als Ersatz für die Abdeckung als Kantenabsorber mit oder ohne Perforation wären ebenso denkbar. Alginat kann auch optisch interessant gestaltet werden, da das Ausgangsgel transparent ist und außerdem leicht formbar.

10 Anhang

Gerät	Bezeichnung	Notiz
1 x Kalibrator	Brüel Kjaer Sound Calibrator	
1 x Laser-Abstandsmesser	Bosch DLE 70	
1 x Messmikrofon	NTI MA220	Serial Nr. 5321
1 x Dodekaeder Lautsprecher	Norsonic Nor276	Serial-Nr. 2765675
1 x Verstärker	Norsonic Nor280	Serial-Nr. 2804052
1 x Laptop	HP Elitebook	
1 x Audiointerface	RME Fireface 800	
1 x Messsoftware	ARTA	Build 2021
1 x Messsoftware	REW	Build 2021.2
1 x Zubehör	Stative + Kabeln	

Tabelle 4: Equipment zur Messung der Impulsantwort

Gerät	Bezeichnung	Notiz
1 x Impedanzrohr	Messrohr der TU Graz, Durchmesser $d = 10 \text{ cm}$	
3 x Messmikrofon	Beyerdynamic MM 1	
2 x Lautsprecher	Visaton W100s	
1 x Verstärker	Alesis RA 300 Amplifier	
1 x Laptop	HP Elitebook	
1 x Audiointerface	RME Fireface 800	
1 x Messsoftware	CATS9	
1 x Zubehör	Kabeln, Multimeter	

Tabelle 5: Equipment zur Absorptionsgradmessung im Impedanzrohr

Trennwandplatte Sonorock®

Anwendungsbereich

Nichtbrennbare und formstabile Steinwolle-Dämmplatte zur Hohlraumdämmung von leichten Trennwänden zur Verbesserung der Schalldämmung oder des Feuerwiderstands.

Lieferprogramm

Dicke mm	m ² /Paket	m ² /Großgebäude	R _D -Wert (m ² K/W)
40	7,500	180,0	1,00
50	7,500	150,0	1,25
60	5,625	180,0	1,50
80	3,750	135,0	2,00
100	3,750	112,5	2,50
120	2,500	90,0	3,00
140	2,500	80,0	3,50

Plattenformat
L x B (mm) 1000 x 625

Technische Daten

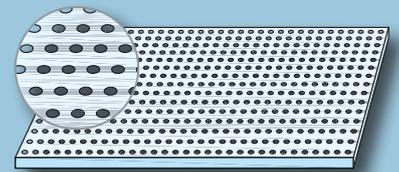
	Zeichen	Beschreibung/Messwert	Norm/Vorschrift
Anwendungsgebiete	DZ, WH, WI-zk, WTR	Innendämmung von Trennwänden, Holzrahmenbau	DIN 4108-10
Brandverhalten	A1	nichtbrennbar, Euroklasse A1	DIN EN 13501-1
Schmelzpunkt		> 1000 °C	DIN 4102-17
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	λ	0,040 W/(m·K)	Z-23.15-1468
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	MU 1	μ = 1	DIN EN 12086
Längenbezogener Strömungswiderstand	AFri	≥ 6 kPa · s/m ²	DIN EN ISO 29053

Bezeichnungsschlüssel gem. DIN EN 13162: MW-EN 13162-T3-AFr6-MU1

Amtlich güteüberwacht

DEUTSCHE ROCKWOOL
Mineralwoll GmbH & Co. OHG
Postfach 207
45952 Gladbeck
Telefon: +49 (0) 20 43/4 08-0
Telefax: +49 (0) 20 43/4 08-444
www.rockwool.de

Unsere technischen Informationen geben den Stand unseres Wissens und unserer Erfahrung zum Zeitpunkt der Drucklegung wieder, verwenden Sie bitte deshalb die jeweils neueste Auflage, da sich Erfahrungs- und Wissensstand stets weiterentwickeln. In Zweifelsfällen setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung. Beschriebene Anwendungsbeispiele können besondere Verhältnisse des Einzelfalles nicht berücksichtigen und erfolgen daher ohne Haftung. Unseren Geschäftsbeziehungen mit Ihnen liegen stets unsere Allgemeinen Verkaufs-, Lieferungs- und Zahlungsbedingungen in der jeweils neuesten Fassung zugrunde, die Sie unter www.rockwool.de finden. Auf Anfrage senden wir Ihnen die AGBs auch gerne zu.



Cleaneo SK

Gelochte Gipsplatte mit Spezialkante für Schallabsorption

Produktbeschreibung

Cleaneo SK sind gelochte Gipsplatten nach EN 14190 mit serienmäßigem Luftreinigungseffekt. Die Gipsplatten haben ein schwarzes oder weißes Faservlies auf der Plattenrückseite. Ohne Faservlies auf Anfrage. Sie haben eine Kantenausbildung 4SK (umlaufende scharfkantig) und sind an den Schnittkanten rot und blau gekennzeichnet.

Lagerung

Trocken auf Plattenpaletten lagern.

Qualität

In Übereinstimmung mit der EN 14190 unterliegt das Produkt einer Erstprüfung sowie der ständigen werkseigenen Produktionskontrolle und trägt eine CE-Kennzeichnung.

Eigenschaften und Mehrwert

- Schallabsorbierend
- Brandverhalten A2-s1, d0
- Durchlaufende Lochung für fugenlose Optik
- Einfache verarbeitung
- Biegbar

Cleaneo Classic

Gelochte Gipsplatte mit Spezialkante für Schallabsorption

Anwendungsbereich

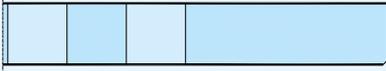
Cleaneo SK werden hauptsächlich als Bekleidung von Wand- und Deckensystemen zur Verbesserung der Raumakustik und Schallabsorption und/oder zur individuellen Raumgestaltung eingesetzt.

Durch den serienmäßigen Luftreinigungseffekt sind sie zusätzlich ideal für Innenräume zur Verbesserung des Raumklimas.

Geeignet für folgende Systeme:

- Akustik-Plattendecken
- Vorsatzschalen mit akustischen Eigenschaften (im nicht stoßbelasteten Bereich)

Technische Daten

Bezeichnung	Einheit	Wert	Norm
Plattentyp national	–	Gelochte Gipsplatte	DIN 18180
Plattentyp europäisch	–	Verfahren a), c), g)	EN 14190
Brandverhalten	Klasse	A2-s1, d0 (C.4)	EN 14190
Kantenausbildung	–	4SK 	–
Maßtoleranzen Breite	mm	+1 / -1	EN 14190
Maßtoleranzen Länge	mm	+1 / -1	EN 14190
Maßtoleranzen Dicke	mm	+0,5 / -0,5	EN 14190
Maßtoleranzen Diagonaldifferenz	mm	+2 / -2	EN 14190
Wärmeleitfähigkeit λ (ungelochte Platte)	W/(m·K)	Ca. 0,23	EN ISO 10456
Schwind- und Quellmaß je 1 % Änderung der rel. Luftfeuchte	mm/m	0,005 – 0,008	–
Schwind- und Quellmaß je 2 Kelvin Änderung der Temperatur	mm/m	0,013 – 0,02	–
Rohdichte	kg/m ³	Ca. 760	–
Biegebruchlast (ungelochte Platte ohne Vlies) parallel zur Herstellrichtung	N	≥ 610	DIN 18180
Biegebruchlast (ungelochte Platte ohne Vlies) rechtwinklig zur Herstellrichtung	N	≥ 210	DIN 18180
Dauertemperaturbelastung max. (Obergrenze)	°C	≤ 50	–
Schallabsorptionsgrad	–	Siehe Detailblatt Knauf Cleaneo Akustik-Plattendecken D12.de	–
Plattengewicht (ungelochte Platte ohne Vlies)	kg/m ²	Ca. 9,5	–
Zulässiger Biegeradius, trocken gebogen, konkav und konvex			
Gerade Rundlochung R	m	≥ 3	–
Quadratlochung Q	m	≥ 3	–
Versetzte Rundlochung R	m	≥ 3	–
Streulochung R	m	≥ 3,5	–
Zulässiger Biegeradius, angefeuchtet gebogen, konkav			
Gerade Rundlochung R	m	≥ 2	–
Quadratlochung Q	m	≥ 2	–
Versetzte Rundlochung R	m	≥ 2	–
Streulochung R	m	≥ 2,5	–

Ausführung

Verarbeitung

Die Verarbeitung erfolgt gemäß den einschlägigen Normen, gemäß dem Detailblatt Knauf Akustik-Plattendecken D12.de sowie der entsprechenden Montageanleitung Cleaneo SK K761S-A01.de.

Cleaneo SK werden mit einer Fuge von ca. 3 mm verlegt, die mit Uniflott verspachtelt wird. Sie sind an den Kanten rot und blau gekennzeichnet.

Verschraubung

Verschrauben auf CD-Profilen mit Senkkopfschraube SN 3,5 x 30 mm.

Alternative Befestigung bei geraden Rundlochungen 8/18 R, 10/23 R oder 12/25 R mit Cleaneo Caps (8/18 R in Verbindung mit Tragprofilen CD 70/27) bei gerader Quadratlochung 12/25 Q mit Cleaneo-Caps Q (Stirnkanten doppeltes CD 60/27).

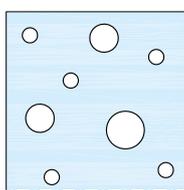
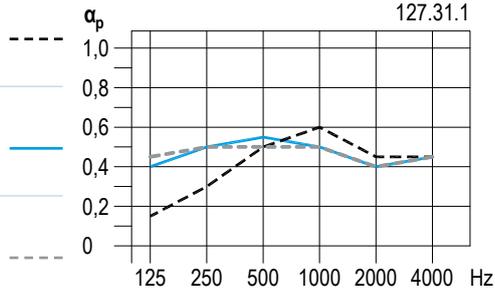
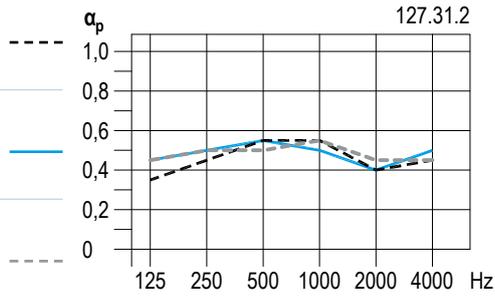
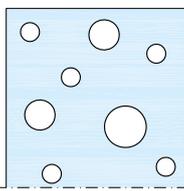
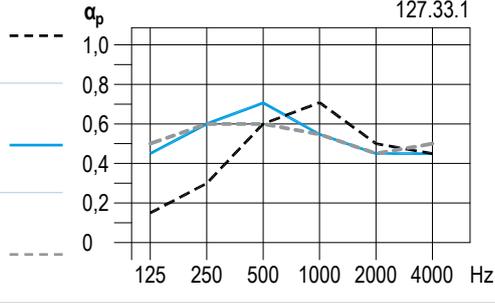
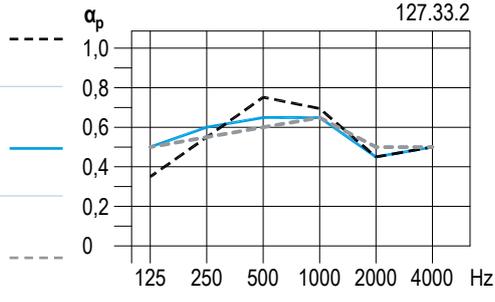
Lieferprogramm

Bezeichnung	Breite x Länge mm	Dicke mm	Liefergewicht kg/m ²	Faser- vlies	Verpackungs- einheit	Artikel- nummer	EAN
Cleaneo SK 8/18 R 12,5	1188 x 1998	12,5	Ca. 8,1	Schwarz	25 Stück/Palette	00071246	4003982179067
	1188 x 1998	12,5	Ca. 8,1	Weiß	25 Stück/Palette	00071248	4003982179081
Cleaneo SK 12/25 R 12,5	1200 x 2000	12,5	Ca. 7,9	Schwarz	25 Stück/Palette	00071304	4003982179333
	1200 x 2000	12,5	Ca. 7,9	Weiß	25 Stück/Palette	00071306	4003982179357
Cleaneo SK 8/18 Q 12,5	1188 x 1998	12,5	Ca. 7,7	Schwarz	25 Stück/Palette	00071257	4003982179203
	1188 x 1998	12,5	Ca. 7,7	Weiß	25 Stück/Palette	00071258	4003982179227
Cleaneo SK 12/25 Q 12,5	1200 x 2000	12,5	Ca. 7,4	Schwarz	25 Stück/Palette	00071322	4003982179395
	1200 x 2000	12,5	Ca. 7,4	Weiß	25 Stück/Palette	00071326	4003982196545
Cleaneo SK 8/15/20 R 12,5 Streulochung	1200 x 1875	12,5	Ca. 8,7	Schwarz	25 Stück/Palette	00608436	4003982424211
	1200 x 1875	12,5	Ca. 8,7	Weiß	25 Stück/Palette	00608437	4003982424235

Bei Bestellung angeben
Vlieskaschierung

D127.de Cleaneo Akustik-Plattendecke

12,5 mm Cleaneo Classic Platten mit Akustikvlies

Lochbild	Konstruktionstiefe mm	NRC	α_w	Frequenzabhängiger Absorptionsgrad α_p						
				125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Streulochung 8/15/20 R  Lochanteil: 9,9 %	Ohne Dämmschicht									
	65	0,45	0,50	0,15	0,30	0,50	0,60	0,45	0,45	 127.31.1
	200	0,50	0,50	0,40	0,50	0,55	0,50	0,40	0,45	
	400	0,45	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,40	0,45	
	Mit Dämmschicht (Anforderung an die Dämmschicht siehe Seite 40)									
	65	0,50	0,50	0,35	0,45	0,55	0,55	0,40	0,45	 127.31.2
200	0,50	0,50	0,45	0,50	0,55	0,50	0,40	0,50		
400	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,55	0,45	0,45		
Streulochung 10/16/22 R  Lochanteil: 12,6 %	Ohne Dämmschicht									
	65	0,50	0,55	0,15	0,30	0,60	0,70	0,50	0,45	 127.33.1
	200	0,55	0,55	0,45	0,60	0,70	0,55	0,45	0,45	
	400	0,55	0,55 (L)	0,50	0,60	0,60	0,55	0,45	0,50	
	Mit Dämmschicht (Anforderung an die Dämmschicht siehe Seite 40)									
	65	0,60	0,55 (L)	0,35	0,55	0,75	0,70	0,45	0,50	 127.33.2
200	0,60	0,55 (L)	0,50	0,60	0,65	0,65	0,45	0,50		
400	0,55	0,60	0,50	0,55	0,60	0,65	0,50	0,50		

Abbildungsverzeichnis

1	Konzept der Spiegelschallquellen, Reflexionen an Begrenzungsflächen. . .	9
2	Optimale Nachhallzeit von Räumen in besetztem Zustand für unterschiedliche Nutzung aus ÖNORM B-8115-3, 2015	10
3	Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit der Frequenz für Sprache, Kommunikation, Musikproberäume aus ÖNORM B-8115-3, 2015	10
4	Leerer Raum	14
5	Für tiefe Frequenzen treten vereinzelt Raummoden auf, die Anzahl steigt mit der Frequenz stark. “Raummoden Rechner - Trikustik”, 2021	15
6	Struktur von porösem Material mit einer Vielzahl an Poren und Verzweigungen [Daubner, 2017]	16
7	Verteilung von Schalldruck und Schallschnelle im Abstand zu einer Wand.	17
8	Vergleich von Absorbern aus z.B. Melaminharz ($5kPa * s/m^2$, blau) und Mineralwolle ($15kPa * s/m^2$, grün) bei einer Materialstärke von 10 cm. [PCal, 2021]	20
9	Vergleich von Absorbern aus z.B. Melaminharz ($5kPa * s/m^2$, blau) und Mineralwolle ($15kPa * s/m^2$, grün) bei einer Materialstärke von 50 cm. [PCal, 2021]	20
10	Reflexionsarmer Messraum des Fraunhofer-Instituts IDMT in Ilmenau . .	21
11	Reflexionsarmer Messraum mit horizontal und vertikal angeordneten Keilabsorbern	22
12	Aufbau eines Exponentialtrichters [Bernstein, 2019]	23
13	Beispiel eines Exponentialhorns mit $f_G = 600Hz$ “Exponentialhorn Bild”, 2021	25
14	Exponentialhorn (Schema)	26
15	Hyperbolisches Lautsprecherhorn (Schema)	26
16	Probenentwurf als Exponentialtrichter und als Pyramide ausgeführt . . .	27
17	Drei Modelle aus Akustikvlies	28
18	Messung im Impedanzrohr, Aufbau	29
19	gemessene Absorptionsgrade	30
20	gemessene Absorptionsgrade der negativen Teilstücke	31
21	Frei abgehängte Bahnen mikroperforierter Folien im Forum des OIC (Office Innovation Center, Fraunhofer Institut) Wack, 2004	32
22	Prinzipskizze eines mikroperforierten Schallabsorbers mit den geometrischen Parametern t, d, b und D [Nocke und Hilge, 2004]	33
23	Absorptionsgrad eines leicht gewölbten MPA im Vergleich zu einem ebenen MPA. [Zha et al., 1994]	34

24	Charakteristischer Absorptionsgrad für Kantenabsorber mit verschiedener Mineralwolle-Füllung (A=0mm, B = 160mm, C = 320mm, D = 500mm) [Lamprecht und Fuchs, 2012]	35
25	Beispielhaft Kantenabsorber in den Raumkanten [Fuchs, 2010]	36
26	Herstellung einer Probe aus Fasern der Kerzen-Palmlilie. [Soltani et al., 2020]	37
27	Absorptionsgradvergleich einer Probe, gemessen und berechnet. Das erweiterte JCA- Modell wird in der Arbeit vorgestellt.[Soltani et al., 2020]	38
28	(c) Probe unter Mikroskop (50x), (c1) Detailaufnahme (500x) der Probe, eingeschlossene Glasfasern werden sichtbar, (d) Makrostruktur der Probe, (d1) Probe für das Impedanzrohr [Caniato et al., 2020]	39
29	Ausgangsmaterial a) Jeansstoff b) Jutefasern. [Raj et al., 2020]	41
30	Messergebnisse im Impedanzrohr, Vergleich mit kommerzieller Glaswolle. Sample 01 und 02 haben eine Stärke von 5cm, 03 und 04 7cm [Raj et al., 2020]	41
31	Absorptionsgradmessung im Impedanzrohr. [Pelletier et al., 2017]	42
32	Grüne Probe aus Alginat mit rauher Oberfläche.	43
33	Proben aus Alginat.	44
34	Rote Probe mit eingeschlossenem Luftvolumen.	45
35	Absorptionsgrad nach Impedanzrohrmessung.	46
36	Absorberprobe G-001 mit kleinen Luft einschüssen.	47
37	Probenserie G mit verschiedenem Luftanteil	47
38	Probenserie der zweiten Messreihe.	48
39	Absorptionsgrade der zweiten Messreihe.	48
40	Probe AS-02-02, mit Laserperforierung.	50
41	Probe AS-02-05, tiefste Resonanzfrequenz.	50
42	Absorptionsgrad mit Luftpolster 2cm, 8cm und 10cm.	51
43	Aus Holzspänen und Pilzsporen gewonnene Myceliumproben.	52
44	Absorptionsgrad der Myceliumproben, Dicke 2cm (Blau) und 3cm (Rot).	53
45	Grundriss Regieraum	54
46	Leerer Raum	54
47	Errechneter Verlauf der Nachhallzeit	55
48	Schematischer Messaufbau	56
49	Verteilung der Quell- und Mikrofonpositionen	57
50	Nachhallzeit über alle Positionen und Quellen	58
51	Nachhallzeit T_{20} gemittelt an Quellenposition 1	59
52	Vergleich EDT , T_{20} , T_{30}	59
53	Insgesamt 14 Mineralwollepakete sind im Raum verteilt. Dicke: zwischen 55cm und 62cm, hier: Setup 1	60
54	Aufstellung der Mineralwollepakete in den Raumkanten	61
55	Auswertung für Setup 3, T_{20} räumlich gemittelt und an der späteren Abhörposition 3.	62

56	T_{20} , gemessen an den weiteren Setups [Eigene Darstellung]	63
57	Gemittelte Nachhallzeit der einzelnen Setups im Vergleich	64
58	3D Skizze des Regieraums	65
59	Rahmenkonstruktion aus Holz für den Kantenabsorber	66
60	Mineralwolleplatten werden in die Unterkonstruktion mit leichtem Druck eingepasst.	66
61	Die Abdeckung mit Parkettelementen soll später einige Ablageflächen ermöglichen	67
62	Konstruktion eines Deckenelements	68
63	Eingebaute Deckenkonstruktion, Vorbereitung der Wandelemente.	69
64	Konstruktion der Wandabsorber	70
65	Regieraum nach Einbau der Absorber	71
66	Gemittelte Nachhallzeit nach Einbau der Absorber	72
67	Ergebnisse der Nachhallzeitmessung, Regieraum	73
68	Gemittelte Nachhallzeit nach Einbau der Absorber	74
69	Analyse von C_{50} und C_{80}	76
70	Regieraum möbliert	78

Tabellenverzeichnis

1	Verschiedene Materialien und ihre Werte für Ξ . [Möser, 2015]	19
2	Legende zur Impedanzrohrmessung	46
3	Legende zur zweiten Messreihe	49
4	Equipment zur Messung der Impulsantwort	80
5	Equipment zur Absorptionsgradmessung im Impedanzrohr	80

Literatur

- Absorptionswerte verschiedener Stoffe.* (2021). <https://www.schweizer-fn.de/stoff/akustik/absorptionsfaktoren.php>
- ARTA Software.* (2021). <https://artalabs.hr/>
- Baustoffwissen. (2014, 28. Mai). *Ist Mineralwolle (Glas- oder Steinwolle) gesundheitsschädlich?* <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/daemmstoffe/krebsrisiko-moderne-mineralwolle-ist-unbedenklich/>
- Bernstein, H. (2019). *Elektroakustik: Mikrofone, Klangstufen, Verstärker, Filterschaltungen und Lautsprecher* (2., aktualisierte Auflage). Springer Vieweg.

- Caniato, M., Kyaw Oo D'Amore, G., Kaspar, J. & Gasparella, A. (2020). Sound absorption performance of sustainable foam materials: Application of analytical and numerical tools for the optimization of forecasting models. *Applied Acoustics*, 161, 107166. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X19307510>
- Cox, T. J. & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application* (2nd ed). Taylor & Francis.
- Daubner, B. (2017, 1. Juli). *Poröse Absorber: Grundlagen der Schallabsorption* [Heimkino Praxis]. <https://www.heimkino-praxis.de/poroese-absorber/>
- Denda, M. (2010). *Messsystem für akustische Zweitore* (Bachelorarbeit). TU Graz.
- Exponentialhorn Bild*. (2021). <https://m.media-amazon.com/images/I/51Pob4bozbL.jpg>
- Fuchs, H. V. (2010). *Schallabsorber und Schalldämpfer: innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen* (3., wesentlich erw. und aktualisierte Aufl). Springer Berlin.
- Institute of technical acoustics (ITA) / toolbox*. (2012). <https://git.rwth-aachen.de/ita/toolbox>
- Lamprecht, J. & Fuchs, H. V. (2012). Zur Wirkungsweise von Kanten-Absorbern in kleinen bis mittelgroßen Räumen.
- Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*. Academic Press.
- Maa, D. (1975). Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions.
- Marjanovic, I. (2021). *Alginat in der Architektur* (Masterarbeit). TU Graz.
- Mechel, F. (1997). *Schallabsorber, Bd.3, Anwendungen*. Hirzel, Stuttgart.
- Meyer, J. (1999). *Akustik und musikalische Aufführungspraxis: Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten* (4., überarb. Aufl). Bochinsky.
- Möser, M. (2015). *Technische Akustik* (10.). Springer Vieweg.
- Nocke, C. & Hilge, C. (2004). Mikroperforierte Absorber aus gespannten Folien.
- ÖNORM B-8115-3. (2015). *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik* (Standard ÖNORM B-8115-3).
- ÖNORM EN ISO 354:2003. (2003). *Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen* (Standard ISO 354:2003).
- PCal. (2021). *Porous Absorber Calculator*. <http://www.acousticmodelling.com/porous.php>
- Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Lara, A. J., Tapia-Carillo, A., McIntyre, G. & Bayer, E. (2017). An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Industrial Crops and Products*, 95, 342–347.
- Raj, M., Fatima, S. & Tandon, N. (2020). Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: A study on denim shoddy and waste jute fibers. *Applied Acoustics*, 159, 107070.
- Raummoden Rechner - Trikustik*. (2021). <https://trikustik.at/raummoden-rechner/>

- Schroeder, M. R. (1954). *Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von großen Räumen*. *Acustica* 4.
- Soltani, P., Taban, E., Faridan, M., Samaei, S. E. & Amininasab, S. (2020). Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca gloriosa fiber. *Applied Acoustics*, 157, 106999.
- Sonarworks. (2021). *SoundID reference - speaker & headphone calibration*. <https://www.sonarworks.com/soundid-reference>
- Wack, R. (2004). Mikroperforierte Akustik-Segel in Versammlungsräumen. *IBP-Mitteilung* 31 (2004).
- Waterhouse, R. V. (1955). Interference Patterns in Reverberant Sound Fields [Publisher: Acoustical Society of America]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27(2), 247–258.
- Zha, X., Zhou, X. & Kang, J. (1994). Mikro-perforierter Platten-Absorber - MPA. *IBP-Mitteilung* 21 (1994).
- Zollner, M. & Zwicker, E. (2003). *Elektroakustik* (3. Auflage).