
MASTERARBEIT

im Studiengang Ingenieurakustik

Frau
Luisa Lorenzen

**Die Auslegung und Umsetzung
von raumakustischen Maßnah-
men für ein Tonstudio in Mün-
chen**

2022

MASTERARBEIT

Die Auslegung und Umsetzung von raumakustischen Maßnah- men für ein Tonstudio in Mün- chen

Autor/in:
Frau Luisa Lorenzen

Studiengang:
Ingenieurakustik

Seminargruppe:
IA15W1-M

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing Stefan Sentpali

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Einreichung:
München, 26.04.22

MASTER THESIS

The design and realization of the room acoustics for a re- cording studio in Munich

author:

Ms. Luisa Lorenzen

course of studies:

Acoustical Engineering

seminar group:

IA15W1-M

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

second examiner:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

submission:

Munich, 26.04.22

Bibliografische Angaben

Lorenzen, Luisa:

Die Auslegung und Umsetzung von raumakustischen Maßnahmen für ein Tonstudio in München

The design and realization of the room acoustics for a recording studio in Munich

82 Seiten, Anlage 2 Seiten

Hochschule München, Fakultät Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik /
Hochschule Mittweida Fakultät Ingenieurwissenschaften

University of Applied Sciences Munich, Faculty Mechanical, Automotive, Aeronautical
Engineering / University of Applied Sciences Mittweida, Faculty Engineering Sciences

April, 2022

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Projekts der Firma ABP Akustikbüro Becker & Partner und der vorliegenden Masterarbeit für den Studiengang Ingenieurakustik erfolgte die Auslegung und Umsetzung der Raumakustik für ein Tonstudio in München. Dieses hat sich auf elektronische Musik spezialisiert. Hierfür erfolgten raumakustische Berechnungen und Messungen. Die Akustik Elemente wurden auf der Grundlage eines ausgearbeiteten Konzepts entwickelt, in Eigenregie gefertigt und an den entsprechenden Stellen in das Studio integriert. Abschließend erfolgte ein Wirksamkeitsnachweis mittels einer weiteren überprüfenden Messung der Nachhallzeit im fertigen Studio.

Abstract

In this dissertation, which was compiled with a project within the engineering company ABP Akustikbüro Becker & Partner and the Master's programme Acoustical Engineering, the design and realization of the room acoustics for a recording studio in Munich were carried out. The studio, which is located in Munich, is specialized in electronical music. The sound-absorbing elements were developed on the basis of ingenious concept. The components were built autonomously and afterwards integrated on the appropriate positions of the studio. In the end verifying measurements of the reverberation time were conducted to assess the effectiveness of the self-made sound-absorbing elements.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Vorwort	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Aufbau	4
2 Stand der Technik.....	5
3 Theoretische Grundlagen.....	10
3.1 Raumakustik im Musikstudio	10
3.2 Funktion von porösen Absorbern und Resonanzabsorbern.....	21
3.2.1 Poröse Absorber	22
3.2.2 Resonanzabsorber.....	25
3.3 Berechnungsverfahren.....	31
3.4 Messverfahren	35
4 Bearbeitung der Raumakustik im Musikstudio	38
4.1 Festlegung der Anforderungen	38
4.2 Messung der Nachhallzeit.....	40
4.2.1 Messaufbau im Studio	40
4.2.2 Messgeräte	41
4.2.3 Messergebnis Ist-Zustand.....	43
4.3 Berechnung der notwendigen Maßnahmen	44
4.4 Umsetzung der Maßnahmen im Studio.....	48
4.4.1 Poröse Absorber	50
4.4.2 Resonatoren	54
4.5 Messtechnische Analyse	61
4.5.1 Zwischenmessung	61
4.5.2 Nachmessung	62
4.5.3 Wirksamkeitsnachweis.....	63

5 Zusammenfassung	65
6 Ausblick.....	67
Literaturverzeichnis.....	XI
Anlagen	XIV
Eigenständigkeitserklärung.....	XVI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grammophon.....	1
Abbildung 2: Musikproduktion zuhause mit Laptop	2
Abbildung 3: „Bassfalle“	5
Abbildung 4: „Bassfalle“ - Platzierung in den Raumecken	6
Abbildung 5: Membranabsorber (Artnovion).....	7
Abbildung 6: Exemplarische Berechnung von Raummoden	15
Abbildung 7: Überlagerung Direkt- und Diffusschall, Hallradius	16
Abbildung 8: Hallradius abhängig von Raumvolumen und Nachhallzeit	17
Abbildung 9: Stereodreieck	20
Abbildung 10: Prinzipieller Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades	21
Abbildung 11: Einfluss der Wellenlänge λ , der Absorptionsdicke d	23
Abbildung 12: Holzarten	26
Abbildung 13: Skizze Plattenschwinger (ABP Akustik).....	27
Abbildung 14: Resonanzfrequenz von Plattenschwingern	28
Abbildung 15: Mikroperforierter Folienabsorber (ABP Akustik).....	29
Abbildung 16: Prinzipielle Aufbau eines Helmholtzresonators	30
Abbildung 17: Nachhallkurve	36
Abbildung 18: Exemplarisches Wasserfalldiagramm	37
Abbildung 19: Grundriss Studio	41
Abbildung 20: Messgerät Typ Soundbook	42
Abbildung 21: Lautsprecher Dodekaeder	42
Abbildung 22: Mikrofonkapsel	42
Abbildung 23: Ist-Zustand ohne Maßnahmen.....	43
Abbildung 24: Grundriss Studio mit Stereodreieck	48
Abbildung 25: Nackter Raum mit Kachelwand.....	49
Abbildung 26: Poröse Module Detail.....	50
Abbildung 27: Poröse Absorber an der seitlichen Wand.....	51
Abbildung 28: Poröse Absorber an der Wand mit Fenstern.....	51
Abbildung 29: Poröse Absorber an der Rückwand	52
Abbildung 30: doppelagige Poröse Absorber.....	52
Abbildung 31: Module aus Caruso-Iso-Bond Europalette	53
Abbildung 32: Rückwand Resonator.....	54
Abbildung 33: Schmale Holzlatte und Querlatte	55
Abbildung 34: Befüllen mit Dämmstoff.....	55
Abbildung 35: Rahmen der Resonatoren.....	55
Abbildung 36: Lochabsorber.....	56
Abbildung 37: Verlegeplan für die Resonatoren	59
Abbildung 38: Positionierung der Mitschwinger	60
Abbildung 39: Zwischenmessung	61
Abbildung 40: Nachhallzeitmessung Nachmessung.....	62
Abbildung 41: Endergebnis Musikstudio.....	64
Abbildung 42: Musikproduktion im Heimbereich.....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schallabsorptionsgrad Caruso-Iso-Bond 5 cm.....	24
Tabelle 2: Schallabsorptionsgrad Caruso-Iso-Bond 10 cm	24
Tabelle 3: Schallabsorptionsgrad exemplarisch für einen Plattenschwinger	26
Tabelle 4: Nachhallzeiten des unbehandelten Raumes.....	44
Tabelle 5: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger $f = 63$ Hz.....	46
Tabelle 6: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger $f = 72$ Hz.....	46
Tabelle 7: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger $f = 83$ Hz	46
Tabelle 8: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger $f = 123$ Hz.....	46
Tabelle 9: Schallabsorption Lochabsorber $f = 120$ Hz	47
Tabelle 10: Nachhallzeiten	64

Vorwort

Ich möchte hiermit all denjenigen danken, die mich bei der vorliegenden Masterarbeit motiviert und unterstützt haben.

Die Idee, die Arbeit über dieses Thema zu schreiben, entwickelte sich während meiner Arbeit im Akustikbüro Becker & Partner. An dieser Stelle möchte ich mich noch einmal herzlich bei Herrn Christian Becker für seine Hilfsbereitschaft und Geduld danken.

Ebenfalls möchte ich mich bei Daniel Mayer, dem Besitzer des Tonstudios, für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Außerdem danke ich meinen Eltern, die mir jederzeit zur Seite standen. Meinem Vater danke ich insbesondere für das Korrekturlesen dieser Arbeit und meiner Mutter für Ihre finanzielle Unterstützung.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Sentpali für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit.

München, April 2022

Luisa Lorenzen

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in die Thematik der Arbeit gegeben. Es werden einzelne Zielsetzungen der Errichtung eines Musikstudio für elektronische Musik in höchster Güte beschrieben. Außerdem werden zentrale Forschungsfragen der Arbeit und der Aufbau erläutert.

1.1 Zielsetzung

Die Arbeit setzt sich das Ziel, für ein geplantes Musikstudio eine optimale Raumakustik mittels individuell angefertigter Module zu schaffen; angefangen bei der Auslegung des Raumklangs bis hin zum Bau der unterschiedlichen Module. Das finanzielle Budget ist dabei begrenzt.

In dem Studio, das sich im Keller des Anwesens in der Zenettistraße 12 im Schlachthof befindet, ist insbesondere das Aufnehmen und Bearbeiten von elektronischer Tanzmusik beabsichtigt. Die Klänge und Töne werden künstlich am Computer produziert, die Nutzung natürlicher Musikinstrumente fallen dadurch weg.

Als man begann, Musik aufzunehmen, waren die Wiedergabegeräte wie Röhrenradios und Grammophone im Vergleich zu heute sehr einfach aufgebaut und die Musik hörte sich „blechern“ an.



Abbildung 1: Grammophon¹

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Nipper> [24.01.2022].

Tieffrequente Musikanteile konnte man zur damaligen Zeit nicht wiedergeben und das Ganze wurde noch von einem Knistern und Knacken überlagert.

Seit der Verbreitung qualitativ hochwertiger Stereoanlagen in den 60er Jahren wuchs auch das Bedürfnis nach ebenfalls qualitätvollen Musikaufnahmen. Zu dieser Zeit entstanden weltweit einige große Studiokomplexe, in denen Musiker und Bands ihre Musik aufnehmen konnten.

Durch die Nutzung der Computertechnologie und der damit einhergehenden Musikverarbeitung entstand in den 80er Jahren für einen immer größer werdenden Personenkreis die Möglichkeit, in einfacheren Studios, jedoch auch im privaten Bereich, Musik aufzunehmen und zu produzieren. Die Musikbearbeitung erfolgt im Heimbereich überwiegend im Nahfeld. Bevor professionelle Aufnahmen veröffentlicht werden, wird in der Regel noch ein klassisches Tonstudio aufgesucht, um die Musik dort final abzumischen. Hier entstand das Interesse, diesen letzten Schritt ebenfalls im Heimbereich umsetzen zu können. Dabei gibt es die Notwendigkeit, den Musikarbeitsraum hinsichtlich des Klangs so zu gestalten, dass ein Musikstück über den gesamten interessierenden Frequenzbereich frei von störenden Raumrückwirkungen ist. Dabei bemerkt der Nutzer recht schnell, dass es mit Eierkartons und Schaumstoff nicht getan ist.

Bei der Suche nach Lösungen auf dem Markt, zeigt sich, dass es hier immer noch sehr wenig verfügbares Material gibt. Erschwert wird das Ganze dadurch, dass sich jeder Raum akustisch anders verhält, abhängig von Raumboflächenbeschaffenheit, Geometrie, Volumen etc.



Abbildung 2: Musikproduktion zuhause mit Laptop ²

² <https://www.barrierefrei-studieren-koeln.de/erfahrungsberichte/> [24.01.2022].

Bei elektronischer Musik, die bevorzugt laut abgespielt wird, da sie vor allem als Tanzmusik dient, wird der Raum in dem kritischen Frequenzbereich angeregt, in dem sich auch die ersten und akustisch dominanten Raummoden befinden.

Da das Interesse an Produktion von Musik im Heimbereich stetig wächst, gibt es heutzutage im Internet teilweise frei verfügbare Programme zur Analyse der Nachhallzeit und Bestimmung der Raummoden. Es ist somit dem engagierten Nutzer möglich, die raumakustischen Kenndaten seines Raumes relativ exakt zu bestimmen.

Zur Ausarbeitung eines geeigneten Raumakustikkonzeptes und Festlegung der benötigten Maßnahmen stellen die raumakustischen Messungen des ursprünglichen Studioraumes die Grundlage für eine erfolgreiche Optimierung dar. Die Zielvorgaben werden auf der Grundlage von Erfahrungswerten und den Wünschen des Betreibers formuliert. Nach der Durchführung von Berechnungen werden die notwendigen raumakustischen Maßnahmen ausgelegt. Für die Raumakustikmodule erfolgen Realisierungsvorgaben wie die Beschaffenheit und Stärke des Materials. Mittels eines ausgearbeiteten Verlegungsplanes wird die Montage im Studio durchgeführt.

Das finale Messergebnis nach Umsetzung der Maßnahmen bzw. Einbringung der Module im Studio soll möglichst nah an den raumakustischen Zielvorgaben liegen.

Die messtechnisch ermittelten Werte sollten also im besten Fall mit den Berechnungsergebnissen übereinstimmen. Hierzu kann gegebenenfalls eine Feinjustierung notwendig werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine *Do-it-yourself*-Bauanleitung für effektive Raumakustikmaßnahmen erläutert.

Die Arbeit soll einen Beitrag für die Wissenschaft, aber vielmehr noch für die Praxis darstellen und richtet sich somit an Personen aus den Bereichen raumakustische Gestaltung und Musikstudios. In der Arbeit wird untersucht, ob es tatsächlich möglich ist, ein Raumakustikkonzept mit geringem Budget selbst zu entwickeln und zu realisieren.

Es soll ein Konzept ausgearbeitet werden, dass auch weiteren Studiobesitzern dienen könnte.

1.2 Aufbau

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die relevanten theoretischen Grundlagen der Raumakustik erläutert. Dabei werden die Grundbegriffe der Raumakustik, die Funktion von Akustikmodulen sowie die verwendeten Berechnungs- und Messverfahren der im Rahmen der Masterarbeit durchgeführten Untersuchung dargelegt.

Der zweite Teil der Arbeit beschreibt das Vorgehen bei der Auslegung und Umsetzung des raumakustischen Konzepts im Studio.

Auf der Basis des messtechnisch ermittelten Ist-Zustandes erfolgen die raumakustischen Berechnungen für das Objekt in Abstimmung mit den Wünschen des Studiobesitzers. Anhand der Ergebnisse werden die benötigten Maßnahmen und jeweils notwendigen Dimensionen für den Raum bestimmt.

Für die Auslegung der Raumakustik im Studio ist neben der Wahl der passenden Absorber und Diffusoren auch die richtige Platzierung der Elemente im Raum entscheidend.

Die Materialeigenschaften werden anhand von entsprechender Fachliteratur und Datenblättern ermittelt. Die Bestimmung der Effektivität des Materials und des jeweiligen Aufbaus erfolgt auf der Grundlage von Erfahrungen. Um eine Planungssicherheit zu erhalten, werden im Zuge der Umsetzung schalltechnische Zwischenmessungen vorgenommen und bei Bedarf die Rechenmodelle angeglichen.

Nach der Anfertigung der benötigten raumakustischen Vorrichtungen gemäß den vorab berechneten Vorgaben werden die selbst gefertigten Bauteile in die optische Raumgestaltung des Studios integriert.

Im Anschluss erfolgt eine messtechnische Analyse. Das vor Ort realisierte Raumakustikkonzept wird durch eine überprüfende Messung hinsichtlich der Wirksamkeit der selbst angefertigten Elemente untersucht. Es erfolgt eine Gegenüberstellung der messtechnisch ermittelten Werte mit den planerischen Vorgaben.

Am Ende der Arbeit wird eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick mit denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten der behandelten Thematik dargelegt.

2 Stand der Technik

Auf dem Markt für raumakustische Maßnahmen finden sich unzählige Produkte. Die überwiegende Anzahl der Firmen zielt auf den großen Sektor von Büros. In Schulen und ähnlichen Bauwerken gibt es in Deutschland sogar gesetzliche Vorgaben wie z. B. die Unfallverhütungsvorschrift. Entsprechende Hersteller hierfür sind unter anderem: Knauf, OWA, Ecophone. Auch die Firma Thomann, die auf dem deutschen Markt führend im Bereich von Musikequipment ist, verkauft Elemente aus Serienproduktion für Ton- und Musikstudios.

Für Konzertsäle oder Musik- und Tonstudios werden die Maßnahmen meist individuell von einem Fachmann bzw. Akustiker geplant. Auf Produkte von der Stange wird dabei höchstens im mittleren und hohen Frequenzbereich zurückgegriffen.

Mit der rasant steigenden Anzahl an kleineren Studios oder auch Heimkinos hat sich für diesen Bereich ein Markt entwickelt, auf dem überwiegend Raumakustikmodule aus Serienfertigung verkauft werden. Betrachtet man die Firmen im Bereich Studioakustik genauer, so stellt man fest, dass alle Produktpaletten auf ein breitgefächertes Angebot von porösen Absorbern abzielen. Die einzige Ergänzung dazu stellen dabei die Diffusoren dar. Vereinzelt sind auch Kombinationen dieser beiden Grundelemente zu finden.

In den Angeboten entdeckt man natürlich auch Produkte für den tieffrequenten Bereich mit klingenden Namen wie „Bassfallen“ oder „Bass Traps“.³



Abbildung 3: „Bassfalle“⁴

³ <https://www.mw-acoustics.com/bassfallen> [16.04.2022].

⁴ <https://gikacoustics.de/produkte/tri-trap-bassfalle-sondergroesse/> [16.04.2022].

Bei genauerer Betrachtung handelt es sich dabei jedoch wiederum um poröse Absorber, die teilweise als dickere Platte vor einer Raumecke platziert werden sollen, oder um dreieck-förmige Gebilde, die komplett in einer Ecke montiert werden.



Abbildung 4: „Bassfalle“ - Platzierung in den Raumecken ⁵

Das Problem bei dieser Bauart ist die zu große Breitbandigkeit und gleichzeitig geringe Effizienz bei tiefen Frequenzen unter 100 Hz. In der Kombination mit den immer noch benötigten Maßnahmen im mittleren und hohen Frequenzbereich lässt sich eine Überdämpfung des Raumes ab ca. 500 Hz kaum vermeiden.

Erweitert man die Suche nach effektiven Modulen, die ihre Wirkung überwiegend bei Frequenzen unter 100 Hz entwickeln, findet man hauptsächlich auf dem amerikanischen Markt Bauanleitungen für Resonanzabsorber. Nachfolgend ein Beispiel:

<https://www.acousticfields.com/how-to-build-a-diaphragmatic-absorber/> [16.04.2022].

Bei dem dort vorgeschlagenen Material handelt es sich um eine dünne MDF-Platte als Mitschwinger (ca. 0,9 cm bis 1,3 cm) und einem dickeren Rahmen, ebenfalls aus MDF.

⁵ <https://gikacoustics.de/produkte/tri-trap-bassfalle-sondergroesse/> [16.04.2022].

Berechnungsformeln und unterschiedliche Abstimmfrequenzen werden dabei nicht behandelt. Das eingesetzte MDF-Material weist zudem eine höhere dynamische Steifigkeit auf als das in dieser Arbeit verwendete Pappelsperholz. Dadurch reduziert sich die Effektivität erfahrungsgemäß um ca. 10 %.⁶

In deutscher Sprache ist diesbezüglich kaum Literatur verfügbar.

Weiterhin sind im Internet amerikanische Firmen vertreten, die Lösungen für den tieffrequenten Bereich anbieten. Dabei handelt es sich z.B. um Membranabsorber, die zusätzlich mit einer punktuellen Masse versehen werden. Je nach Abstimmbereich soll deren Wirkung hinab bis zu 40 Hz reichen. Die fertigen Produkte decken zwei Bereiche ab. Die sogenannten „Corner Bass Traps“ arbeiten von 40 Hz bis 60 Hz und 60 Hz bis 80 Hz.

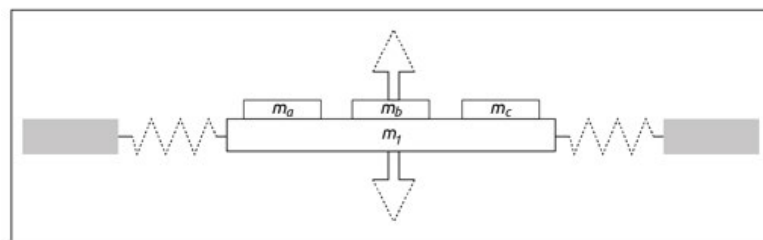


Abbildung 5: Membranabsorber (Artnovion)

Der Nachteil der obigen Lösung ist, dass es sich hierbei um Standard-Module handelt, die pauschal im tieffrequenten Bereich arbeiten. Ein auf den Raum abgestimmtes Konzept kann mit dieser Lösung nicht erzielt werden. Eine Individualisierung bietet der Hersteller nicht an. Zudem sind die Berechnungsformeln und das eingesetzte Material nicht ersichtlich. Genauso wenig finden sich objektive Leistungsnachweise in Form von Messergebnissen.⁷

Speziell im tieffrequenten Bereich gibt es darüber hinaus noch weitere Firmen, die versuchen, beim Thema „Absorption“ neue Wege zu gehen, in dem sie z.B. gewissen Materialien besondere Eigenschaften zusprechen.

⁶ <https://www.acousticfields.com/how-to-build-a-diaphragmatic-absorber/> [16.04.2022].

⁷ <https://www.artnovion.com/educational/tpda> [16.04.2022].

Die Firma Acoustic Fields vertreibt Module, die mit Aktivkohle befüllt werden und ein Absorptionsvermögen von 63 % bei 40 Hz und 100 % bei 50 Hz aufweisen sollen. Auch hier fehlt jeglicher Leistungsnachweis in Form von verifizierbaren neutralen Messungen.

Die im Internet verfügbaren Bauanleitungen sind nicht ansatzweise vergleichbar mit der vorliegenden Arbeit. Es wird zum Teil der Aufbau Plattenschwinger erläutert sowie deren Platzierung im Raum, der Raummodenrechner Trikustik wird auch genannt. Insgesamt wird die Thematik im Internet jedoch nicht genau untersucht oder bewertet und nur sehr knapp beschrieben. Außerdem sind die Anleitungen nicht wissenschaftlich formuliert. Nachfolgend einige Beispiele aus dem Internet:

<https://orthogonalrecords.com/2017/02/22/building-a-proper-control-room-construction-of-early-reflection-absorbers/> [17.04.2022].

<https://leiseshaus.com/tonstudio-selbst-bauen/> [17.04.2022].

<https://www.delamar.de/raumakustik/gesangskabine-bauen-22562/> [17.04.2022].

<https://homerecording1x1.de/homestudio-einrichten/> [17.04.2022].

<https://www.bonedo.de> [17.04.2022].

<http://soundrooms.blogspot.com/2011/06/10-porosabsorber-plattenschwinger-und-20.html> [17.04.2022].

Des Weiteren gibt es im Internet diverse Foren, in denen sich Interessierte zu dem Thema austauschen - eine richtige Bauanleitung für Plattenschwinger ist hier jedoch auch nicht zu finden. Nachfolgend ein paar Beispiele:

<https://www.beisammen.de/index.php?thread/101971-bautipp-für-plattenschwinger/> [17.04.2022].

<https://recording.de/threads/erfahrungen-mit-plattenschwinger.232719/> [17.04.2022].

<https://www.open-end-music.com/forum/diy-do-it-yourself/elemente-zur-optimierung-der-raumakustik/2521-was-ist-die-richtige-formel-für-plattenschwinger> [17.04.2022].

<https://www.hififorum.at/node/5290#post241375> [17.04.2022].

<http://www.hifi-forum.de/viewthread-72-601.html> [17.04.2022].

<https://www.piega.info/forum/know-how/positionierung/40595-diy-projekt-plattenschwinger-im-kampf-gegen-raummoden#post40595> [17.04.2022].

<https://www.nubert-forum.de/nuforum/viewtopic.php?t=10358> [17.04.2022].

<https://produzentenkreis.de/tutorials/raumakustik/absorber-selbst-bauen-diy-raumakustik/> [17.04.2022].

<https://de.ehomerecordingstudio.com/bass-trap/> [17.04.2022].

In den in dieser Arbeit zitierten Büchern sind zwar alle Formeln zu finden und teilweise auch die eine oder andere Anleitung zum Bau von Modulen, wie z. B. in „Studio Akustik“ von Friesecke, aber auch hier fehlen zahlreiche wichtige Details. Somit sind die Beschreibungen als unvollständig zu bewerten.

In der OPAC Online Bibliothek war gleichermaßen wenig interessantes Material zu finden. Außer obiger Literatur von Friesecke waren keine weiteren Publikationen zum gesuchten Thema erhältlich.

Bei der Durchsicht von Zeitschriften der DEGA waren auch keine aufschlussreichen Artikel aufzufinden. Hier waren lediglich Publikationen wie „Raumakustik - Zur Normbarkeit von Räumen“ (Nr. 03/2019 Akustik Journal Dega) und „Die Farbe macht die Musik - Akustische und perzeptuelle Grundlagen der Klangfarbenwahrnehmung“ (02 2020 Akustik Journal Dega) zu finden. Zum Thema Studioakustik und Plattenschwinger gab es keinerlei Material.

Bei der Recherche auf der Seite des Deutschen Patent- und Markenamtes konnte auch kein für diese Arbeit bedeutsames Patent gefunden werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass es zum aktuellen Zeitpunkt keine individuellen Lösungen im Frequenzbereich unter 100 Hz gibt. Die verfügbaren Produkte weisen meist einen breiteren Wirkungsbereich auf und gelten allgemein für bestimmte Bereiche. Bauanleitungen inklusive der Berechnungsformeln sind entweder schwer zu finden oder lückenhaft und dazu meist auf englischer Sprache. Die Untersuchungen hinsichtlich des Forschungsstandes haben gezeigt, dass es bisher keine wissenschaftliche Arbeit zu diesem Thema gibt und somit von einer Forschungslücke ausgegangen werden kann.

3 Theoretische Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Raumakustik und Schallausbreitung im Raum sowie grundlegende Mess- bzw. Berechnungsverfahren, welche für die Dimensionierung der raumakustischen Maßnahmen notwendig sind, erläutert. Weiterhin wird die Funktionsweise der unterschiedlichen Raumakustikelemente beschrieben.

3.1 Raumakustik im Musikstudio

Unter diesem Abschnitt der Theorie werden die wichtigsten Gesichtspunkte der Raumakustik im Musikstudio dargelegt. Diese sind: Nachhallzeit, Schallabsorption, Schallausbreitung, stehende Wellen, Raummoden, Hallradius, Interferenzen, Stereodreieck

Nachhallzeit

Die wichtigste akustische Eigenschaft eines Raumes ist die Nachhallzeit. Sie stellt das älteste und bekannteste raumakustische Kriterium dar und wird neben dem Schallabsorptionsvermögen des Raumes auch durch das Raumvolumen beeinflusst. Die Nachhallzeit beschreibt die Zeitdauer, in der die Schallenergie in einem geschlossenen Raum nach Beenden des Schallereignisses z.B. Sprechen oder ein Musikklang abfällt. Der reflektierte Schall kann in diesem Fall nicht vom ursprünglichen Schall getrennt werden, sondern geht in der Wahrnehmung ineinander über. (Vgl. Fasold/Veres 1998: 135) Ist die Nachhallzeit zu lang, so wirkt der Raum hallig. Bei Musik bewirkt eine zu lange Nachhallzeit eine Verschmelzung der Klänge, sodass ein unklarer und „schwammiger“ Eindruck entsteht. Vielfachreflexionen an Einrichtungsgegenständen und Raumbegrenzungsflächen wie z.B. Wänden oder Decken erzeugen den Nachhall. Je höher also der Hallanteil im Raum, desto verschwommener wirkt die Musik. Einzelne Instrumente werden weniger wahrgenommen. Die Sprachverständlichkeit von Liedtexten nimmt ab. Ein schnelles Tempo - Beats per Minute - das heißt, die Abfolge von vielen Beats in kurzer Zeit, ist charakteristisch für elektronische Musik. Damit sich die Beats nicht überschlagen, darf die Nachhallzeit nicht zu lang sein, denn das harte, scharfe „Wummern“ der Bässe wird ansonsten durch die verminderte Klarheit aufgelöst. Bässe und kurze Taktfolgen sollen bei elektronischer Musik nicht nachschwingen.

Je nach vorhandener Beschallungsanlage erfolgt eine Anregung des Raumes bereits deutlich unter 100 Hz. Normalerweise beginnt der interessierende Frequenzbereich ab 50 Hz. Sind besonders große Lautsprecher vorhanden, so kann auch der Bereich ab der Terzmittenfrequenz 31,5 Hz relevant werden.

Gemessen werden kann die Nachhallzeit, indem man den entsprechenden Raum mit einem kontinuierlichen breitbandigen Geräusch wie dem sogenannten rosa Rauschen oder mit einem kurzfristigen Impuls wie z. B. ein Schuss aus einer Pistole anregt.

Bei kontinuierlicher Anregung kommen ein kugelförmiger Lautsprecher und ein Mikrofon zum Einsatz. Mit dem Lautsprecher wird der Raum für eine gewisse Zeit angeregt und nach dem Abschalten erfolgt die Messung der Raumantwort. Das Mikrofon stellt man im Raum nacheinander so auf, dass möglichst der ganze Raum gleichmäßig erfasst wird. Nach Abschalten des Signals erfolgt die Aufzeichnung und Auswertung der Abklingdauer des Schalls. Die Zeitspanne, die der Schall braucht, um 60 dB abzufallen, entspricht der Nachhallzeit. (Vgl. ebd: 153)

Allgemein erfolgt ein Absenken bzw. eine Verbesserung der Nachhallzeit bei gewöhnlichen Räumen erfolgt durch die Einbringung von schallabsorbierenden Materialien wie Wand- und Deckenverkleidungen sowie weichen Fußböden wie Teppiche. Außerdem können Einrichtungsdetails wie Kissen, Sitzbänke mit Stoffbezug und Vorhänge vor den Fenstern erheblich zur Bedämpfung eines Raumes beitragen. (Vgl. Mommertz 2008: 23)

Ein unbehandelter Raum verändert Klang, Gesang, Stimme und Musik. Ziel ist, den Raum akustisch so zu optimieren, dass dieser keinen negativen Einfluss mehr auf die Aufnahme bzw. Wiedergabe hat.

In einem halligen Raum bzw. bei einer langen Nachhallzeit wird die Klarheit herabgesetzt. Aus diesem Grund sind raumakustische Elemente notwendig. Um die Nachhallzeit in einem gewünschten Bereich absenken zu können, ist eine ausgeklügelte Kombination von verschiedenen Absorbern nötig, die ihre Wirkung jeweils in unterschiedlichen Frequenzbereichen zeigen.

Die Raumakustik war früher für die Aufnahme von Gesang und Instrumenten essenziell. Heutzutage wird Musik zum Teil komplett elektronisch bzw. digital am Computer zusammengesetzt. Somit können bei der Nachbearbeitung auch Störeffekte durch den Raum leichter korrigiert werden.

Bei Abhörung der produzierten Musik ist die Raumakustik allerdings auch im Nahfeld wieder relevant.

Der Grund dafür ist, dass elektronische Musik gerne laut abgehört wird, um die Qualität und Tanzbarkeit besser beurteilen zu können. Dabei wird der Raum angeregt und es kommt zu einer Rückantwort.

Ein Studioraum ist für einen Musikproduzenten oder Toningenieur wie ein zusätzliches Instrument. Er kennt die gegebenenfalls vorhandenen Schwächen und kann diese später elektroakustisch eliminieren.

In der Kirche ist eine lange Nachhallzeit wünschenswert. Sie ist Bestandteil des erwarteten subjektiven Eindrucks und unterstützt die Predigt und den Gottesdienst. Kirchenmusik wie z. B. die von Johan Sebastian Bach ist speziell für eine lange Nachhallzeit komponiert. Elektronische Musik hingegen kann ihre Wirkung in einem trockenen Raum mit kurzer Nachhallzeit erst richtig entfalten. Bei noch nicht existenten Räumen kann die Nachhallzeit vorab bereits in der Planungsphase rechnerisch ermittelt werden.

Schallabsorption

Die Schallabsorption wird in α , dem Schallabsorptionsgrad, angegeben. Das Schallabsorptionsvermögen von Oberflächen sowie die Nachhallzeit sind frequenzabhängig. Aus diesem Grund erfolgen die Berechnungen im Allgemeinen zum Beispiel für den Schallschutz meist für die Oktaven des Frequenzbereiches von 125 Hz bis 4000 Hz. Im mittleren Frequenzbereich von ca. 250 Hz bis 500 Hz sind die meisten Energieanteile der menschlichen Sprache zu finden. Die Schallabsorptionsgrade von Oberflächen können veröffentlichter Fachliteratur oder Prüfzeugnissen der Hersteller von Schallabsorptionsmaterialien entnommen werden. (Vgl. Müller/Möser 2004: 345)

Hersteller von raumakustischen Elementen geben die akustische Eigenschaft mit dem Schallabsorptionsgrad α an. Dabei ist die tiefste angegebene Frequenz das Oktavband von 125 Hz und die höchste angegebene Frequenz in der Regel 4000 Hz.

Unter dem Schallabsorptionsgrad α versteht man das Verhältnis von nicht reflektierter zu auftreffender Schallenergie. Dieser kann zwischen 0, d. h. komplett reflektierend und 1, alles absorbierend, liegen. (Vgl. Mommertz 2008: 15)

Schallausbreitung im Raum

Wenn sich Schall ohne Hindernisse ausbreiten kann, spricht man von Direktschall. Bei einem sogenannten diffusen Schallfeld überlagern sich viele verschiedene Schallfelder, da der Schall mehrmals an den Raumbegrenzungsflächen reflektiert wird. Um ein Schallfeld definieren zu können, wird die Orts- und Zeitabhängigkeit zweier Schallfeldgrößen benötigt. Meistens werden der Druck und die Schnelle angegeben.

(Vgl. Dickreiter 1997: 2)

Die Schallausbreitung in einem Raum wird durch Hindernisse wie Gegenstände und Wände wie folgt beeinflusst:

1. Durch totale oder teilweise Reflexion wird die Ausbreitungsrichtung entweder im gesamten Frequenzbereich oder im Bereich höherer Frequenzen verändert und bewirkt Schalbündelung oder Schallzerstreuung.
2. Durch Beugung der Schallwellen wird die geradlinige Ausbreitungsrichtung insbesondere im Bereich der tiefen Frequenzen verändert.
3. Bei totaler oder teilweiser Absorption verliert die Schallwelle an Energie, wodurch sie eliminiert oder abgeschwächt wird. Meistens ist die Absorption frequenzabhängig.

(Vgl. ebd.: 11)

Stehende Wellen

Zwischen parallelen, reflektierenden Wänden kann es zu Raumresonanzen bzw. „stehenden“ Wellen kommen. Dies bedeutet, dass eine senkrecht aufkommende Welle immer wieder mit ihrer eigenen Reflexion überlagert wird. Dadurch löschen sich die Schallwellen teilweise gegenseitig aus oder aber verstärken sich an gewissen Punkten. (Vgl. Dickreiter 1997: 11)

Die Bedingung für eine stehende Welle ist, „dass der Wandabstand gleich der halben Wellenlänge oder einem ganzzahligen Vielfachen davon ist“ (ebd.: 11).

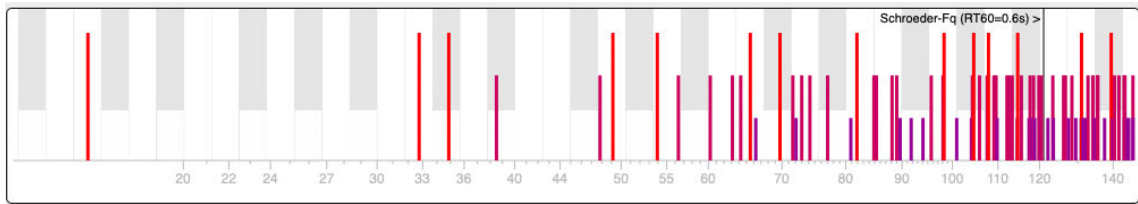
Dieser Effekt lässt sich vor allem in kleinen Räumen beobachten. Mit der trail-and-error-Methode können mithilfe eines Sinusgenerators oder anhand von speziellen Berechnungstools stehende Wellen in einem Studio ermittelt werden. Bei ersterem werden entsprechende Single generiert, sodass ein Dröhnen im Raum zu hören ist. Man beginnt bei den tiefen Frequenzen und dreht die Frequenz dann immer höher. Es machen sich dann Überhöhungen und Einbrüche im Raum bemerkbar. Eine weitere Möglichkeit, eine stehende Welle zu identifizieren, ist die Verteilung mehrerer Personen im Raum. So wird vermutlich zumindest eine Person einen Effekt wie Dröhnen feststellen. Insbesondere an der Abhörposition sollte auf eventuell vorhandene stehende Welle geachtet werden, da hier die Musik später die meiste Zeit abgehört werden wird. (Vgl. Friesecke 2007: 60 f.)

In den Ecken und an den Wänden bauen sich insbesondere durch Bässe Druckmaxima und somit Schalldrucküberhöhungen auf. Aus diesem Grund ist die Platzierung von Plattenschwingern in den Ecken besonders wirkungsvoll.

Wird ein Signal immer wieder hin und her reflektiert, so entsteht bei impulsartigem Schall zwischen zwei parallelen Raumbegrenzungsflächen ein Flatterecho. Bei großem Wandabstand können viele schnell aufeinanderfolgende Echos hörbar sein, bei kleinerem Wandabstand wird die Abfolge so schnell, dass ein sogenanntes Klangecho entsteht. (Vgl. Dickreiter 1997: 11)

Raummoden

Unter Raummoden, auch Raumresonanzen genannt, versteht man einen negativen Effekt, der aufgrund von stehenden Wellen entsteht. Insbesondere bei kleinen Studios kann er im kritischen Frequenzbereich zwischen 100 und 1.000 Hz auftreten. Je größer das Studio, umso tiefer liegt der Bereich der Raummoden. Durch die Interferenzen kommt es zu Veränderungen der Klangfarbe im Raum. Die Akustik wird somit nicht an allen Stellen gleich wahrgenommen. Durch das Aufstellen entsprechender Raumakustikmodule können diese negativen Effekte vermieden werden. Dieser Aspekt ist vor allem für die Abhörposition von großer Bedeutung. Manchmal genügt es bereits, die Mikrofonposition ein wenig abzuändern. Sind die Raummoden im Studio gleichmäßig verteilt, sind sie nicht unbedingt störend. (ebd.: 44)

Abbildung 6: Exemplarische Berechnung von Raummoden ⁸

Hallradius

Als Hallradius bezeichnet man in einem Raum man den Abstand zu einer Schallquelle, bei dem der Direktschall genauso laut ist wie der Diffusschall. Dies bedeute, dass sich der Direktschall und der Diffusschall überlagern. Außerhalb des Hallradius dominiert der Diffusschall und erst ab diesem Punkt sind raumakustische Absorber effektiv. Aus diesem Grund ist es wichtig, den genauen Abstand, d.h. den sogenannten Hallradius, zu kennen. Innerhalb des Hallradius wird auch die Abhörposition weniger beeinflusst. Im Nahfeld der Schallquelle überwiegt der Direktschall. Hier gilt das 6dB- Abstandsgesetz: Der Schallpegel einer Kugelwelle verringert sich je Entfernungsverdoppelung um 6 dB. Bei der freien Schallausbreitung gibt es keinen Diffusschall, sondern nur das Direktschallfeld. (Vgl. Dickreiter 1997: 36)

Die allgemeine Formel für das Abstandsgesetz lautet wie folgt:

$$L = 20 \cdot \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right)$$

mit:

L = Pegeländerung in dB

r1 = alter Abstand in Metern, m

r2 = neuer Abstand in Metern, m

(Vgl. Friesecke 2007: 30)

⁸ <https://trikustik.at/raummoden-rechner/> [24.01.2022].

Je größer der Raum und je kürzer die Nachhallzeit, umso größer ist der Hallradius. Dieser ist außerdem frequenzabhängig und wird zu höheren Frequenzen immer größer.

Der Hallradius bei einem kugelförmigen Abstrahlverhalten kann wie folgt definiert werden:

$$R_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{RT60}}$$

mit:

R_H = Hallradius in Metern, m

V = Raumvolumen in m^3

$RT60$ = Nachhallzeit in Sekunden

(Vgl. Dickreiter 1997: 36 ff.)

In der nachfolgenden Grafik wird der Zusammenhang zwischen Hallradius und Diffus- und Direktschall in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle und dem Abstandsgesetz (s. oben) veranschaulicht.

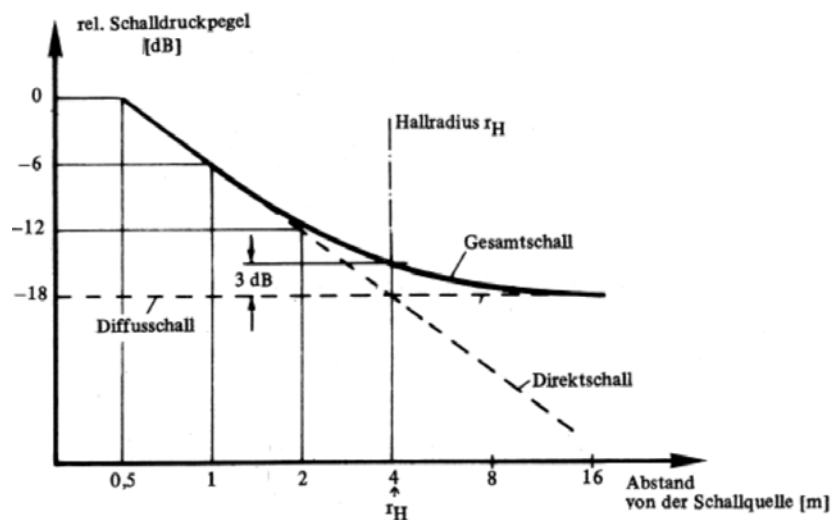


Abbildung 7: Überlagerung Direkt- und Diffusschall, Hallradius ⁹

⁹ Dickreiter 1997: 37

In Abbildung 4 ist erkennbar, wie der Hallradius abhängig von der Nachhallzeit und somit gleichzeitig auch vom Raumvolumen ist.

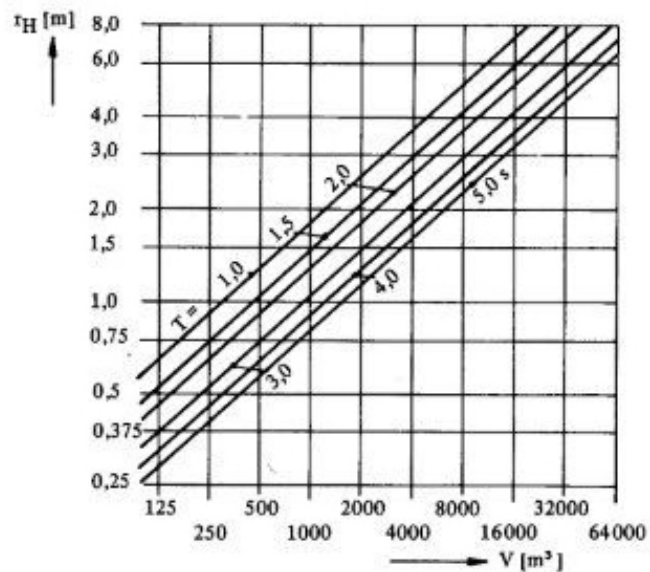


Abbildung 8: Hallradius abhängig von Raumvolumen und Nachhallzeit ¹⁰

Der Schalldruckpegel des Direktschalls eines Lautsprechers in einer bestimmten Entfernung lässt sich wie folgt berechnen:

$$L_{\text{SPL}} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{ak}}}{1 \text{ pW}} \right) - 10 \cdot \log (4\pi r^2)$$

mit:

L_{SPL} = Schalldruckpegel in dB_{SPL}

P_{ak} = akustischer Leistungspegel des Lautsprechers in Watt, W (in der Praxis ca. 1-2% des elektrischen Eingangspegels)

r = Abstand zur Schallquelle in Meter, m (für die Diffusschallberechnung muss für r der Hallradius r_{H}) eingesetzt werden.

(Vgl. Friesecke 2007: 42)

¹⁰ ebd: 38

Interferenzen

Interferenzen sind Überlagerungsmuster von Schallwellen in einem Raum, die entweder eine Erhöhung des Schalldruckes oder eine Auslöschung bewirken können. Bei einem phasengleichen Aufeinandertreffen der beiden Schallwellen wird das Signal an dieser Stelle um 6 dB erhöht. Im Falle eines gegenphasigen Aufeinandertreffens kommt es zur gegenseitigen Auslöschung der Schalldruckverläufe. In diesem Fall kann es vorkommen, dass der Schalldruck beinahe bis Null bzw. bis minus unendlich dB verringert wird. Insbesondere an der Stereoabhöre können sich Interferenzen bemerkbar machen, und zwar vor allem bei hohen Frequenzen, da diese eine geringere Wellenlänge besitzen. Sofern das Stereodreieck berücksichtigt wird und man sich in der Mitte der beiden Lautsprecher befindet, wie es unter dem nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird, kann man Interferenzen gut entgegenwirken.

In Bezug auf Interferenzen gilt allgemein:

$$f = \frac{N \cdot C}{2 \cdot d}$$

mit:

f = Frequenz, an der eine Auslöschung oder Anhebung stattfindet in Hertz, in Hz

N = ganze Zahl

d = Umwegstrecke zwischen zwei Signalen in Metern, m

C = Schallgeschwindigkeit: 344 m/s

Auslöschungen treten auf bei: N = 1, 3, 5, 7,...

Auslöschungen treten auf bei: N = (0), 2, 4, 6, 8...

(Vgl. ebd: 34)

Laufzeit des Schalls

Bei der Raumakustik bzw. beim Raumklang ist neben der Schallausbreitung auch der zeitliche Verlauf des Schallfeldes von großer Bedeutung. Zuerst nimmt der Hörer immer den Direktschall wahr. Erst danach treffen die reflektierten Schallwellen auf den Hörer, denn die Wegstrecke ist bei Reflexionen stets länger und somit ist der Diffusschall, d. h. der reflektierte Schall, auch leiser als der Direktschall.

Die Umwegstrecke lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$s = \frac{t \cdot c}{1000}$$

mit:

s = Umwegstrecke in Metern, m

t = Zeitversatz zwischen Direktsignal und Reflexionen in Millisekunden, ms

c = Schallgeschwindigkeit: 344 m/s

Es wird zwischen drei wesentlichen Zeitbereichen unterschieden, in denen die ersten Reflexionen, die sogenannten Early Reflections, beim Hörer ankommen können:

1. Wenn eine Reflexion zwischen 0 und 10 ms nach dem Direktschall eintrifft, entspricht dies einer Umwegstrecke zwischen 0 und 34,4 m. Diese Reflexionen können kritisch werden, wenn sie unsymmetrisch aus nur einer Richtung an der Stereoabhöre ankommen.
2. Der sogenannte Haaseffekt, auch Präzedenzeffekt genannt, wirkt sich hingegen nicht negativ auf die Abhöre aus. Durch diesen Effekt können verzögerte Signale um mehr als 10 dB lauter werden, ohne jedoch dabei den Direktschall zu verändern. Hier treffen Reflexionen 10 bis 30 ms nach dem Direktschall ein, was einer Umwegstrecke von 3,4 bis 10,3 m.
3. Trifft eine Reflexion nach 30 ms ein, wird diese als eigenes Signal wahrgenommen, da die Umwegstrecke in diesem Fall mehr als 10,3 m beträgt. Bei flächigen Klängen muss die Verzögerung allerdings erheblich mehr als 30 ms betragen, um als Echo wahrgenommen zu werden. (Vgl. ebd: 45 f.)

Stereofone Schallwiedergabe

Beim Stereodreieck bildet die Abhörposition ein gleichseitiges Dreieck mit den Lautsprechern L1 und L2, die wiederum gleichzeitig die gleichen Signale aussenden. Diese Anordnung führt dazu, dass der Hörer nicht zwei verschiedene Schallquellen wahrnimmt, sondern eine sogenannte Phantomschallquelle, die sich fiktiv in der Mitte der beiden Lautsprecher befindet. Durch eine Verschiebung der Hörposition nach rechts oder links bzw. weg von der Mittelachse kommt es zu Laufzeit- und Pegeldifferenzen. Somit stellt das Stereodreieck die Voraussetzung für eine stereofone Schallwiedergabe dar. (Vgl. Dickreiter 1997: 124 ff.)

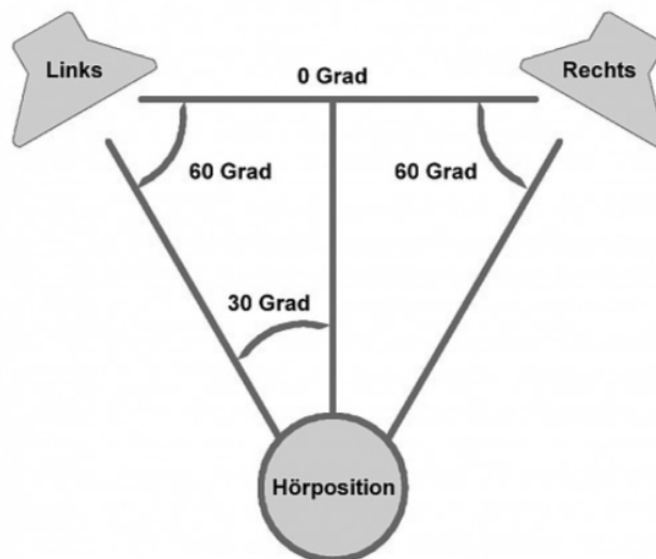


Abbildung 9: Stereodreieck ¹¹

¹¹ http://www.hifi-forum.de/bild/stereodreieck398821_623253.html [19.03.2022].

3.2 Funktion von porösen Absorbern und Resonanzabsorbern

Ziel ist es, im Musikstudio mithilfe von entsprechenden Maßnahmen den Klang des Raumes auf die gewünschte Nutzung anzupassen. Studios, die der Aufnahme oder Abhörung von elektronischer Musik dienen, sollen wenig „klingen“, d.h. der Raum soll möglichst trocken sein und kaum Rückwirkung auf den Höreindruck aufweisen. Eine mittlere Nachhallzeit von 0,5 s im interessierenden Frequenzbereich ist wünschenswert. Der interessierende Bereich liegt beim betrachteten Studio zwischen den Oktavfrequenzen von 63,5 Hz bis 4000 Hz. Zur Regulierung der Nachhallzeit kommen poröse Absorber, Plattenschwinger sowie Loch- und Schlitzplattenschwinger zum Einsatz. Allgemein wird bei Raumakustikmodulen zwischen Absorbern und Resonatoren unterschieden. Im geplanten Studio werden poröse Absorber für den mittleren und hohen Frequenzbereich mit Plattenschwingern für den Tieftonbereich sowie Lochplattenschwinger für mittlere Frequenzen kombiniert. Dadurch gelingt es, einen möglichst linearen und lückenlosen Frequenzverlauf zu erzielen.

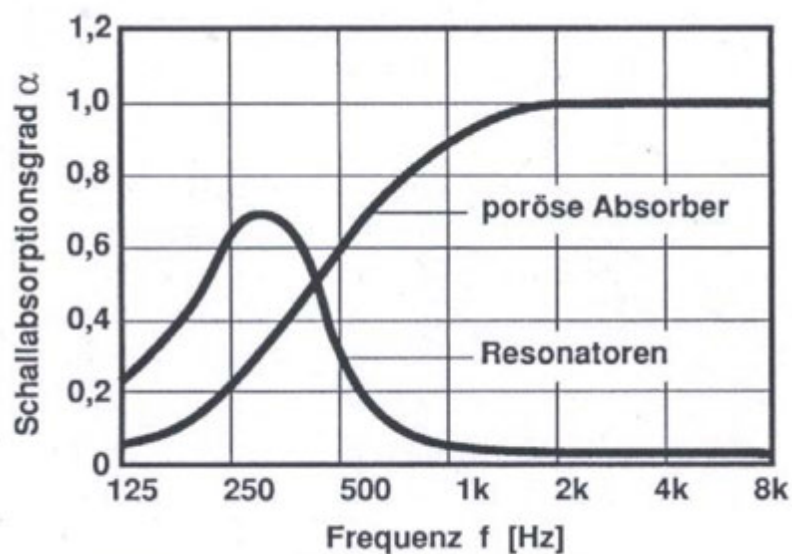


Abbildung 10: Prinzipieller Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades ¹²

¹² Fasold/Veres 1998: 70

In der obigen Abbildung wird der prinzipielle Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades von porösen Absorbern und Resonatoren dargestellt. Es wird verdeutlicht, dass durch die geschickte Kombination von porösen Absorbern mit Plattenschwingern eine linearer Frequenzverlauf und somit eine optimale Raumakustik geschaffen werden kann.

3.2.1 Poröse Absorber

Unter dem Aspekt der kostenoptimierten Bearbeitung der Raumakustik eignet sich in einem ersten Schritt die Anordnung von einem hocheffektiven porösen Absorber. Dies ist beispielsweise Mineralfaser, Schaumstoff oder wie im vorliegenden Fall Caruso-Iso-Bond, ein Material aus Polyester-Faser. Bei der Auswahl des Materials spielen neben finanziellen Aspekten auch gesundheitliche Gründe, ökologische Gesichtspunkte oder Fragen bezüglich der Brennbarkeit eine Rolle. Mineralfaser wird von vielen Anwendern wegen gesundheitlicher Bedenken abgelehnt. Schaumstoff, welcher in der Form von pyramidenförmigen schwarzen Platten häufig verwendet wird, weist im Brandfall eine lebensbedrohliche Rauchentwicklung auf. Als alternativer Schaumstoff käme beispielsweise Basotec bzw. Melaminharzschäumstoff in Betracht. Der spätere Studienutzer hatte mehrere Quadratmeter des Caruso-Iso-Bond Materials zur Verfügung. Mit diesem Absorber wird der mittlere und hohe Frequenzbereich bestmöglich und vor allem kostenoptimiert bearbeitet. Wie in Tabelle des Absorptionskoeffizienten zu entnehmen ist, ist dieses Material auch unterhalb von 500 Hz wirksam. Somit ist der größte Teil des interessierenden Frequenzbereichs bereits bearbeitet.

Bei porösen Absorbern wird Schallenergie in Wärmeenergie umgewandelt. Die Schallenergie dringt mit einer bestimmten Schnelle in die Poren des Dämmstoffes ein und dadurch entsteht Reibung. Die Voraussetzung für die Funktion eines Dämmstoffes ist die sogenannte Porosität σ , die das Verhältnis zwischen Luftvolumen V_L und Gesamtvolumen V_{ges} beschreibt. Des Weiteren sind der Strukturfaktor s und der längenbezogene Strömungswiderstand r wichtige Kenngrößen von Dämmstoffen. Der längenbezogene Strömungswiderstand steigt mit zunehmender Materialdichte an.

Je dicker die Dämmschicht, umso höher ist der spezifische Strömungswiderstand R_s . Letzterer wird als Verhältnis der Druckdifferenz Δp (in Pa) vor und hinter der Materialschicht zur Geschwindigkeit der durchströmenden Luft u (in m/s) definiert.

Der optimale spezifische Strömungswiderstand liegt zwischen 1 kPa s/m und 3 kPa s/m.

Poröse Absorber werden hauptsächlich für die hohen Frequenzbereiche verwendet. Um bei tiefen Frequenzen eine Wirkung zu erzielen, benötigen poröse Absorber eine beachtliche Schichtdicke. (Vgl. Fasold/Veres 1998: 72 ff.)

Zur Vermeidung von Flatterechos sollten die porösen bei zwei parallelen Wänden möglichst nicht ganz symmetrisch im Raum angebracht werden. Andernfalls können die auftretenden Reflexionen einen negativen Einfluss auf die Musik haben. (Vgl. Mommertz 2008: 13)

Die Absorptionswirkung des Absorbers ist im Bereich eines Schnellemaximus am größten. Im Schnellenullpunkt hat der Absorber so gut wie keine Wirkung. Eine reflektierte Welle, die an einer harten Wand ankommt, besitzt an der Reflexionsfläche einen Schnellenullpunkt, im Abstand von einer $\frac{1}{4}$ Wellenlänge hat die ihr Schnellemaximum. Somit gilt: Je größer der Wandabstand und je dicker die poröse Schicht ist, desto höher ist die Wirksamkeit bei tieferen Frequenzen.

Der Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ , der Absorptionsdicke d , dem Abstand Absorber-Wand a und der Absorption wird auch durch die nachfolgende Abbildung verdeutlicht:

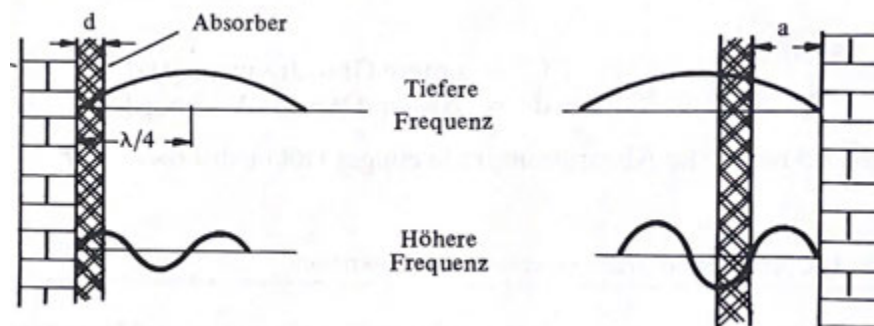


Abbildung 11: Einfluss der Wellenlänge λ , der Absorptionsdicke d und des Wandabstandes a

(Vgl. Dickreiter 1997: 19)

Für den Bau der porösen Absorber wurde der aus Polyester bestehende, dennoch ökologische Dämmstoff Caruso-Iso-Bond der Firma BVS Akustik mit Sitz in Verl verwendet. Hersteller des Dämmstoffs ist CARUSO GmbH mit Sitz in Ebersdorf / Coburg (s. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung in der Anlage).

Das Material weist gemäß Datenblatt unter anderem folgende Eigenschaften auf:

- gute thermische Isolation,
- schallisolierend,
- enthält keine Chemikalien,
- minimale Sorptionsfeuchte,
- sicher gegen Schimmelpilze und Hausstaubmilben,
- 100 % recycelbar und umweltverträglich,
- formbeständig
- schwer entflammbar B1 nach DIN 4102

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der jeweiligen Frequenz. Die Hersteller von Akustikelementen geben die Schallabsorptionswerte in der Regel in Oktaven an. Aus diesem Grund werden die Schallabsorptionswerte auch in dieser Arbeit stets in Oktavwerten gezeigt.

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,10	0,53	0,90	1,09	0,99	1,04	1,05

Tabelle 1: Schallabsorptionsgrad Caruso-Iso-Bond 5 cm

(Vgl. Datenblatt von BVS siehe Anlage)

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,2	0,55	0,91	1,09	1,06	1,07	1,10

Tabelle 2: Schallabsorptionsgrad Caruso-Iso-Bond 10 cm ¹³

¹³ <https://www.don-audio.com/CARUSO-ISO-BONDZ-WLG-040-100mm-Schallabsorber-Akustikvlies> [19.04.2022].

3.2.2 Resonanzabsorber

Plattenschwinger

Plattenschwinger bestehen aus einem stabilen luftdichten Rahmen mit Rückwand und einer davor schwingenden Platte und bilden somit ein Feder-Masse-System. Dabei wirkt die Luft als Feder und die Platte, z.B. Sperrholzplatte als Masse. Letztere sollte mindestens $0,5 \text{ m}^2$ betragen und sollte bei Sperrholz nicht stärker als 5 mm sein, damit sie nicht zu steif wird und optimal schwingen kann. Im Innenraum befindet sich Mineralwolle, die für die Breitbandigkeit des Plattenschwingers verantwortlich ist. Sie darf die Platte nicht berühren, da dies eine Verschlechterung des Wirkungsgrades verursacht.

Die maximale Schallabsorption der Plattenschwinger liegt bei der Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems. Für eine wirkungsvolle Funktion muss die Kantenlänge in jede Richtung mindestens 50 cm betragen und die Fläche des Plattenschwingers darf nicht unter $0,5 \text{ m}^2$ betragen. (Vgl. Friesecke 2007: 158 f.)

Als Plattenschwinger eignen sich verschiedene Materialien. Es können zum Beispiel, Spanplatten, Holzfaserverplatten, MDF, Glas, Holzverkleidungen, Gipskartonplatten, steife Folien, Linoleum, Leder, aber auch Blech verwendet werden. Sowohl Glas als auch MDF sind relativ steif. Dies führt zu einer verminderten Effizienz. Bei Blech sollte darauf geachtet werden, dass es nicht zu sehr nachschwingt und im schlimmsten Fall die Nachhallzeit verlängert, da das Material eine geringere dämpfende Wirkung hat. Um dies zu vermeiden, muss der Hohlraum des Plattenschwingers mit genügend Mineralwolle befüllt werden, sodass diese das Blech leicht berührt. Bei Blech können jedoch bereits kleinere verfügbare Flächen genutzt werden, da auch Baugrößen von unter $0,5 \text{ m}^2$ raumakustische Wirkung entfalten. (Vgl. Fasold/Veres 1998: 83)

Beim Vorhaben wurde Pappelsperrholz für den Bau der Resonanzabsorber gewählt. Obiges Material ist in Baumärkten leicht verfügbar und ist zudem kostengünstig. Das geringe Gewicht sowie die gute innere Dämpfung, geringe Steifigkeit und hohe Stabilität sind ebenfalls positive Eigenschaften, durch die sich das Pappelsperrholz auszeichnet.

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die verschiedenen Holzarten mit der jeweiligen Dichte in Kilogramm pro Kubikmeter:

Holzarten	Raumgewicht in kg/m ³
BIRKEN – Sperrholz	700
BIRKEN – Combi-Sperrholz	620
BUCHEN – Sperrholz	770
FICHTEN – Sperrholz	500
KIEFER – Sperrholz	600
OKOUME – Sperrholz	480
PAPPEL – Sperrholz	460

Abbildung 12: Holzarten ¹⁴

Berechnet wurden die jeweiligen Resonanzabsorber anhand von eigenen Excel-Tools der Firma ABP Akustikbüro Becker & Partner. Der Schallabsorptionsgrad für die unterschiedlichen Resonatoren je Frequenz wurde durch langjährige berufliche Erfahrung im Bereich Raumakustik sinnvoll festgelegt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der jeweiligen Frequenz exemplarisch für einen berechneten Plattenschwinger mit $f_0 = 64$ Hz für die Oktavfrequenzen von 63 bis 4.000 Hz. Weitere Tabellen folgen unter Kapitel 4.3 Berechnung der notwendigen Maßnahmen.

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,7	0,3	0,1	0,07	0,06	0,06	0,06

Tabelle 3: Schallabsorptionsgrad exemplarisch für einen Plattenschwinger

¹⁴ <https://www.yumpu.com/de/document/read/4867630/eigenschaften-sperrholz> [05.03.2022].

In der nachfolgenden Abbildung wird der prinzipielle Aufbau eines Plattenschwingers dargestellt. Die Skizze stammt aus einem alten Projekt innerhalb des Akustikbüros Becker & Partner. Nach diesem Schema wurden ebenfalls die Mitschwinger für das beabsichtigte Studio in der Zenettistraße gebaut. Das Hasengitter wird benötigt, damit die Mineralwolle nicht die schwingende Platte berührt.

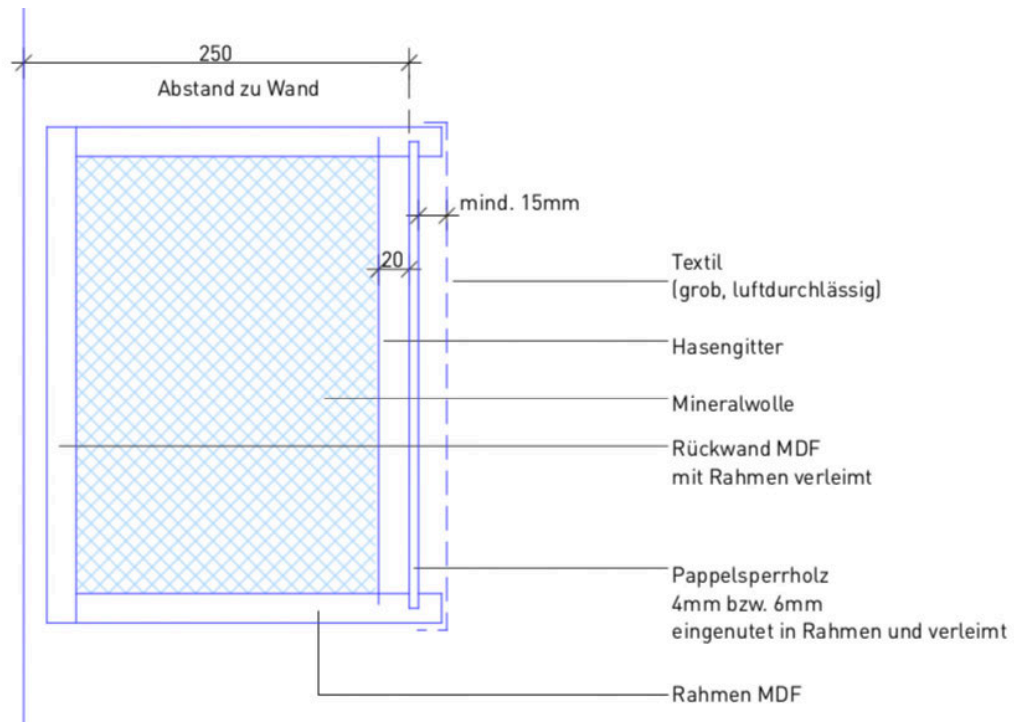


Abbildung 13: Skizze Plattenschwinger (ABP Akustik)

Das eingeschlossene Luftvolumen erfüllt nur dann seine Funktion als Feder, sofern der Wandabstand d näherungsweise kleiner als ein Zwölftel der Wellenlänge ist.

Durch nachfolgende Formel wird der Wandabstand begrenzt:

$$d \leq \lambda_0/12 \leq 2800/f_0$$

Wird der maximale Wandabstand überschritten, kann es vorkommen, dass bei festen Platten die Platteneigenfrequenz im tieffrequenten Bereich hörbar wird. Die Platteneigenfrequenz erzeugt ein flaches Absorptionsmaximum und kann mit $f_{PL} = 4t$ Hz bestimmt werden. Meist werden schwere und feste Platten sowie eine geringe Bautiefe für einen Plattenschwinger bevorzugt. Somit liegt die Platteneigenfrequenz in der Regel unter 50 Hz und hat wenig Einfluss. Der Wandabstand sollte mindestens $d \leq \lambda_0/100 \leq 340/f_0$ betragen. (Vgl. Fasold/Veres 1998: 84)

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Resonanzfrequenzen von Plattenschwingern in Abhängigkeit von Wandabstand d_L und flächenbezogener Masse m' der Platten:

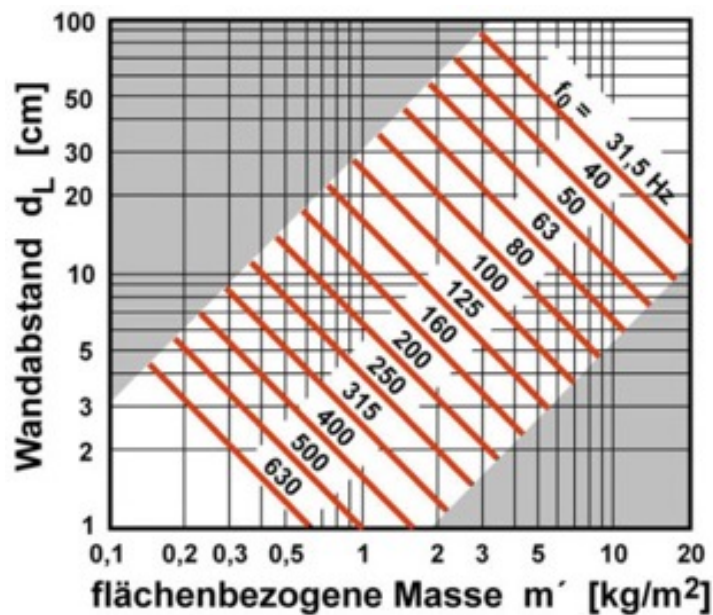


Abbildung 14: Resonanzfrequenz von Plattenschwingern ¹⁵

Lochplattenschwinger

Eine weitere Form der Resonanzabsorber stellen die Lochplattenschwinger dar. Die Öffnungen sind in der Regel gleichmäßig verteilt und können in Form von Schlitz, Kreisen, Quadraten etc. in die Platte gefräst sein. Der Aufbau eines Lochplattenschwinger ist vergleichbar mit dem des Plattenschwinger.

Die Absorption wird bestimmt durch die Auswahl von Plattendicke, Lochdurchmesser bzw. Schlitzbreite, Lochflächenverhältnis und Wandabstand. Durch mehrlagige Lochplatten oder schräggestellte sowie gewölbte Platten kann die Breitbandigkeit des Absorbers erhöht werden.

¹⁵ Fasold/Veres 1998: 83

Lochplattenschwinger sind eher im mittleren Frequenzbereich zwischen 200 und 400 Hz wirksam sind. Ihre Funktionsweise ist mit der eines Helmholzresonators vergleichbar. Im Grunde aber funktionieren sie wie Plattenschwinger, nur dass anstatt der schwingenden Platte die Lochplatte zum Einsatz kommt. Die Platte muss in diesem Fall nicht schwingen, da durch die Luftlöcher Resonanz entsteht. Hinter der Lochplatte befindet sich wie bei den Plattenschwingern ein poröser Absorber wie beispielsweise Mineralwolle. Die Mindestfläche sollte 1 m^2 betragen, damit der Lochabsorber wirksam ist.

Lochplattenschwinger zeigen ihre Wirkung insbesondere im Frequenzbereich zwischen 200 und 400 Hz. Da die Resonanz anders als bei Plattenschwingern durch die Luftlöcher entsteht, muss die Lochplatte nicht schwingen. Die Lochplatte sollte eine Oberfläche von mindestens 1 m^2 aufweisen. (Vgl. Friesecke 2007:150 ff.)

Der Lochflächenanteil sollte bei Lochplattenschwingern mehr als 30 % der Oberfläche betragen. Weiterhin ist anzumerken, dass der Lochabstand kleiner als $\lambda/2$ und die Lochtiefe $h^* = h + 1,6 \cdot r$ kleiner als $\lambda/4$ sein muss. (Vgl. Sinambari / Sentpali 2014: 326)

Mikroperforierter Plattenschwinger

Bei Lochplattenschwingern kann auch auf den Dämmstoff im Hohlraum verzichtet werden. Damit die faserfreien Schallabsorber einwandfrei funktionieren, verwendet man dünne Platten (bis ca. 8 mm), die mit sehr kleinen Löchern versehen werden. Der Durchmesser der Öffnungen sollte ca. 0,3 bis 2,0 mm betragen. (Vgl. Fasold/Veres 1998: 87)

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Beispiel für einen mikroperforierten Absorber:

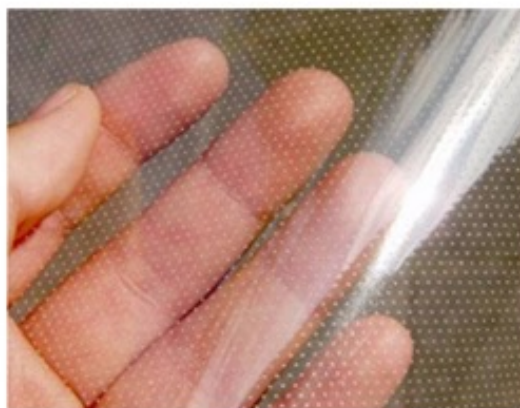


Abbildung 15: Mikroperforierter Folienabsorber (ABP Akustik)

Helmholtzresonatoren

Zuletzt sollte noch der Helmholtzresonator genannt werden, selbst wenn er nicht Bestandteil der Planung ist. Beim Helmholtzresonator stellt der Resonatorhals die Masse und die eingeschlossene Luft bzw. das Resonatorvolumen, die Feder des Feder-Masse-Systems dar.

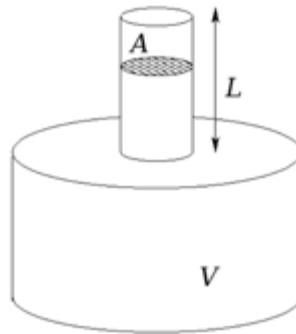


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau eines Helmholtzresonators ¹⁶

(Vgl. Fasold/Veres 1998: 87 f.)

¹⁶ <https://www.rohde.at/helmholtzresonator> [03.04.2022].

3.3 Berechnungsverfahren

Sabinesche Formel

Die Dimensionierung der raumakustischen Maßnahmen im Studio erfolgte in erster Linie über die bereits oben erwähnte Sabinesche Formel. Nach dieser Formel gilt, je größer der Raum und je geringer das Absorptionsvermögen der Raumbegrenzungsflächen, umso länger die Nachhallzeit.

Sie ergibt sich aus: $T = 0,163 \cdot \frac{V}{A}$

mit:

T = Nachhallzeit in s

V = Raumvolumen in m³

A = Absorptionsvermögen in m²

(Vgl. Dickreiter 1997: 32)

Nachhallzeit nach Eyring

Mit der etwas komplizierter nach Eyring benannten Formel lässt sich ebenfalls die Nachhallzeit berechnen.

Sie ergibt sich aus: $T = 0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \alpha)}$

mit:

T = Nachhallzeit in s

V = Raumvolumen in m³

α = mittlerer Absorptionskoeffizient des Raumes

S = Raumgesamtoberfläche in m²

(Vgl. Friesecke 2007: 47)

Äquivalente Schallabsorptionsfläche A

Das Schallabsorptionsvermögen A, also die Gesamtabsorption einer Raumbegrenzungsfläche oder eines Raumes ergibt sich aus dem Absorptionsgrad α und der absorbierenden Fläche S.

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \alpha_3 \cdot S_3 + \dots$$

mit:

A = Äquivalente Schallabsorptionsfläche A

α = mittlerer Absorptionskoeffizient des Raumes

S = Raumgesamtoberfläche in m²

(Mommertz 2008: 15)

Schalldruckpegel des Direktschalls

Der Schalldruckpegel des Direktschalls eines Lautsprechers in einer bestimmten Entfernung lässt sich wie folgt berechnen:

$$L_{\text{SPL}} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{ak}}}{1 \text{ pW}} \right) - 10 \cdot \log (4\pi r^2)$$

mit:

L_{SPL} = Schalldruckpegel in dB_{SPL}

P_{ak} = akustischer Leistungspegel des Lautsprechers in W (in der Praxis ca. 1-2% des elektrischen Eingangspegels)

r = Abstand zur Schallquelle in m (Für die Diffus-schallberechnung muss für r der Hallradius r_{H}) eingesetzt werden.

Plattenschwinger

Die Arbeitsfrequenz eines Plattenschwingers bzw. die Frequenz, bei welcher sich die schwingende Platte in Resonanz befindet wird mit der nachfolgenden vereinfachten Formel berechnet werden:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{m' d}}$$

mit:

f_0 = Resonanzfrequenz in Hz

m' = Flächenspezifische Masse der Platte oder Folie in kg/m^2

d = Tiefe des Luftpolsters hinter der Platte oder der Folie in cm

(Vgl. Friesecke 2007: 149)

Helmholtzresonator

Die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_0 = 170 \sqrt{\frac{S}{V \cdot (t + 2\Delta t)}} \text{ Hz}$$

mit:

S = Fläche des Resonatorhalsquerschnittes in cm^2

V = Resonatorvolumen in dm^3

t = Resonatorhalslänge (Materialdicke) in cm

$2\Delta t$ = Mündungskorrektur in cm

(Vgl. Fasold/Veres 1998: 88)

Lochplattenschwinger

Berechnung der Oberfläche eines runden Lochs:

$$A_L = r^2 \cdot \pi$$

mit:

A_L = Oberfläche des Lochs in m^2

r = Radius des Lochs in m

Berechnung der Oberfläche eines rechteckigen Lochs:

$$A = l_L \cdot b_L$$

mit:

A_L = Oberfläche des Lochs in m^2

l_L = Länge des Lochs in m

b_L = Breite des Lochs in m

Für die Perforation gilt allgemein:

$$p = \frac{N \cdot A_L}{A_P}$$

mit:

p = Perforation der Platte in %

A_L = Oberfläche des Lochs in m^2

N = Anzahl der Löcher

A_P = Breite des Lochs in m^2

Formel zur Berechnung der Resonanzfrequenz des Lochplattenschwingers:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1000 \cdot p}{d \cdot (t + 1,23 \cdot r)}}$$

mit:

f_0 = Resonanzfrequenz des Lochplattenschwinger in Hz

c = Schallgeschwindigkeit: 344 m/s

p = Perforation der Frontplatte in %

d = Dicke des Luftpolsters hinter der Platte in cm

t = Lochtiefe in mm

r = Radius der Löcher in mm

(Vgl. Friesecke 2007: 151 f.)

3.4 Messverfahren

Messung der Nachhallzeit

Die Messung der Nachhallzeit wird in der Norm DIN EN ISO 3382-2 von September 2008 beschrieben. Der Titel lautet: Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen.

Es gibt zwei Verfahren, die sich zur Messung der Nachhallzeit eignen: Das Verfahren des abgeschalteten Rauschens und das Verfahren der integrierten Impulsantwort. Der Frequenzbereich kann je nach Zweck der Messungen variieren. Wenn keine bestimmten Anforderungen an die Frequenzbänder festgelegt sind, sollte der Frequenzbereich für das Kurzverfahren mindestens von 250 Hz bis 2.000 Hz gehen. Für das Präzisionsverfahren und das Standardverfahren muss der Frequenzbereich bei Oktavbändern von 125 Hz bis 4.000 Hz und bei Terzbändern von 100 Hz bis 5.000 Hz gehen.

Beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens setzt sich die Gesamtzahl der Abklingvorgänge aus mehreren Abklingvorgängen an jeder Position zusammen. Es kann aber auch für jeden Abklingvorgang eine neue Position gewählt werden. Voraussetzung dafür, ist, dass die Gesamtzahl der Abklingvorgänge den Festlegungen entspricht.

Als Sendeposition werden in der Regel die Ecken des Raumes gewählt. Die Mikrofonpositionen sollten, wenn möglich, mindestens eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt liegen, d. h. im üblichen Frequenzbereich ca. 2 m. Der Abstand jeder Mikrofonposition zur nächstgelegenen Raumbegrenzungsfläche sollte bevorzugt eine Viertel Wellenlänge betragen, d.h. normalerweise ca. 1 m. Symmetrische Positionen sind zu vermeiden.

Zwischen den einzelnen Mikrofonpositionen muss genügend Abstand vorhanden sein. Weiterhin darf sich das Mikrofon nicht zu nah an der Schallquelle befinden, um einen zu starken Direktschall-Einfluss zu vermeiden.

Als Signal sollte ein breitbandiges statisches oder pseudo-statistisches elektrisches Rauschen gewählt. Die Schallquelle muss einen Schalldruckpegel erzeugen, der ausreichend ist, um eine Abklingkurve sicherzustellen, die mindestens 35 dB über dem Störgeräuschpegel im entsprechenden Frequenzband beginnt. Wenn man T_{30} messen möchte, muss ein Schalldruckpegel gesendet werden, der mindestens 45 dB über dem Störgeräusch liegt.

Die Bandbreite des Signals muss bei einer Messung in Oktavbändern mindestens eine Oktave und in Terzbändern mindestens eine Terz betragen. Es muss bei Terzbändern mit Bandmittenfrequenzen von 100 Hz bis 5 kHz oder bei Oktavbändern der Frequenzbereich von 125 Hz bis 4 kHz abgedeckt sein.

Das Signal (Rauschen) muss mindestens $T/2s$ lang abgestrahlt werden. Bei großen Räumen muss der Raum mindestens 1 s lang angeregt werden.

Alternativ zum abgeschalteten Rauschen kann auch ein kurzes Anregungssignal oder ein Impulssignal verwendet werden.

(Vgl. Norm DIN EN ISO 3382-2 von September 2008 „Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen“)

In der nachfolgenden Grafik wird die Nachhallzeit noch einmal bildlich dargestellt:

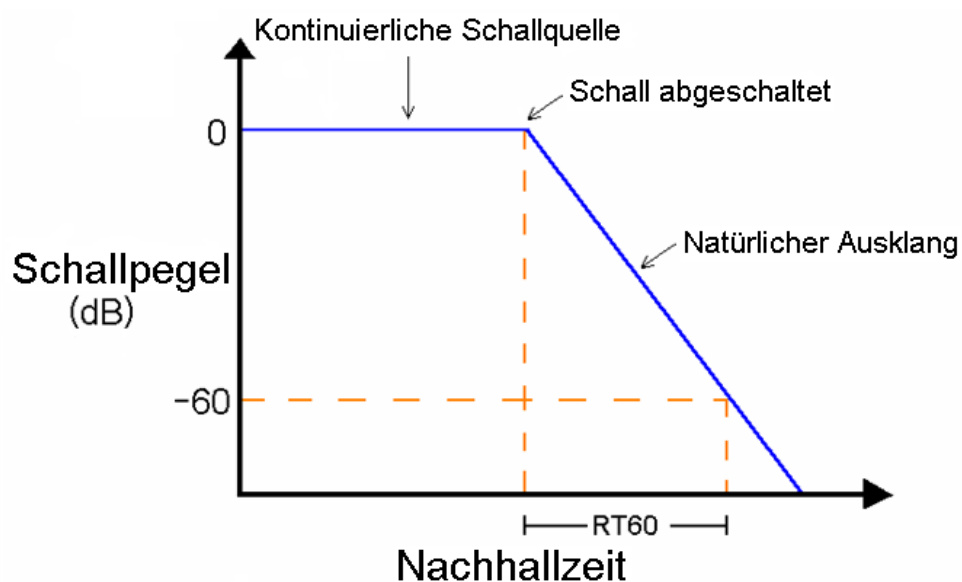


Abbildung 17: Nachhallkurve¹⁷

¹⁷ <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60.htm> [28.04.2021].

Wasserfalldiagramm

Anhand des sogenannten dreidimensionalen Wasserfalldiagramms, in dem Pegel, Frequenz und Zeit dargestellt werden, kann man einen schnellen Eindruck über die frequenzabhängige Nachhallzeit eines Raumes gewinnen. In einem Wasserfalldiagramm ist ersichtlich, wie ein Raum bei den jeweiligen Frequenzen ausschwingt. (Vgl. Friesecke 2007.:137)

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Beispiel für ein Wasserfalldiagramm:

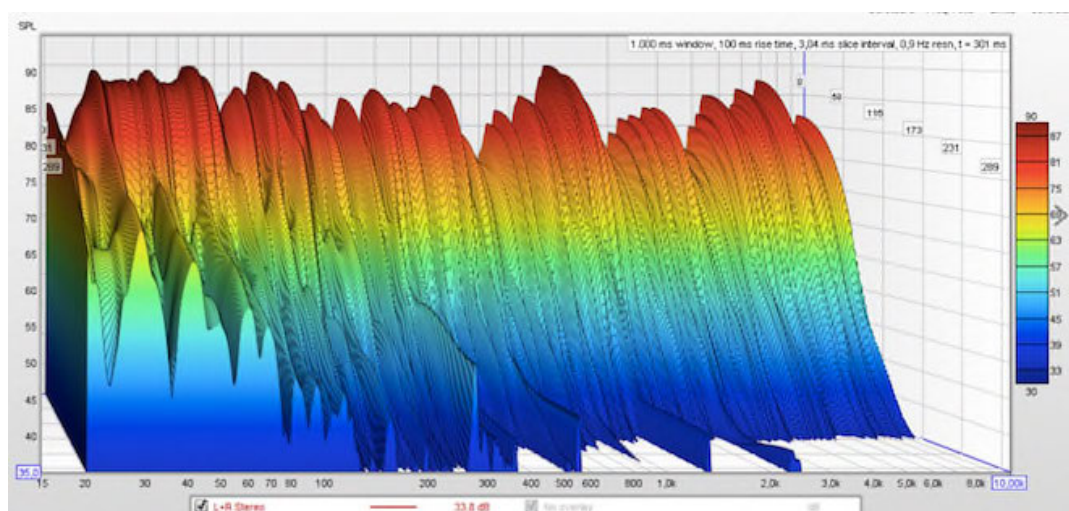


Abbildung 18: Exemplarisches Wasserfalldiagramm ¹⁸

¹⁸ <https://www.heimkino-praxis.de/manuelle-akustische-messungen/> [24.01.2022].

4 Bearbeitung der Raumakustik im Musikstudio

Mit der Aufarbeitung der theoretischen Grundlagen der Raumakustik wird in den nachfolgenden Kapiteln die Herangehensweise an die Erstellung sowie Umsetzung eines Raumakustikkonzepts für das Studio ausgeführt.

Nach der Festlegung der Anforderungen erfolgt eine Beschreibung der durchgeführten Nachhallzeitmessungen. Anschließend werden der Bau der Module sowie die Umsetzung der Maßnahmen im Studio erläutert. Das Kapitel wird mit der messtechnischen Analyse und einem Wirksamkeitsnachweis abgeschlossen.

4.1 Festlegung der Anforderungen

Generell wird zwischen Bau- und Raumakustik unterschieden. Bei der Bauakustik geht es in erster Linie um von außen eindringende Störgeräusche, kurz gesagt um die Schalldämmung des Gebäudes. Normalerweise stellt die Dimensionierung von bauakustischen Maßnahmen ebenfalls einen wichtigen Aspekt bei der Planung dar. Im Musikstudio soll auch mit gehobener Lautstärke abgehört werden können, dies auch zu Uhrzeiten, in welchen z.B. Nachbarn bereits schlafen wollen. Weiterhin sollen Geräusche von außen nicht die Musikproduktion stören. Aufgrund der Lage im Untergeschoss des Gebäudes und der angrenzenden Einheiten, welche als Lager und ähnlichem dienen, kann der Schallschutz jedoch beim vorliegenden Projekt durchaus vernachlässigt werden.

Unter Raumakustik versteht man u. a. die Nachhallzeit, den Hallradius sowie die Verzögerung und Richtung der ersten Reflexionen. Die entsprechenden Anforderungen an ein Studio sind von dem jeweiligen Zweck abhängig. So ist in Tonstudios für Gesang und Sprachaufnahmen generell der untere Frequenzbereich von 100-400 Hz wichtig, da hier auch der Sprachbereich liegt. In dem geplanten Musikstudio in der Zenettistraße soll hauptsächlich elektronische Musik produziert, aber auch bearbeitet werden. Diese Art von Musik zeichnet sich dadurch aus, dass sie in der Regel aus rein synthetisch hergestellten Klängen besteht und keine Instrumente im klassischen Sinn beinhaltet. Ein weiteres Merkmal ist der stark ausgeprägte Bass welcher in sehr kurzen Abständen wiederholt wird.

Aus diesem Grund ist hier insbesondere der Frequenzbereich zwischen 63-125 Hz relevant, da dieser Bereich ausschlaggebend für den guten Klang der Bässe ist und mit besonders viel Energie ausgestattet ist. Speziell der Frequenzbereich um 80 Hz animiert Clubbesucher zum Tanzen. Die schnell aufeinanderfolgenden Beats verlangen nach einer möglichst kurzen Nachhallzeit in diesem Bereich.

Synchronstudios für Sprachaufnahmen zum Beispiel weisen in der Regel sehr kurze Nachhallzeiten wie 0,2 oder 0,3 s auf. Bei klassischer Musik ist es meist wünschenswert, dass die Musikinstrumente noch nachklingen und die Nachhallzeit des Aufnahme Raumes höher ist. Bei elektronischer Musik wird im Gegensatz zur klassischen Musik, bei der die Klänge der Musikinstrumente oftmals nachklingen sollen, ein reiner, sehr „trockener“ Klang angestrebt.

Die Anforderungen an das Tonstudio wurden in Absprache mit den Bauherren und auf der Grundlage von vergleichbaren Projekten der letzten Jahre im Akustikbüro Becker und Partner festgelegt. In einem ersten Schritt wurde eine mittlere Nachhallzeit von 0,6 - 0,7 s angestrebt. In Gesprächen mit dem Betreiber und seinen Wünschen wurde in einem zweiten Schritt die mittlere Nachhallzeit weiter auf 0,5 s im Studio in der Zenettistraße reduziert.

Im Oktavband von 63 Hz und 80 Hz wird ein leichter Anstieg der Nachhallzeit als akzeptabel angesehen, da der Raum dadurch wärmer wirkt. Dies hat auch einen praktischen Vorteil, denn die Maßnahmen sind diesem Bereich besonders kostenintensiv.

4.2 Messung der Nachhallzeit

Die Messungen der Nachhallzeit sowie die Auswertung dieser wurden durch meine Person durchgeführt, um diese für die weiteren Berechnungen zu verwenden.

Sie wurden gemäß der Norm DIN EN ISO 3382 – Teil 2; Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen vom September 2008 vorgenommen.

Während der Messungen wurde sowohl die Mikrofonhöhe als auch -position variiert. Zudem erfolgten die Messungen mit drei unterschiedlichen Lautsprecherpositionen. Der Dodekaeder-Lautsprecher befand sich dabei immer in einer Ecke. Zu Beginn und gegen Ende wurde der Grundgeräuschpegel der Umgebung bzw. des Raumes messtechnisch erfasst. Die dargestellte Nachhallzeit setzt sich aus 3 Messungen mit je 6 Einzelwerten zusammen.

Die messtechnisch ermittelten Nachhallzeiten wurden zunächst von 125 Hz bis 4 kHz in Terzschritten bestimmt und für die weiteren Berechnungen dann in Oktaven umgewandelt.

4.2.1 Messaufbau im Studio

Das Studio befindet sich im Untergeschoss eines Geschäftsgebäudes auf dem Schlachthofgelände in der Zenettistraße 2 in München. Die Grundfläche des Raumes beträgt ca. 51 m² und die Höhe 3,20 m. Zum Zeitpunkt der Messung befanden sich keine Möbel im Studio. Es waren zudem keine weiteren Personen anwesend.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Mikrofon- und Lautsprecherpositionen markiert.

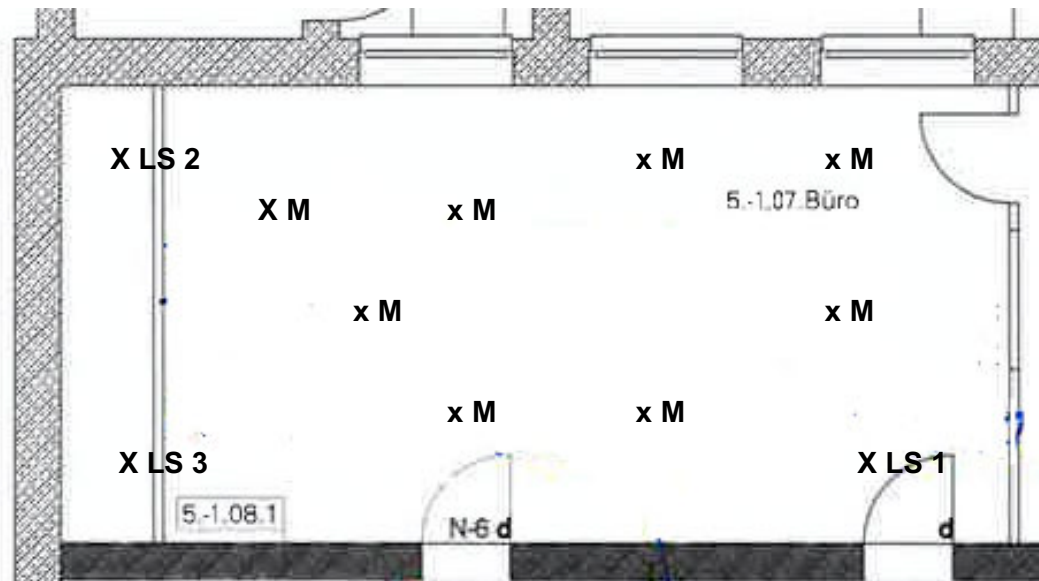


Abbildung 19: Grundriss Studio

4.2.2 Messgeräte

Das Messsystem bestand bei den durchgeführten Messungen aus einem Messgerät Soundbook MK 2 mit dazugehöriger Software Samurai der Firma SINUS Messtechnik GmbH. Weiterhin war ein Kondensator-Mikrofon der Firma Mikrotech Gefell GmbH. Dieses besteht aus dem Vorverstärker MV 203 und einer $\frac{1}{2}$ - Zoll Mikrofonkapsel MK 221. Als Quelle wurde ein sogenannter Dodekaeder-Lautsprecher mit Rundumcharakteristik verwendet. Die Boxen des Lautsprechers stammen von der Firma Brüel & Kjær. Zudem kam ein Verstärker der Firma Behringer bei den Messungen zum Einsatz und es wurden geeignete Kabel verwendet.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die verwendeten Messapparaturen dargestellt:



Abbildung 20: Messgerät Typ Soundbook ¹⁹



Abbildung 21: Lautsprecher Dodekaeder ²⁰



Abbildung 22: Mikrofonskapsel ²¹

¹⁹ <https://www.microtechgefell.de/mikrofonkapsel?wl=463-MK221> [01.04.2022].

²⁰ ABP Akustikbüro Becker & Partner

²¹ <https://www.microtechgefell.de/mikrofonkapsel?wl=463-MK221> [01.04.2022].

4.2.3 Messergebnis Ist-Zustand

In der nachfolgenden Grafik sind die Ergebnisse der ersten Nachhallzeitmessung ersichtlich. Dieser Zustand stellt die Ausgangssituation für die nachfolgenden Berechnungen und Messungen dar. Zu diesem Zeitpunkt handelte es sich um einen „nackten“ Raum ohne jegliche Möbel.

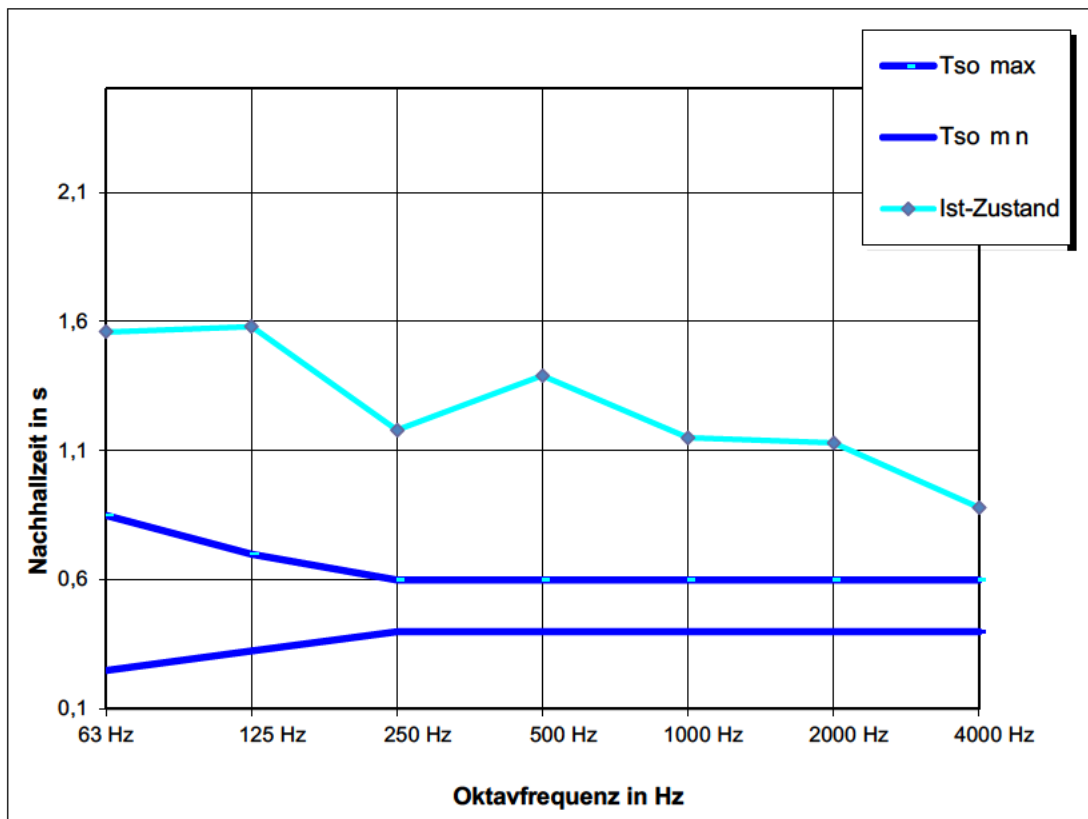


Abbildung 23: Ist-Zustand ohne Maßnahmen

In obiger Abbildung weicht die hellblaue Kurve der messtechnisch ermittelten Nachhallzeit deutlich vom dunkelblauen Toleranzschlauch ab. Zum Zeitpunkt der ersten Nachhallzeitmessung lag die mittlere Nachhallzeit im Raum bei 1,2 s.

Die Nachhallzeit des unbehandelten Raums liegt in allen Frequenzbereichen deutlich über dem Soll-Bereich und somit komplett außerhalb des Toleranzschlauches. Die mittlere Nachhallzeit des Musikstudios liegt zu diesem Zeitpunkt bei 1,44 s. Die gewünschte mittlere Nachhallzeit wurde gemeinsam mit dem Bauherrn auf 0,5 s festgelegt.

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Nachhallzeit T	1,56 s	1,58 s	1,18 s	1,39 s	1,15 s	1,13 s	1,56 s

Tabelle 4: Nachhallzeiten des unbehandelten Raumes

4.3 Berechnung der notwendigen Maßnahmen

. Die Berechnungen für die vorliegende Arbeit wurde mittels eigenen Excel-Tools innerhalb des Akustikbüros durchgeführt.

Eine Schwierigkeit bei der Planung stellte die Kachelwand mit den Rohren an der Rückwand des Raumes dar. Durch die Rohre ist eine absolut symmetrische Verteilung der Resonanzabsorber nicht möglich.

Da der Einsatz des porösen Absorbers bereits feststand, wurde in einem ersten Schritt ermittelt, wie viele Quadratmeter von diesem Material benötigt werden. Dabei wurden auch zukünftig geplante Einbauten wie Regale, ein Sofa sowie ein kleiner Teppichbelag rechnerisch berücksichtigt. Die entsprechenden Absorptionswerte wurden anhand von Angaben aus der Literatur wie z.B. dem Buch von Fasold & Veres konservativ abgeschätzt.

Ergänzend hierzu wurden mögliche Wirkungsbereiche weiterer Maßnahmen festgelegt. Hierbei sollte möglichst der gesamte interessierende Frequenzbereich abgedeckt werden.

Die Resonatoren wurden für den Bereich der Oktavfrequenzen 63 Hz und 125 Hz gewählt. Der wichtige Frequenzbereich um 80 Hz wurde mit Plattenschwinger, die bei ca. 70 Hz und 80 Hz wirksam sind, ergänzt.

Die somit ermittelte Nachhallzeit wies noch eine Erhöhung zwischen 100 Hz und 125 Hz auf. Deshalb wurden die obigen Maßnahmen mit einem Resonator bei 120 Hz vervollständigt.

Die zur Verfügung stehenden Plattenstärken des Pappelsperrholzes von 4 mm, 6 mm und 8 mm wurden nach den benötigten Abstimmfrequenzen entsprechend aufgeteilt, um möglichst gleiche Modultiefen zu erlangen. Die Rohdichte des verwendeten Pappelsperrholzes beträgt 390 kg/dm^3 .

Für die Auslegung der Raumakustik wurden die **Resonanzabsorber** wie folgt dimensioniert:

Tieffrequenter Mitschwinger Typ C: 63 Hz

Pappelsperrholz

Wandabstand = 290 mm

Plattenmasse = $3,2 \text{ kg/m}^2$

Plattenstärke = 8 mm

Benötigte Fläche = 6 m^2

Tieffrequenter Mitschwinger Typ E: 72 Hz

Pappelsperrholz

Wandabstand = 220 mm

Plattenmasse = $3,2 \text{ kg/m}^2$

Plattenstärke = 8 mm

Benötigte Fläche = 6 m^2

Tieffrequenter Mitschwinger Typ D: 80 Hz

Pappelsperrholz

Wandabstand = 240 mm

Plattenmasse = $2,4 \text{ kg/m}^2$

Plattenstärke = 6 mm

Benötigte Fläche = 10 m^2

Tieffrequenter Mitschwinger Typ G: 124 Hz

Pappelsper Holz

Wandabstand = 150 mm

Plattenmasse = 1,6 kg/m²

Plattenstärke = 4 mm

Benötigte Fläche = 4 m²

In den nachfolgenden Tabellen sind die jeweiligen Schallabsorptionsgrade der berechneten Mitschwinger dargestellt. Diese wurden anhand von langjähriger Erfahrung im Ingenieurbüro ABP Akustikbüro Becker & Partner abgeschätzt.

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,7	0,3	0,1	0,07	0,06	0,06	0,06

Tabelle 5: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger f = 63 Hz

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,4	0,1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabelle 6: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger f = 72 Hz

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	10 kHz	20 kHz	40 kHz
α_w	0,4	0,2	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06

Tabelle 7: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger f = 83 Hz

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,3	0,7	0,3	0,1	0,07	0,06	0,06

Tabelle 8: Schallabsorptionsgrad Plattenschwinger f = 123 Hz

Weiterhin wurde ein **Lochplattenschwinger** für das Raumakustikkonzept wie folgt dimensioniert:

Lochplattenschwinger Typ B: 120 Hz

Holzvertäfelung gelocht

Lochtiefe = 30 mm

Lochdurchmesser = 8 mm

Lochflächenverhältnis = 4,91%

Lochabstand = 32 mm

Wandabstand = 300 mm

Benötigte Fläche = 8 m²

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_w	0,55	0,7	0,55	0,45	0,35	0,25	0,55

Tabelle 9: Schallabsorption Lochabsorber f = 120 Hz

Zusätzlich beinhalten die Berechnungen Module mit Caruso-Iso-Bond. Die Fläche für ein Modul beträgt 0,78 m². Insgesamt befinden sich 12 Module an den Wänden.

Weiteres übrig gebliebenes Material wurde vor den Lochabsorber, welcher über der Abhörposition angebracht ist, montiert.

In der Mitte des Raumes befindet sich an der Decke ein mit einer Kette montierte Europalette, die ebenfalls mit dem Dammstoff befüllt ist. Diese befand sich jedoch von Anfang an im Raum, sodass dieses bei den Berechnungen vernachlässigt werden kann.

Zum Schluss wurde noch zwei poröse Absorber vor die Mitschwinger auf der Höhe der Abhörposition montiert.

Auf zusätzliche poröse Absorber kann bei kleineren Studios verzichtet werden. Es ist jedoch sinnvoll weitere Einbauten wie Regale geschickt zu platzieren, damit diese die Diffusität des Raumes zusätzlich erhöhen.

4.4 Umsetzung der Maßnahmen im Studio

Neben der reinen theoretischen Berechnung der benötigten Maßnahmen hat deren Platzierung im Raum einen nicht unerheblichen Einfluss auf den raumakustischen Effekt. Der Arbeitsplatz mit Mischpult und Computerbildschirmen war im vorderen Drittel des Raumes geplant.



Abbildung 24: Grundriss Studio mit Stereodreieck

Bei den Bässen bzw. tiefen Frequenzen bauen sich Druckmaxima in den Ecken des Raumes auf, insbesondere, wenn dort auch die Anregung erfolgt. Aus diesem Grund sind dort folglich auch die tieffrequenten Maßnahmen besonders effektiv. Das heißt, der Bereich hinter und seitlich neben den Lausprechern, zwischen den ersten Caruso-Iso-Bond-Modulen und den Rohren nach oben hin bis zum Ende der Kacheln ist entscheidend für die tieffrequenten Maßnahmen in Form von Resonatoren. Diese sollten möglichst symmetrisch auf beiden Seiten verteilt werden, um ein gutes Stereobild beim Abhören von Musik zu erzeugen. Weiterhin erfolgte auch eine symmetrische Aufteilung der unterschiedlichen Arbeitsfrequenzen bzw. Modultypen. Eine auf beiden Seiten identische Aufteilung ist im vorliegenden Fall aufgrund der vorhandenen Rohre jedoch nicht vollständig möglich.



Abbildung 25: Nackter Raum mit Kachelwand

Die porösen Absorber werden an den Wänden angebracht. Sie können aber auch an der Decke befestigt werden. Bei der Positionierung sollten nachfolgende Aspekte berücksichtigt werden:

Die Platzierung sollte sofern räumlich möglich erst hinter der Abhörposition am Arbeitsplatz erfolgen. Um Flatterechos zu vermeiden sind versetzte Anordnungen an jeweils gegenüberliegenden Wänden zu bevorzugen. Bei etwas größeren Räumen muss auch die rückwertige Wand absorbierend gestaltet sein. Reflexionen an der rückwertigen Wand können bei etwas größeren Räumen zu einer Verzerrung der Musik führen, wenn diese nach 10 Millisekunden am Ohr eintreffen.

In diesem Bereich eignen sich zusätzlich auch Regaleinbauten zur Erhöhung der Diffusität.

Der betrachtete Raum weist an einer Seite eine Fensterfront mit insgesamt 3 Fenstern auf, welche sich hinter der Abhörposition befinden. Um das Tageslicht zu erhalten, bleiben diese unbehandelt. Sollten die unbehandelten schallharten Flächen zu einem späteren Zeitpunkt stören, kann ein absorbierender Vorhang nachgerüstet werden, welcher bei Bedarf vor dieses Bauteil gezogen wird. Ein entsprechender Hersteller für schallabsorbierende Vorhänge ist z. B. Création Baumann.

4.4.1 Poröse Absorber

Die porösen Absorber wurden mit dem oben beschriebenen Material Caruso-Iso-Bond aufgebaut. Die vorhandene Plattengröße betrug $0,78 \text{ m}^2$ und gab somit die Größe eines Moduls vor. Es wurde eine Stärke von 5 cm gewählt. Der Rahmen wurde aus 4 cm starken und 50 cm breiten Birkenholzplatten hergestellt und wurde knapp 1 cm kürzer als die Abmessungen der Dämmstoffplatte gefertigt, damit diese von alleine hält und nicht geleimt werden muss. Das Material musste folglich nicht zurechtgeschnitten werden.

Die Rahmen bestehen aus Fichtenholz und wurden verschraubt. Die Module wurden schließlich in 20 cm Abstand zur Wand (bis zur Oberkante des Modulrahmens) mit Schrauben befestigt.



Abbildung 26: Poröse Module Detail

Insgesamt befinden sich 12 Module an den Wänden. Diese bestehen zum Teil auch aus zwei Rahmen, die über einen kleinen Steg oben und unten zusammenschraubt sind und mit zwei Schichten Caruso-Iso-Bond befüllt sind.

Die Module können auch mit einem geeigneten Stoff bezogen werden. Hierfür muss ein akustisch durchlässiges Material verwendet werden. Aus Kostengründen wurde beim vorliegenden Projekt auf einen Stoffbezug vorerst verzichtet.

Im Nachhinein wurde zudem festgestellt, dass die Resonatoren ohne Bezug besser zur Optik des Studios passen. Ein entsprechender Hersteller für akustisch durchlässig Stoffe ist zum Beispiel ist z. B. Camirafabrics. Es wurde zu Beginn der Planung bereits ein geeigneter Stoff ausgewählt.

In den nachfolgenden Bildern sind die im Studio montierten porösen Module ersichtlich:



Abbildung 27: Poröse Absorber an der seitlichen Wand



Abbildung 28: Poröse Absorber an der Wand mit Fenstern

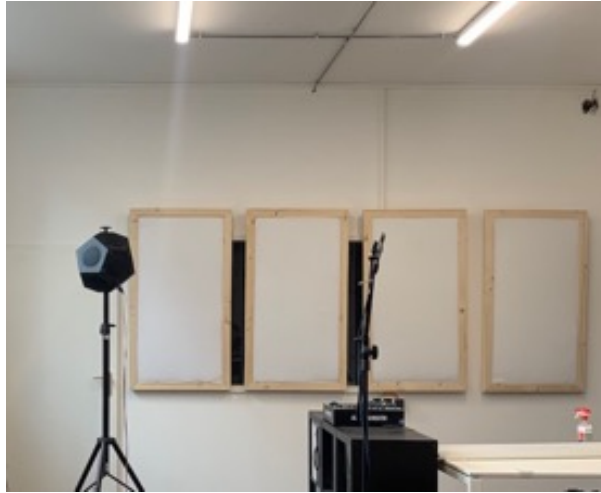


Abbildung 29: Poröse Absorber an der Rückwand



Abbildung 30: doppelagige Poröse Absorber

Es wurden insgesamt vier zweilagige poröse Absorber im Studio installiert. Im hinteren Teil des Raumes befindet sich an der Decke eine mit einer Kette montierte Europalette, die ebenfalls mit dem Dammstoff befüllt ist. Auf dem Bild befindet sich das Element noch an einer anderen Position.



Abbildung 31: Module aus Caruso-Iso-Bond Europalette

Ganz zum Schluss wurden noch zwei überschüssige Module vorne vor die Mitschwinger montiert, damit bei der Abhörposition der Klang nicht ganz so hart ist und etwas Bedämpfung bei höheren Frequenzen vorhanden ist. Zudem wurde vor die Lochplatten an der Decke ebenfalls Caruso-Iso-Bond-Dämmstoff installiert, um die Höhen an der Abhörposition etwas zu bedämpfen.

4.4.2 Resonatoren

Konstruktion der Resonanzabsorber

Die Rahmen der Plattenschwinger wurden aus 19 mm starken MDF-Platten zusammengebaut. Die für die Lochabsorber verwendeten MDF-Platten weisen eine Stärke von lediglich 13 mm auf. Die Stärke wurde auch hier so gewählt, um das Gewicht der Lochabsorber zu reduzieren, da diese an der Decke befestigt werden sollten. Die Rückwand der Resonatoren besteht ebenfalls aus MDF-Platten.

Die Tiefe des Rahmens der Resonatoren wurde dabei unterschiedlich gewählt. Die einzelnen Abmessungen sind unter Abschnitt „Anzahl und Maße der Resonatoren“ aufgelistet.

Der gesamte Korpus wurde luftdicht mit SMP Klebedichtstoff clear von Würth ausgeführt. In die Rahmen wurde für die unterschiedliche Positionierung der schwingenden Sperrholzplatten in dem vorab berechneten Abstand eine schmale Holzlatte in den Rahmen geschraubt, wodurch die Sperrholzplatte fixiert werden sollte. Des Weiteren wurden Querlatten zur Versteifung der Module montiert.

Die Befüllung der Resonatoren erfolgte mit Mineralwolleplatten Typ W nach DIN 18 165, längenbezogener Strömungswiderstand $R_s \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, dicht gestoßen verlegt (z.B. ISOVER Akustic SSP).

Zu Beginn war das Beziehen der Mitschwinger mit einem entsprechenden Stoff der Firma Camirafabrics beabsichtigt. Schließlich hat sich der Bauherr jedoch dagegen entschieden, da sich die Resonatoren optisch gut in das Studio integrieren ließen.



Abbildung 32: Rückwand Resonator



Abbildung 33: Schmale Holzlatte und Querlatte



Abbildung 34: Befüllen mit Dämmstoff



Abbildung 35: Rahmen der Resonatoren

Lochplattenschwinger

Die Bohrung der Löcher erfolgte manuell. Dieser Arbeitsschritt war mit hohem Aufwand verbunden. Zu Beginn war geplant, die Löcher zu fräsen. Dies hat jedoch Schwierigkeiten mit sich gebracht und somit fiel die Entscheidung schließlich auf die Durchführung mittels Handbohrmaschine. Die Punkte, an denen gebohrt werden sollte, wurden vorab gemäß den Vorgaben mit einem Bleistift in 32 mm Abstand aufgezeichnet und anschließend manuell mit einer Hand-Bohrmaschine in das Brett gebohrt. Dieser Vorgang erwies sich als sehr zeitintensiv. Pro Tag konnte lediglich eine Lochlatte produziert werden. Insgesamt wurden 6 Lochplattenschwinger hergestellt, was ca. 60 % der vorab berechneten notwendigen Fläche von 8 m² entspricht. Die Gesamtfläche an integriertem Lochabsorber beträgt 4,5 m². Auf die Lochplatte wurde überschüssiges Caruso-Iso-Bond-Material eingefügt, um die Höhen im Bereich der Abhöre zu bedämpfen. Dieses wurde ebenfalls nicht zugeschnitten. Beim vorliegenden Projekt wurden die Lochabsorber mittels einer Schiene an der Decke über der Abhörposition befestigt.



Abbildung 36: Lochabsorber

Die nachfolgenden Listen zeigen die Anzahl und Maße der verwendeten MDF-Platten und Pappelsperholzplatten.

Verbaute unbeschichtete MDF- Platten

Typ C:

19 mm

08x 1000 x 800

16x 1038 x 340

16x 800 x 340

08x 800 x 150

Typ E:

19 mm

04x 1500 x 1000

08x 1538 x 270

08x 1000 x 270

04x 1000 x 150

Typ D1:

19 mm

04x 1400 x 1000

08x 1438 x 270

08x 1000 x 270

04x 1000 x 150

Typ D2:

19 mm

04x 800 x 800

08x 838 x 340

08x 800 x 340

Typ D3:

19 mm

02x 1500 x 700

04x 1538 x 270

04x 700 x 270

02x 700 x 150

Typ G1:

19 mm

02x 1200 x 1000

04x 1238 x 200

04x 1000 x 200

02x 1000 x 100

02x 1200 x 100

Typ G2:

19 mm

02x 1241 x 720

02x 2538 x 200

02x 700 x 200

02x 720 x 125

03x 720 x 100

Typ B:

12 mm

12x 1226 x 390

12x 620 x 390

06x 1200 x 620

28 mm

06x1200x620

Verbaute Pappelsperrholzplatten:**Typ C:** 999 mm x 799 mm Pappelsperrholz Stärke 8 mm (Masse 3,2 kg/m²) → 8 Stück**Typ D1:** 1399 mm x 999 mm Pappelsperrholz Stärke 6 mm (Masse 2,4 kg/m²) → 4 Stück**Typ D2:** 799 mm x 799 mm Pappelsperrholz Stärke 6 mm (Masse 2,4 kg/m²) → 4 Stück**Typ D3:** 1499 x 699 mm Pappelsperrholz Stärke 6 mm (Masse 2,4 kg/m²) → 2 Stück**Typ E:** 1499 mm x 999 mm Pappelsperrholz Stärke 6 mm (Masse 3,2 kg/m²) → 4 Stück**Typ G1:** 1199 mm x 99 mm Pappelsperrholz Stärke 4 mm (Masse 1,6 kg/m²) → 2 Stück**Typ G2:** 1240 mm x 719 mm Pappelsperrholz Stärke 4 mm (Masse 1,6 kg/m²) → 2 Stück

Verlegeplan für die Resonatoren

Es wurde ein Verlegeplan in Form einer Handskizze für die Aufteilung der Module angefertigt. Dieser ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Positionierung der Resonatoren erfolgte an der rechten und linken Seite symmetrisch. Aufgrund des Aufbaus von Druckmaxima in den Ecken wurden dort die Resonatoren für die ganz tiefen Frequenzen installiert. Von diesen Mitschwingern war die geringste Stückzahl vorhanden. Um diese optimal zu nutzen, wurden diese im oben genannten Bereich platziert, die Resonatoren knapp hinter die Abhörposition. Dahinter sind keine Mitschwinger mehr angebracht, sondern nur noch poröse Absorber.

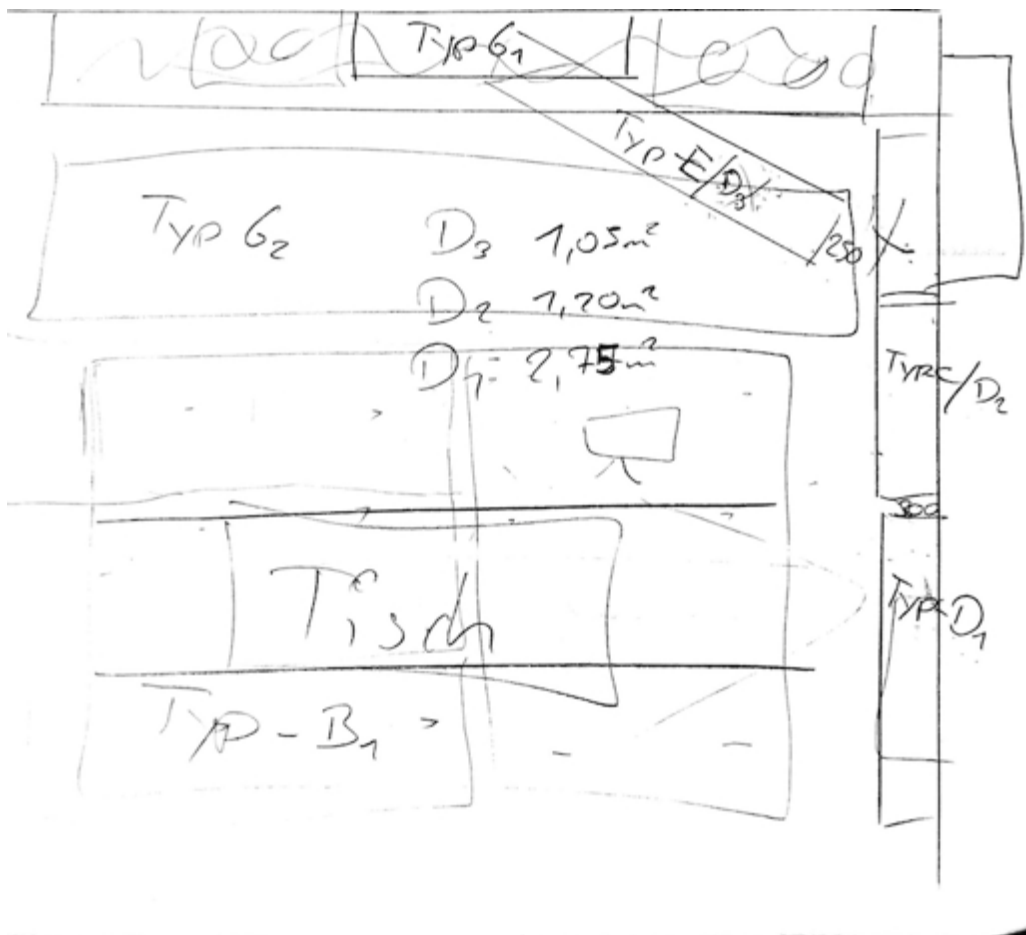


Abbildung 37: Verlegeplan für die Resonatoren

Positionierung der Resonatoren im Musikstudio

Im folgenden Bild sind die einzelnen Plattenschwinger-Typen bezeichnet. Dies entspricht ebenfalls der Aufteilung der Resonatoren zum Zeitpunkt der Nachmessung. Auf der Abbildung sind auch die porösen Absorber ersichtlich, die auf der Höhe der Abhörposition vor die Mitschwinger angebracht wurden.

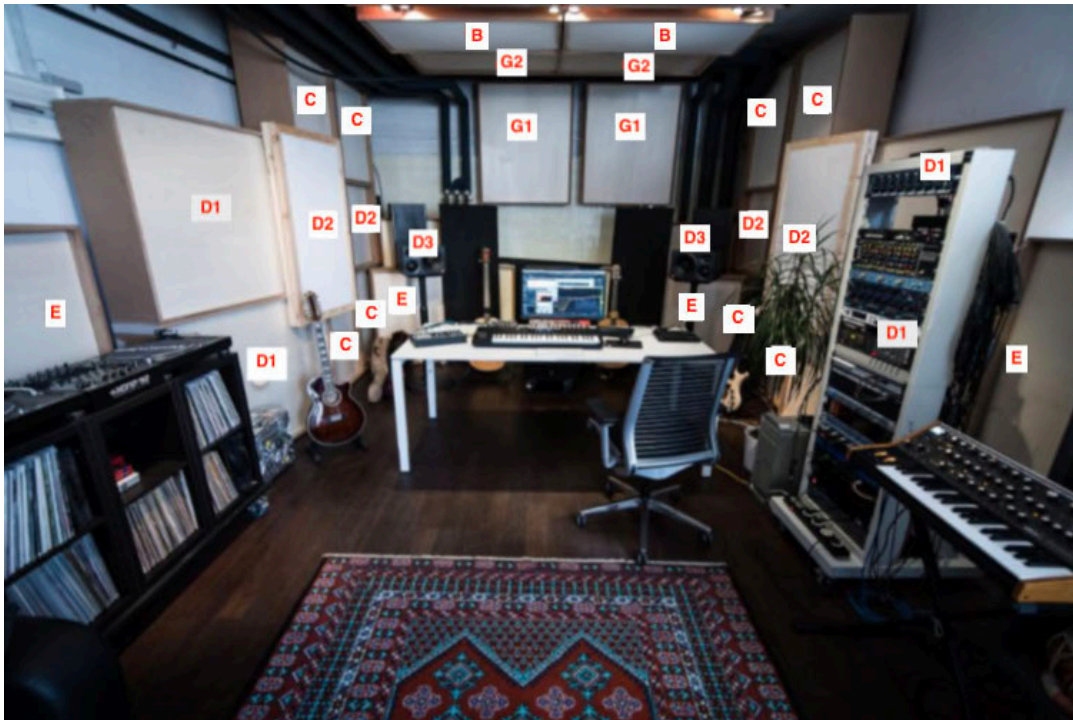


Abbildung 38: Positionierung der Mitschwinger

Mitschwinger-Typen:

Typ C: 63 Hz

Typ E: 72 Hz

Typ D: 80 Hz

Typ G: 124 Hz

Typ B: 120 Hz

4.5 Messtechnische Analyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der raumakustischen Untersuchung beschrieben und die durchgeführten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit geprüft.

4.5.1 Zwischenmessung

Nach Einbringung der porösen Absorber in das Studio wurde eine Zwischenmessung durchgeführt, um die Wirkung dieser zu überprüfen.

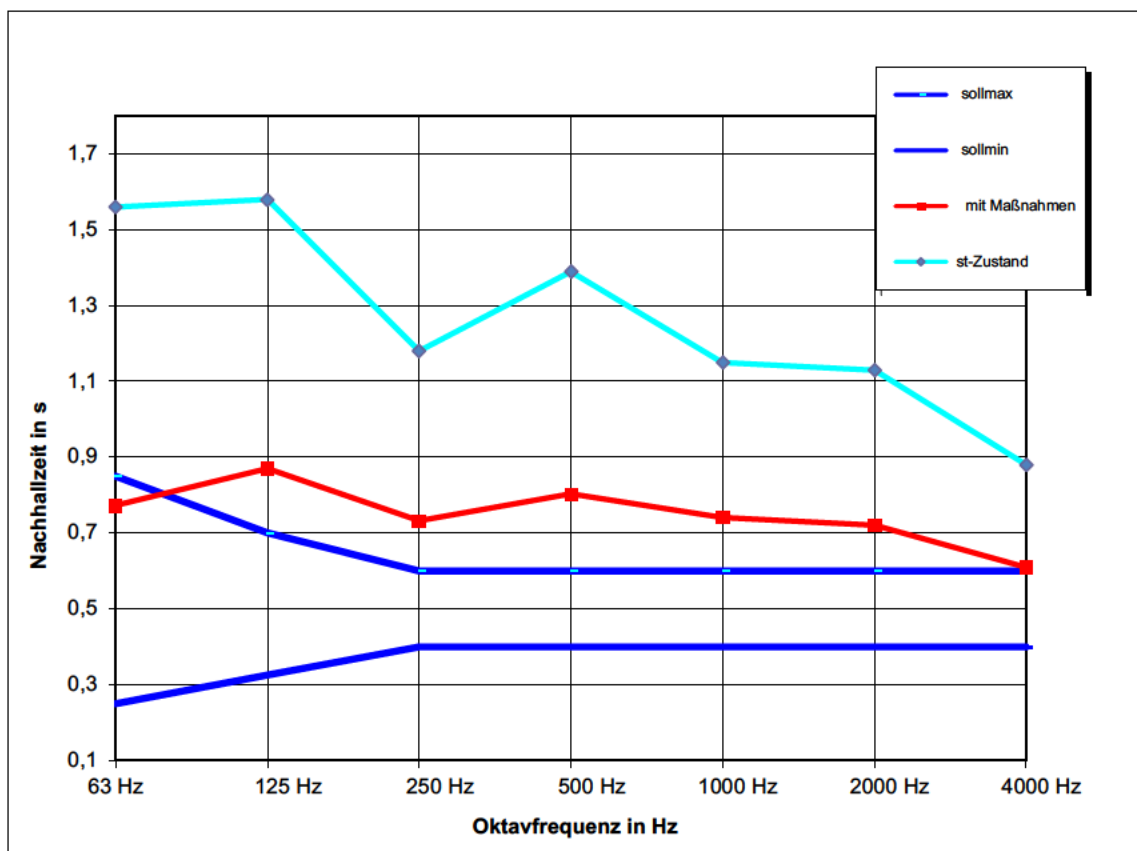


Abbildung 39: Zwischenmessung

Im Studio waren zu diesem Zeitpunkt 12 poröse Absorber an den Wänden montiert. Im mittleren bis oberen Frequenzbereich konnte die Nachhallzeit mittels der eingebrachten porösen Absorber erfolgreich abgesenkt werden.

4.5.2 Nachmessung

In der nachfolgenden Abbildung sind die Ergebnisse der Nachmessung ersichtlich. Zum Zeitpunkt der Nachmessung waren alle Maßnahmen im Studio umgesetzt.

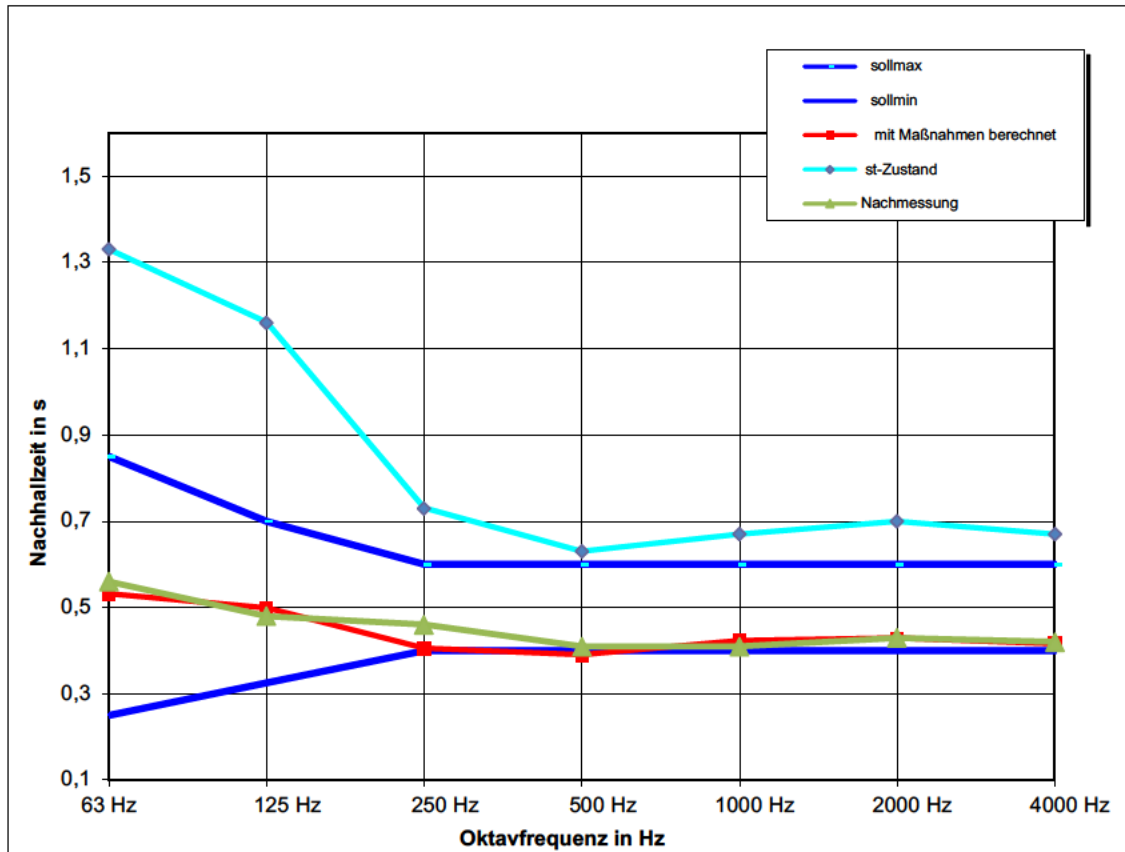


Abbildung 40: Nachhallzeitmessung Nachmessung

Die türkise Kurve zeigt die Messergebnisse der Zwischenmessung, die rote Kurve hingegen die berechnete Nachhallzeit und die grüne Kurve die finale Nachhallzeitmessung nach Umsetzung aller Maßnahmen.

4.5.3 Wirksamkeitsnachweis

Mit den umgesetzten Maßnahmen konnten die Zielvorgaben an die Raumakustik im Studio erreicht werden.

Als sehr positiv ist insbesondere das Ergebnis im tieffrequenten Bereich zwischen 63 Hz und 200 Hz zu bewerten. Der Erfolg des Projektes resultiert mit Sicherheit aus der guten Ausführungsqualität der selbst konstruierten porösen Absorbern und Resonatoren.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Absorptionskoeffizienten für die Plattenschwinger gut abgeschätzt waren.

Die obige grüne Kurve, die die gemessene Nachhallzeit im Studio nach Umsetzung aller erforderlichen Maßnahmen darstellt, stimmt sehr gut mit der vorab berechneten roten Nachhallzeitkurve überein. Die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Raumakustik liegen somit im optimalen Toleranzschlauch (blaue Kurven).

Es war beabsichtigt, im Nachgang der überprüfenden Nachhallzeitmessung eine Feinjustierung mittels Bitumen-Schwerfolie vorzunehmen. Diese kann in Quadrate ausgeschnitten werden und auf die Mitschwinger geklebt werden. Im vorliegenden Fall wurde auf die Nachjustierung verzichtet, da die Messergebnisse auch ohne die Feinabstimmung zufriedenstellend waren. Eine weitere Verbesserung war somit nicht notwendig.

In der nachfolgenden Tabelle werden die raumakustischen Vorgaben, die berechnete Nachhallzeit sowie die gemessene Nachhallzeit mit und ohne Maßnahmen dargestellt.

Frequenz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sollwert Max	0,9 s	0,7 s	0,6 s	0,6 s	0,6 s	0,6 s	0,6 s
Sollwert Min	0,3 s	0,3 s	0,4 s	0,4 s	0,4 s	0,4 s	0,4 s
T IST-Zustand	1,56 s	1,58 s	1,18 s	1,39 s	1,15 s	1,13 s	0,88 s
T berechnet	0,53 s	0,50 s	0,41 s	0,40 s	0,43 s	0,44 s	0,43 s
T Zwischenmessung	1,33 s	1,16 s	0,73 s	0,63 s	0,67 s	0,70 s	0,67 s
T Nachmessung	0,56 s	0,48 s	0,46 s	0,41 s	0,41 s	0,43 s	0,42 s

Tabelle 10: Nachhallzeiten



Abbildung 41: Endergebnis Musikstudio

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurden die theoretischen Grundlagen der Raumakustik und die einzelnen Schritte der Messtechnik und der raumakustischen Berechnungen dargelegt, die zur Auslegung einer optimalen Raumakustik im Studio führen. Es wurde zudem der Bau der porösen Absorber und Resonatoren schrittweise zum Teil auch anhand von Bildern und Skizzen beschrieben. Anschließend wurden die Ergebnisse zusammengefasst und unter dem Abschnitt „Wirksamkeitsnachweis“ bewertet.

Wie in Abbildung 37 zu erkennen ist, konnte mit den berechneten Maßnahmen eine optimale Raumakustik im geplanten Tonstudio in der Zenettistraße in München erzielt werden. Dabei wurden anhand von Nachhallzeitmessungen im geplanten Studio, in dem hauptsächlich elektronische Musik produziert wird, verschiedene raumakustische Maßnahmen mittels Berechnungen dimensioniert. Es wurden auf Grundlage der berechneten Angaben zuerst poröse Absorber aus Holzrahmen und gefüllt mit dem Dämmstoff Caruso-Iso-Bond für die mittleren bis hohen Frequenzbereiche gefertigt und anschließend Resonatoren sowie für die tieferen Frequenzen im Studio selbst angefertigt. Die Resonatoren wurden auf verschiedene Frequenzen abgestimmt. Es wurden Mitschwinger für die Resonanzfrequenzen $f_0 = 63$ Hz, $f_0 = 72$ Hz, $f_0 = 83$ Hz und $f_0 = 123$ Hz sowie Lochabsorber mit $f_0 = 120$ Hz gebaut.

Die Nachmessungen haben bewiesen, dass die akustische Wirkung der selbst gebauten Resonatoren mit den vorab getätigten Berechnungen übereinstimmen. Die abgeschätzten Schallabsorptionswerte der Mitschwinger waren somit korrekt. Die ausgeklügelte Konstruktion der Plattenschwinger hat sich als funktionsfähig erwiesen.

Eine weitere Nachjustierung der selbstgebauten Plattenschwinger war nicht erforderlich, da die Ergebnisse der Nachmessung bereits den gewünschten Erfolg der umgesetzten Maßnahmen im Studio darlegten. Eine Möglichkeit zur Feinabstimmung von Resonatoren bietet der Einsatz von Bitumen-Schwerfolie.

Nach oben sind der raumakustischen Gestaltung keine Grenzen gesetzt. Sie kann immer weiter bis ins Detail ausgebaut und verfeinert werden. Beispielsweise können die Absorber mit einem akustisch durchlässigen Stoff bezogen werden. Somit gibt es bezüglich der Optik auch noch Spielraum. Ein entsprechender Hersteller hierfür ist z. B. Camirafabrics. Des Weiteren können Vorhänge eingebracht werden.

Im vorliegenden Fall sollten ursprünglich akustisch wirksame Vorhänge vor den Fenstern angebracht werden. Diese können z. B. bei der Firma Création Baumann erworben werden.

Die Arbeit hat gezeigt, dass es möglich war, mit sehr geringen Materialkosten von ca. € 4.500 bei dem geplanten Musikstudio einen idealen Raumklang für die Produktion und das Abhören von elektronischer Musik zu schaffen. Normalerweise würden die Kosten bei mindestens € 15.000 liegen.

Bei einem Umzug können alle Module einfach abmontiert und wieder aufgestellt bzw. erneut angebracht werden.

Bis heute gibt es auf dem Markt wenig Material hinsichtlich der raumakustischen Gestaltung von Studios verfügbar. Nach wie vor ist kaum Literatur im Internet oder in Form von Büchern für Interessenten erhältlich. Fest steht, dass jeder Raum anders ist und somit auch unterschiedliche Raummoden aufweist. Mit dieser Arbeit konnte jedoch eine grundsätzliche Bauanleitung zur raumakustischen Gestaltung von Tonstudios geschaffen werden. Die eigenen Raummoden können mit entsprechenden Tools im Internet berechnet werden.

Das Ziel der Masterarbeit wurde erreicht und das im Rahmen der Firma ABP durchgeführte Raumakustik-Projekt konnte somit erfolgreich abgeschlossen werden.

6 **Ausblick**

Weitere Forschungsziele

Ursprünglich war die Anwendung von Laserscanning an einem Mitschwinger im Labor angedacht, um weitere Forschungsergebnisse zu erzielen. Dieses Verfahren wird eingesetzt, um das Schwingungsverhalten eines Bauteils zu untersuchen. Durch die berührungslose Methode kann der Einsatz von zahlreichen Beschleunigungsaufnehmern vermieden werden. Mittels dieser Methode ist es unter anderem möglich, die Auswirkung von Randeinspannungen oder Aussteifungen zu analysieren. Des Weiteren können Auslenkungen und die Schwinggeschwindigkeit eines Elements berechnet werden.²²

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Durch die heutigen Computerprogramme gibt es immer mehr Menschen, die in ihrem Privatbereich kleine Tonstudios einrichten und Musik produzieren, um diese dann anschließend bei sozialen Medien hochzuladen. Es könnten Handbücher für die Praxis aus den durch die Studienarbeit gewonnen Erkenntnisse veröffentlicht werden (*Musikstudio: Do it yourself*). Die Ergebnisse könnten auch bei der Errichtung von privaten Heimkinos genutzt werden und ebenso bei hochwertigen Stereoanlagen zur Verbesserung des Klangs im Wohn- oder Musikzimmers dienen. Wie diese Arbeit gezeigt hat, gibt es in diesem Bereich der Raumakustik keine Standardisierung, jedoch könnte man durchaus weitere Literatur zu diesem Thema anbieten, da hierzu nach wie vor sehr wenig Material in Form von Büchern erhältlich ist, das Bedürfnis danach allerdings stetig wächst.

²² Vgl. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/produktblaetter/ak/laser-scanning-vibrometer.pdf> [09.04.2022].



Abbildung 42: Musikproduktion im Heimbereich²³

Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Die Projektergebnisse können als Grundlage für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten wie zum Beispiel die Masterarbeit herangezogen werden. Das Thema könnte auch für einen Fachvortrag bei einer Tagung interessant sein. Es wäre denkbar, eine Standardmodulserie für tiefe Frequenzen zu entwickeln.

In der Zwischenzeit erfolgten die Auslegung und Umsetzung der Raumakustik für ein weiteres Studio. Der Bau der Module wurde wie beim vorliegenden Projekt eigenständig durchgeführt. Die Ergebnisse waren ebenfalls sehr positiv.

²³ <https://www.heise.de/ct/ausgabe/2014-1-Musik-machen-ohne-Instrumente-2140889.html>
[24.01.2022].

Literaturverzeichnis

Bücher

BORUCKI Hans (Hg.): Einführung in die Akustik. Mannheim, Wien, Zürich 1989.

COX/D'ANTONIO, Trevor J./Peter (Hg.): Acoustic Absorbers and Diffusers., Abingdon, Oxon 2009.

CREMER/MÜLLER, Lothar/Helmut (Hg.): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik – Band I. Stuttgart 1978.

CREMER/MÜLLER, Lothar/Helmut (Hg.): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik – Band II. Stuttgart 1976.

DEUTSCHER NORMAUSSCHUSS (Hg.): Schallabsorptionsgrad-Tabelle. Berlin, Köln, Frankfurt 1968.

DICKREITER Michael (Hg.): Handbuch der Tonstudioteknik. München 1997.

EVEREST, F. Anton (Hg.): The master of handbook pf acoustics. Baltimore USA 2001.

FASOLD/VERES Wolfgang/Eva (Hg.): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis Berlin 2015.

FRIESECKE Andreas (Hg): Studio Akustik - Konzepte für besseren Klang. Bergkirchen 2007.

HUBER, RUNSTEIN, David Miles/Robert E. (Hg.): Modern Recording Techniques. Oxford UK 2005.

KUTRUFF, Heinrich (Hg.): Acoustics. Abingdon, Oxon 2007.

KUTRUFF, Heinrich (Hg.): Room Acoustics. London 2000.

MOMMERTZ Eckard (Hg.): Akustik und Schallschutz - Grundlagen, Planung, Beispiele. München 2008.

MÖSER, Michael (Hg.): Messtechnik der Akustik. Berlin, Heidelberg 2010.

MÖSER, Michael (Hg.): Technische Akustik. Berlin, Heidelberg, 2007.

MÖSER/MÜLLER, Michael/Gerhard (Hg.): Handbuch der Technischen Akustik. Berlin, Heidelberg, 2004.

NEVELL, Philip (Hg.): Recording Studio Design. Burlington MA 2008.

SHEA Mike (Hg): How to build a small budget recording studio. New York 2002.

SINAMBARI/SENTPALI, Gh. Reza/Stefa (Hg.): Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Wiesbade 2014.

WATKINSON, John (Hg.): The Art of Sound Reproduction. Oxford UK 1998.

Normen

DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung. März 2016.

DIN EN ISO 3382: Akustik - Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter. März 2000.

DIN EN ISO 3382-2: Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen. September 2008.

DIN EN ISO 354:2003-12: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Dezember 2003.

Internetquellen

<https://de.wikipedia.org/wiki/Nipper> [24.01.2022].

<https://www.barrierefrei-studieren-koeln.de/erfahrungsberichte/> [24.01.2022].

<https://www.mw-acoustics.com/bassfallen> [16.04.2022].

<https://gikacoustics.de/produkte/tri-trap-bassfalle-sondergroesse/> [16.04.2022].

<https://www.acousticfields.com/how-to-build-a-diaphragmatic-absorber/> [16.04.2022].

<https://www.artnovion.com/educational/tpda> [16.04.2022].

<https://trikustik.at/raummoden-rechner/> [24.01.2022].

http://www.hifi-forum.de/bild/stereodreieck398821_623253.html [19.03.2022].

<https://www.don-audio.com/CARUSO-ISO-BONDZ-WLG-040-100mm-Schallabsorber-Akustikvlies> [19.04.2022].

<https://www.rohde.at/helmholtzresonator> [03.04.2022].

<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60.htm> [28.04.2021].

<https://www.heimkino-praxis.de/manuelle-akustische-messungen/> [24.01.2022].

<https://www.microtechgefell.de/mikrofonkapsel?wl=463-MK221> [01.04.2022].

<https://www.microtechgefell.de/mikrofonkapsel?wl=463-MK221> [01.04.2022].

<https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/produktblaetter/ak/laser-scanning-vibrometer.pdf> [09.04.2022].

Anlagen

BVS – Atmosphäre statt Stress

Dämmung mit **Caruso-Iso-Bond®**



Schadstoffgeprüfter Dämmstoff

Wir verarbeiten CARUSO-ISO-BOND®, einen ökologischen Dämmstoff zur Wärme- und Schallisolierung aus 100% Polyesterfasern. Dieser enthält keinerlei chemische Bindemittel oder Zusatzstoffe, hat beste Dämmwerte, ist schwer entflammbar, verrottungssicher, formbeständig und ist frei von Schimmelpilzbefall und Milben.

Wir empfehlen ergänzend zu unseren Akustikplatten bei Wand und Deckenverkleidung die zusätzliche Bedämmung mit CARUSO-ISO-BOND® zu einer noch besseren Schallabsorption.

Eigenschaften

- **schwer entflammbar, erfüllt die Bedingungen B1** nach DIN 4102, Teil 1, sowie diverse andere Brandschutznormen, z.B. BS 5852-P2, California-Norm, MVSS 203, F1, K1 usw.
- **gute thermische Isolationseigenschaften** bis WLG 0,035 (035) DIN 52612
- **gute schallisolierende Eigenschaften** > 5 kNs/m⁴ DIN 52213
- UV-stabil
- **verrottungssicher**
- **keine Chemikalien enthalten** (notwendig bei einigen anderen Produkten für Mottenschutz, Schimmelpilzbefall, Schwerentflammbarkeit)
- **toxikologisch unbedenklich, schadstoffgeprüftes Textil** nach Öko-Text Standard 100, Prüf-Nr. 94.0.0541 – Forschungsinstitut Hohenstein
- **minimale Sorbtionsfeuchte**
- **sicher gegen Schimmelpilzbefall, Hausstaubmilben**
- 100% recycelbar, umweltverträglich
- hautsympatisch, allergikerfreundlich, atmungsaktiv
- 100% sortenrein, flexibel, formbeständig und zugfest
- Fremdüberwacht durch FIW München
- Deutsche Baustoff-Zulassungs-nr. Z-23.1 3-278
- Anwendungstyp W/WL

BVS – Seit 1990 in der Möbelindustrie.

Ausgestattet mit modernsten CNC-Sägen und Bohranlagen fertigen wir für Sie ganz individuell nach Ihren Vorstellungen. Wir beraten Sie gern.



BVS Akustik GmbH & Co. KG
Chromstraße 103 | 33415 Verl
Tel.: +49 (0) 5246 70310 - 0 | Fax: +49 (0) 5246 70310 - 20
Info@bvs-akustik.de | bvs-akustik.de [english language selectable]



B1

Brandschutzklasse

Schwer entflammbar

Schallabsorption
CARUSO-ISO-BOND®

Frequenz HZ	Schallabsorptionsgrad as
100	0,37
125	0,47
160	0,75
200	0,78
250	0,99
315	0,94
400	1,10
500	1,10
630	1,08
800	1,03
1000	1,04
1250	0,99
1600	1,03
2000	1,03
2500	1,06
3150	1,05
4000	1,04
5000	1,06



Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten

Bautechnisches Prüfamt

Eine vom Bund und den Ländern
gemeinsam getragene Anstalt des öffentlichen Rechts
Mitglied der EOTA, der UEAtc und der WFTAO

Datum: 12.03.2020 Geschäftszeichen: III 12.1-1.23.11-37/19

Zulassungsnummer:
Z-23.1.3-278

Antragsteller:
CARUSO GmbH
Garnstadter Straße 38-39
96237 Ebersdorf/Coburg

Geltungsdauer
vom: **14. März 2020**
bis: **14. März 2025**

Zulassungsgegenstand:
Wärmedämmstoff aus Polyesterfasern
"CARUSO-ISO-Bond"

Elektronische Kopie der abZ des DIBt: Z-23.1.3-278

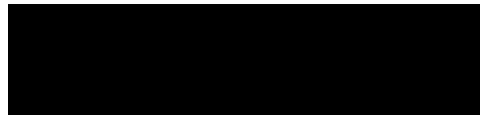
Der oben genannte Zulassungsgegenstand wird hiermit allgemein bauaufsichtlich zugelassen.
Dieser Bescheid umfasst acht Seiten.

DIBt

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

München, 26.04.2022



Ort, Datum

Vorname Nachname