

Martin Müller

Entwurf und Konstruktion eines Modell-Hallraumes im Maßstab 1:10

Toningenieur-Projekt

Technische Universität Graz

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Projektbetreuung: DI Jamilla Balint

Graz, November 2016

Danksagung

In erster Linie gilt mein Dank der Betreuerin dieser Projektarbeit, DI Jamilla Balint, die mir nicht nur die Möglichkeit gab dieses Toningenieurs-Projekt durchzuführen, sondern mich auch zu jeder Zeit und auf allen Ebenen mit Geduld und Nachsicht beraten und unterstützt hat.

Weiters möchte ich mich insbesondere bei meiner Mutter Gerda, meiner Schwester Johanna, meinem Bruder Robert, meiner Nichte Julia und meinen Freunden Michael und Michael bedanken. Ihr alle seit mir in Summe zu jedem Zeitpunkt der Arbeit bei jedem Schritt zur Seite gestanden und habt mir den Rücken gestärkt.

Martin Müller,
Graz, November 2016

This document is set in Palatino, compiled with [pdfL^AT_EX2_ε](#) and [Biber](#).

The L^AT_EX template from Karl Voit is based on [KOMA script](#) and can be found online: <https://github.com/novoid/LaTeX-KOMA-template>

Inhaltsverzeichnis

Abstract	viii
1. Einführung	1
2. Theorie einer Hallraummessung	3
2.1. Absorptionsgradmessung	3
2.2. Akustik in Hallräumen	9
2.3. Luftabsorption	13
3. Konstruktion des Miniaturhallraums	16
3.1. Auswahl der Materialien	16
3.2. Abmessungen und Konstruktion	17
3.3. Halterahmen	20
3.4. Diffusoren	23
3.5. Kabeldurchführungen	26
4. Schallquelle	30
4.1. Planung der Schallquelle	30
4.2. Vermessung der Lautsprecher	31
4.3. Lautsprechergehäuse	39
4.4. Bau der Schallquelle	41
4.5. Weitere Konstruktionsideen zur Schallquelle	42
4.5.1. Medizinische Experiment-Transducer	43
4.5.2. PVDF Transducer	44
4.5.3. PZT Piezo-Keramik Transducer	47
4.5.4. Elektrostatische Transducer	51
5. Software	53
5.1. Anforderungen an die Software	53

Inhaltsverzeichnis

5.2.	Beschreibung der ita-Funktionen	53
5.3.	Beschreibung der grafischen Benutzeroberfläche	54
5.4.	Beschreibung des Workflows	60
6.	Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354	62
6.1.	Vorgaben der Norm	62
6.2.	Umlegung auf den Modellhallraum und das Projekt	63
6.3.	Durchführung von Probemessungen im Modellhallraum	65
6.4.	Durchführung der Eignungsprüfung im Modellhallraum	70
7.	Résumé und Ausblick	77
7.1.	Zusammenfassung	77
7.2.	Offene Fragen	77
7.3.	Verbesserungen und Ausblick	78
A.	Dateienverzeichnis	82
A.1.	Schriftliche Arbeit, Ordner "/Doc/"	82
A.2.	Dateien der Präsentation	83
A.3.	MATlab-Dateien (*.m und *.fig), Ordner "/HRP Program/"	83
A.4.	Messergebnisse des Programms (*.mat), Ordner "/Results/"	84
A.5.	Ergebnis-Grafiken (*.fig), Ordner "/Figures/"	86
A.6.	Bilddateiverzeichnis, Ordner "/Doc/figures/"	87
B.	Geräteverzeichnis	90
C.	Plattendiffusorenverzeichnis	91
Literatur		92

Abbildungsverzeichnis

2.1. Auswertung der Nachhallzeit: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/RT60_measurement.jpg	3
2.2. Verlauf der Luftabsorptionskorrektur nach Bass et al.	15
3.1. 3D-Konzeptzeichnung des Modellhallraums	18
3.2. 3D-Konzeptzeichnung der Spannverschlüsse	19
3.3. Konzept der Abdichtung aller Verschraubungen	19
3.4. Umsetzungen an der realen Messbox	20
3.5. Umlaufende Aluminiumstangen	21
3.6. An den Alustangen aufgehängte Diffusorkugel	23
3.7. An den Alustangen aufgehängte Diffusorplatten	25
3.8. Miniaturstativ aus Aluminium mit Drahtfüßen	26
3.9. Kabeldurchführungen in der Marinetechnik: https://www.awn.de/wasserdichte-decksdurchfuehrung.html	27
3.10. Funktionsprinzip der Durchführungsichtung	28
3.11. Durchführungsichtung am fertigen Modellhallraum	28
4.1. Messsetup des Lausprechers	33
4.2. Messkette der Vermessung der Lausprecher	33
4.3. Messergebnisse aus dem Programm WinMLS	34
4.4. Messergebnis des Tymphany OT19, gemessen in MatLAB mit itaToolbox	35
4.5. Frequenzgang des OT19 Tweeters: http://www.tymphany.com/wp-content/themes/pathfinders/cache/pdfs/OT19NCoo-04.pdf	36
4.6. PZT Lautsprecher für akustische Maderscheuchen: https://www.kemo-electronic.de/de/Auto/Lautsprecher/Lo10-Ultraschall-Piezo-Lautsprecher.php	37

Abbildungsverzeichnis

4.7.	Messung des Frequenzgangs des Kemo Lo10 Piezo Lautsprecher	37
4.8.	3D-Konzeptzeichnung des Lautsprechergehäuses	39
4.9.	3D-Modell des Lautsprechergehäuses für den 3D-Druck	40
4.10.	3D-Druck des Lautsprechergehäuses	40
4.11.	Fertiges Lautsprecherensemble	42
4.12.	TDT Lautsprecher und Frequenzgang: http://www.tdt.com/files/fastfacts/SpeakerGuide.pdf	43
4.13.	PVDF Lautsprecher und Frequenzgang: [T. Hidaka, 2010]	44
4.14.	PVDF Lautsprecher-Konzept: [A. Duclos, 2004]	45
4.15.	PVDF Lautsprecher-Konzept, 3D Modell	46
4.16.	PVDF Dome-Lautsprecher: [A. Duclos, 2004]	46
4.17.	PZT Abstandssensoren und Frequenzgang: http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/open.htm	47
4.18.	PZT Lautsprecher für akustische Maderscheuchen: https://www.kemo-electronic.de/de/Auto/Lautsprecher/Lo10-Ultraschall-Piezo-Lautsprecher.php	48
4.19.	3D-Konzept einer PZT-Schallquelle	49
4.20.	Prototyp eines Hochtönlautsprechers aus einer PZT-Scheibe: [M. Kuze, 2000]	50
4.21.	Polaroid Electrostativ Transducer: http://www.robotstorehk.com/6500.pdf	51
4.22.	Prowave Electrostativ Transducer: http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/es/500es430.htm	51
5.1.	Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche des Programms	55
6.1.	Für die Messung verwendete Absorbermatte	64
6.2.	Übersicht der Positionen im Modellhallraum	66
6.3.	Ergebnisse der Leerraum-Messung	67
6.4.	Mittelwerte der aufgenommenen Nachhallzeiten der ersten Messung	68
6.5.	Ergebnisse der Diffusitätsbestimmung für Kugeldiffusoren, mit und ohne Korrektur	72
6.6.	Ergebnisse der Absorptionsgradbestimmung mit Kugeldiffusoren und Volumenkorrektur	73

Abbildungsverzeichnis

6.7. Ergebnisse der Diffusitätsbestimmung für Plattendiffusoren .	74
6.8. Vergleich der Ergebnisse	75

Abstract

Die vorliegenden Projektarbeit beschreibt Planung und Bau eines Modellhallraumes im Maßstab 1:10 und die Konstruktion der dafür notwendigen Schallquelle, sowie die Programmierung einer Software für den Betrieb des resultierenden Messsystems. Die dadurch geschaffene Messumgebung versucht den Anforderungen der Absorptionsgradmessungen in Hallräumen nach ÖNORM [EN ISO 354, 2003] im Sinne einer 1:10 skalierten Auswertung zu genügen. Um die Funktion des Modellhallraums zu testen, wurde abschließend eine von der Norm vorgegebene Diffusitätsprüfung des Schallfeldes mit sowohl Volums-, als auch Plattendiffusoren durchgeführt. Das fertige Produkt soll in zukünftigen wissenschaftlichen Arbeiten dazu dienen Untersuchungen des diffusen Schallfeldes in Hallräumen zu ermöglichen.

The project work at hand documents the design and construction of a 1:10 scale model reverberation chamber and a suitable sound source, as well as the implementation of a software necessary for operating the resulting measurement system. Said system aims to satisfy the requirements of ÖNORM EN ISO 354 sound absorption measurements in reverberation chambers in a 1:10 scale model context. In conclusion a soundfield diffusivity examination suggested by the norm was performed to test the functionality of the model reverberation chamber using both boundary and hanging diffusors (i.e. volume diffusors and conventional panel diffusors respectively). The resulting product built during this project is intended to serve as a testbench in future scientific studies concerning the research of diffuse sound fields in reverberation chambers.

1. Einführung

Ein Hallraum stellt eine Form eines Messraumes in der akustischen Messtechnik dar. Während ein reflexionsarmer Messraum versucht sich den akustischen Bedingungen des Freifeldes anzunähern, also wenige bis gar keine Reflexionen des Schalls an seinen Wänden zuzulassen, bezweckt ein Hallraum das Gegenteil. Hier möchte man durch so viele Reflexionen wie möglich ein diffuses und isotropes Schallfeld erzeugen. Dabei handelt es sich bei einem diffusen Schallfeld um einen Zustand bei dem, im Sinne der statistischen Akustik in jedem Punkt des Raumes im Mittel die Schallenergie im Pegel konstant ist, während ein isotropes Schallfeld an jedem Ort den Einfall der Schallwellen aus allen Richtungen definiert. Durch Messen von Schalldruckpegeln im Raum werden dadurch primär zwei Messungen durch den Hallraum möglich: die Messung der Schallleistung eines Geräts oder einer Maschine, sowie die Messung des Absorptionsgrades eines Materials aus der Differenz der Nachhallzeiten vor und nach Anwesenheit des Materials im Raum nach den Nachhallzeitformeln von Sabine oder Eyring. Die Methode unterscheidet sich dabei von Messungen im Messrohr, da im Hallraum, wie in der realen Anwendung von Absorbern in Büroräumen, Konzert- und Vortragssälen usw., die gesamte Oberfläche eines oder mehrerer Absorberpaneele dem Schall aus allen möglichen Richtungen ausgesetzt wird, anstatt lediglich einem direkten frontalen Einfall auf eine, relativ betrachtet, kleine Probe im Messrohr.

Jedoch wirft der Hallraum, beziehungsweise die durch ihn gewonnenen Messergebnisse, seit seiner Integration in die Messtechnik der Industrie immer wieder Fragen auf. Laut Untersuchungen von [Vercammen, 2010] liefern unterschiedliche Hallräume unterschiedliche Ergebnisse für dieselben Testsubjekte. Aus der weiterhin andauernden Motivation die Erfassung von Absorptionsgradwerten von Absorbern im diffusen Schallfeld durchzuführen statt im Messrohr, besteht ein Interesse der Forschung die Gründe

1. Einführung

für die Abweichung der Messergebnisse zu finden.

Da es für die Forschung jedoch umständlich ist für jedes Experiment das Lager im nächst Hallraum aufzuschlagen, bietet es sich an das Experiment mit dem gesamten Hallraum in einem bestimmten Maßstab zu verkleinern und im Modell durchzuführen. Ähnliche Modellbauten wurden in der Akustik schon früher verwendet um Konzepte von neuen Konzertsälen zu vermessen, wie beispielsweise in der Arbeit von [Gade, 2006]. Die Motivation des Baus eines solchen Modells besteht neben der Prüfung des akustischen Verhaltens der Architektur auch darin akustisch wirksame Maßnahmen zu testen, bevor der Saal in Originalgröße überhaupt gebaut worden ist und so potentielle Umbaukosten zu vermeiden.

Der Bau eines Modellhallraumes an sich wurde jedoch auch schon zum Beispiel von [Jachmann, 2006] erfolgreich durchgeführt. Der rechnerisch einfachste Maßstab eines akustischen Modellraums ist wohl 1:10. Eine 10 Meter Wand schrumpft dabei auf 1 Meter, während die gemessenen Frequenzen des Schalls um den Faktor 10 zunehmen. In der ÖNORM [EN ISO 354, 2003] "Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen" wird der Schall im Bereich von 100 Hz bis 5 kHz ausgewertet. Im Modell wächst der Messbereich daher auf 1 kHz bis 50 kHz. Er liegt damit von 20 kHz bis 50 kHz per Definition im Ultraschallbereich.

Durch die Miniaturisierung müsste für eine vollständige Umlegung der Absorptionsgradbestimmung nach EN ISO 354 logischer Weise auch das akustisch zu vermessene Material, sprich die Absorberproben selbst strukturell ebenso verkleinert werden. Die Durchführbarkeit und auch Sinnhaftigkeit solcher Vorgehensweisen sei in dieser Arbeit dahingestellt. Der Fokus lag primär darin eine Möglichkeit für die Untersuchung des diffusen Schallfeldes an sich zu schaffen. Der Modellhallraum soll also vor allem für Forschungszwecke dienen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war nun die Planung und Konstruktion eines solchen Modell-Hallraumes im Maßstab 1:10. Zusätzlich galt es aber, wegen der Verschiebung des gemessenen Frequenzbereichs des Schalls ebenso einen Lautsprecher zu finden, welcher den Bereich abdecken kann und aus 6 solcher Lautsprecher eine funktionierende Schallquelle zu konstruieren. Außerdem musste eine Messsoftware zur Aufnahme der Nachhallzeiten und Absorptionsgrade implementiert werden.

2. Theorie einer Hallraummessung

2.1. Absorptionsgradmessung

Jegliche Messung der Absorptionsgrade in einem Hallraum erfolgt durch die Beschallung eines Raumes durch eine omnidirektionale Schallquelle. Das einfachste Messprinzip besteht darin mit einer solchen Schallquelle den Raum mit einem Rauschsignal anzuregen und dadurch ein ideal diffuses und isotropes Schallfeld zu erzeugen. Hat sich dieser Zustand eingestellt, wird die Quelle abgeschaltet und mit einem Mikrofon das Abklingen des Schallfeldes festgehalten. Daraus resultiert eine Abfallkurve des gemessenen Schalldrucks über die Zeit, welche sich bei logarithmischer Betrachtung einer Geraden annähert.

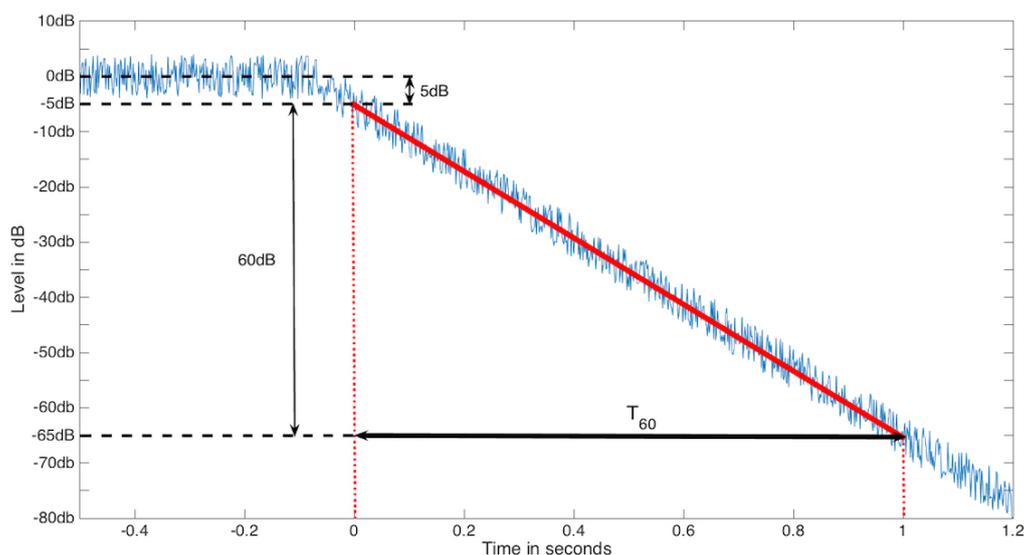


Abbildung 2.1.: Definition und Auswertung der Nachhallzeit

2. Theorie einer Hallraummessung

Bei der Auswertung der Abfallkurve wird im Folgenden ab einer Abnahme des Pegels von -5dB unter dem Rauschpegel der eingeschalteten Schallquelle der Zeitraum gemessen, bis der Pegel von diesem Punkt aus einen weiteren festgelegten Pegelwert unterschritten hat, wie in [Abbildung 2.1](#) dargestellt. Das menschliche Gehör kann maximal nur einen Pegelabfall von 60dB wahrnehmen. Daher wurde die Nachhallzeit T_{60} per Konvention dementsprechend als jene Zeitspanne festgelegt, die der Pegel für den Abfall in diesem 60dB Dynamikfenster benötigt.

In diesem Fall wird also der Pegelabfall ab einem Pegel von -5dB nach dem Abschalten der Schallquelle im Hallraum bis zu einem Pegel von -65dB verfolgt und in diesem Bereich des Pegelverlaufs eine Ausgleichsgerade eingefügt. Die dabei verstrichene Zeit zwischen dem Beginn der Gerade und der -65dB Pegelschwelle wird als Nachhallzeit gemessen. Die Messung kann auch einen höheren Endwert haben, wie zum Beispiel 30dB unter dem Startwert. Der so bestimmte Nachhallzeitwert ist dann aber linear auf T_{60} zu extrapolieren. Im Falle von den beispielhaften 30dB ist sie also zu verdoppeln und wird sinngemäß T_{30} genannt. Da ein Dynamikumfang einer Messung von über 65dB heutzutage technisch durchaus zu bewerkstelligen ist, aber in der Realität akustisches und elektronisches Rauschen und Nebengeräusche hinzukommen, ist die Messung der vollen 60dB aber selten wirklich durchführbar. Der Messung T_{30} oder gar T_{20} wird man viel öfter begegnen.

In der Realität werden für eine aussagekräftige Messung der Nachhallzeit jedoch auch Werte über das gesamte Hörspektrum benötigt. Bei der Aufstellung der ÖNORM EN ISO 354 für die Bestimmung der Absorptionsgrade wurde dieses Spektrum auf die Messung der Terzbänder von 100Hz bis 5000Hz beschränkt. Die Messung dieser Werte erfolgt im Gegensatz zum vereinfachten Grundprinzip aus der Messung der Impulsantwort durch einen Sinus-Sweep. Anhand der Impulsantwort kann über eine Berechnung für ein herausgefiltertes, spektrales Segment dessen Nachhallzeit angegeben werden. Diese Berechnung bedient sich dabei der Rückwärts-Integration der quadrierten Impulsantwort und wird mit [Formel 2.1](#) computergestützt berechnet.

$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

2. Theorie einer Hallraummessung

Hierbei bezeichnet $h(\tau)$ die gemessene Impulsantwort. Der berechnete Verlauf $E(t)$ zeigt die gesuchte Abfallkurve, welche Frequenzband-gefiltert auf gleiche Weise ausgewertet werden kann wie bei der Methode mit dem abgeschalteten Rauschen. Der daraus bestimmte Nachhallzeitwert T bildet die Grundlage für die Bestimmung der Absorptionsgrade, welche der Norm nach auf zwei Arten berechnet werden können.

Die erste Methode geht auf die Grundlagen der Raumakustik nach Wallace Clement Sabine und dessen Nachhall-Formel 2.9 zurück. Wie in [Moeser, 2007] beschrieben ergibt sich Sabines Nachhall-Formel aus der Betrachtung der Energiebilanz eines Schallfeldes in einem Raum. Das einfachste Modell zur Vorstellung dieser Überlegung ist ein geschlossener Raum, welcher von einer Schallquelle mit einer konstanten Rauschleistung P beschallt wird. Nach einem Einschwingvorgang entsteht ein Schallfeld, welches durch die konstante Leistung der Quelle auch konstant erhalten wird. Die Quelle sorgt nach dem Einschwingvorgang also nur für den Erhalt des Schallfeldes, welches im Mindesten durch die Luft selbst Verluste erfährt. Diese zugeführte Leistung ist in Formel 2.2 gegeben als:

$$P = \frac{6 \cdot \ln(10)}{T} E \cdot V = \frac{6 \cdot \ln(10)}{T} \frac{\tilde{p}^2}{\rho c^2} \cdot V \quad (2.2)$$

Dabei entspricht T der Nachhallzeit, E der potentiellen Energie des Schallfeldes und V dem Raumvolumen. Die Energie lässt sich weiter durch den quadrierten Effektivwert des Schalldrucks \tilde{p}^2 , der Luftdichte ρ und dem Quadrat der Schallgeschwindigkeit c ausdrücken.

In der Realität haben als Absorber wirksame Objekte im Raum aber einen weit höheren Anteil am Verlust dieser Leistung als die Luft. Stellt man sich deren Wirkung in einem einzigen Objekt mit der Oberfläche S vor, so trifft die Leistung P_{in} auf diese Fläche auf und die reflektierte oder wieder austretende Leistung aus dem Objekt P_{aus} steht mit der eintreffenden Leistung im direkten Verhältnis.

$$P_{\text{aus}} = \alpha \cdot P_{\text{in}} \quad (2.3)$$

2. Theorie einer Hallraummessung

Der Faktor α definiert dabei den Leistungsverlust und wird dementsprechend als Absorptionsgrad bezeichnet. Diese Betrachtung entspricht einer ebenen Schallwellenausbreitung mit direktem Einfall auf die Fläche S . Im angenommenen Diffusschallfeld wird der Schall jedoch idealerweise aus allen Richtungen einfallen. Die Leistung des Schalls aus seitlicher Richtung mit dem Winkel ϑ zwischen Null und 90 Grad ist in Formel 2.4 angegeben:

$$P_{\vartheta} = \frac{\tilde{p}_{1/2}^2}{\rho c} S \cdot \cos(\vartheta) \quad (2.4)$$

Wird nur der Bereich zwischen Null und 90 Grad betrachtet, wirkt in Summe nur die Hälfte des eintreffenden quadrierten Gesamtschalldrucks.

$$\tilde{p}_{1/2}^2 = \frac{1}{2} \tilde{p}^2 \quad (2.5)$$

Um den Zusammenhang zwischen der auf die Fläche auftreffenden Leistung und dem Schalldruck nun zu vereinfachen, wird der schräge Schalleinfall über alle Winkel gemittelt. Da dabei $\cos(\vartheta)$ alle Werte zwischen Null und 1 gleichermaßen annimmt, wählt man im Mittel $\cos(\vartheta) = 0.5$, also 60 Grad. Damit ergibt sich die eintreffende Leistung zu:

$$P_{\text{in}} = \frac{\tilde{p}^2 S}{2 \cdot 2 \cdot \rho c} \quad (2.6)$$

Und über Formel 2.3 die ausgehende Leistung zu:

$$P_{\text{aus}} = \frac{\tilde{p}^2}{4 \rho c} \alpha S \quad (2.7)$$

Der Faktor αS wird auch die "äquivalente Absorptionsfläche A " genannt.

$$A = \alpha \cdot S \quad (2.8)$$

Setzt man Formel 2.7 in Formel 2.2 so ergibt sich die dimensionslose Form, beziehungsweise durch Einsetzen der Schallgeschwindigkeit der Luft von

2. Theorie einer Hallraummessung

etwa 343m/s, für eine Raumtemperatur von 20 Grad, sowie 30% Luftfeuchtigkeit, die für uns interessante Form der Sabine'schen Nachhallformel 2.9:

$$T = \frac{4 \cdot 6 \cdot \ln(10) \cdot V}{c \cdot \alpha S} = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V}{A} = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (2.9)$$

Wie in der ÖNORM [EN ISO 354, 2003] beschrieben, erhält man durch Umformung der Formel 2.9 nach α und der Aufnahme von verschiedenen Nachhallzeiten nun das Verfahren nach Sabine.

$$\alpha_{m,2} = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V}{S_2} \cdot \left(\frac{1}{T_X} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.10)$$

Hier beschreibt $\alpha_{m,2}$ den Absorptionskoeffizienten eines Materials, welches in einer Hallraummessung die Nachhallzeiten T_X ergeben hat. Die Nachhallzeiten des Raumes ohne dieses Material sind mit T_1 gekennzeichnet. Die restlichen Konstanten beschreiben die Werte der Schallgeschwindigkeit in der Luft c , des Raumvolumens V und der Oberfläche des Materials S_2 . Zunächst wird bei diesem Verfahren im leeren Hallraum eine Messung durchgeführt. Die gemessene Nachhallzeit T_1 wird berechnet und festgehalten. Daraufhin wird das zu untersuchende Absorptionsmaterial in den Raum gelegt und erneut gemessen. Da sowohl das Raumvolumen V sowie die gesamte Oberfläche S_2 des Absorptionsmaterials bekannt ist, kann aus diesen Werten für jedes Nachhallzeitenpaar pro Frequenzband der Absorptionsgrad ausgerechnet werden.

Alternativ ist auch die Berechnung nach Carl F. Eyring zur Absorptionsgradbestimmung zulässig. Obwohl die Bestimmung nach Eyring auf einem anderen mathematischen Prinzip beruht, funktioniert die praktische Durchführung hier ganz gleich: Die Messung der Nachhallzeiten bei leerem und mit Absorptionsmaterial ausgelegtem Hallraum führt über die Formel zum gesuchten Wert.

Eyrings Formel beruht dabei aber nicht auf der Beobachtung von Energiebilanzen, sondern auf der "Verfolgung des mittleren Strahlenschicksals". Dabei werden Strahlenpakete des, von der Quelle abgestrahlten Schalls

2. Theorie einer Hallraummessung

behandelt. Das Prinzip nimmt nun für jedes dieser Pakete eine geradlinige Ausbreitung von der Quelle weg an, dessen Weg im Raum einer *mittleren freien* Weglänge entspricht bevor es an einer Wand zu einer Reflexion kommt. Bei der Reflexion wird ein Teil davon absorbiert und damit dem Schall Energie entzogen. Die Energiedichte des Pakets sinkt dabei um:

$$E_{\text{Ref}} = \Delta E(1 - \overline{\alpha_m}) \quad (2.11)$$

ΔE beschreibt hier eine Energieänderung des Strahlenpakets und α_m wieder den gemittelten Absorptionsgrad. Für eine *mittlere Stoßzahl* n , das bedeutet die mittlere Anzahl von Reflexionen pro Sekunde, erhält man über die Zeit t betrachtet eine Abfallfunktion der Form:

$$E(t) = E_0(1 - \overline{\alpha_m})^{n \cdot t} \quad (2.12)$$

E_0 bezeichnet hierbei den Energiebestand zu Beginn des Nachhallvorgangs. Die Formel für die mittlere Stoßzahl n lautet:

$$n = \frac{c \cdot S_{\text{ges}}}{4 \cdot V} \quad (2.13)$$

Wieder bezeichnet c die Schallgeschwindigkeit und V das Volumen. Mit S_{ges} ist die Oberfläche des Raumes gemeint. Setzt man Formel 2.13 in Formel 2.12 erhält man:

$$E(t) = E_0 \cdot (1 - \overline{\alpha_m})^{\frac{c \cdot S_{\text{ges}}}{4 \cdot V} \cdot t} = E_0 \cdot e^{\frac{c \cdot S_{\text{ges}} \cdot \ln(1 - \overline{\alpha_m})}{4 \cdot V} \cdot t} \quad (2.14)$$

Mit der Definition der Nachhallzeit T als jenen Zeitraum bei welchem der Pegel um 60dB abgefallen ist, kann die Exponentialfunktion in Formel 2.14 dem entsprechenden Energiewert von 10^{-6} gleichgesetzt werden.

$$e^{\frac{c \cdot S_{\text{ges}} \cdot \ln(1 - \overline{\alpha_m})}{4 \cdot V} \cdot T} \stackrel{!}{=} 10^{-6} \quad (2.15)$$

2. Theorie einer Hallraummessung

Dieser Ausdruck muss lediglich nach α_m umgeschrieben werden und für eine Schallgeschwindigkeit von 343m/s erhält man die Eyring'sche Nachhallformel:

$$\bar{\alpha}_m = 1 - e^{-0.161 \frac{V}{S_{ges} \cdot T}} \quad (2.16)$$

Um nun den Absorptionsgrad eines Materials im Hallraum zu erfassen, sind wieder zwei getrennte Messungen, sprich zwei verschiedene Nachhallzeiten mit und ohne Absorbermaterial erforderlich. In diesem Fall erweitert sich Formel 2.16 zu:

$$\alpha_{m,2} = \frac{S_{ges,1}}{S_2} \cdot \left(e^{-0.161 \frac{V}{S_{ges,1} \cdot T_1}} - e^{-0.161 \frac{V}{S_{ges,1} \cdot T_X}} \right) \quad (2.17)$$

Im Unterschied zur Sabine'schen Formel fließt neben der Absorberoberfläche S_2 auch die gesamte Oberfläche des Raumes $S_{ges,1}$ ein. In der Praxis zeigt die Eyring'sche Formel einen geringeren Absorptionsgrad an als die Sabine'sche Formel. Dies wirkt sich umso stärker aus, je höher der tatsächliche Absorptionsgrad ist, da Formel 2.16 keinen Wert größer als 1 liefern kann.

2.2. Akustik in Hallräumen

Ein quaderförmiger Raum stellt für die theoretische Akustik ein geschlossenes System dar. Unter der Bedingung dass die Wände des Raumes schallhart sind, an den Wänden die wandnormalen Komponenten der Schallschnelle verschwindet und der Raum durch eine harmonische Schwingung ange-regt wird, lässt sich das Schallfeld im Raum durch die Wellengleichung beschreiben. Die dreidimensional erweiterte Wellengleichung hat dabei die Form:

$$\begin{aligned} \underline{p} &= \underline{\hat{p}}_h (e^{-jkx} + e^{jkx}) (e^{-jky} + e^{jky}) (e^{-jkz} + e^{jkz}) e^{j\omega t} \\ &= 8\underline{\hat{p}}_h \cos(kx)\cos(ky)\cos(kz)e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.18)$$

2. Theorie einer Hallraummessung

Durch die Randbedingung der verschwindenden Schallschnelle an gegenüberliegenden Wänden erhält man aus Gleichung 2.18 Resonanzfrequenzen die der Akustiker *Raummoden* nennt. Wird der Raum mit einer solchen Frequenz angeregt, entstehen stehende Wellen aus der Superposition der reflektierenden Wellen im Raum. Im Sinne des Hallraumes ist das Schallfeld für diese Frequenz dann also nicht mehr diffus, da die Schallenergie in jedem Punkt im Raum im zeitlichen Mittel nicht mehr konstant ist. Eine Wellenzahl k einer *Raummode* lässt sich durch folgende Zusammenhänge ortsabhängig darstellen:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \lambda = \frac{2l}{n} \quad f = \frac{c}{\lambda} = \frac{nc}{2l} \quad (2.19)$$

$$\text{Bsp.: } \cos(k_{rx}x) = \cos\left(\frac{n_x\pi}{l_x}x\right)$$

Gleichung 2.18 kann in diesem Sinne umgeschrieben werden zu:

$$\underline{p} = 8\hat{p}_h \cos\left(\frac{n_x\pi}{l_x}x\right) \cos\left(\frac{n_y\pi}{l_y}y\right) \cos\left(\frac{n_z\pi}{l_z}z\right) e^{j\omega t} \quad (2.20)$$

Hierbei beschreiben l_x , l_y und l_z die Kantenlängen des betrachteten Quader- raumes. Für jede Kombination der ganzzahligen Werte von n_x , n_y und n_z existiert eine Raummode. Auf Grund der Wellenlängen und der begrenzten Raumgröße eines Hallraumes ergibt sich durch diese Sachverhalte eine zu höheren Frequenzen hin zunehmende Anzahl an möglichen Raummoden. Dabei treten axiale Moden parallel zu den Raumkanten, tangentielle Moden senkrecht auf die Raumkanten, sowie auf alle Raumkanten schräg liegende Moden auf, wobei in Hallräumen mit über $200m^3$ die Anzahl der schrägen Moden überwiegt. Wie von [Mooser, 2007] beschrieben, gibt Formel 2.21 die Anzahl dieser Eigenmoden bis zu einer Frequenz f an.

$$N_V \approx \frac{\frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot f^3}{\left(\frac{c}{2}\right)^3 \cdot \frac{1}{l_x l_y l_z}} \approx \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{f^3}{c^3} \cdot V \quad (2.21)$$

Wie zu sehen ist, steigt die Anzahl der schrägen Moden mit der Frequenz zur dritten Potenz. Bei einer hohen Anzahl von Moden beeinflussen sich die

2. Theorie einer Hallraummessung

Schwingungen auf Grund der spektralen Überlappung gegenseitig in einem derartigen Ausmaß, dass das Schallfeld durch die Summe aller Wirkungen einen diffusen Charakter erhält. Eine hohe Modendichte entspricht also einem Soll-Zustand eines Hallraumes. Zu tiefen Frequenzen hin lichtet sich jedoch die Anzahl der Moden und es wird spektrale Bereiche geben, welche kein ausreichend diffuses Feld aufweisen. Gesucht wird nun eine Frequenz ab der eine ausreichende Anzahl von Moden im Raum wirkt. Die erste Ableitung nach der Frequenz in Formel 2.21 ergibt die Modendichte für schräge Moden in der Umgebung der Frequenz f :

$$\frac{dN_V}{df} \approx \frac{4\pi}{c^3} \cdot V \cdot f^2 \quad (2.22)$$

Das Differential dN_V/df kann als die Anzahl der Moden pro Hertz Absolutbandbreite verstanden werden. Durch Umformung von Gleichung 2.22 kann man natürlich auch die Frequenz f ausdrücken:

$$f_g \approx \sqrt{\frac{c^3}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{dN_V}{df}} \cdot \sqrt{\frac{1}{V}} \quad (2.23)$$

Für eine Modendichte von 1 Mode pro 1 Hertz Absolutbandbreite, sprich $dN_V/df=1$ ergibt Formel 2.23 für eine Schallgeschwindigkeit c von 343m/s eine Grenzfrequenz f_g von:

$$f_g \approx \sqrt{\frac{c^3}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{V}} \approx \frac{1800}{V} \quad (2.24)$$

Das bedeutet für einen gewählten Raum mit dem Volumen V werden erst ab der Grenzfrequenz f_g mindestens 1 Mode pro 1 Hertz Frequenzbandbreite auftreten. Bei einem Volumen von zum Beispiel $V=200m^3$ gibt die Formel eine Frequenz von etwa 300Hz an.

Nicht berücksichtigt wird dabei die Überlappung benachbarter Moden bezüglich ihrer Güte. Eine Mode stellt spektral betrachtet eine Glockenkurve um die jeweilige Resonanzfrequenz dar. Die Güte definiert die 3dB-Halbwertsbandbreite, also jene Bandbreite um die Resonanzfrequenz, bei

2. Theorie einer Hallraummessung

der die Kurve um 3dB abgesunken ist. Um diese erweiterte Bandbreite pro Mode in die obigen Überlegungen einzubauen wird die Modendichte um die 3dB-Halbwertsbreite Δf_3 erweitert und forthin als Modenüberlappung M bezeichnet.

$$M = \Delta f_3 \cdot \frac{dN_V}{df} \quad (2.25)$$

Der Kehrwert der Kreisfrequenz der 3dB-Halbwertsbreite $\Delta\omega_3$ sei nun die Abklingzeit τ bei der jeweiligen Resonanzfrequenz.

$$\tau(\omega_0) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta f_3} = \frac{1}{\Delta\omega_3} \quad (2.26)$$

Über die Definition des Nachhalls nach Sabine besteht ein Zusammenhang zwischen der Abklingzeit und der Nachhallzeit. Werden die 60dB Dynamik der Definition verwendet, lautet dieser Zusammenhang:

$$T = \tau \cdot \ln \frac{E_0}{E(T)} = \tau \cdot \ln(10^6) \quad (2.27)$$

Setzt man Gleichung 2.26 und 2.27 in Formel 2.25 ein, erhält man die von der Nachhallzeit T abhängige Modenüberlappung M :

$$M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \cdot \frac{dN_V}{df} = \frac{\ln(10^6)}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \frac{dN_V}{df} = \frac{2,2}{T} \cdot \frac{dN_V}{df} \quad (2.28)$$

Über Formel 2.22 kann die Modenüberlappung M nun in Gleichung 2.23 eingesetzt werden und man erhält Formel 2.29.

$$f_g \approx \sqrt{\frac{c^3}{2,2 \cdot 4\pi}} \sqrt{M} \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.29)$$

Die Schroederfrequenz, benannt nach Manfred Schroeder, verlangt für die zu berechnende Grenzfrequenz f_g eine garantierte Modenüberlappung von

2. Theorie einer Hallraummessung

$M=3$, das bedeutet eine Anzahl von mindestens 3 schrägen Eigenmoden je 3dB-Halbwertsbreite. Für einen Hallraum ist diese Forderung als das strengste Kriterium anzusehen. Bei Volumswerten von mehr als $200m^3$ fällt sie in der Regel in die Frequenzregion zwischen 400Hz-500Hz. Setzt man wieder eine Schallgeschwindigkeit von $c = 343m/s$ ein, vereinfacht sich Gleichung 2.29 zu:

$$f_g \approx \sqrt{\frac{343^3}{2,2 \cdot 4\pi}} \sqrt{3} \sqrt{\frac{T}{V}} \approx 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.30)$$

Im Hallraum kann die Modenverteilung und -ausprägung aber auch durch zusätzliche reflektierende Körper beeinflusst werden. Eine steife Platte mit einer einseitigen Mindestfläche von, laut ÖNORM [EN ISO 354, 2003], Anhang A etwa $0,8m^2$, bedeutet zwar in der Praxis eine Verringerung der Nachhallzeiten im Raum, sie reflektiert jedoch, sinnvoll im Raum platziert, Schallwellen so, dass die Modenverteilung gestört wird und dadurch das Schallfeld an Diffusität zunimmt. Solche Reflektoren werden in der vorliegenden Arbeit fortlaufen als "Diffusoren" bezeichnet.

2.3. Luftabsorption

Da im Miniaturhallraum die gemessenen Schallwellen durch den Skalierungsfaktor 1:10 auch über der Hörschwelle des menschlichen Gehörs liegen, sei an dieser Stelle noch auf die Eigenschaften von Luftschall höherer Frequenzen hingewiesen. Im Grunde handelt es sich bei Luftschall um mechanische Longitudinalwellen der Luftmoleküle. Bei ihrer Fortpflanzung erfährt die Schallwelle eine Dämpfung, welche sich bei freier Schallausbreitung auf die Dissipation durch mechanische Reibung, Wärmeleitung und innermolekulare Verluste der Luftteilchen zurückführen lässt. Durch die Eigenschaften dieser Verlustfaktoren entzieht das Medium Luft dem Schall frequenzabhängig Energie.

Eine Methode die den Verlust durch die Luft zu erfassen versucht, ist die Formel nach [H. E. Bass, 1995]. Diese Formel errechnet für eine bestimmte

2. Theorie einer Hallraummessung

Frequenz, der Lufttemperatur, dem Luftdruck und der relativen Luftfeuchtigkeit einen Faktor m [in dB] Verlust pro Längeneinheit.

$$m = 20 \cdot \log_{10}(e) \cdot p_s \cdot F^2 \cdot \left(1.84 \cdot 10^{-11} \cdot \sqrt{\left(\frac{T}{T_0}\right)} \cdot p_{s,0} + \frac{0.1068 \cdot e^{-\frac{3352}{T}}}{F_{r,0} + \frac{F^2}{F_{r,0}}} + \frac{0.1068 \cdot e^{-\frac{3352}{T}}}{F_{r,N} + \frac{F^2}{F_{r,N}}} \right) \quad (2.31)$$

Die Variablen dieser Formel sind die Temperatur T , die durchschnittliche Raumtemperatur T_0 , das Verhältnis des herrschenden Luftdrucks zum durchschnittlichen Luftdruck p_s , sowie zu sich selbst $p_{s,0}$ ($=1$). Die Variable F ist die Frequenz zum herrschenden Luftdruckverhältnis:

$$F = \frac{f}{p_s} \quad (2.32)$$

Die Variablen $F_{r,0}$ und $F_{r,N}$ sind Terme abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Setzt man den für die Durchführung einer 1:10 Miniaturhallraummessung relevanten Frequenzbereich in die Formel ein, erhält man einen Graphen wie er in [Abbildung 2.2](#) dargestellt ist. Die Dämpfung des freien Luftschalls selbst nimmt also speziell für hohe Frequenzen stark zu. Im Gegensatz zur Messung im echten Hallraum wo dieser Effekt kaum messbar ist geht bei der Schallausbreitung im Modellhallraum mit zunehmender Frequenz durchaus ein merkbarer Anteil der Energie verloren. Wie in [Abbildung 2.2](#) zu erkennen, berechnet [Formel 2.31](#) den Korrekturfaktor als atmosphärischen Koeffizienten in dB pro Längeneinheit. Um den Faktor mit den Nachhallzeiten in Verbindung zu bringen muss er laut [R. H. C. Wenmaekers, 2008] noch in Neper pro Längeneinheit (Np/m) konvertiert werden. Der Zusammenhang ist in [Formel 2.33](#) dargestellt.

2. Theorie einer Hallraummessung

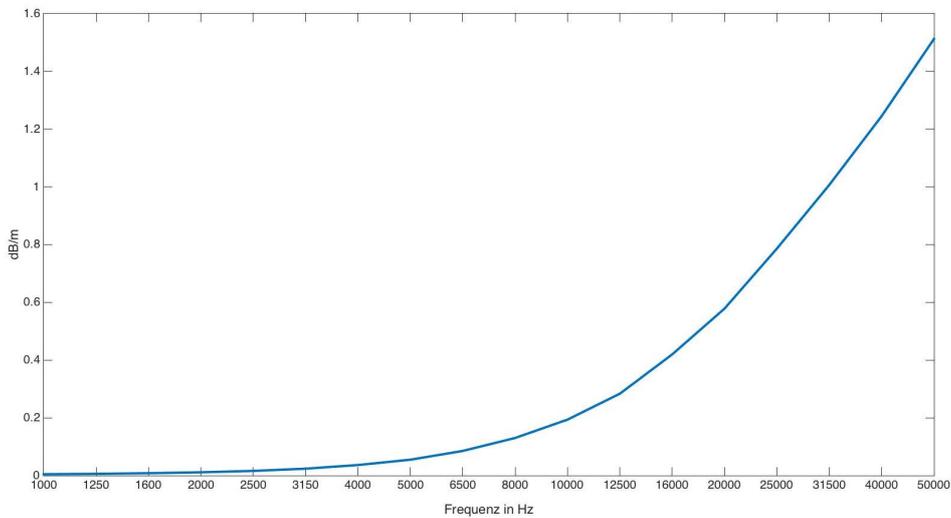


Abbildung 2.2.: Verlauf der Luftabsorptionskorrektur nach Bass et al.

$$\alpha_{\text{Korr}} = \frac{m}{20 \cdot \log_{10}(e)} \quad (2.33)$$

Der Druck-Dämpfungs-Koeffizienten α_{Korr} kann nun über den Korrekturfaktor $4\alpha_{\text{Korr}}V$ in die Sabine'sche Nachhallformel eingesetzt werden.

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{A + 4\alpha_{\text{Korr}}V} \quad (2.34)$$

Bei der Bestimmung des Absorptionsgrades entsteht für den Korrekturfaktor eine Differenz zwischen dem Faktor der Nachhallzeit ohne und dem mit anwesendem Absorptionsmaterial. Geht man davon aus, dass sich zwischen den Messungen dieser beiden Nachhallzeiten die atmosphärischen Bedingungen im Hallraum nicht geändert haben, so ist der Faktor natürlich exakt gleich groß und kürzt sich heraus. Andernfalls müssen für beide Messungen jeweils die Werte der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und des Luftdrucks aufgenommen werden um die vorhandene Diskrepanz auszugleichen.

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

3.1. Auswahl der Materialien

Praktisch gesehen bieten sich für die Konstruktion eines Modelhallraums die Möglichkeiten an, ihn aus Holz oder einer Form von Kunststoff herzustellen. Eine Konstruktion aus Holz ist relativ kostengünstig. Mit MDF (mitteldichte Faserplatten) entstehen relativ dichte Wände mit Werten zwischen etwa 650 kg/m^3 bis 800 kg/m^3 . Der Vorteil liegt neben den Kosten auch in der einfachen Herstellung von Zuschnitt bis Verleimung und Bearbeitbarkeit. Ein offensichtlicher Nachteil liegt natürlich darin, dass das Messobjekt nicht sichtbar ist, außer man kombiniert das Design mit einem Fenster.

Für den Betrieb ist dies nicht von Belangen, allerdings hat jede Holzkonstruktion ohne Oberflächenbehandlung der Platten auch den Nachteil zu rau zu sein. Je nach Material existieren mehr oder weniger viele offene Poren welche Luftschall zumindest bis zu einem gewissen Maß beeinflussen. Daher muss eine solche Konstruktion mit einem Lack in mehreren Schichten behandelt werden. Geeigneter polierbarer Komponentenlack steigert aber wiederum die Kosten, sowie den Aufbauaufwand, da viele Schichten aufgetragen werden müssen, welche ebenso eine Politur benötigen um wirklich glatt zu sein.

Plexiglas auf der anderen Seite ist ab Werk schon sehr glatt um zum Zweck der Transparenz das Licht möglichst wenig zu brechen. Der Werkstoff Plexiglas ist dabei eine lizenzierte Untergruppe der Acrylgläser. Bis auf geringe Abweichungen bezeichnen beide Begriffe im Grunde denselben Werkstoff. Die Dichte liegt für gewöhnlich bei 1150 kg/m^3 , die Wände können daher

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

auch dünner dimensioniert werden als Wände aus Holz mit vergleichbare Härte. Zusätzlich bricht Acrylglas weniger leicht als gewöhnliches Glas, obwohl es nur etwa halb so dicht ist und Modifikationen wie Löcher sind generell wesentlich einfacher vorzunehmen. Eine Komplikation stellt wiederum die Verklebung der Wandteile dar, da laut Herstellerangaben die Verklebung nicht unbedingt Millimeter genau vorhergesehen werden kann. Kratzer im Acryl lassen sich bis zu einer gewissen Tiefe sehr gut herauspolieren.

Die Herstellung einer Kiste aus Acrylglas als Basis für einen Modellhallraum ist daher absolut möglich, es empfiehlt sich aber es von einem Acrylglas-Hersteller durchführen zu lassen, welcher den Zuschnitt der Platten so genau wie möglich vornehmen kann, mit den Klebemitteln vertraut ist und die Platten damit präzise zu verbinden weiß.

3.2. Abmessungen und Konstruktion

Auf Grund der Attraktivität der Vorteile wurde für das Projekt beschlossen den Model-Hallraum von einem Vitrinen-Hersteller aus Acrylglas mit 8 Millimeter Stärke anfertigen zu lassen. Dieser besitzt die in Tabelle 3.1 dargestellten Abmessungen. Der Miniaturhallraum nähert sich damit den 1:10 skalierten Dimensionen des Hallraumes des Instituts für Bauphysik an der TU Graz an. Abbildung 3.1 zeigt das 3d-Modell welches für die Planung erstellt wurde.

Länge	Breite	Höhe	Wandstärke	Volumen
83,5cm	49,6cm	59,2cm	8mm	0,225m ³

Tabelle 3.1.: Abmessungen des Modellhallraumes

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

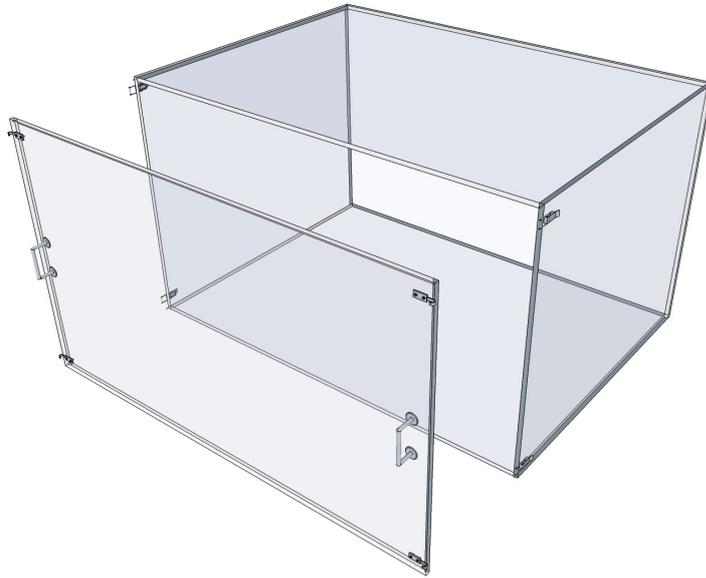


Abbildung 3.1.: 3D-Konzeptzeichnung des Modellhallraums

Beim Aufbau des Modellhallraums mussten nun eine Vielzahl von Bohrungen vorgenommen werden. Der Deckel benötigte Löcher für ein Paar Haltegriffe und für die geplanten Spannverschlüsse war die Montage von Gegenhacken eingeplant. Dieses Verschlussprinzip ist in [Abbildung 3.2](#) konzeptionell dargestellt. Der Deckel selbst wurde vom Hersteller der Box so konstruiert, dass auf der Innenseite eine Umrandung von 4mm Tiefe und 8mm Breite ausgefräst wurde. Damit lässt sich die entfernbare Wand passgenau wieder auf den Kasten aufsetzen. Um die Luftdichtheit möglichst zu gewährleisten, wurde der Rahmen der offenen Kastenseite mit einem Dichtungsgummi versehen, welcher einseitig auf dem Rand der Box klebt.

Wie [Abbildung 3.2](#) ebenfalls andeutet, mussten weitere Bohrungen für die Befestigung eines einfachen Spannverschlusses an der Box selbst gesetzt werden. Da die Wandplatte einigermaßen fest auf den Kasten gepresst werden sollte, kommt man nicht darum herum alle Löcher für Befestigungen durch das ganze Glas hindurch zu machen und die Verschraubungen hernach mit Gummi-Unterlegscheiben abzudichten. Dieses Prinzip wurde bei jedem Loch, beziehungsweise bei jeder Verschraubung so gut wie möglich eingehalten: Ein Dichtungsring presst auf die Glasoberfläche, gefolgt von

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

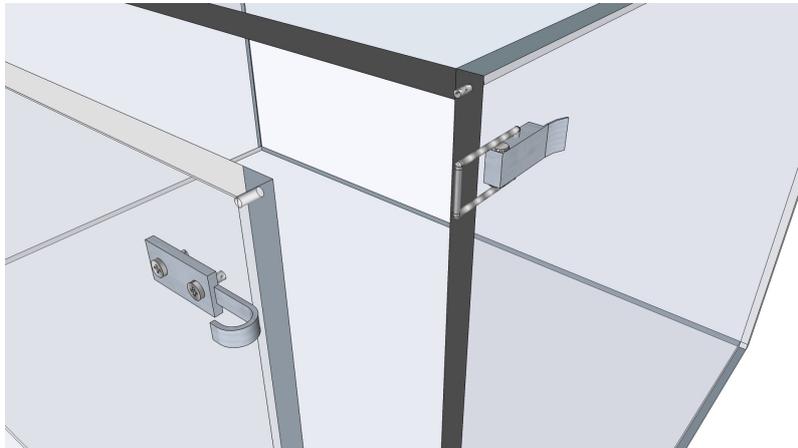


Abbildung 3.2.: 3D-Konzeptzeichnung der Spannverschlüsse

einer Unterlegscheibe, welche mit einer Hutmutter verklebt ist. Abbildung 3.3 zeigt die Anordnung dieser Verschraubungen.

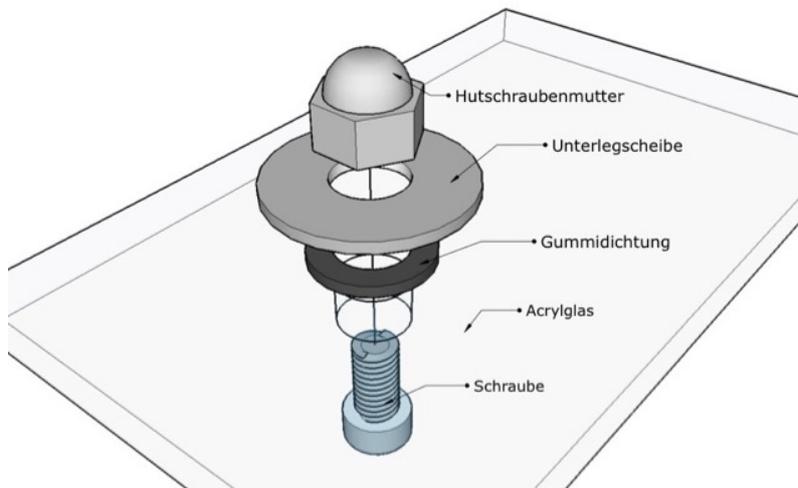


Abbildung 3.3.: Konzept der Abdichtung aller Verschraubungen

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

Da die Hutmutter nach oben hin an sich schon luftdicht geschlossen ist, sind die Luftaustrittsmöglichkeiten somit sehr beschränkt. Abbildung 3.4 zeigt die umgesetzten Konzepte im fertigen Miniaturhallraum.



Abbildung 3.4.: Umsetzungen an der realen Messbox

3.3. Halterahmen

Für den Betrieb eines Hallraumes reicht der nackte, leere Raum in den wenigsten Fällen aus um optimale Messergebnisse zu erzielen. Die Geometrie des Raumes selbst bedingt gezwungener Maßen eine Vielzahl von Frequenzen, bei denen stehende Wellen auftreten. Ab hinreichend hohen Frequenzen ist die Dichte dieser möglichen stehenden Wellen jedoch so hoch, dass die frequenzbetonenden Effekte sich gegeneinander aufheben und in Summe ein gleichmäßig diffuses Feld zulassen. Bei tieferen Frequenzen müsste man

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

aber die Geometrie des Raumes verändern, um eine Änderung zu bewirken. Da dies in der Regel weder möglich, noch zielführend ist, bedient man sich zweier Hilfsmittel: Diffusoren und Absorber. Letztere werden nur für schmale Frequenzbänder eingesetzt um den Effekt sehr ausgeprägter Moden zu verringern. Erstere dienen der Streuung des Schallfeldes und werden meist durch $0,8\text{-}3\text{m}^2$ große Platten aus Metall oder Kunststoff realisiert, welche im Raum verteilt aufgehängt werden.

Ein anderes Äquivalent zu diesen Platten stellen sehr glatte und steife Kugeln dar. In beiden Fällen müssen im echten Hallraum Haken in der Decke und den Wänden eingepfählt werden um die Diffusor-Körper frei schwebend mit Karabinern und Stahlseilen anzubringen. Für den Modellhallraum wurde entschieden die Anzahl der Bohrungen auf ein Minimum zu beschränken.

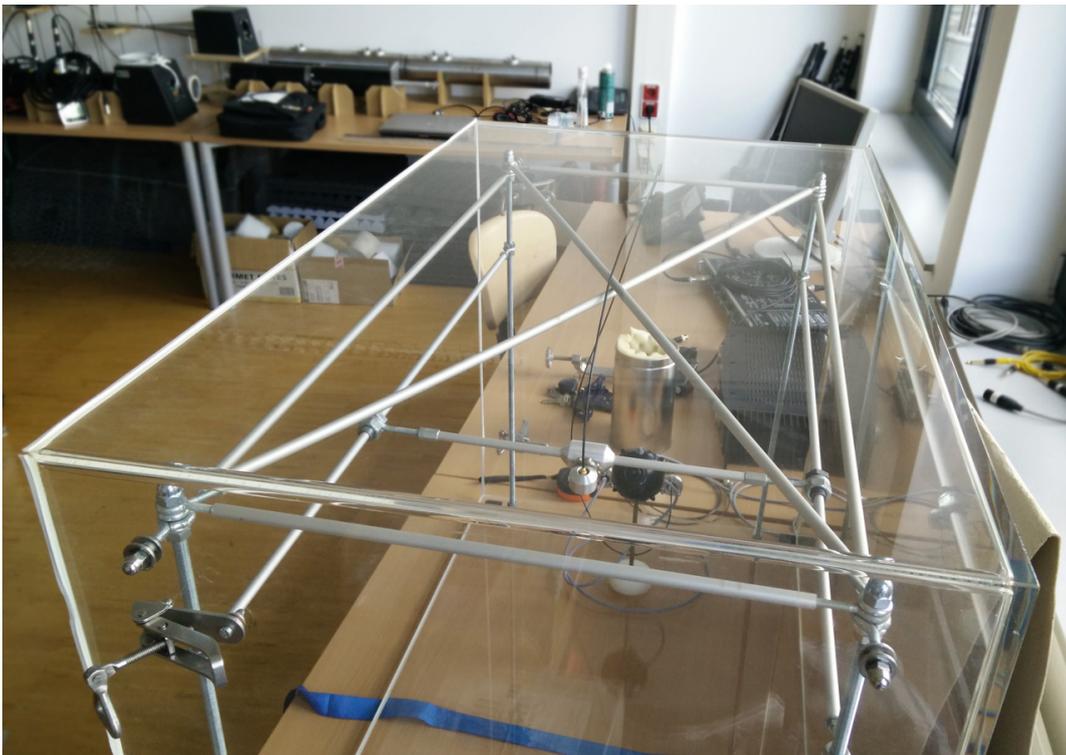


Abbildung 3.5.: Umlaufende Aluminiumstangen

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

Daher musste eine Art Haltegerüst eingeplant werden auf dem die Diffusoren angebracht werden können. Ein solches Gerüst erübrigte außerdem ebenso die Frage nach der Aufhängung des Mikrofons.

Das Gerüst selbst wird durch vier Ringschrauben, welche durch Bohrungen im Kasten angebracht sind gehalten. Die Ringe der Ringschrauben bieten eine Möglichkeit, Stangen mit gleichartigen Enden horizontal entlang der Decke zu positionieren und mit Schrauben zu fixieren. So entstand zuerst ein umlaufendes Gerüst aus Aluminiumstangen, welches nach Fertigstellung noch durch zwei Kreuzstangen und vier Gewindestangen erweitert wurde. Die Gewindestangen wurden von den Ringschrauben an der Decke bis zum Boden des Kastens eingepasst und dienen als einfache Installationsmöglichkeit weiterer Stangen sowie eine zusätzliche Stütze für das gesamte Gerüst um es gegen das Gewicht der Diffusoren zu entlasten. Das Konstrukt ist in [Abbildung 3.5](#) im fertigen Zustand dargestellt.

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

3.4. Diffusoren

Für die Realisierung der Diffusoren sollten sowohl Volums- als auch Plattendiffusoren gebaut werden. Für die Realisierung der ersteren Art wurde zunächst versucht einfache, zweiteilige Zierkugeln aus einem sehr dünnen Kunststoffglas mit Modellgips zu füllen um die Schwingfähigkeit des Plastiks zu eliminieren. Leider hält der Kunststoff den Belastungen des Härtingsprozesses nicht Stand. Ein paar Stunden nachdem der Gips eingegossen wurde entstanden Risse, welche sich Tage später weiter vermehrten. Zum Zwecke der Haltbarkeit des Experiments musste daher eine Alternative gefunden werden.



Abbildung 3.6.: An den Alustangen aufgehängte Diffusorkugel

Hölzerne Kugeln kämen in Frage, wurden aber wegen der notwendigen Lackierung und Politur, um jede absorbierende Eigenschaft bestmöglich zu unterbinden, verworfen. Optimal erschien es, Kugeln aus einem Metall zu verwenden. Diese sind in der benötigten Größe in der Regel nicht gerade günstig. Eine Recherche ergab jedoch einen lokalen Händler, der

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

Gartenzierkugeln mit 5,75cm und 8cm Durchmesser aus einem dünnen Stahlblech, welche schon ab Werk mit einer Chromschicht bedeckt und glattpoliert waren, in ausreichender Menge anbot. Diese hohlen Vollkugeln mussten daher nur aufgebohrt, um ihre Eigenschwingungen zu eliminieren mit Gips gefüllt und mit einem Schraubendübel versehen werden, in die ein Haken eingeschraubt werden konnte, um sie aufhängen zu können. Dabei erwies sich Modellgips "Keramin" als bestes Füllmaterial, da man das Gemisch aus Gips und Wasser sehr dünnflüssig anlegen kann, der Gips im Endstadium der Trocknung aber trotzdem eine hohe Härte aufweist. Normaler Gips aus dem Baumarkt erwies sich dagegen entweder als zu dickflüssig um sich in die 6,5 mm Löcher gießen zu lassen, oder, wenn ein dünnflüssigeres Gemisch verwendet wurde, nach der Härtung als zu weich und dadurch insgesamt als problematisch.

Die fertigen Kugeln lassen sich einfach direkt auf den Aluminium-Haltestangen aufhängen, oder an Drähten um sie der Wand entlang tiefer in den Raum zu positionieren. Abbildung 3.6 zeigt ein aufgehängtes Exemplar einer solchen angefertigten Kugel.

Zum Zwecke erhöhter Flexibilität bei späteren Versuchen wurde zudem eine Reihe von Plattendiffusoren nach konventionellem Design aus Plexiglas gefertigt. Dabei handelt es sich um rechtwinklige Zuschnitte aus 2mm starkem Plexiglas mit abgeschliffenen Kanten und 2mm breiten Löchern an jeder Ecke. Ein Großteil dieser Platten wurde nach dem Zuschnitt in einen Schraubstock so eingespannt, dass sich das Plexiglas durch den Druck in einem möglichst gleichmäßigen Bogen krümmte. Eine vorsichtige Erwärmung der Platten in diesem Zustand durch eine Heißluftpistole lässt das Glas die erzwungene Form annehmen ohne sich dabei unattraktiv zu wellen oder zu verziehen. Ein kleiner Teil der zugeschnittenen Platten wurde hingegen ohne Biegung belassen. Ein Ensemble auf dieser Weise hergestellten Diffusorplatten ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Jede Platte kann an starren Drähten und Haken an den Haltestangen im Hallraum aufgehängt werden. Die Anzahl und die jeweiligen Abmessungen der Platten sind im Anhang aufgelistet.

Für die Positionierung des Mikrofons wurden zusätzliche Stangen an den vertikalen Gewindestangen horizontal angebracht, welche als Basis für einen einfachen optionalen Schlittenmechanismus dienen können.

3. Konstruktion des Miniaturhallraums



Abbildung 3.7.: An den Alustangen aufgehängte Diffusorplatten

In diesem Fall wird eine Stangenkonstruktion normal auf die Schlittenführung durch den Modellhallraum gespannt, welche Fixierungsmöglichkeiten für das Mikrofon bietet. Für die Messung kann die Vorrichtung entlang abgemessener und markierter Abstände bewegt werden um mehrere Messpunkte im Raum zu bieten. Theoretisch macht dies die Messungen bis zu einem gewissen Grad reproduzierbar, da das Mikrofon immer wieder an die gleichen Punkte gebracht werden kann. Es erwies sich jedoch als Hindernis den Prototypen einer solchen Schlittenkonstruktion entlang der Stangen zu bewegen ohne dass sich nicht eine der Diffusoraufhängungen im Weg befand. Zudem müsste der Schlitten in allen Achsenrichtungen verstellbar sein, was sich bei der Erstkonstruktion als schwierig zu realisieren herausstellte.

Um die Messungen einfacher und auch flexibler durchzuführen wurde stattdessen noch ein Miniaturstativ für das Mikrofon konstruiert. Es besteht aus einer Aluminiumbasis mit einer eingeklebten Aluminiumstange, auf der ein kurzer Mikrofonarm mit einer kleinen Halterung auf und ab bewegt werden kann. Die Fixierung erfolgt über eine Feststellschraube am Mikrofonarm. Wie in Abbildung 3.8 zu sehen ist, bilden drei Beinchen aus Zaundraht, welche in die Stativbasis eingesetzt sind die Standaufgabe. Durch die dünnen, jedoch für den gegebenen Einsatzzweck schallharten Beinchen kann das

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

Stativ im ganzen Raum aufgestellt werden. Selbst die Positionierung auf einer Absorberprobe sollte nur vernachlässigbare Auswirkungen auf die Messung haben. Ist das Mikrofonstativ in Verwendung muss jedoch die Position der Kapsel des Mikrofons bei jedem Messpunkt mit dem Maßband eingerichtet werden, da es sonst keine zuverlässige Referenz gibt. Aufgeklebte kleine Markierungen am Hallraumboden können hier zwar helfen, der Abstand von den Wänden in den drei Achsenrichtungen sollte aber trotzdem überprüft werden.



Abbildung 3.8.: Miniaturstativ aus Aluminium mit Drahtfüßen

Um eine Arbeit mit dem Modellhallraum in Zukunft zu vereinfachen, sollte nach Abschluss des Projektes noch eine verbesserte Mikrofonaufhängung nachgereicht werden.

3.5. Kabeldurchführungen

Nachdem der Modellhallraum bis zu diesem Punkt gebaut und vorbereitet war, mussten nur noch Bohrungen für luftdichte Kabeldurchgänge vorgenommen werden. Für solche Fälle existieren zwar spezielle Buchsen, die

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

zum Beispiel jeweils eine männliche BNC-Buchse auf jeder Seite und ein luftdichtes Schott auf einer Seite aufweisen, aber das Mikrofon, welches für das Projekt angeschafft wurde, besitzt einen "Micro-Dot"-Anschluss mit einem langem und sehr dünnem Kabel. Um zu vermeiden dass der Innenraum mit viel losem Kabel gefüllt wird, wurde stattdessen eine Eigenkonstruktion einer dichten Durchführung entworfen. Das Design dieser Durchführung basiert weitgehend auf Deckdurchführungen in der Marineteknik.



Abbildung 3.9.: Kabeldurchführungen in der Marineteknik

Soll zum Beispiel ein Antennenkabel eines Funkgeräts an Deck eines Bootes geführt werden, wird ein Loch für das Kabel gebohrt, in das aber natürlich Wasser eintreten könnte. Um den Durchgang zu ermöglichen und das Loch gleichzeitig abzudichten, wird an der Außenseite eine Gummidichtung um das Kabel angebracht. Das kann ein runder Zylinderpfropfen sein, der in der Mitte ein Loch und einen Schlitz auf einer Seite besitzt um das Kabel ins Loch zu bekommen. Darüber wird eine Kappe angebracht, die mit Schrauben an Deck fixiert wird. Dadurch drückt die Kappe auf den Gummi, verformt diesen, wodurch die zu dichtenden Eintrittsslitze verschwinden und, im Falle der Vorlage, einen Wassereintritt verhindern.

Für die Kabeldurchführung wurde daher mit der Drehbank eine Aluminiumscheibe angefertigt, welche eine, sich konisch verjüngende Vertiefung in der Mitte aufweist. Diese Vertiefung wird mit einer kleinen Gummidichtungsscheibe aus der Sanitärtechnik ausgefüllt, die ebenso ein Loch für das jeweilige Kabel und einen Schlitz besitzt um den Gummi auf das Kabel zu stecken. Die Aluscheibe wird hernach mit Schrauben auf das Acrylglas

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

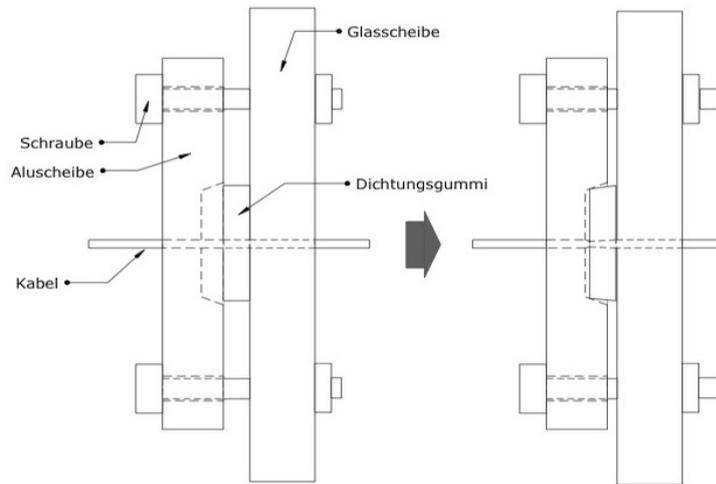


Abbildung 3.10.: Funktionsprinzip der Durchführungsdichtung

gepresst, wodurch sich der Gummi in der sich verjüngenden Vertiefung zusammendrückt und das Kabel fest umschließt. Das Loch im Glaskasten kann deshalb auch groß genug sein um auch dickere Kabel sowie den Microdot-Stecker des Mikrofons durchzuführen.

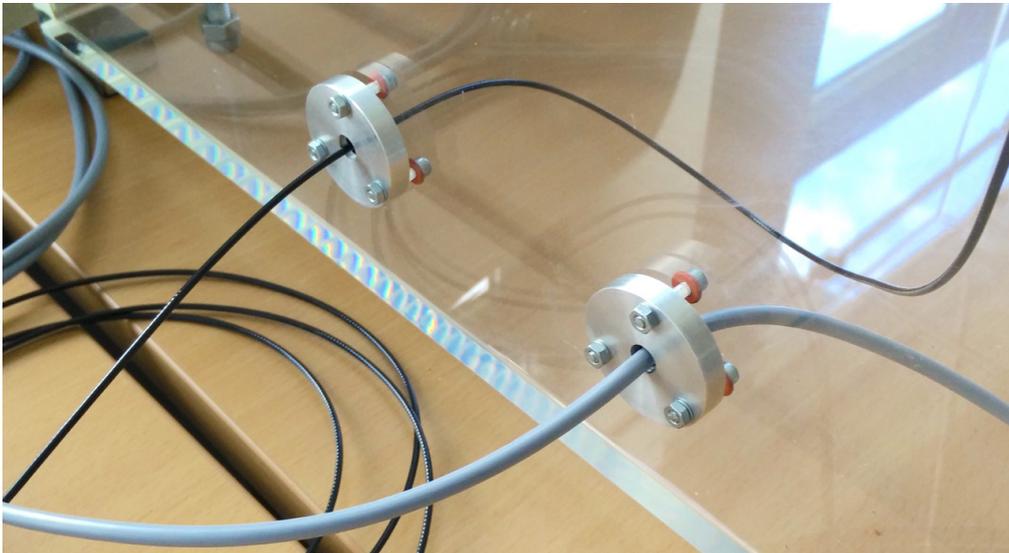


Abbildung 3.11.: Durchführungsdichtung am fertigen Modellhallraum

3. Konstruktion des Miniaturhallraums

Die Gummischeibe umfasst unter Druck das durchgeführte Kabel und bildet gleichzeitig einen Abschluss für das größere Loch im Kasten. Das Prinzip dieser Dichtung ist in Abbildung 3.10 schematisch dargestellt.

Diese Dichtung wurde zweimal angefertigt, einmal für das Mikrofon und einmal für die Schallquelle. Auf diese Weise ist auch eine Erweiterungsmöglichkeit eingeräumt. Sollten in Zukunft andere Mikrofone oder Quellen installiert werden, so kann die Dichtung gegen eine mit einem passenden Loch für ein mehradriges Kabel getauscht werden. Abbildung 3.11 zeigt die Umsetzung am fertigen Modellhallraum.

4. Schallquelle

4.1. Planung der Schallquelle

Für die Implementation einer geeigneten 1:10 Schallquelle benötigen wir für die 1:10-transformierte Messung des Schallabsorptionsgrades nach [EN ISO 354, 2003] einen Lautsprecher der statt dem Bereich von 100 Hz bis 5 kHz eine Bandbreite von 1 kHz bis 50 kHz besitzt. Ein einzelner Treiber kann eine solche Bandbreite generell abdecken, die Herausforderung liegt darin, einen Lautsprecher in der passenden Größe zu finden, der möglichst lineare Übertragungseigenschaften hat, laut genug ist um einen hohen SNR der Messung zu gewährleisten und im Rahmen des Budgets liegt. Die angezielte Größe der Lautsprecher-Box sollte ein Hexaeder mit maximal etwa 5 cm Kantenlänge sein. Dem entsprechend wurden 6 passende Schallwandler gesucht, sprich einer für jede kartesische Achsenrichtung.

Eine interessante Idee Lautsprecher aus bestehenden Produkten auszubauen kommt dabei von [Keiji, 2007], vorgestellt am Internationalen Symposium für Raumakustik (ISRA). Dabei hatte der Autor die Treiber eines kommerziell erhältlichen Luxus-Kopfhörers ausgebaut und aus ihnen eine Dodekaeder-Schallquelle für den Ultraschallbereich, sowie eine Quasi-Tetraeder-Quelle für den Hörschallbereich gebastelt. Eine ähnliche Arbeit stammt von [R. Hupke, 2016] von der Universität Hannover, der aus 6 Paaren teurer In-Ear Kopfhörern die Treiber ausgebaut und daraus eine Dodekaederschallquelle von nur 2 cm Durchmesser hergestellt hatte. Das Ziel dieser Arbeit war es aber ebenso eine Beschallungsmöglichkeit für Modelle im Maßstab 1:25 zu beschallen. Dieser Anspruch der Miniaturisierung war für das vorliegende Projekt nicht erforderlich und die Kosten für Lautsprecher aus den recherchierten Arbeiten lagen weit außerhalb des Budgets.

4. Schallquelle

Es existieren jedoch laut Herstellerangaben eine Reihe von elektrodynamischen Hochton-Lautsprechern für Hi-Fi-Anlagen und Studiomonitore, welche bis maximal etwa 70 kHz übertragen können. Solche Hochtonlautsprecher sind in der Regel dafür ausgelegt ein 2- oder 3-Wege Boxensystem von etwa 1kHz bis 5kHz weg bis zur oberen Hörgrenze zu versorgen. Sie werden in allen möglichen Größen und Belastbarkeiten, beziehungsweise Leistungsstufen hergestellt. Im Hi-Fi-Bereich spricht man bei einem Treiber mit einer Bandbreite die über das menschliche Gehör hinausgeht von einem "Super-Tweeter". Leider sind erhältliche Super-Tweeter gänzlich unbrauchbar für den geforderten Zweck, da sie fast ausschließlich für große Heimanlagen dimensioniert und daher nur in Größen von etwa 10cm x 10cm x 20cm gebaut werden. Auch die Kosten für solche Treiber bewegen sich in manchen Fällen in der Höhe von einigen tausend Euro pro Tweeter.

Ebenso begegnet man im Anlagen- und Studiomonitor-Bereich oft Bändchen-Lautsprechern. Durch die sehr leicht eingespannten Bändchen besitzen Hochtöner nach diesem Funktionsprinzip durchwegs eine erweiterte Wiedergabebandbreite im Ultraschall, mit einem Standardvolumen von über 100 cm³ pro Treiber und doppelten bis dreifachen Kosten eines gewöhnlichen Hochton-Lautsprechers sind sie aber für den geforderten Zweck ebenfalls unbrauchbar.

Glücklicher Weise existieren aber auch eine Reihe von Hochtönern mit akzeptablen Abmessungen im Bereich der Studiomonitore als Einzelbauteile, sowie als Ersatzteile, welche für den geforderten Zweck in Frage kommen. Zwei solcher Hochtöner, der OX20SC00-04 und der OT19NC00-04 der Marke Tymphany, dessen Datenblätter eine Wiedergabe bis über 40kHz aufzeigten, wurden bestellt und mit den Messgeräten des SPSC Instituts an der TU Graz vermessen.

4.2. Vermessung der Lautsprecher

Zur Überprüfung des akustischen Übertragungsverhaltens der bestellten Hochtonlautsprecher wurde vorweg beschlossen, die Messung in den relativ reflexionsarmen Aufnahmeraum des Tonstudios der TU Graz zu verlegen

4. Schallquelle

und dabei nur die direkten Übertragungsfunktionen über das gesamte Messsetup auszuwerten.

Diese Vorgangsweise ergab deshalb die gesuchten Antworten, da für die Funktion der Lautsprecher als Messschallquelle keine strenge Annäherung an ein lineares Spektrum von Nöten ist, da die Auswertung der Nachhallzeiten für jedes Frequenzband Relativmessungen darstellen und die Angaben zur abgestrahlten Schalleistung aus dem Datenblatt nicht geprüft werden mussten. Es ist für eine erfolgreiche Aufstellung einer Abfallkurve im Grunde also nur genug SNR pro Frequenzband zu bewerkstelligen. Der gesuchte Lautsprecher sollte also idealerweise durchaus so linear wie möglich sein, jedoch vor allem einen guten SNR für das Mikrofon erzeugen. Abweichungen von einem linearen Frequenzgang würden die zu messenden Kandidaten jedoch nicht ausschließen. Primär ging es bei der Messung also um die Information, ob die Hochtöner überhaupt die Frequenzgänge ihrer Datenblätter tatsächlich einhielten und welche relativen Lautstärken am oberen Ende des Messbereichs mit ihnen erreicht werden können, da die Datenblätter nur Angaben bis 40kHz machten.

Ebenso wurde von einer kalibrierten Messung abgesehen, welche die Ergebnisse in dB SPL, also absoluter Lautstärke ausgeben würde. Aus den oben genannten Gründen gab es kein Interesse, die Lautstärke der Lautsprecher zu bestätigen oder zu untersuchen.

Der Aufnahmeraum des Tonstudios der TU Graz ist ein Quaderraum mit einer Breite von 5,5m, einer Länge von 7,7m und einer Höhe von 2,8m. Die Hochtöner wurden in einem kleinen Schraubstock eingespannt, welcher an der Kante eines kleinen Tisches geklemmt war, wie in [Abbildung 4.1](#) dargestellt. Das akustische Zentrum befand sich dabei 2,65m von der nördlichen und 2,9m von der östlichen Wand entfernt auf einer Höhe von 89cm über dem Boden und um 30 Grad in Richtung der östlichen Wand gedreht.

Die Messpositionen wurden hauptsächlich im Nahfeld auf oder in der Nähe der Abstrahlachse der Lautsprecher gewählt. Die im Anhang aufgeführten Messkurven zeigen in der Legende in welcher Entfernung sich das Mikrofon vom akustischen Zentrum des Lautsprechers befand. Dabei wurde beim Mikrofon die Membran etwa 3 mm hinter der Schutzummantelung angenommen.

4. Schallquelle



Abbildung 4.1.: Messsetup des Lausprechers

Da es sich beim Mikrofon um eine Kapsel-Vorverstärker-Kombination handelt, welche für einen "Constant Current Power" (CCP) - Betrieb ausgelegt ist, musste dieses Signal erst mit einem sogenannten "Conditioning Amplifier" auf ein audiointerfacetaugliches Line-Signal umgeformt werden. Damit ergab sich die Messkette in Abbildung 4.2. Das Audiointerface spielte die Sweepsignale aus der Messsoftware heraus, wodurch der zu messende Hochtöner über einen Verstärker angeregt wurde. Das akustische Signal wurde vom Mikrofon aufgenommen und dessen Signal im Conditioning Amplifier in ein Line Signal umgesetzt welches wieder in das Interface gespeist wurde.

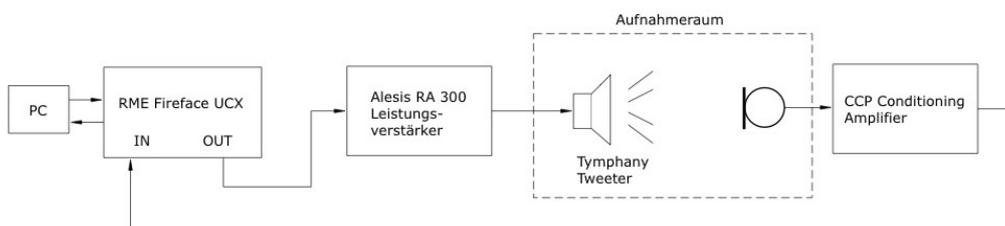


Abbildung 4.2.: Messkette der Vermessung der Lausprecher

4. Schallquelle

Abbildung 4.3 zeigt die Ergebnisse dieser Messung, durchgeführt im Programm "WinMLS" mit der beschriebenen Messkette. Die Aufnahme der Übertragungsfunktionen erfolgte mit einem exponentiellen Sweep über einem Frequenzbereich von 900Hz bis 60kHz in einem Intervall von 10 Sekunden. In Abbildung 4.3 sind ebenso Messungen von zwei unterschiedlichen CCP-Vorverstärkern dargestellt. Bei den ersten Messdurchläufen wurde ein "Nexus Conditioning Amplifier" der Marke Brüel & Kjaer verwendet. Wie zu sehen ist, ergab die Messung mit diesem Vorverstärker einen zu niedrigen Rauschabstand und daher eine ebenso verrauschte Übertragungsfunktion, welche zudem auch noch eine geringere Aussteuerung aufwies. Das Gerät wurde daher durch einen "Charge Amplifier M68D1" der Marke MMF Radebeul ausgetauscht, welcher die Ergebnisse der oberen zwei Kurven lieferte. Die rote und die blaue Kurve zeigen jeweils die Messung des OX20SC00-04, die hell-, sowie die dunkelgrüne Kurve die Messung des OT19NC00-04. Während dieser Messungen tauchte jedoch auch ein unerwarteter Effekt im oberen Spektrum ab etwa 20kHz auf.

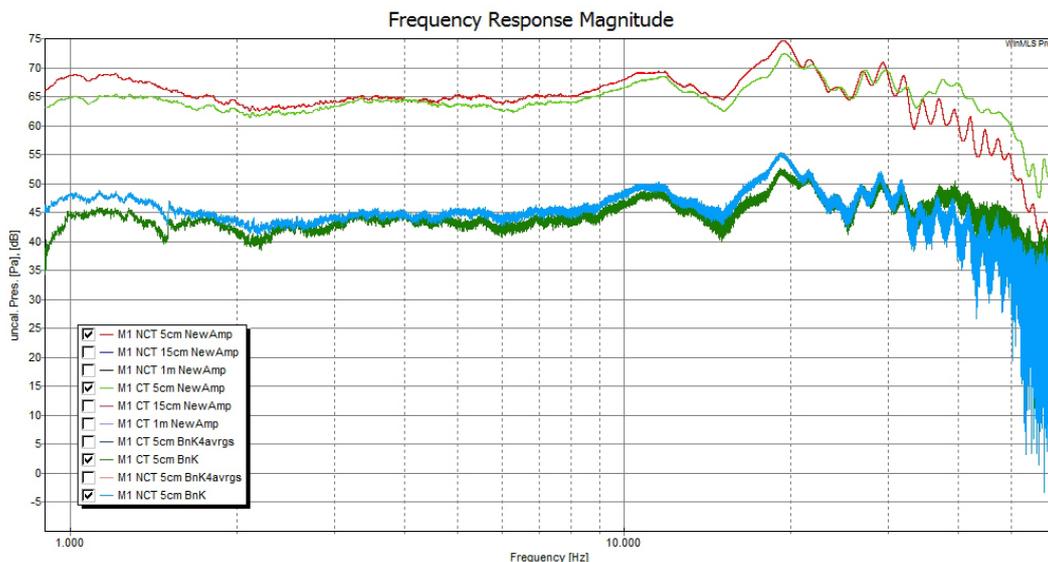


Abbildung 4.3.: Messergebnisse aus dem Programm WinMLS

Wie in Abbildung 4.3 zu sehen, stellten sich Kammfilter-Verläufe ein, deren

4. Schallquelle

Herkunft vom eigens hergestellten Mikrofon-Clip stammte. Der Clip bestand zu diesem Zeitpunkt aus einem Stück Aluminiumstange, etwa 23mm im Durchmesser, in die ein Loch gedreht war, um das etwa 6,5mm dicke Mikrofon zu halten. Die restlichen 16,5mm des Zylinders bildeten jedoch eine reflektierende Wand normal auf die Abstrahlachse der Lautsprecher. Bei den Messungen war also stets der Direktschall in Richtung Mikrofon vom Clip reflektiert worden und bildete Interferenzen.

Als Konsequenz wurde die Messung wiederholt und das Mikrofon zum Vergleich auch ohne Clip mit Klebeband als Sicherung am Stativ befestigt. Die resultierende Messkurve, dargestellt in Abbildung 4.4, rote Kurve, zeigt annähernd lineare Übertragungseigenschaften.

In Abbildung 4.5 ist der Frequenzgang aus dem Datenblatt des OT19NC00-04 dargestellt. Im Vergleich zeigt die durchgeführte Messung ein etwas anderes Bild im Bereich zwischen 1kHz und 5kHz. Auch zeigt das Datenblatt mehr Unebenheiten im Frequenzgang. Die Kurven aus dem Datenblatt und der Messung liegen jedoch innerhalb eines Dynamikfensters von unter 10dB im Bereich von 1kHz bis 40kHz.

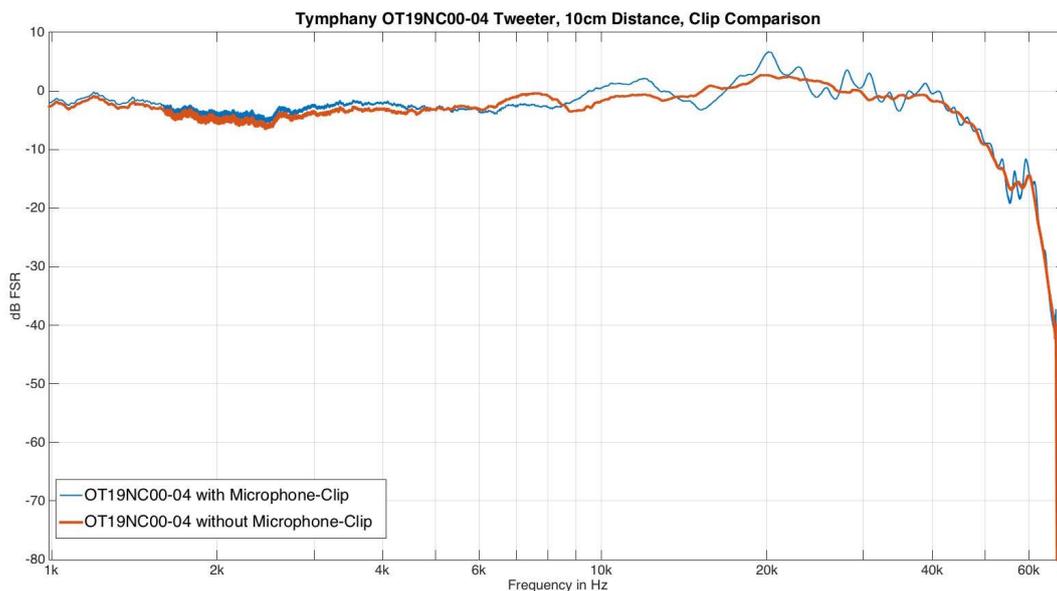


Abbildung 4.4.: Messergebnis des Tymphany OT19, gemessen in MatLAB mit itaToolbox

4. Schallquelle

Die vermessenen Hochtöner, der OT19NC00-04, sowie der OX20SC00-04, sind vom Gehäuse her fast identisch. Der Unterschied liegt in der Membrankonstruktion. Der OX20 stellt einen typischen Kuppel-Hochtöner ("Dome-Tweeter") dar, der OT19 besitzt jedoch einen starren Leitkegel in der Mitte, welcher eine höhere Wiedergabebandbreite ermöglicht. Da sich die beiden Hochtöner hauptsächlich durch den Pegel der maximalen Wiedergabefrequenz unterscheiden, wurde der OT19 als Treiber für die Schallquelle gewählt. Sein Frequenzgang ist nicht durchwegs linear, bleibt aber über große Teile des Spektrums in einem +/- 3dB Fenster.

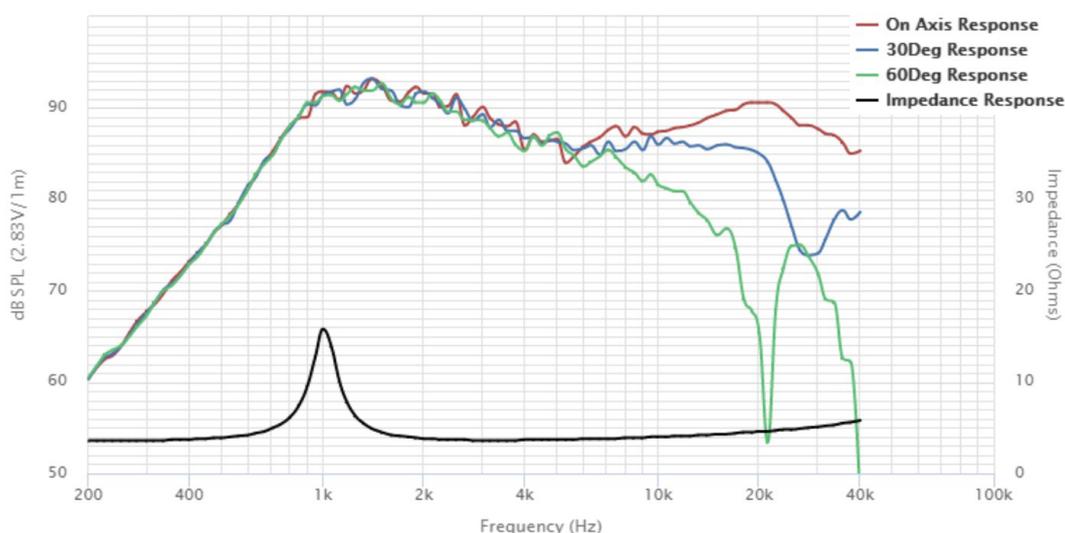


Abbildung 4.5.: Frequenzgang des OT19 Tweeters aus dem Datenblatt

An dieser Stelle sei auch noch einmal hervorgehoben, dass die Messung wie im Vorfeld beschrieben mit einem qualitativ hochwertigen aber dennoch gewöhnlichen Audio-Interface für Musikproduktion/Rundfunk etc. durchgeführt wurde. Das Datenblatt des Geräts selbst gibt für den Übertragungsbereich eine Unsicherheit von +/- 1dB an.

Im Vergleich zum ausgewählten Lautsprecher seien noch die Ergebnisse eines anderen möglichen Kandidaten vorgestellt. Der Kemo L010 ist ein Piezo-Lautsprecher, welcher für den Zweck konstruiert wurde Ultraschallfrequenzen mit bis zu 120dB SPL abzustrahlen. Wie im Unterkapitel 4.5.3

4. Schallquelle

genauer beschrieben, weisen Lautsprecher dieser Bauweise keine linearen Übertragungseigenschaften auf. Abbildung 4.6 zeigt ein Bild des Lautsprechers, sowie einen Ausschnitt des Frequenzgangs.

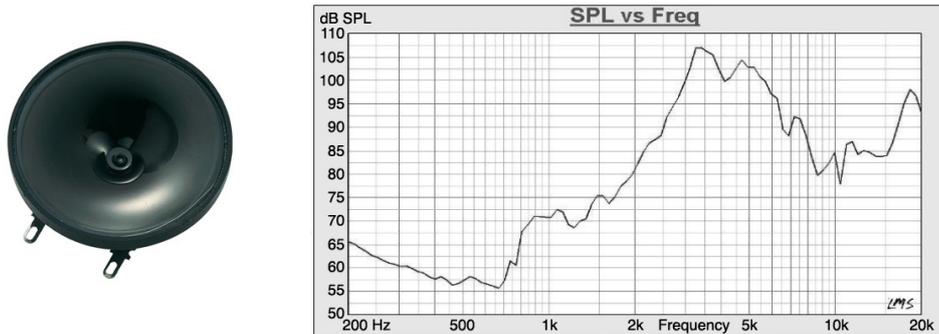


Abbildung 4.6.: PZT Lautsprecher für akustische Maderscheuchen

Die in Abbildung 4.7 dargestellte selbst durchgeführte Messung bestätigt Teile dieses Ausschnitts.

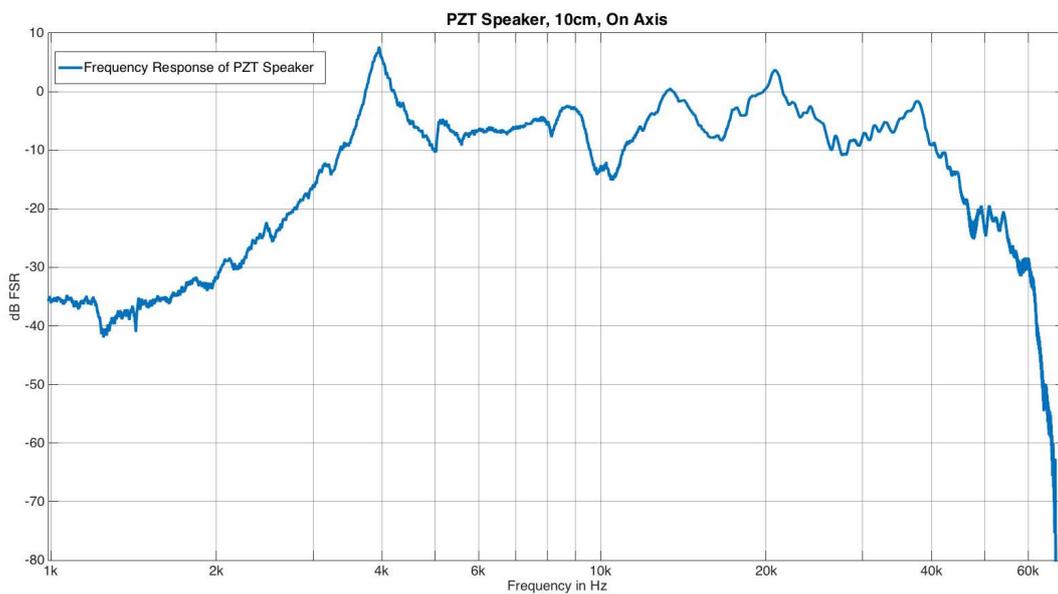


Abbildung 4.7.: Messung des Frequenzgangs des Kemo L010 Piezo Lautsprechers

4. Schallquelle

Bis auf die viel höhere Welligkeit im oberen Bereich darf der Lautsprecher im Bereich zwischen 5kHz und 40kHz sogar als verwendbar bezeichnet werden. Die Probleme liegen in der viel zu geringen Übertragung des Bereichs zwischen 1kHz und 3kHz, sowie die offensichtliche und sehr ausgeprägt Resonanzfrequenz des Lautsprechers bei 4kHz.

4.3. Lautsprechergehäuse

Um die ausgewählten Hochtöner als Messschallquelle zu betreiben, wurde ein Gehäuse benötigt. Für das Projekt wurde eine Hexaederquelle geplant, also 6 Lautsprecher in einer Würfelanordnung. Bei dieser Anordnung bot sich an, aus dem Würfel eine Kugel zu machen. Eine zerlegbare Hohlkugel in passender Größe ist schwer zu finden. Vor allem eine solche, die sich auch leicht bearbeiten lässt, um 6 Löcher zwischen 3 und 4 cm Durchmesser für die Lautsprecher zu bohren. Es lag im Rahmen der heutigen Mittel daher nahe, ein Gehäuse in einem CAD Programm zu erstellen, welches sich von einem 3D Drucker drucken lässt. Hierfür wurde zunächst die in Abbildung 4.8 dargestellte grobe Skizze erstellt.

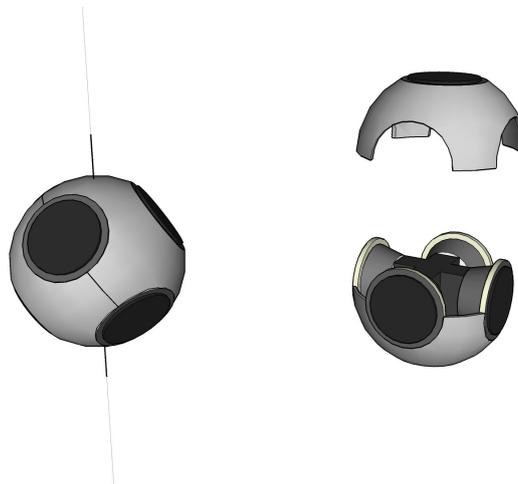


Abbildung 4.8.: 3D-Konzeptzeichnung des Lautsprechergehäuses

Wie zu erkennen ist, sah das Konzept vor, die Kugel in zwei Schalen zu fertigen, welche dann eine Bohrung quer durch jeweils eine der Seitenflächen erhalten würden. Die Tweeter sollten dabei auf einem festen Kern in der Mitte befestigt werden. Die Kugelgröße sollte zunächst einen 6 cm Durchmesser aufweisen. Der Durchgang für das Anschlusskabel der Lautsprecher wurde durch ein eigenes, zusätzliches Loch geplant.

4. Schallquelle

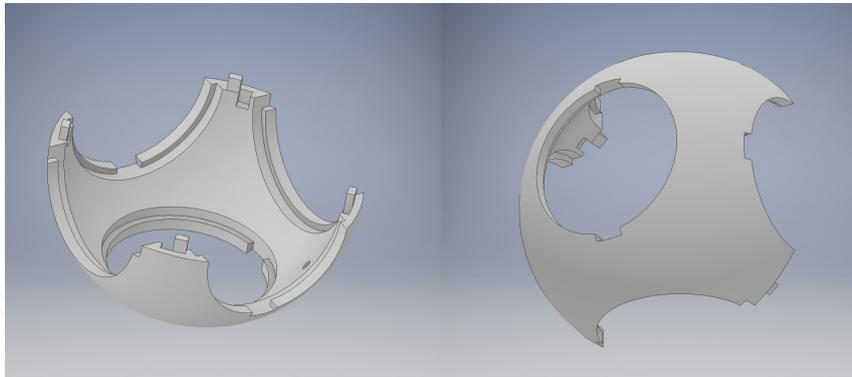


Abbildung 4.9.: 3D-Modell des Lautsprechergehäuses für den 3D-Druck

Das endgültige 3D-Modell dieser Konstruktion wurde dann im Programm "Inventor" von Autodesk erstellt und ist in [Abbildung 4.9](#) dargestellt. Ein auf diese Weise erstelltes Modell lässt sich per Knopfdruck in ein gültiges 3D-Druck Format exportieren. Der Prototyp des Gehäuses wurde erfolgreich fertiggestellt, wies jedoch entscheidende Mängel auf. Zunächst ist zu sagen, dass 3D Drucktechnik für den normalen Konsumenten zum Zeitpunkt des Projekts allgemein noch keine Millimeter-genaue Präzision aufwies. Obwohl der Druck im Großen und Ganzen den Maßen des Modells entsprach, mussten viele Details erst mit der Feile und Schleifpapier nachbearbeitet werden. Dazu kam, dass die Oberfläche eines 3D Drucks generell rau ist.



Abbildung 4.10.: 3D-Druck des Lautsprechergehäuses

4. Schallquelle

Das Abschleifen der Oberfläche und eine Lackierung waren also unbedingt notwendig. Leider erwiesen sich aber zusätzlich die für die Konstruktion des Modells verwendeten Angaben der Lautsprecher im Datenblatt als zu ungenau, weshalb zwar ein einzelner Lautsprecher in seine geplante Kerbe passte, die benachbarten Lautsprecher dann aber um 2mm keinen Platz mehr fanden. Vom Abschleifen und Einpassen der Lautsprecher selbst wurde aus Sorge sie in ihrer Funktion zu beschädigen abgesehen.

Das Modell wurde daher sicherheitshalber auf 7 cm Durchmesser vergrößert und mit einigen Verbesserungen in der Konstruktion, wie einer dickeren Wandstärke erneut in Auftrag gegeben. Der zweite Druck musste natürlich wieder mit Feile und Schleifpapier bearbeitet und lackiert werden, erwies sich jedoch als passgenauer als der Prototyp. Das fertige Ergebnis ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

4.4. Bau der Schallquelle

Die ausgewählten Lautsprecher besitzen laut Datenblatt je eine angegebene Impedanz von $3,64 \Omega$. Die meisten Transistor-Leistungsverstärker in der Audiotechnik sind auf eine Mindestimpedanz von 2Ω ausgelegt. Um diesen Wert bei der Zusammenschaltung der Lautsprecher nicht zu unterschreiten, aber auch keine zu hohe Gesamtimpedanz zu erzeugen, wurde beschlossen, die 6 Lautsprecher in zwei parallelen Serienschaltungen zu betreiben. Eine Gruppe von 3 Lautsprechern besitzt also $10,92 \Omega$, die Gesamtschaltung aus beiden Gruppen daher $5,46 \Omega$.

Zum Zwecke der Zerlegbarkeit wurde beschlossen die Lautsprecher nicht festzukleben. Da die Hochtöner ein gekapseltes Gehäuse besitzen, war es auch nicht notwendig das Gehäuse möglichst dicht zu gestalten. Es genügt die Lautsprecher in das Gehäuse einzusetzen und einen Kern in Form eines passenden Gummiballs zu verwenden um sie an Ort und Stelle zu halten. Die Bohrung quer durch das Gehäuse ermöglicht es, eine 4mm dicke Gewindestange einzuziehen, welche auch durch den Kern führt und auf der Oberseite der Kugelschale wieder austritt. Auf einer Schraube ruhend lässt sich so die gesamte Konstruktion nur durch die Gewindestange fixieren,

4. Schallquelle



Abbildung 4.11.: Fertiges Lautsprecherensemble

welche gleichzeitig als Stativ dient und zum Beispiel in einen passenden Sockel geschraubt werden kann.

Damit diese Konstruktion symmetrisch ist, wurde schon bei der Modellkonstruktion eine exakte Bohrmarkierung an der richtigen Stelle auf der Innenseite der Kugel eingeplant. Eine weitere dieser Markierungen bot sich für das Loch des Anschlusskabels an. Abbildung 4.11 zeigt die fertige Schallquelle.

4.5. Weitere Konstruktionsideen zur Schallquelle

Die in der vorliegenden Arbeit präsentierten Lösungen für die jeweiligen Problemstellungen waren selten die einzigen. Vor allem die Auswahl einer geeigneten Schallquelle stellte eine Herausforderung dar. Zum Zwecke der Dokumentation seien die anderen Konzepte und Ideen zu diesem Thema hier aufgelistet.

Im Folgenden werden Lautsprecher oftmals als "Transducer" beschrieben. Dieser Begriff beschreibt Aktuatoren aller Art, die eine mechanische Schwin-

4. Schallquelle

gung auf ein anderes Medium ausüben. Ultraschallfähige Lautsprecher werden selten als Lautsprecher für das menschliche Ohr verwendet, daher findet man unter dem Allgemeinbegriff "Transducer" mehr Produkte im Handel.

4.5.1. Medizinische Experiment-Transducer

Laut Recherche gibt es im Tierforschungsbereich Lautsprecher mit ähnlichen Eckdaten Anwendung, da viele Tiere, die für Laborexperimente seit Jahrzehnten eingesetzt werden, für den niedrigen Ultraschallbereich empfindlich sind (Mäuse, Hunde,...). Die amerikanische Firma "Tucker-Davis Technologies" bietet für diese Zwecke eine Reihe kleiner elektrostatischer Schallwandler an. Abbildung 4.12 zeigt das TDT Modell ES1 und ein Diagramm der Übertragungsfunktion des ES1, sowie des MF1. Der Transducer ES1 ist ein elektrostatischer Treiber, der MF1 ein elektrodynamischer Lautsprecher.

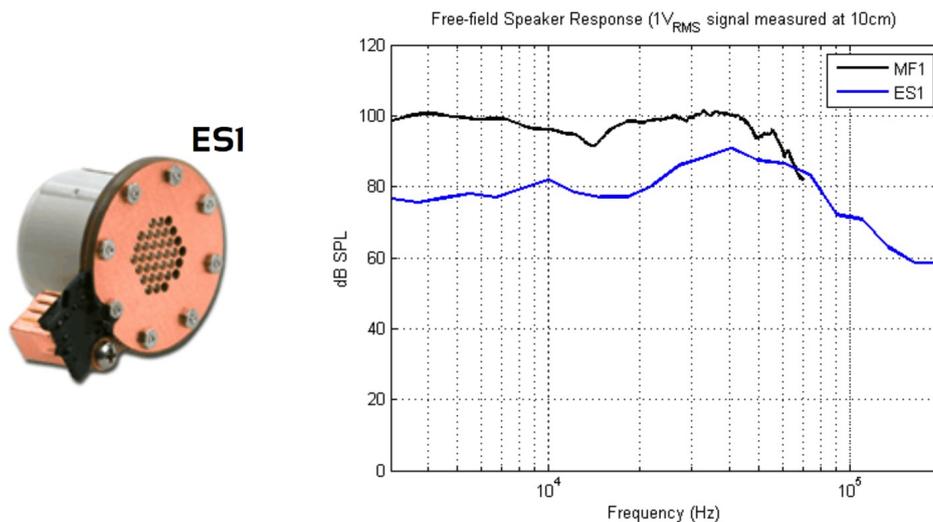


Abbildung 4.12.: Lautsprecher der Firma TDT und Übertragungsfunktion

Der Nachteil dieser Produkte sind die Kosten. Auf Grund der komplizierten Ansteuerung der elektrostatischen Lautsprecher, kann nur ein kom-

4. Schallquelle

plettes System bestellt werden, dessen Kosten das Budget des Projekts überstiegen.

4.5.2. PVDF Transducer

Im Paper von [T. Hidaka, 2010] findet sich eine Schallquelle mit minimalen Abmessungen die für genau den geforderten Fall konstruiert wurde. Zusammenfassend handelt es sich dabei um einen Dodekaeder aus Plastik auf dessen Fünfeckflächen je ein 9,5 mm x 7 mm großer Transducer aus PVDF (Poly-Vinyliden-Flourid) eingesetzt ist. Die Recherche ergab bisher keine Ergebnisse ob es solche Transducer aus einer Massenfertigung zu kaufen gibt. Es muss auch zu einem gewissen Grad angenommen werden, dass es keine große Vielfalt in und kein Interesse an der Massenfertigung dieser Transducerart gibt. Der Grund ergibt sich aus den Eigenschaften des Materials.

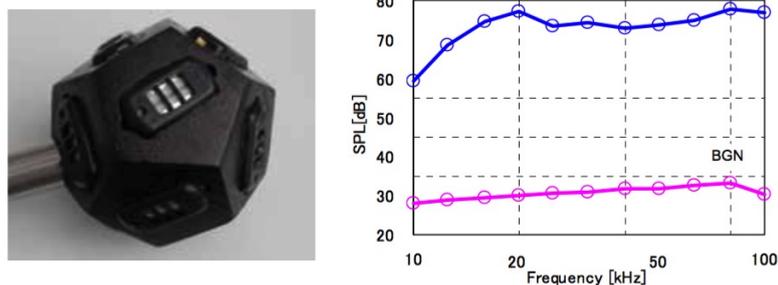


Abbildung 4.13.: PVDF Lautsprecher und Übertragungsfunktion

PVDF ist ein Polymer das sich gut als Folie mit sehr geringer Dicke (bis zu 5-20 μ m) herstellen lässt. Es ist an sich nicht piezoelektrisch. Laut [Wikipedia, 2016a] entwickelt das Material erst durch Erwärmung, sowie durch anschließende Aussetzung eines starken elektrischen Feldes von 30 MV/m die Eigenschaften eines Piezoelements. Generell wären diese Folien sehr attraktiv, da sehr wenig Masse durch das alleinige Anlegen einer Spannung in Bewegung gesetzt wird. In weiteren Publikationen, wie beispielsweise von [K. Gürkan, 2011], wird vorgeschlagen die Folie leicht zu krümmen.

4. Schallquelle

Der Piezoeffekt lässt dann die Folie je nach Spannung zusammenziehen, oder expandieren.

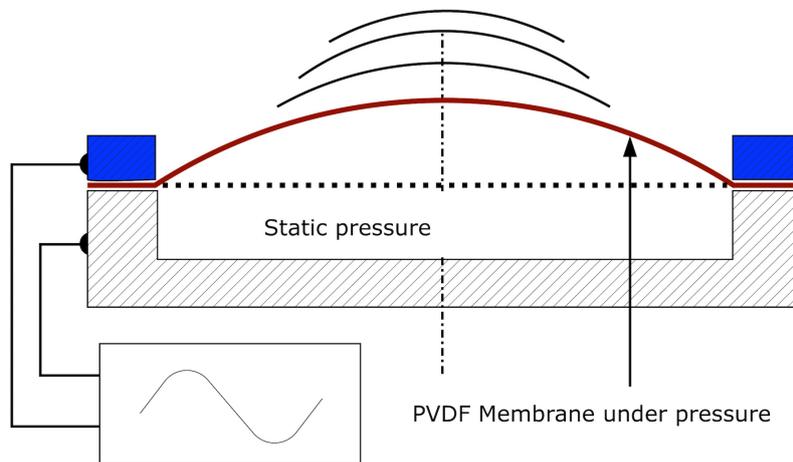


Abbildung 4.14.: PVDF Lautsprecher-Konzept

Obwohl der Werkstoff schon älter ist, gibt es wie gesagt bis jetzt nicht viele erhältliche Produkte aus PVDF. Es finden sich zylindrische Sensoren, welche für Abstandsmessungen konzipiert wurden. Das heißt praktisch, dass ein solcher Zylinder eine eher spitze Resonanzkurve an einer Nennfrequenz und sonst eher mäßiger Wiedergabeeigenschaften besitzt. Abstandssensoren, wie man sie aus Automobilen als Rückfahrhilfe kennt, benötigen nur einen engen Frequenzbereich für die Messung von Abständen durch Abgabe und Aufnahme von Ultraschall.

Eine Möglichkeit hätte darin bestanden etwas PVDF Folie zu kaufen und die benötigten Lautsprecher selbst zu bauen. Dem stehen aber einige Herausforderungen im Wege. Das erste Problem mit PVDF ist, dass es durch Hitzeeinwirkung seine piezoelektrischen Eigenschaften verlieren würde. Ein Anlöten von Leiterdrähten fällt damit also aus. Die Folie muss daher schon ab Werk mit leitfähigem Schichtmaterial geprägt sein, z.B. einem hauchdünnen Film aus Gold. Das nächste Problem ist das Design der Membran. Zwar könnte sie einfach zwischen positive und negative Kontakte geklemmt werden, aber es stellt sich die Frage wie man dies tut. Eine Konstruktion wie in der Skizze in [Abbildung 4.14](#), deren Folie lediglich

4. Schallquelle

einfach gekrümmt ist, ließe sich durchaus selbst herstellen, es müsste aber der Luftspalt zwischen Membran und Gehäuse bedacht werden, der unweigerlich zu akustischen Kurzschlüssen führen würde, wie in [Abbildung 4.15](#) konzeptionell dargestellt ist.

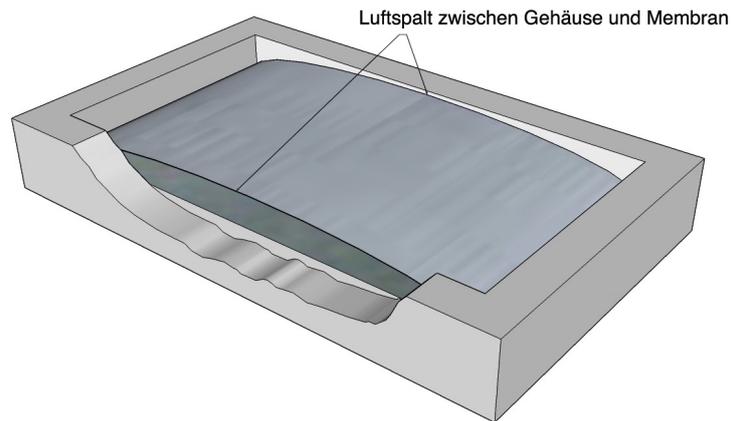


Abbildung 4.15.: PVDF Lautsprecher-Konzept, 3D Modell

Ein anderes Design von [A. Duclos, [2004](#)] sieht die Konstruktion eines sogenannten "Dome-Tweeters" vor. Anders als bei einem gewöhnlichen Hochtöner ließen sich mit PVDF die Membran und dessen Treiber in ein Bauteil vereinen. [Abbildung 4.16](#) zeigt diesen PVDF-Hochtöner, sowie einen Vergleich der simulierten und gemessenen Frequenzgänge des Lautsprechers.

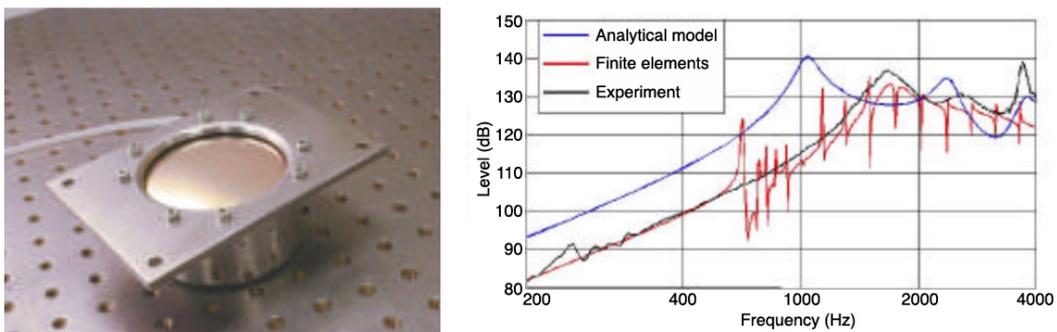


Abbildung 4.16.: PVDF Dome-Lautsprecher

4. Schallquelle

Die Komplikation besteht hierbei darin die PVDF Folie zu einer gleichmäßigen Kuppel zu formen. Allgemein ist zum Thema PVDF noch zu sagen, dass jeglicher PVDF Transducer aus Sicht eines Leistungsverstärkers eine rein kapazitive Last statt einer hauptsächlich induktiven Last eines elektrodynamischen Lautsprechers darstellt.

4.5.3. PZT Piezo-Keramik Transducer

PZT steht für Blei-Zirkonat-Titanat (aus den chemischen Elementen Plumbum, Zirconium und Titan). Der Verbundstoff ist ein Ferroelektrikum und eignet sich als piezoelektrisches Material. Im Gegensatz zu PVDF handelt es sich um etwa 1 mm dicke Keramiken welche sich an sich selbst nicht gut als Membran eignen da PZT in keiner Herstellungsform gute Eigenschaften besitzt. Laut [Wikipedia, 2016b] kann das Material entweder mit weichen Eigenschaften hergestellt werden, was jedoch eine hohe Remanenz zur Folge hat, es verhält sich also nicht-linear, oder man produziert hartes PZT, was das Gegenteil bewirkt, also eine hohe Härte bedingt, welche das Material schwerer formbar macht. Daher finden sich viele PZT Transducer deren Piezoelement mit einer hornförmigen Membran verklebt ist. In den meisten Fällen ist diese Kombination auf eine Frequenz im Ultraschallbereich (Standard ist 40kHz) abgestimmt und hat um diese Frequenz lediglich eine -3dB oder sogar -6dB Bandbreite von +/- 1kHz. Man findet diese Sensoren fast in jedem Ultraschall-Abstandsmessgerät.

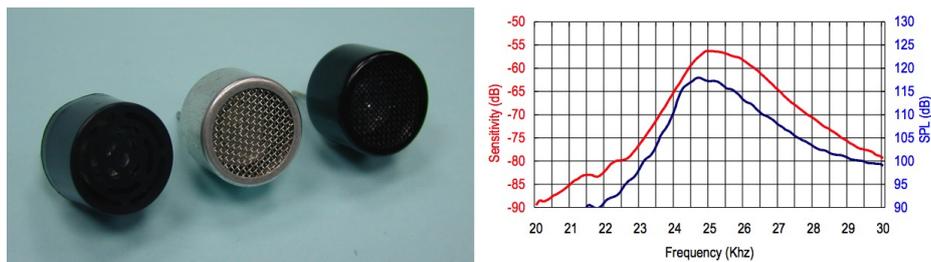


Abbildung 4.17.: PZT Abstandssensoren und typische Übertragungsfunktion

Ein Ensemble dieser Abstandssensoren, sowie eine typische Übertragungsfunktion eines solchen Sensors mit einer Kennfrequenz von 25kHz ist in Abbildung

4. Schallquelle

4.17 dargestellt. Sie sind billig und weit verbreitet. Neben den Abstandssensoren gibt es noch eine Reihe von günstigen PZT-Lautsprechern, welche zum Beispiel als akustische Maderscheuchen für Automobile regelmäßig laute Töne im Ultraschall aussenden. Abbildung 4.18 zeigt den Lautsprecher Kemo L010, welcher in Kapitel 4.2 vermessen wurde, als Beispiel.



Abbildung 4.18.: PZT Lautsprecher für akustische Maderscheuchen

Das bedeutet zwar, dass Lautsprecher wie diese Ultraschall aussenden können, das akustische Übertragungsverhalten ist jedoch nicht wirklich geeignet um, selbst frequenzentzerrt, als Messschallquelle zu dienen.

Da die Abstandssensoren jedoch relativ klein und in sich gekapselt sind, also keine Lautsprecherbox benötigen und es mehrere Modelle mit verschiedenen Resonanzfrequenzen gibt, könnte man mehrere von ihnen parallel betreiben. Der gemeinsame Frequenzgang wäre zwar dennoch sehr wellig, das Mini-Array hätte jedoch den Vorteil, dass es sehr hohe Schalldrücke von bis zu über 100dB SPL laut Datenblättern abgeben könnte. Ein System dieser Art könnte etwa so aussehen, wie in Abbildung 4.19 dargestellt.

Der Würfel unter dem Ultraschall-Array besteht dabei aus einfachen elektrodynamischen Lautsprechern. Diese sind mit Bandbreiten bis zu 20kHz günstig und leicht käuflich erwerblich. Der obere Würfel könnte dabei aus Ultraschallsendern mit den Kennfrequenzen von 22,5kHz, 32,5kHz, 40kHz und 58kHz bestehen.

4. Schallquelle

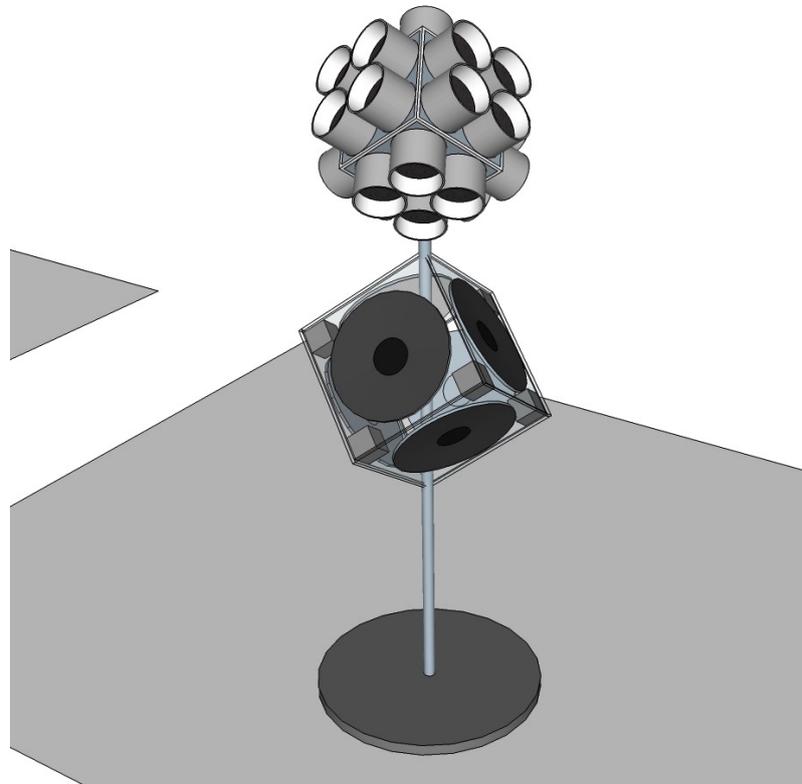


Abbildung 4.19.: 3D-Konzept einer PZT-Schallquelle

Eine weitere Möglichkeit einen PZT Transducer zu bauen wurde im Paper von [M. Kuze, 2000] beschrieben. Hier wird als Treiber eine Piezo-Scheibe verwendet. Solche Scheiben sind handelsüblich und bestehen lediglich aus einer Metallscheibe auf der PZT Material aufgeklebt ist. Im einfachsten Fall wird nun auf der Scheibe und auf das Piezoelement je ein Draht gelötet. Im Gegensatz zu PVDF verträgt PZT höhere Temperaturen und lässt sich verlöten. Eine Spannung veranlasst die Keramik eine Bewegung zu vollführen welche die Scheibe von der Mitte nach außen kreisförmig verbiegt. Das Paper sieht nun vor eine solche Scheibe in einen Metallrahmen, zum Beispiel aus Aluminium zu setzen und sie mit einer kegelförmigen Gummimasse zu versehen. Die zusätzliche Masse soll die Eigenschwingungen der Scheibe bei höheren Frequenzen unterdrücken, die sonst zu Auslöschungen führen würde. Der gebaute Prototyp der Arbeit ist in Abbil-

4. Schallquelle

Abbildung 4.20 seinem Frequenzgang gegenüber gestellt.

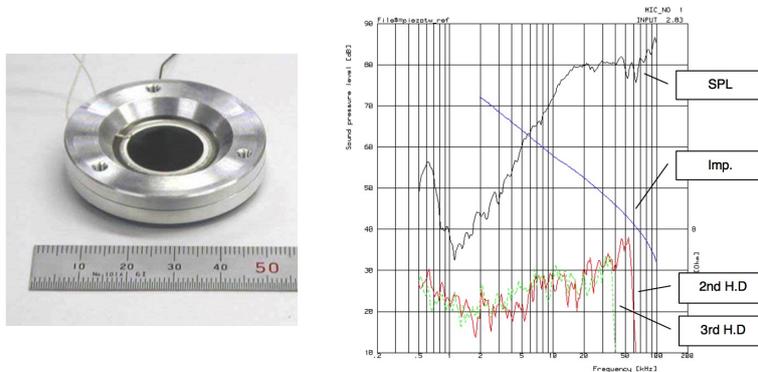


Abbildung 4.20.: Prototyp eines Hochtonlautsprechers aus einer PZT-Scheibe

Das Prinzip wäre relativ vielversprechend da Piezoscheiben günstig sind und bis auf die Anfertigung des Gehäuses und des Dämpfers keine bewegliche Feinmechanik erforderlich wäre. Jedoch verwendeten die Autoren von [M. Kuze, 2000] einen sogenannten bimorphen Piezo. "Bimorphe" Piezoelemente sind eine Art Doppelpiezo bei dem eine Seite einer Piezokeramikscheibe auf eine zweite mit umgekehrter Polung geklebt ist. Im dargestellten Fall ist die Metallscheibe noch zwischen den zwei Piezoelementen eingefügt. Das Prinzip, beschrieben in der Arbeit von [I. Chilbon, 2007], sowie im Buch von [R. Lerch, 2009], ist folgendes: Während die obere Piezokeramik eine zum Beispiel positive Spannung erfährt und sich dabei zusammenzieht, erfährt die untere die gleiche Spannung mit entgegengesetzter Polung und dehnt sich stattdessen aus. In Summe ergibt sich dabei die gleiche Kraft auf die Metallscheibe und daher die gleiche Auslenkung der Membran. Damit lassen sich stärkere Verformungen provozieren und daher insgesamt höhere Lautstärken erreichen.

Das Problem dabei ist, dass es schwieriger ist eine bimorphe Piezometallscheibe in passender Größe im Handel zu finden. Monomorphe Produkte kosten jedoch sehr wenig und sind schnell erhältlich.

4. Schallquelle

4.5.4. Elektrostatische Transducer

Besonderes Augenmerk fiel bei diesen Wandlern auf zwei Modelle von verschiedenen Herstellern, aber mit ähnlicher Funktion. Das eine Modell ist ein "Polaroid Series 600", dargestellt in Abbildung 4.21, das andere der Nachbau des ersten, ein "Prowave 500ES430", dargestellt in Abbildung 4.22. Beide messen etwa 4-5cm im Durchmesser und sind etwa 1cm tief. Der Polaroid liefert etwa 110dB SPL bei 50kHz laut Datenblatt.

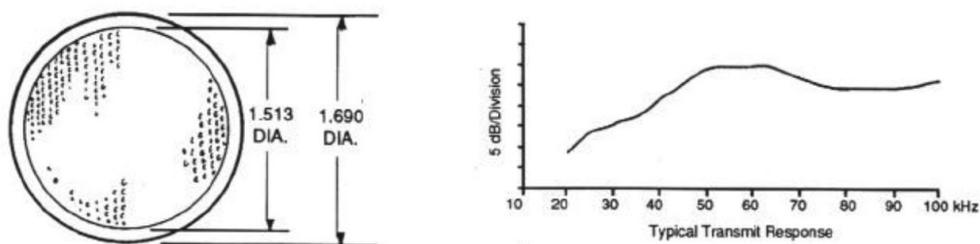


Abbildung 4.21.: Skizzierung und Übertragungsfunktion des Polaroid Transducers

Beide sind flach genug sie auf geeigneten Würfeln zu installieren. Wie aus den Frequenzgängen zu entnehmen ist wäre damit der gesamte Ultraschallbereich abgedeckt. Bei beiden bewegt sich die Kurve in einem 15dB Fenster im interessanten Bereich.

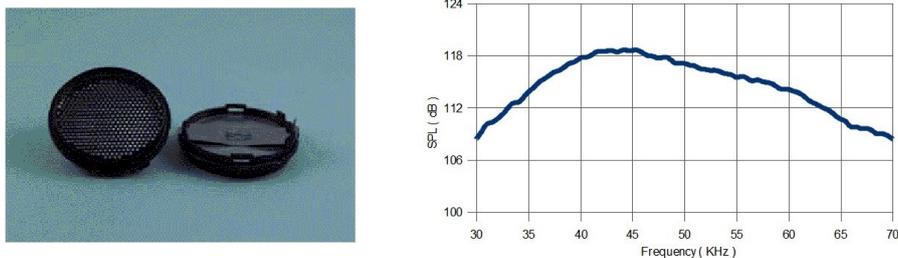


Abbildung 4.22.: Foto und Übertragungsfunktion des Prowave Transducers

Ihr entscheidender Nachteil ist, dass sie eine vergleichsweise sehr hohe Spannung im Bereich von 100 bis 200 Volt für den Betrieb benötigen. Dazu

4. Schallquelle

kommt noch, dass der Betrieb selbst eine Offset-Spannung voraussetzt. Das bedeutet, die Spannung bei zum Beispiel 100 Volt entspricht erst dem Arbeitsmittelpunkt und die positiven und negativen maximalen Ausschläge sind erst mit 200 Volt beziehungsweise respektive 0 Volt erreicht. Da normale Verstärker gerade eine Offset-Spannung verhindern wollen, da diese bei einem herkömmlichen Lautsprecher zu Verzerrungen führen würde, müsste erst ein spezieller Laborverstärker angeschafft werden, der diese Betriebsart bewerkstelligen kann.

5. Software

5.1. Anforderungen an die Software

Die Software des Projekts sollte die Aufnahme der Daten ermöglichen. Dazu gibt es 3 wichtige Teilaufgaben:

- Messung der Raumimpulsantwort
- Berechnung der Nachhallzeiten aus der Impulsantwort für die geforderten Terzbänder
- Berechnung der Absorptionsgrade nach Sabine oder Eyring

Es gibt einige Möglichkeiten wie eine akustische Messung der Impulsantwort durchgeführt werden kann. In Hallraummessungen trifft man jedoch hauptsächlich auf Messungen mit Sinus-Sweeps welche von Dodekaeder-Schallquellen abgestrahlt werden. Um die Implementation dieser Methode weniger zeitaufwändig zu gestalten, wurde anstatt einer kompletten Eigenentwicklung das Softwarepaket "itaToolbox" verwendet. Dabei handelt es sich um eine Ansammlung an Funktionen und Erweiterungen für Mathworks MATLAB. Die im Paper von [Pascal Dietrich, 2010] vorgestellte "itaToolbox" wurde von Mitarbeitern der RWTH Universität Aachen programmiert um Projekte in der Akustik unter einem Dach zu vereinen und deren messtechnischen Implementationen zu beschleunigen. Das Softwarepaket ist unter [itaToolbox, 2016] öffentlich zugänglich.

5.2. Beschreibung der ita-Funktionen

Zu den, für das Projekt, interessantesten Eigenschaften der Software gehören die Funktionen "itaMSTF" und "ita_roomacoustics", welche die geforderten

5. Software

Messungen durchführen können. Die Funktion "itaMSTF" (measurement of transfer function) generiert eine eigene "ita-Klasse", eine MATLAB-Klasse welche von der "itaToolbox" schon alle notwendigen Funktionen zur Bestimmung der Übertragungsfunktion beinhaltet. Dabei kann sogar mit grafischen Benutzeroberflächen (GUIs) gearbeitet werden um der Klasse die nötigen Daten, wie Messfrequenzbereich, Art des Messsignals etc. zu geben, es kann aber auch im MATLAB-Befehl bei der Ausführung in Klammer jeder Parameter schon bei der Initialisierung gesetzt werden.

Befindet sich eine spezifizierte itaMSTF-Klasse einmal im Workspace von MATLAB kann man ihre Funktionen ansteuern. Um die Messung zu starten führt man den Befehl "`*Name der MSTF-Klasse*.run`" aus. Die Routinen der itaToolbox steuern dann selbstständig die Soundkarte des Rechners an, spielen z.B. einen exponentiellen Sinus-Sweep ab, nehmen zugleich das Signal eines oder mehrerer Mikrofone auf und berechnen daraus Impulsantwort und Übertragungsfunktion. Alle Ergebnisse werden in Vektoren/Matrizen im Inneren der MSTF-Klasse gespeichert. Um sie zu nutzen, müssen die Daten über "`*Name der MSTF-Klasse*.Name der Variable*`" ausgelesen werden, wie bei einem MATLAB-Struct oder einer Zelle.

Die Berechnung der Nachhallzeiten kann jedoch einfach mittels der Verwendung der Funktion "ita_roomacoustics" und der erstellten und mit Messdaten gefüllten MSTF-Klasse als Aufrufvariable durchgeführt werden. Auch hier kann mit einem itaToolbox-GUI gearbeitet oder alle Befehle in Skriptform eingegeben werden. Die Funktion berechnet die Nachhallzeiten aus den Impulsantwortdaten der MSTF-Klasse aus und schreibt sie in einer "itaResult"-Klasse als Ausgabewert.

5.3. Beschreibung der grafischen Benutzeroberfläche

Um ein Messen im fertigen Miniaturhallraum zu ermöglichen und praktischer zu gestalten, wurde mit den itaToolbox-Funktionen als Basis eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) mit Hilfe des MATLAB-eigenen GUI-Design-Tools "GUIDE" erstellt. "GUIDE" ermöglicht es auf sehr einfache

5. Software

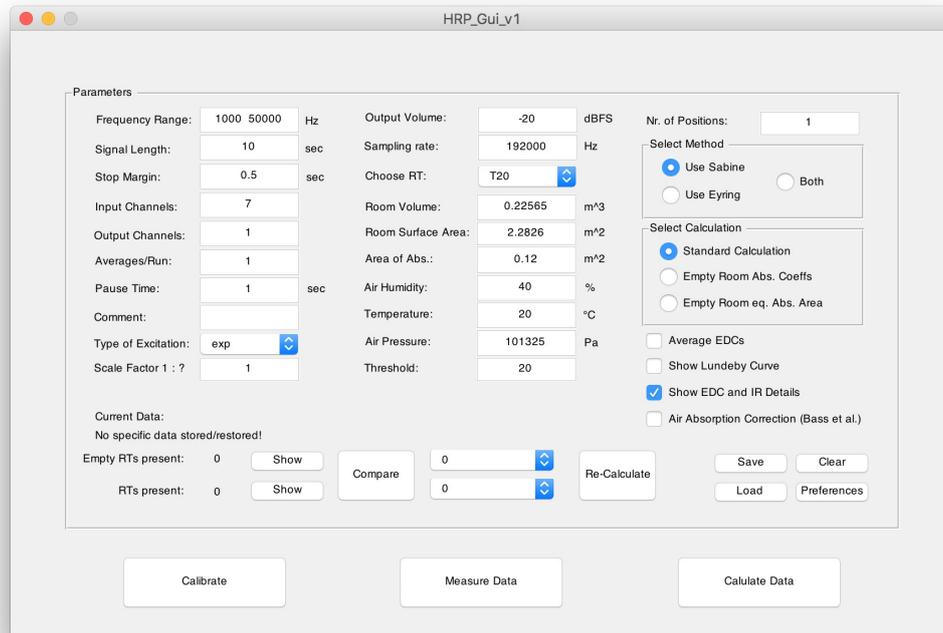


Abbildung 5.1.: Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche des Programms

Weise ein klassisches "Pop-up Fenster" zu erzeugen und zu gestalten, welches Daten als Grafik und in Textform darstellen, Befehlszeilen, Knöpfe, Regler etc. enthalten und im Hintergrund alle MATLAB-Funktionen durch Benutzen der Oberfläche ausführen kann. Legt man sich ein solches GUIDE-GUI an, entstehen zwei Dateien: eine MATLAB typische .m-Datei und eine .fig-Datei. Letztere speichert alle Informationen wie man das GUI im GUIDE-Tool grafisch gestaltet hat, wo welcher Knopf etc. ist, deren Beschriftung und andere Parameter welche für die Darstellung wichtig sind.

Die .m-Datei hingegen enthält die eigentliche, funktionelle Programmierung der Oberfläche. In den ersten Zeilen befindet sich ein Codeblock der mit "Do not edit" markiert ist, da er für die Funktion des GUIs unerlässlich ist. Ab dann kann jeglicher Skriptcode erstellt werden, der zur Laufzeit des GUIs ausgeführt wird. Hauptsächlich beinhaltet der Skriptcode jedoch Funktionen

5. Software

der Knöpfe, Textfelder, etc. welche zum Beispiel dann ausgeführt werden, wenn man sie mit der Maus anklickt.

Das Design des Miniaturhallraum-GUIs, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, entsprang dem Grundgedanken ein Interface zu erstellen in dem man alle wichtigen Parameter für die Messung eingeben und jederzeit ablesen kann. Die Durchführung der Messungen wurde hingegen auf im Prinzip zwei Knöpfe vereinfacht: der Knopf "Measure Data" startet die Messung der Impulsantwort und führt danach noch die Nachhallzeitberechnung aus, der Knopf "Calculate Data" berechnet die Koeffizienten im externen Skript "HRP.CalcCoeffs".

Ein weiterer Knopf ist für die Kalibrierung des Messmikrofons gedacht. Dessen Funktion greift auf die Kalibrierrouinen von "itaToolbox" zurück und legt im Prinzip nur eine kalibrierte Version des MSTF Objekts an, welches danach im Stande ist Schalldruckverläufe in dB SPL anzugeben.

Für die Eingabe aller Parameter gilt ein und dasselbe Prinzip. Ein nur grafisch relevanter Text ("Label") gibt an welche Textbox für welchen Parameter zuständig ist. Wird ein Wert eingegeben, wird in der .m-Datei die entsprechende Textbox-Funktion ausgeführt. Dabei wird der Inhalt der Textbox als Zeichenkette ("String") ausgelesen und in eine Zahl konvertiert. Eine Abfrage überzeugt sich ob der konvertierte Text wirklich eine Zahl ist und gibt im negativen Fall eine Fehlernachricht aus. Im positiven Fall wird der Wert in ein GUI-weites Feld "handles.MRCM_GUIdata" geschrieben. Dies ist notwendig damit alle Unterfunktionen, sprich alle Knöpfe und Regler die eingegebenen Variablen auslesen können. Andernfalls "lebt" die Variable nur in der entsprechenden Funktion und ihr Speicher wird danach von MATLAB wieder freigegeben.

Bei den Dropdownmenüs verhält es sich mit dem Auslesen etwas aufwendiger, da das Dropdownmenü beim Programmstart erst mit möglichen Zeichenketten beschrieben werden muss. Aber im Prinzip geht es auch hier nur darum einen Satz aktueller Parameter zu erhalten mit denen die itaToolbox-Funktionen aufgerufen, bzw. mit denen Berechnungen in Verbindung mit den daraus gewonnenen Daten durchgeführt werden können.

Die Zustandsboxen (Häkchenfelder in Abbildung 5.1 rechts oben) und der Wahlschalter zwischen der Methode nach Sabine oder Eyring darunter

5. Software

stellen jedoch ultimativ nur binäre Werte dar. Ist ein Häkchen gesetzt oder der Schalter zB. in Position "Sabine", weiß das Programm an betreffenden Stellen welche Funktionen auszuführen sind.

Wurden einmal Daten aufgenommen so unterscheidet das GUI durch die zwei möglichen Optionen "Empty" und "Filled" vor der Messung ob der Datensatz dem eines vermessenen, leeren Hallraumes oder dem eines solchen mit angebrachten Absorbern entspricht. Um die Absorptionskoeffizienten zu berechnen benötigt man nach Sabine im einfachsten Fall eine Nachhallzeit ohne Absorptionsmaterial, eine Nachhallzeit mit dem Material, das Raumvolumen und die Oberfläche des Absorbers. Durch Auswahl der ersteren Option wird der Datensatz als "empty room data" gespeichert, andernfalls als "filled room data". Nur wenn Messungen für beide Datensätze vorhanden sind kann das Programm die Absorptionskoeffizienten berechnen.

Das GUI, oder besser die itaToolbox ist darauf ausgelegt die Nachhallzeiten für jedes Terzband pro Oktave im vermessenen Frequenzbereich zu berechnen. Dazu gehört auch die Option wie aus mehreren Messdurchläufen der Durchschnitt der Daten berechnet wird. Je nach Wahl im betreffenden Häkchenkästchen "Average EDCs" werden standardmäßig entweder vor Berechnung der Absorptionskoeffizienten die Nachhallzeiten alle arithmetisch gemittelt oder eben alle "energy decay curves" (EDCs), also alle Abfallkurven die aus den Impulsantworten berechnet wurden. Der Grund dafür ist, dass man so Unregelmäßigkeiten in den EDCs ausgleichen kann um den Algorithmus der Nachhallzeitbestimmung zu verfeinern.

Das Häkchenkästchen "Show EDC and IR Details" bewirkt, dass das Programm bei jedem Messdurchgang ein Übersicht aller Abfallkurven eines bestimmten Mikrofons und die quadrierte Impulsantwort grafisch angezeigt. Dies bietet dem Benutzer Einblick in die aufgenommenen Daten und fehlerhafter Berechnungen, Ausreißer in der Impulsantwort, etc. können vorweg identifiziert werden.

Zur Kontrolle möchte man natürlich die Möglichkeit haben alle ermittelten Nachhallzeiten grafisch auszulesen. itaToolbox hat auch dafür eine eingebaute Funktion. Ergebnisse der Funktionen wie "ita_roomacoustics" werden in Klassen des Typs "itaResult" geschrieben. Diese enthält die Ergebnisse, z.B. Vektoren/Matrizen und Variablen, aber auch Funktionen welche die

5. Software

Daten anzeigen lassen. Im Falle der Daten aus "ita_roomacoustics" gibt es die Möglichkeit alle Nachhallzeiten mittels *Name des itaResults*.bar als Balkengrafik anzeigen zu lassen.

Die Dropdownmenüs und die Knöpfe "Show" über den Messstart-Knöpfen unten im GUI bieten dem User an einen der aufgenommenen Datensätze auszuwählen und die Balkengrafik davon anzeigen zu lassen.

Durch Betätigen des Knopfes "Calculate Data" wird die Berechnung der Absorptionsgrade durchgeführt und automatisch eine Balkengrafik der Ergebnisse angezeigt. Welche Berechnungsmethode dabei verwendet wird entscheidet die gewählte Option im Feld "Select Method". Es kann zwischen der Berechnung nach Sabine oder Eyring entschieden, oder beide in einer Grafik gegenüber gestellt werden. Im Feld "Select Calculation" kann der Benutzer zudem noch entscheiden ob die Standardberechnung mit Hallraumzeiten des leeren und mit Absorber bestückten Hallraums, oder nur die Eigenabsorption des Hallraums selbst berechnet werden soll. Das Häkchenkästchen "Air Absorption Correction (Bass et al.)" ist eine Option die ausschließlich für letzteren Fall dem Endergebnis die Absorption der Luft im Hallraum durch eine Formel nach Bass et al., welche im externen Skript "air_absorption.m" berechnet wird, abzieht. Das Ergebnis soll dann einen theoretischen Eindruck vermitteln wie sehr die Absorption der Luft zur Bestimmung der Eigenabsorption beiträgt. Im Falle der Standardberechnung würde sich diese Korrektur herauskürzen.

Es kann natürlich argumentiert werden, dass die Änderung der Umwelteinflüsse für jede Messung eine marginal andere Korrektur ergibt. Dies hätte jedoch vorausgesetzt allen Messdaten separat eigene Temperatur-, Luftfeuchtigkeit- und Luftdruck-Werte anzuhängen, die vor jeder Messung eingegeben werden müssten. Ein solches Verfahren hätte dann aber auch bedeutet jede Berechnung der Nachhallzeiten mit der zugehörig berechneten Schallgeschwindigkeit durchzuführen und ebenso alle Korrekturterme getrennt aufzustellen, zu mitteln und zum Schluss voneinander abzuziehen. Auf Grund des Umfang des Projekts wurde darauf verzichtet. Eine solche Berechnungsart kann aber dem Programm mit einigem Aufwand jederzeit hinzugefügt werden.

Der Button "Compare" führt ein separates GUI "HRP_Compare" aus. Dieses GUI stellt alle aufgenommen Hallraumzeiten aller Mikrofone in zwei Listen

5. Software

(Leerraum, Raum mit Absorbern) dar. Der Benutzer kann jede (und jede Kombination) von den berechneten Hallraumzeiten in einem einzigen Balkengrafik anzeigen lassen. Dabei wird, unabhängig vom "Comment"-String, welcher jedem Satz Messdaten einen Kommentar hinzufügt, jedem Eintrag in der jeweiligen Liste ein Name zugewiesen, welcher Messposition und Mikronummer enthält. Diese Benennungen werden auch in der Legende der Grafik eingetragen. Zusätzlich wird beim Aufruf auch der Average von beiden Hallzeit-Daten-Sets (also "empty" und "filled" Daten) berechnet und kann mit den einzelnen Verläufen verglichen werden.

Weiters gibt es unten rechts noch 4 Knöpfe (Abbildung 5.1 rechts unten). "Save" nimmt den gesamten Workspace des GUIs, das umfasst alle Parameter und alle Messergebnisse und speichert diese an einen vom User definierten Ort am PC als MATLAB-Datensatz ab (*.mat). "Load" öffnet wiederum ein Fenster um einen solchen Datensatz auszuwählen und die komplette Messung wiederherzustellen. Bei der für den Modellhallraum erforderlichen Abtastfrequenz von 192kHz entstehen größere Datenmengen und je nach Betriebssystem und Leistung des Computers können beide Vorgänge etwas Zeit in Anspruch nehmen. Das Programm zeigt daher während rechenaufwändiger Vorgänge ein "Busy"-Symbol neben dem Cursor bis die Berechnungen fertig sind. Auch erscheint dann ein rein informatives Fenster, welches die beendete Arbeit signalisiert.

Der Knopf "Clear" löscht alle aufgenommenen Daten und Parameter und versetzt das GUI in den Startzustand zurück, welcher schon in der m-Datei des GUIs definierte Standardparameter enthält. "Preferences" öffnet das Eigenschaften-Menü der itaToolbox. Diese Funktion ist dafür gedacht die Soundkarte des Rechners schnell und einfach für die Messung zu konfigurieren ohne das gesamte itaToolbox-GUI öffnen zu müssen.

Der Button "Re-Calculate" führt weite Teile der Berechnungen im Inneren der Funktion von "Measure Data" noch einmal separat aus. Dies hat den Zweck, dass schon aufgenommene Impulsantworten in einem korrekt angelegten Datensatz dazu verwendet werden können um andere Nachhallzeiten zu berechnen, oder vorhandene Datensätze dazu um Nachhallzeiten erneut zu berechnen. Da dabei alle Daten in einem einzigen Durchgang behandelt werden, kann diese Option noch mehr Zeit in Anspruch nehmen als das Speichern oder Wiederherstellen von Daten mit "Save" und "Load".

5.4. Beschreibung des Workflows

Eine Messung mit der Software besteht nun aus folgenden Punkten:

- Die Diffusoren werden optional angebracht und das Messmikrofon wird an einer gewünschten Stelle fixiert. Nach der Aufstellung der Schallquelle wird der Kasten geschlossen und die Messsoftware gestartet.
- In der Messsoftware sollten nun alle Werte und Einstellungen eingetragen, bzw. überprüft werden. Im Textfeld oben rechts muss vor der Messung bestimmt werden wie viele Messpunkte man abfahren möchte. Da für das Projekt nur ein Mikrofon zur Verfügung steht, muss die Messung für jede Position des Mikrofons wiederholt werden. Um die Positionswechsel des Mikrofons zu ermöglichen hält das Programm vor jeder Messung mit einem Pop-up Fenster an und fragt den Benutzer, ob es weitermachen kann.
- Bei einem "Ok" fährt das Programm einen kompletten Messvorgang ab. Gab es nur einen Messpunkt, oder handelt es sich um den letzten, wird die Messung gespeichert und das Programm kehrt zum Normalzustand zurück. Bei einem Abbruch werden falls vorhanden alle bis zu diesem Punkt aufgenommenen Messdaten gespeichert und die Messung abgebrochen.
- Für die Messung des leeren Raumes ist bei der Abfrage am Beginn der Messung die Option "Empty" auszuwählen. Dies erstellt einen Datensatz für Nachhallzeiten und Absorptionsgrade des leeren Hallraums für das Programm. Wird "Filled" gewählt, gilt die Messung als Daten für den, mit Absorbern bestückten Hallraum. Dadurch ist es möglich eine Messung für den leeren Hallraum, gefolgt von einer oder mehreren Messungen mit verschiedenen Absorptionsproben durchzuführen.
- Ist die Messung für beide Fälle abgeschlossen, können zunächst über die Drop-down-Menüs unten die Nachhallzeiten-Datensätze geprüft werden. Der Button "Show" zeigt dabei die jeweiligen Daten der ausgewählten Messposition.
- Um die Nachhallzeiten bestimmter Messungen vergleichen zu können, kann man sich über den Knopf "Compare" eine Liste aller aufgenommenen Daten angezeigt lassen. Die gewünschten Einträge können

5. Software

mit gehaltener Auswahl Taste an- und abgewählt und mit dem Knopf "Compare selected" in einem Diagramm verglichen werden. Die Auswahl Taste ist vom Betriebssystem des Computers abhängig.

- Wurden für den leeren, als auch den mit Absorptionsmaterial gefüllt Hallraum Nachhallzeiten aufgenommen, erhält man mit dem Button "Calculate" eine Grafik der aus den Daten berechneten Absorptionsgraden, sowie einen Vektor im Arbeitsbereich von MATLAB mit den berechneten Ergebnissen. Erst hier wird entschieden welche Mittelungsverfahren ("Average EDCs") und welche Bestimmungsmethode der Absorptionsgrade (Sabine, Eyring oder beide) gewählt wurde. Ebenso verhält es sich mit den Werten für Volumen und Oberflächen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, etc. Alle Werte die erst in die Absorptionsgradberechnung einfließen, können auch erst dann eingetragen, bzw. für jede Berechnung vorher ausgebessert werden.
- Will man weitere Messergebnisse aufnehmen, oder eine bestimmte Messposition wiederholen, wählt man die jeweilige Option beim Start der Messung. "Add Data" fügt unabhängig von den schon gespeicherten Daten weitere Daten hinzu. Für "Replace Data" wird eine bestimmte Position ausgewählt und mit neuen Ergebnissen überschrieben.

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

6.1. Vorgaben der Norm

Die ÖNORM EN ISO 354 klassifiziert einen Raum als geeigneten Hallraum wenn dieser ein Volumen von über $200m^3$ reinem Luftvolumen besitzt, dessen Raumkantenlängen in keinem ganzzahligen Verhältnis stehen. Die Oberfläche wird natürlich als so reflektiv wie möglich vorausgesetzt und wie in den vergangenen Kapiteln erwähnt, sollte die Diffusität des Schallfeldes im Raum durch zusätzlich angebrachte Flächen zur Streuung gesteigert werden. Diese Diffusoren sollten laut Norm starr angebrachte, gerade oder gekrümmte Platten sein.

Um die Diffusität des Schallfeldes im Hallraum nach ÖNORM EN ISO 354 zu gewährleisten gibt es im Anhang A der Norm eine Eignungsprüfung. Dazu wird eine stark dämmende Probe von 5cm bis 10cm Dicke und einer Fläche von $10-12m^2$ mit einem Seitenverhältnis von 0.7 bis 1 in mehreren normgerechten Messreihen mit ansteigender Anzahl von Diffusoren vermessen. Die Probe sollte eine Absorption von $\alpha > 0,9$ im Bereich zwischen 500Hz und 5kHz besitzen, eine Eigenschaft die Glaswolle, Steinwolle oder Zell-Polyurethanen besitzen. Die Probe soll dabei laut [EN ISO 354, 2003] leicht schiefwinklig zur nächsten Raumwand mindestens 75cm, aber am besten mindestens 1m von jeder Wand entfernt aufgelegt werden.

Die gewöhnlichen Diffusorplatten sollten hingegen eine flächenbezogene Masse von $5kg/m^2$ aufweisen und etwa $0,8m^2$ bis $3m^2$ groß sein. Für Diffusorkugeln gibt es keine Vorgaben, viele Publikationen und Versuche, wie zum Beispiel denen von [D. Bradley, 2014], haben jedoch bestätigt dass

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

Volumsdiffusoren in Form von Halbkugeln oder Kugeln als sogenannte "Boundary Diffusors" verwendet werden können. Die angefertigten Metallkugeln des Projekts besitzen umgerechnet einen Durchmesser von 55cm, was einer Oberfläche von $0,95m^2$ entspricht. Die Oberfläche entspricht also den Mindestmaßen aus der Norm.

Zur Bestimmung der Diffusität wird nun die Schallabsorption der Absorberprobe in folgenden Schritten im Hallraum vermessen:

- Messung ohne Diffusoren
- Messung mit einer geringen Anzahl von Diffusoren mit einer Gesamtfläche von etwa $5m^2$
- Weitere Messungen mit einer zunehmenden Anzahl von Diffusoren in Schritten von etwa $5m^2$

Abschließend ist von jeder Messung aus allen Nachhallzeiten im Bereich von 500Hz bis 5kHz der Durchschnitt zu berechnen und dieser Wert als Funktion der in der jeweiligen Messung verwendeten gesamten Diffusorfläche in einem Diagramm zu vermerken. Bei zunehmender Diffusorenanzahl nähert sich der errechnete Mittelwert der Nachhallzeiten einem Maximum an und verändert sich bei steigender Anzahl von weiteren Diffusoren nur geringfügig um dieses Maximum. Die Gesamtfläche von Diffusoren bei der dieses Maximum erreicht wird, bezeichnet die Norm ISO 354 als die optimale Anzahl an Diffusoren.

Laut einer Anmerkung in der Norm trifft dieser Zustand erfahrungsgemäß ab einer gesamten Diffusorfläche im Ausmaß zwischen 15 bis 25 Prozent der gesamten Raumbofläche ein. Bei einer Fläche von $228,26m^2$ fällt diese Schätzung also zwischen $34,24m^2$ und $57,06m^2$.

6.2. Umlegung auf den Modellhallraum und das Projekt

Die Vorgaben der ÖNORM EN ISO 354 lassen sich im Allgemeinen im Maßstab 1:10 skalieren. Die Probe sollte demnach umgerechnet etwa 5mm bis 1cm dick sein, eine Größe von $0,1m^2$ bis $0,12m^2$, deren Kantenlängen

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354



Abbildung 6.1.: Für die Messung verwendete Absorbermatte

in einem Verhältnis von 0,7 bis 1 stehen und eine Absorption von 0,9 im Bereich von 5kHz bis 50kHz aufweisen. Die Diffusoren sollten in Schritten von $0,05m^2$ Fläche zunehmen.

Als Absorberprobe wurde eine einfache Schaumstoffdämmmatte gewählt, welche eine gehügelte Oberfläche besaß, an dessen Spitzen die Matte eine Dicke von etwa 1cm aufwies. Die Matte maß etwa 41cm Länge zu 29cm Breite und ist in [Abbildung 6.1](#) dargestellt. Damit war die Vorgabe der Norm erfüllt, es sei jedoch erwähnt, dass durch die Vorgabe zum Seitenverhältnis die Probe so breit geraten war, dass bei schräger Auflage nur etwas mehr als der Mindestabstand von 7,5cm zu beiden nächsten Wänden eingehalten werden konnte. Der ideale Abstand von 10cm hätte vorausgesetzt die Probe zu schmälern, was aber wiederum die Vorgaben für das Seitenverhältnis verletzt hätte. Da die 7,5cm Mindestabstand eingehalten werden konnten, wurde entschieden auf den idealen Abstand zu verzichten.

Die Diffusorkugeln hatten, wie im Kapitel 3 beschrieben bis auf zwei 8cm Kugeln je einen Durchmesser von etwa 5,75cm. Bei einer Diffusorfläche von $95cm^2$ mussten also pro Messung je mindestens 5 Kugeln im Raum hinzugefügt werden. Die zusätzlich angefertigten Diffusorplatten aus Plexiglas besitzen alle verschiedene Abmessungen, deren Daten im Anhang zu finden sind.

6.3. Durchführung von Probemessungen im Modellhallraum

Da dem Projekt nur ein einzelnes geeignetes Messmikrofon zur Verfügung stand, mussten selbstverständlich alle Messungen sequentiell durchgeführt werden. Die ÖNORM EN ISO 354 empfiehlt eine Mikrofonanzahl von 6 und eine Quellenpositionsanzahl von 2, also insgesamt 12 Quellen-Mikrofon-Kombinationen, es musste also für jede Messreihe pro Quellenposition das Mikrofon 6 mal neu positioniert und die geringfügige Änderung der Atmosphäre im Modellhallraum in Kauf genommen werden.

Für die Messungen wurde das Miniaturstativ, wie in Kapitel 3.4 beschrieben verwendet. In Tabelle 6.1 sind die gewählten Mess- und Quellpositionen dokumentiert. Sie wurden pro Messung nach der Reihe abgearbeitet.

Mikrofonnr.	Quellennr.	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
1	-	38 cm	62 cm	22 cm
2	-	34 cm	50 cm	14 cm
3	-	33 cm	36 cm	17 cm
4	-	20 cm	40 cm	28 cm
5	-	22 cm	52 cm	22 cm
6	-	26 cm	63 cm	14 cm
-	1	15 cm	16 cm	17 cm
-	2	30 cm	15 cm	17 cm

Tabelle 6.1.: Mikrofon und Quellpositionen

Die Koordinatenangaben beziehen sich dabei auf die linke untere Ecke der Rückwand auf der Seite der Kabeldurchführungen, welche als Koordinatenursprung diente. Angaben in X-Richtung beschreibt den Abstand vom Ursprung entlang der Seitenkante, in Y-Richtung entlang der Rückwandkante und in Z-Richtung die Höhe über dem Boden. Eine Übersicht der beschriebenen Positionen ist in Abbildung

Zunächst erfolgten einzelne Durchläufe zur Erprobung der Auswertung des Programms. Für jede Messung wurde Eingangs auch Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Nähe des Modellhallraums von einem Messgerät

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

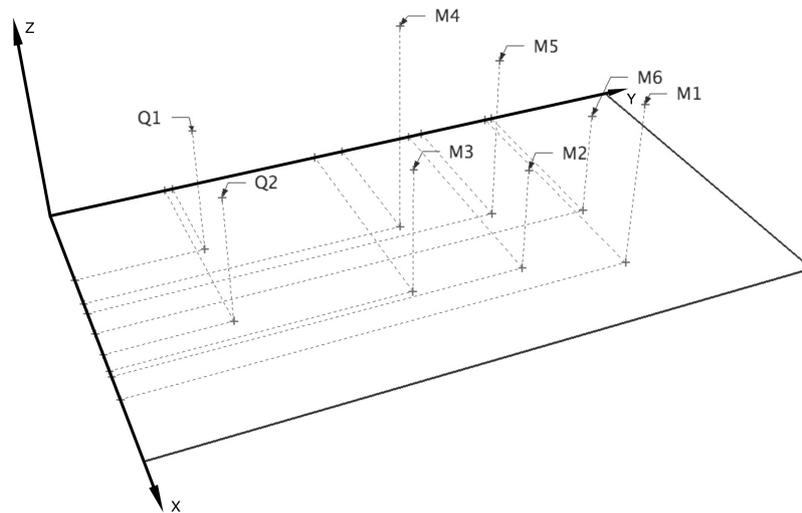


Abbildung 6.2.: Übersicht der Positionen im Modellhallraum

des Laborbestands abgelesen. Der Luftdruck des Grazer Flughafens, dessen Höhe über dem Meeresspiegel näherungsweise auch für die Technische Universität Graz gilt, wurde pro Messsession aus dem Internet unter [ZAMG.ac.at, 2016] abgerufen. Da sich bei mehreren Messsessions der Druck nicht änderte, galt forthin pro Tag ein statischer Luftdruck.

Als erste vollwertige Testmessung wurde der leere Raum an sich untersucht. Der Modellhallraum wurde an 3 verschiedenen Tagen mit je 12 Quell-Mikrofon-Kombinationen vermessen und die reine Eigenabsorption des Raumes für jedes Terzfrequenzband mit der Nachhall-Formel von Sabine mit dem Programm berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.3 zu finden. Bis auf eine geringfügige Varianz in den obersten Frequenzbändern zeigen alle Messungen ein statisch gleiches Bild. Alle drei Messungen sind der Luftabsorptionskorrektur nach [H. E. Bass, 1995] gegenüber gestellt. Wie zu erkennen ist, reduziert die Korrektur die Absorption des Hallraums ohne Lufteinwirkung theoretisch auf ein Minimum unter 3% für alle Frequenzbänder.

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

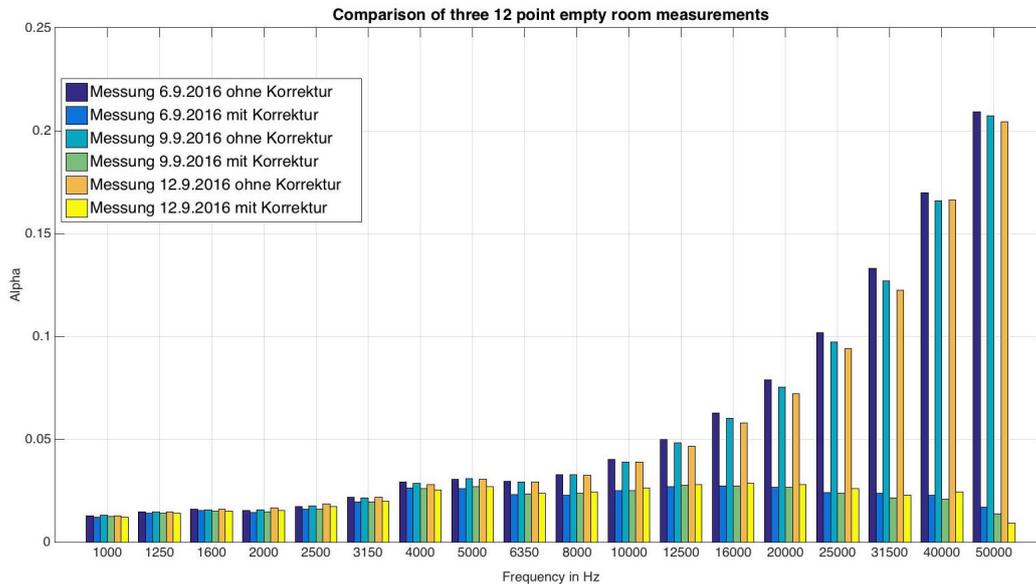


Abbildung 6.3.: Ergebnisse der Leerraum-Messung

Tabelle 6.2 zeigt die an diesen Tagen aufgenommenen atmosphärischen Daten. Bei den Messungen wurde der Drift von Temperatur und Luftfeuchte beobachtet, welcher selten mehr als weitere 1 Grad Celsius, bzw. 1 % relative Feuchtigkeit ausmachte. Die Werte nahmen auf Grund der Körperwärme und Evaporation meistens eher zu als ab. Da jedoch über eine gesamte geschlossene Messreihe nur der beschriebene Drift festzustellen war, welcher die Schallgeschwindigkeitsberechnung lediglich um weniger als 0,5% veränderte, wurde die Änderung während der Messung als vernachlässigbar hingenommen.

Messung Nr.	Datum	Temperatur	Luftfeuchte	Luftdruck
1	6.9.2016	25,0 C	44,5%	102020 Pa
2	9.9.2016	25,0 C	49,2%	101530 Pa
3	12.9.2016	26,8 C	52,1%	101740 Pa

Tabelle 6.2.: Atmosphärische Daten der Leerraummessung

Die Mittelwerte der aufgenommenen Nachhallzeiten des leeren Hallraumes der Messung vom 6.9.2016 sind in Abbildung 6.4 aufgeführt. Dabei darf

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

der Skalierungsfaktor 1:10 nicht übersehen werden. Eine angezeigte Nachhallzeit des Modells von zum Beispiel 1,1 Sekunden entspricht also einer Nachhallzeit von 11 Sekunden im Raum voller Größe. Die dargestellten Werte sind die Ergebnisse einer T_{30} -Messung.

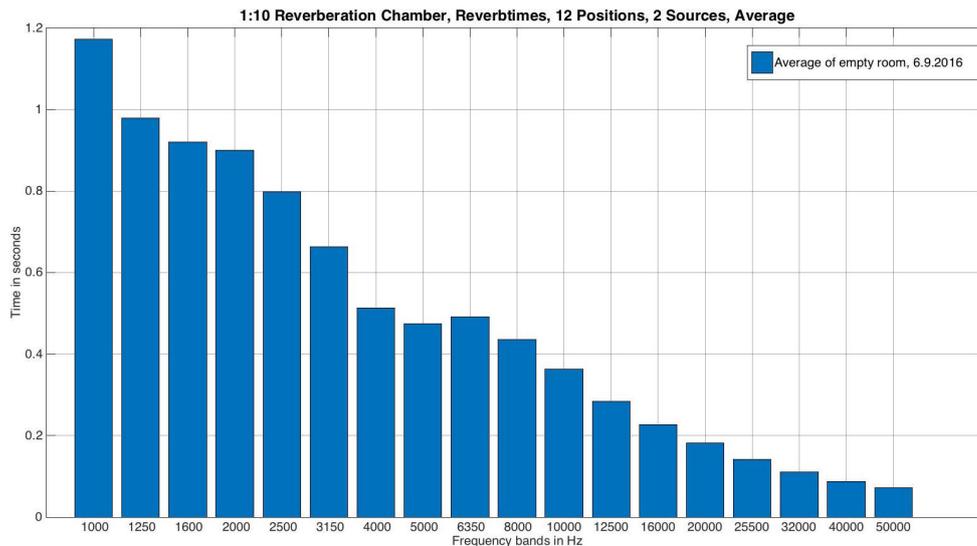


Abbildung 6.4.: Mittelwerte der aufgenommenen Nachhallzeiten der ersten Messung

Tabelle 6.3 zeigt einen Vergleich der aufgenommenen Werte mit der Originalvorlage, dem Hallraum der TU Graz. Dabei sei noch einmal erwähnt, dass vom Acrylglasbox-Hersteller nicht die exakten Maße eingehalten wurden. Die Hallzeiten sind also nur begrenzt vergleichbar. Der tatsächliche Maßstab nähert sich eher einem Verhältnis von 1:10,183 an. Wie in Tabelle 6.3 zu sehen ist, verändern sich dadurch die Nachhallzeiten laut dieser Umrechnung jedoch nur marginal.

Bei Testmessungen mit verschiedenen Absorbern fiel bei der Auswertung sofort auf, dass der SNR bei einigen Berechnungen zu gering war und keine Werte berechnet wurden. In der ÖNORM EN ISO 354 wird empfohlen für jedes Band der erforderlichen Dynamik (bei einer beispielhaften Messung der Nachhallzeit T_{20} bedeutet dies, wie in Kapitel 2 beschrieben eine Auswertung ab -5dB bis -25dB, also 25dB Gesamtdynamik) eine Sicherheitszone von

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

Frequenz	Originalraum RTs	1:10 Modell RTs	1:10,183 Modell RTs
100	13,96s	11,47s	11,68s
125	8,70s	9,89s	10,07s
160	9,70s	9,04s	9,20s
200	6,32s	9,46s	9,63s
250	5,91s	8,36s	8,51s
315	5,98s	6,72s	6,84s
400	5,63s	5,00s	5,09s
500	5,39s	4,79s	4,88s
630	5,11s	4,91s	4,99s
800	5,03s	4,43s	4,51s
1000	4,63s	3,63s	3,69s
1250	4,26s	2,92s	2,97s
1600	3,86s	2,31s	2,35s
2000	3,49s	1,84s	1,87s
2500	3,08s	1,43s	1,45s
3150	2,70s	1,09s	1,11s
4000	2,33s	0,85s	0,87s
5000	1,86s	0,69s	0,70s

Tabelle 6.3.: Vergleich der Nachhallzeiten

weiteren 10dB hinzuzufügen. Die Messungen selbst ergaben naturgemäß einen höheren Signal-Rausch-Abstand im leeren Hallraum und die Messung der Nachhallzeit T_{20} konnte so problemlos gemessen werden. Eine gleichartige Messung mit einer größeren Menge an zylindrischen hochabsorbierenden Akustikschäumen verschiedener Größen bot dem Programm jedoch nicht genug SNR um überhaupt einen Wert anzuzeigen. Da die Programmierung dieser Auswertung von der itaToolbox übernommen wurde, konnte nur anhand einer Analyse des Codes rekonstruiert werden, dass bei zu geringem SNR der Algorithmus bei jedem nicht auswertbaren Frequenzband den Nachhallzeitwert auf "Not a Number" setzt. Für MatLAB gilt: Eine Rechnung mit NaN ergibt immer wieder nur NaN. Die Auswertungen im betreffenden Band wird also bei der Durchschnittsberechnung zu keinem Ergebnis führen, selbst wenn alle anderen Messungen erfolgreich verliefen und der resultierende Graph weist hernach an der betroffenen Stelle einen

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

unbestimmten Lückenwert auf.

Als Reaktion auf diese Ergebnisse wurde dem Programm zunächst eine kleine Routine eingefügt, die nach der Berechnung der Nachhallzeiten aus einer Impulsantwort in einfachen Schritten überprüft, ob es zu NaN-Werten kam, oder nicht und im positiven Fall den Benutzer vor die Wahl stellt die aktuelle Messung einfach noch einmal durchzuführen, oder den kompromittierten Datensatz in Kauf zu nehmen. Eine Wiederholung macht dann Sinn, wenn vermutet werden kann, dass das Mikrofon sich unter Umständen in einem ungünstigen Ort befindet. Eine Repositionierung kann eventuell einen besseren SNR liefern.

Zusätzlich wurde experimentell ein Messvorgang mit dem tendenziell höchsten SNR bestimmt. Dies fiel auf die Auswertung der Nachhallzeiten T_{15} und T_{20} durch Aufnahme einer Impulsantwort mittels Sweep-Methode mit *linearem* Verlauf mit einer Dauer von 5 bis 10 Sekunden. Mit dieser Methode konnten auch hochabsorptive Materialien gemessen werden. Ein Vergleich dieser Messmethode mit dem zuvor verwendeten Standard einer *exponentiellen* Sweep-Messung von 10 Sekunden und einer Auswertung der T_{30} ergab für hintereinander ausgeführte Messungen fast exakt gleiche Werte. Es wurde daher davon ausgegangen, dass die Aufnahme der T_{15} , oder besser T_{20} mit der beschriebenen Methode aussagekräftig zu sein scheint und entschieden die Bestimmung der Diffusität auf diese Weise durchzuführen.

6.4. Durchführung der Eignungsprüfung im Modellhallraum

Durch die Reproduzierbarkeit der Leerraummessung und den erfolgreichen Testmessungen mit hochabsorbierenden Proben bekräftigt, konnte nun die Diffusitätsprüfung nach ÖNORM ISO 354 in Angriff genommen werden. Bei den Messreihen wurden ebenso für jede Etappe 12 Messungen aufgenommen und, beginnend mit dem leeren Hallraum, selbiger mit einer zunehmenden Anzahl Diffusorkugeln pro Messreihe bestückt. Die Anzahl

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

der Kugeln pro Etappe und die daraus resultierende gesamte Diffusoroberfläche ist in Tabelle 6.4 zu finden. Den ersten 5 Etappen folgte je eine Erhöhung um 5 Kugeln, bei der 6. Etappe waren es 7, bei der 7. Etappe waren es 8 und bei der letzten Etappe waren es 4 zusätzliche Kugeln. Die zwei großen Kugeln kamen ab der 2. und in der letzten Etappe zum Einsatz.

Mess-Etappe	Kugelanzahl	ges. Diffusorfläche
1	0	0 m ²
2	5	0,0617m ²
3	10	0,1136m ²
4	15	0,1655m ²
5	20	0,2175m ²
6	27	0,2902m ²
7	35	0,3733m ²
8	39	0,4245 m ²

Tabelle 6.4.: Diffusoranzahl und gesamte Diffusoroberfläche

Insgesamt wurde für eine Diffusitätsprüfung 12 x 2 x 8, also 192 Messungen durchgeführt. Die auf diesem Wege erhaltenen Nachhallzeiten wurden dem Anhang der ÖNORM ISO 354 entsprechend gemittelt und in Abbildung 6.5 dargestellten Diagramm als Funktion der wachsenden Diffusorfläche gegenübergestellt.

Wie in Abbildung 6.5 zu erkennen nimmt der Durchschnitt der Absorption in der Tat für jede Messung sichtlich zu, wobei der Verlauf ab der 4. zur 5. Messung hin abzuflachen scheint. Die 6. Messung ergab den höchsten erreichten Wert der Absorption und wirkt im Vergleich zu den restlichen Werten eher wie ein Ausreißer. Nach [D. Bradley, 2014] wurde aber in einigen Fällen in Hallräumen voller Größe ebenso beobachtet, dass der durchschnittliche Absorptionsgrad ein Maximum erreicht und bei weiter steigender Anzahl an Diffusoren trotz weiter wachsender Fläche sinkt.

Zu den Ergebnissen ist anzumerken, dass Volumsdiffusoren in Form von z.B. Kugeln nicht nur dem Hallraum mehr reflektierende Oberfläche hinzufügt, sondern ihm natürlich auch im Vergleich zu Plattendiffusoren merklich

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

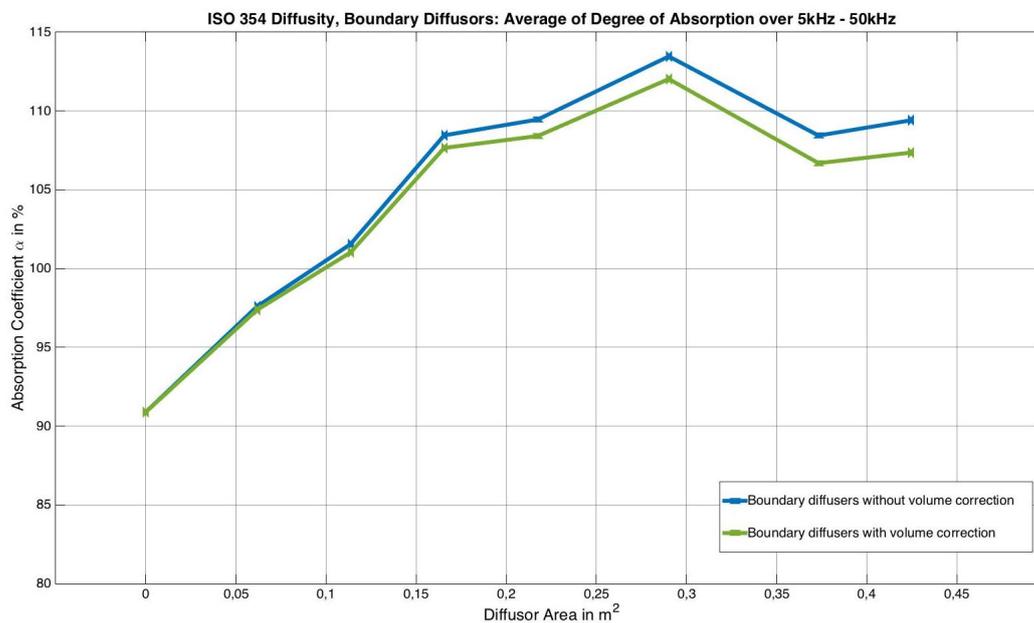


Abbildung 6.5.: Ergebnisse der Diffusitätsbestimmung für Kugeldiffusoren, mit und ohne Korrektur

mehr Raumvolumen raubt. Um diesem Verlust entgegenzuwirken wurde für jede Absorptionsgradberechnung das entsprechende Volumen der Diffusoren vom Raumvolumen abgezogen. Die resultierende Kurve ist den nicht korrigierten Daten in Abbildung 6.5 gegenübergestellt.

Wie im Vergleich der Kurven in Abbildung 6.5 zu erkennen ist, ändert sich der Verlauf zu höheren Diffusorflächen hin. Durch das geringere Volumen der Messungen mit vielen Diffusoren sinken nach Formel 2.10 alle berechneten Absorptionsgrade, daher ist natürlich auch der Durchschnitt geringer. In beiden Fällen ist zu sehen dass sich der Zuwachs der Absorptionsgrade einem Maximum nähert und danach wieder leicht abnimmt. Interpretiert man den Wert der 6. Messung als tatsächlichen Ausreißer mit etwa 4-5% zu viel Alpha, so könnte schon die Anzahl der Diffusoren aus der 4. Messung als *optimale Anzahl* im Sinne der ÖNORM EN ISO 354 angesehen werden, da sich der Wert laut den Ergebnissen in Abbildung 6.5 nicht mehr merklich ändert. Ist der Wert der 6. Messung tatsächlich ein reproduzierbares Maximum, liegt es nahe anzunehmen, dass durch die Anordnung der Kugeln im

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

Raum auch die Isotropie des Schallfeldes ein Maximum erreicht und die optimale Anzahl von Diffusoren bei dieser Konstellation liegt.

Abbildung 6.6 zeigt die berechneten Werte für den Absorptionsgrad α der 6. Messung. Die Schaumstoffmatte absorbiert Schall vor allem für hohe Frequenzen.

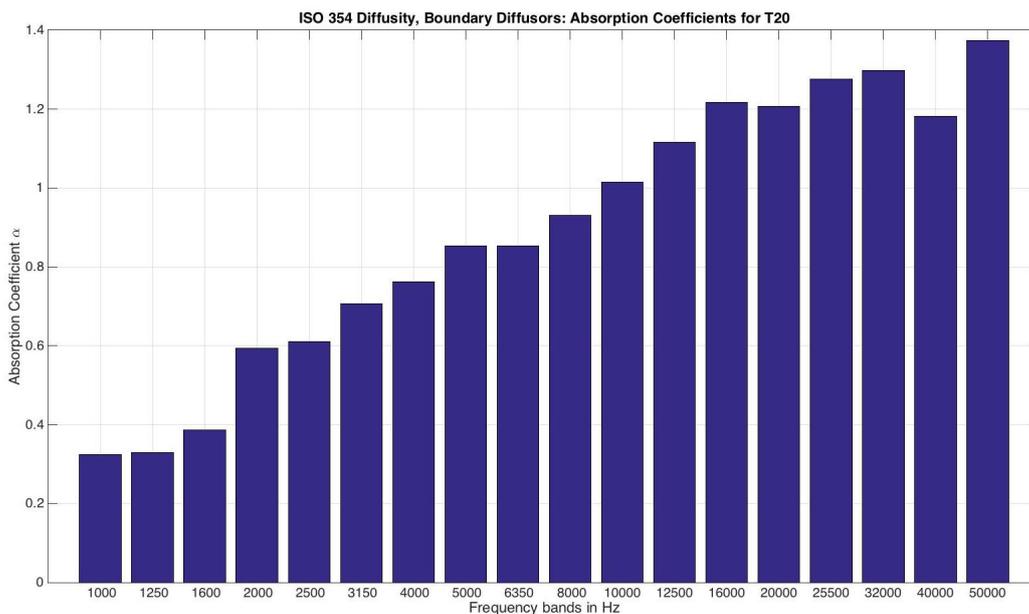


Abbildung 6.6.: Ergebnisse der Absorptionsgradbestimmung mit Kugeldiffusoren und Volumenkorrektur

Als Alternative zu einer Wiederholung der Messreihe wurde stattdessen beschlossen eine Messreihe mit den ebenso angefertigten Plattendiffusoren aus 2mm Plexiglas für den Vergleich durchzuführen. Eine große Anzahl von Plexiglasplatten im Modellhallraum aufzuhängen versperrt mit zunehmenden Platten den Zugang und erschwert die Positionierung von Quelle und Mikrofon. Es wurde daher auf eine Messung mit einer effektiven Oberfläche von über $0,4 \text{ m}^2$ (8. Messung bei den Kugeln) verzichtet. Trotzdem wurde die Messreihe wieder in 8 Durchgänge aufgeteilt. Tabelle 6.5 zeigt die Summe aller Oberflächen aller hinzugefügter Platten (Oberfläche oben und unten, der jeweilige Rand wurde vernachlässigt).

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

Mess-Etappe	Plattenanzahl	ges. Diffusorfläche
1	0	0 m ²
2	2	0,05423m ²
3	3	0,11063m ²
4	5	0,15546m ²
5	7	0,20309m ²
6	9	0,26023m ²
7	10	0,29877 m ²
8	12	0,371528 m ²

Tabelle 6.5.: Diffusorplattenanzahl und gesamte Diffusoroberfläche

Die für diese Messreihe aufgenommenen Ergebnisse der durchschnittlichen Absorptionsgrade zwischen 5kHz und 50kHz sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Der Graph zeigt einen geringeren Absorptionsgrad über die gesamte Messreihe hinweg.

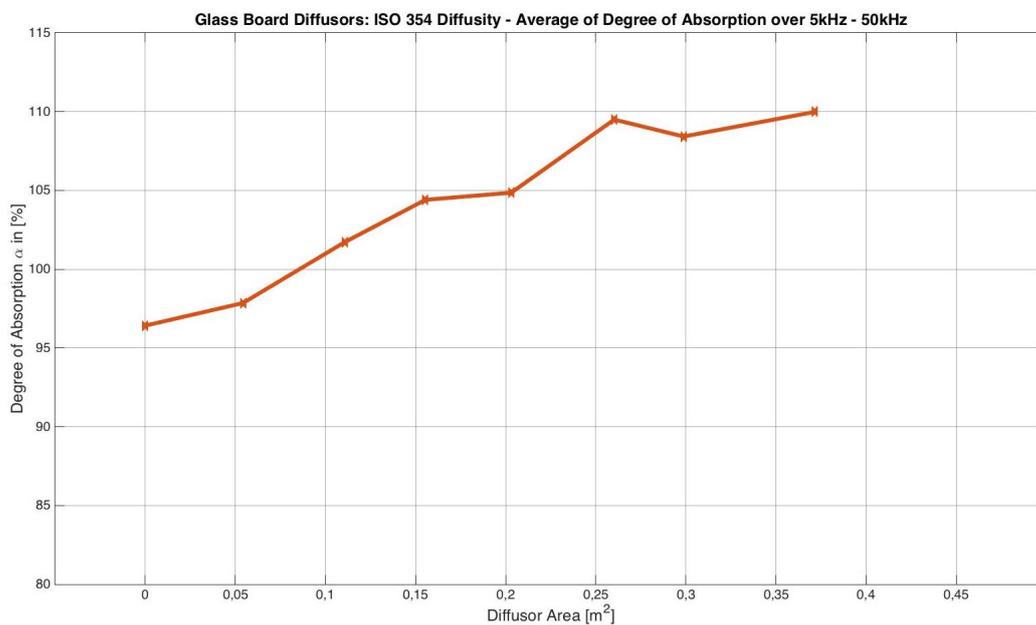


Abbildung 6.7.: Ergebnisse der Diffusitätsbestimmung für Plattendiffusoren

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

Dieser Effekt wurde auch in [D. Bradley, 2014] beobachtet. Dort wird die Theorie aufgestellt dass Volumendiffusoren ein anderes Diffusschallfeld erzeugen als Plattendiffusoren und Energie verstärkt aus dem *horizontalen* Schallfeld in das *vertikale* Schallfeld lenken und damit besser in Richtung des Absorbers leiten.

Die Plattendiffusoren zeigen also für die Diffusitätsbestimmung ebenso einen abflachenden Verlauf für eine steigende Diffusorfläche, sie sorgen laut [D. Bradley, 2014] aber weniger effektiv dafür, dass die Schallenergie zum Absorber gelenkt wird und das Resultat ergibt daher einen geringeren Wert für den durchschnittlichen Absorptionsgrad.

Zum anderen steigt die durchschnittliche Absorption auch hier um einen Diffusorflächenwert von $0,3 \text{ m}^2$ sprunghaft an. Allerdings vermitteln die letzten drei Werte der Messreihe eher den Eindruck eines mehr oder weniger konstanten Wertes. Im Vergleich beider Messreihen lässt sich also die Schwelle für die optimale Anzahl von Diffusoren im Bereich von $0,3 \text{ m}^2$ ansiedeln, was etwas unter den $0,3424 \text{ m}^2$ der von der Norm als Daumenregel angegebenen 15% der gesamten Oberfläche liegt.

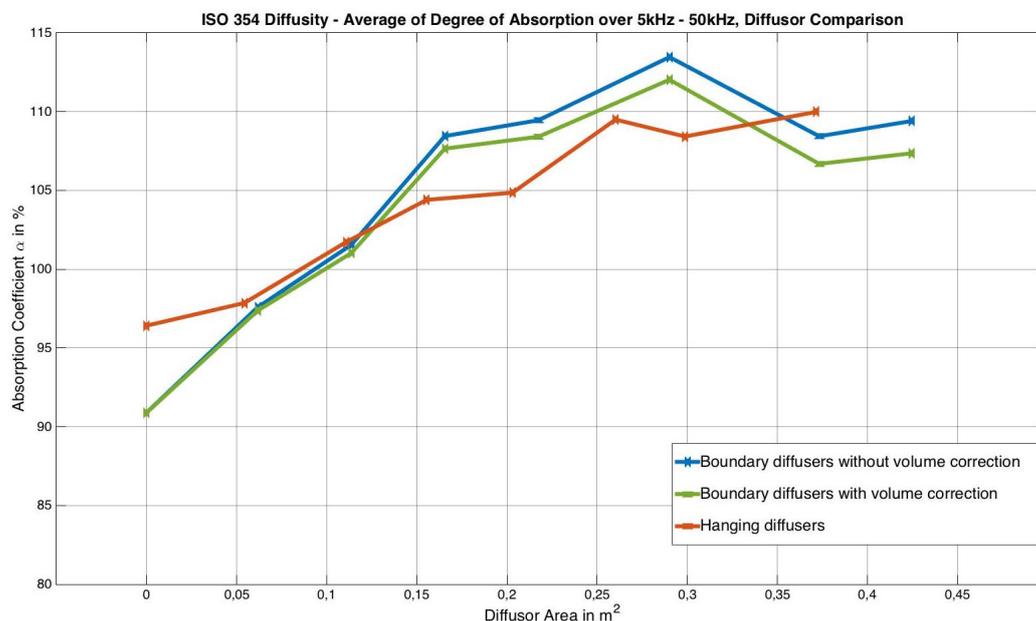


Abbildung 6.8.: Vergleich der Ergebnisse

6. Prüfung der Diffusität nach ÖNORM EN ISO 354

Abbildung 6.8 zeigt den Vergleich aller Ergebnisse. Hier ist sichtbar, dass der Wert des Messdurchgangs ohne Diffusoren sich vom Ergebnis der ersten Reihe unterscheidet. Dabei kann es sich lediglich um einen Messfehler handeln.

Welcher von den beiden Werten sich dem Tatsächlichen annähert bedarf einer Reihe von Wiederholungen, auf welche jedoch im Rahmen des Projekts verzichtet wurde. Interessant ist aber zu sehen, dass die Werte der jeweils zweiten und dritten Messreihe nahe beieinander liegen. Ebenso erwähnenswert ist die höhere Absorption der letzten Messung mit Vollbesetzung aller Plattendiffusoren im Vergleich zu den Volumsdiffusoren.

7. Résumé und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Planung und der Bau eines Modellhallraumes im Maßstab 1:10, sowie die Ergebnisse der ersten Messungen mit der fertig gestellten Hardware geschildert und dokumentiert. Wie die Messungen in Kapitel 6 zeigen, erfüllt der Modellhallraum die vorausgesetzten Bedingungen der OENORM EN ISO 354 und der Hallraum kann in Zukunft verwendet werden um entweder tatsächlich skalierte Absorberproben zu vermessen, oder um Untersuchungen des diffusen Schallfeldes durchzuführen. Die angeschaffte Messhardware kann erwiesenermaßen auch zusammen mit hochqualitativeren Verstärkern und DA-Wandlern der Konsumentenklasse betrieben werden, womit die zusammengestellte Messumgebung sehr flexibel bleibt.

Das Ziel eine funktionierende Software in der MATLAB Umgebung zu implementieren, welche einen komfortableren Betrieb mit der Messhardware ermöglicht, wurde erreicht. Die Software wurde flexibel gehalten, um ebenso in einer Hallraumumgebung in Vollgröße Messungen durchführen zu können. Damit wurden alle primären Ziele des Projekts erreicht.

7.2. Offene Fragen

Offen bleibt nach Abschluss des Projekts unter anderem, ob die Messergebnisse der Diffusitätsprüfung nach EN ISO 354 tatsächlich aussagekräftig sind. Wie in der Arbeit von [R. H. C. Wenmaekers, 2008] beschrieben, stellt

7. Résumé und Ausblick

sich ohnehin die Frage, ob das Messverfahren tatsächlich ein ausreichendes diffuses Schallfeld garantiert. Auch wäre interessant und wichtig zu untersuchen ob die zu höheren Diffusorflächen hin wieder abnehmenden Mittelwerte des Absorptionsgrades reproduzierbar sind. Im positiven Falle einer solchen Wiederholung, wie auch schon jetzt, stellt sich die Frage, wieso dies so ist. Mit dem Verständnis, dass zusätzliche Diffusoren im Hallraum allgemein die Nachhallzeiten nicht steigern sondern sinken lassen, da sich mit ihrer Anwesenheit mehr Wandfläche und damit mehr Möglichkeiten anbietet, um durch Reibung und Reflexion Energie zu verlieren, sollte dieser Effekt logischerweise für eine steigende Diffusorgesamtfläche den Angaben in der Norm entsprechend einer Art Grenzwert entgegenstreben, oder zumindest weiter zu-, jedoch nicht abnehmen.

Auf Seiten der Schallquelle wurde von [A. Nicht, 2016] zudem während der Laufzeit der vorliegenden Projektarbeit die Frage aufgeworfen, ob verwendete Schallquellen in der Hallraummesstechnik wirklich omnidirektional sein müssen. Untersuchungen ergaben, dass es im mittleren Frequenzbereich ab etwa 250Hz unerheblich ist, welche Omnidirektionalquelle verwendet wird und ob die Quelle überhaupt omnidirektional ist! Laut der Arbeit hat die Wahl der Sender- und Empfängerpositionen wesentlich höheren Einfluss als deren Richtcharakteristik. Im Kontext des Projekts bleibt dabei offen, ob diese Ergebnisse auch im Modellhallraum reproduzierbar sind.

7.3. Verbesserungen und Ausblick

Obwohl das Endergebnis des Projekts eine funktionierende Messumgebung zur Verfügung stellt, gibt es natürlich einige Details die einer Revision bedürfen, welche jedoch nicht mehr im Rahmen des Projekts implementiert werden konnten, oder sogar einer weiteren, eigenständigen Projektarbeit würdig wären:

Da es sehr zeitintensiv ist für eine komplette Messreihe das Mikrofon 24 Mal an der richtigen Stelle zu platzieren und auszurichten, wäre es neben der noch besseren Reproduzierbarkeit der Messungen für den Arbeitsaufwand von großer Hilfe, wenn man das Mikrofon nur nach der Reihe in fertig fixierte Messstellen "umstecken" muss. Die Aufhängestangen im Inneren

7. Résumé und Ausblick

des Miniaturhallraumes würden guten Fixierungsgelegenheiten für ein solches "Stecksystem" bieten. Die Herausforderung bestünde darin, dieses System simpel genug zu gestalten, um auch wirklich von Vorteil zu sein.

Eine Alternative dazu bestünde darin entweder das Mikrofonstativ, oder den geplanten Mikrofonschlitten zu überdenken und hier eine möglichst einfache und schnelle Positionierungsmethode zu schaffen.

Die konstruierte Schallquelle stellte sich als überraschend gelungene Lösung für die investierten Ressourcen heraus. Die Lautsprecher waren vergleichsweise günstig, der 3D Druck des Gehäuses war, bis auf die zu behandelnde Oberfläche, eine weit einfacher herzustellende Lösung als ein per Hand gebautes Gehäuse und für den Bau musste nicht übermäßig viel zusätzliche Zeit investiert werden. Trotzdem wäre es von großem Vorteil eine andere Quelle zu bauen, welche bei ähnlich gering-welligem oder ideal sogar flacherem Frequenzgang einen noch höheren Schalldruckpegel erzeugen würde. Vor allem im Ultraschallbereich und dort an der oberen Bereichsgrenze von 50kHz wäre eine verbesserte Wiedergabe wünschenswert. Wie im Kapitel 4 detailliert beschrieben, existieren einige Arbeiten über den Bau solcher, verbesserter Quellen. Das Problem dieser Konstruktionen ist durchwegs der Kostenpunkt. Die Herausforderung stünde also auch darin die Kosten für eine verbesserte Schallquelle niedrig zu halten.

Bei der Messsoftware gilt freilich selbiger Grundsatz wie bei jeglicher Software: Es gibt immer Verbesserungsmöglichkeiten. Im Bezug auf das Projekt stünde jedoch primär die Implementation einer Option an, welche für jede durchgeführte Messposition gestattet Momentaufnahmen der atmosphärischen Daten einzutragen, welche bei der Berechnung der Absorptionsgrade alle getrennt behandelt werden. Die Schallgeschwindigkeit und die Luftdämpfungskorrektur würde also für jede Messposition extra berechnet und die Ergebnisse erst danach summiert werden, um die Absorptionsgrade zu berechnen. Diese Option zu implementieren ist weniger schwierig als zeitaufwändig, da dazu einige Routinen umgebaut werden müssten. In der jetzigen Version werden lediglich die eingetragenen Werte für alle Berechnungen angewendet.

Eine der ersten Aufgaben die mit dem funktionierenden Modellhallraum in naher Zukunft erledigt werden sollte, ist wohl die Wiederholung der Mes-

7. Résumé und Ausblick

sungen des Projekts, sowie die Durchführung und Wiederholung eigener, weiterer Messungen mit anderen Absorberproben.

Appendix

Anhang A.

Dateienverzeichnis

A.1. Schriftliche Arbeit, Ordner "/Doc/"

Dateiname	Beschreibung
ToniProj1.tex	Masterdatei der vorliegenden Arbeit, kompiliert das PDF "ToniProj1.pdf"
HRPcolophon.tex	Tex-Datei der Vorlagenherkunft
HRPabstract.tex	Tex-Datei des Abstracts
HRPchapter1.tex	Tex-Datei der Einführung
HRPchapter2.tex	Tex-Datei des zweiten Kapitels
HRPchapter3.tex	Tex-Datei des dritten Kapitels
HRPchapter4.tex	Tex-Datei des vierten Kapitels
HRPchapter5.tex	Tex-Datei des fünften Kapitels
HRPchapter6.tex	Tex-Datei des sechsten Kapitels
HRPchapter7.tex	Tex-Datei des siebenten Kapitels
HRPdataList.tex	Tex-Datei des Dateienverzeichnisses
HRPdeviceList.tex	Tex-Datei des Geräteverzeichnisses
HRPDiffList.tex	Tex-Datei der Übersicht aller Diffusoren
HRPreferences.bib	Datenbank der zitierten Publikationen
ToniProj1.pdf	Fertig kompiliertes PDF der vorliegenden Arbeit
HRPKonzept.skp	Sammlung der Sketchup Konzepte des Projekts
HRPKugelschalen.skp	Sketchup Konzept des Lautsprechers

Anhang A. Dateienverzeichnis

HRPSphere.ipt	Inventor Datei für den 3D Druck der Schalen
HRPMesskette.layout	LayOut Zeichnung der Messkette
HRPDurchfng.layout	LayOut Zeichnung der Kabel-durchführungen

A.2. Dateien der Präsentation

Dateiname	Beschreibung
ToniProjMueller.pptx	Powerpoint Datei der Präsentation

A.3. MATLAB-Dateien (*.m und *.fig), Ordner "/HRP Program/"

Dateiname	Beschreibung
HRP_Gui_v1.m	m-Datei des Hauptprogrammes
HRP_Gui_v1.fig	fig-Datei des Hauptprogrammes
HRP_CalcCoeffs.m	m-Datei des Skripts zur Absorptionsgradberechnung und Ergebnisdarstellung
HRP_Compare.m	m-Datei der Oberfläche zum Vergleich von Nachhallzeit-Grafiken
HRP_Compare.fig	fig-Datei der Oberfläche zum Vergleich von Nachhallzeit-Grafiken
air_absorption.m	m-Datei der Luftdämpfungsberechnung, programmiert von Edward L. Zechmann

A.4. Messergebnisse des Programms (*.mat), Ordner ” /Results/”

Dateiname	Beschreibung
Messung060916.mat	1. Messung des leeren Hallraumes selbst, ohne Diffusoren, 12 Mikrofonpositionen, 2 Quellenpositionen
Messung090916.mat	2. Messung des leeren Hallraumes selbst, ohne Diffusoren, 12 Mikrofonpositionen, 2 Quellenpositionen
Messung120916.mat	3. Messung des leeren Hallraumes selbst, ohne Diffusoren, 12 Mikrofonpositionen, 2 Quellenpositionen
Messung051016Full1Teil1.mat	1. Messung, kompletter Durchgang 1, ohne Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung130916Full1Teil2.mat	2. Messung, kompletter Durchgang 1, 5 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung130916Full1Teil3.mat	3. Messung, kompletter Durchgang 1, 10 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung140916Full1Teil4.mat	4. Messung, kompletter Durchgang 1, 15 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung140916Full1Teil5.mat	5. Messung, kompletter Durchgang 1, 20 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung140916Full1Teil6.mat	6. Messung, kompletter Durchgang 1, 27 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung150916Full1Teil7.mat	7. Messung, kompletter Durchgang 1, 35 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen

Anhang A. Dateienverzeichnis

Messung280916Full1Teil8.mat	8. Messung, kompletter Durchgang 1, 39 Kugel-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung290916Full2Teil1.mat	1. Messung, kompletter Durchgang 2, ohne Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung290916Full2Teil2.mat	2. Messung, kompletter Durchgang 2, 2 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung290916Full2Teil3.mat	3. Messung, kompletter Durchgang 2, 3 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung300916Full2Teil4.mat	4. Messung, kompletter Durchgang 2, 5 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung300916Full2Teil5.mat	5. Messung, kompletter Durchgang 2, 7 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung300916Full2Teil6.mat	6. Messung, kompletter Durchgang 2, 9 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung041016Full2Teil7.mat	7. Messung, kompletter Durchgang 2, 10 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen
Messung041016Full2Teil8.mat	8. Messung, kompletter Durchgang 2, 12 Platten-Diffusoren, 2x12 Mikro-positionen, 2 Quellenpositionen

A.5. Ergebnis-Grafiken (*.fig), Ordner "/Figures/"

Dateiname	Beschreibung
DiffusivityKugelnBothLines.fig	Grafik der Ergebnisse der Messung mit Kugeldiffusoren mit und ohne Korrektur des Volumsverlustes
DiffusivityPlattenLine.fig	Grafik der Ergebnisse der Messung mit Plattendiffusoren
DiffusivityComparisonLine.fig	Vergleich aller drei Diffusivitätsmessergebnisse
DiffusivityKugelnAlpha.fig	Grafik der Ergebnisse der Absorptionsgrade der 6. Messung
12pointEmptyRoomSep16.fig	Vergleich aller Messergebnisse des leeren Hallraums
OT19plots.fig	Frequenzgang des verwendeten Lautsprechers, mit und ohne Aluminiumhalterung
PZTSpeaker.fig	Frequenzgang eines verworfenen Lautsprechers
Bassplot.fig	Luftdämpfungskorrektur nach Bass et al.
ResultRTs.fig	Grafik der Ergebnisse der Nachhallzeiten des leeren Hallraums

A.6. Bilddateiverzeichnis, Ordner ” /Doc/figures/”

Dateiname	Beschreibung
institution.pdf	Logo der TU Graz
Picoa.jpg	Darstellung der Nachhallzeit
Picob.jpg	Luftdämpfungskorrektur nach Bass et al.
Pic1.jpg	Sketchup Design des Modellhallraums
Pic2.jpg	Sketchup Design des Schließmechanismus
Pic3.jpg	Sketchup Design der luftdichten Verschraubungen
Pic4.jpg	Foto des Schließmechanismus
Pic5.jpg	Foto des inneren Gerüsts
Pic6.jpg	Foto eines aufgehängten Kugeldiffusors
Pic7.jpg	Kabeldurchführungen in der Marinetchnik
Pic8.jpg	LayOut Konzeptzeichnung der Kabeldurchführungen
Pic8b.jpg	Foto der Kabeldurchführungen
Pic9.jpg	Foto der Lautsprechermessung
Pic9b.jpg	Foto der Plattendiffusoren
Pic9c.jpg	Foto des Miniaturmikrofonstativs
Pic10.jpg	LayOut Konzeptzeichnung des Messsetups
Pic11.jpg	WinMLS Messergebnis des Tymphany Lautsprechers
Pic12.jpg	MATlab Messergebnis des Tymphany Lautsprechers
Pic12a.jpg	Frequenzgang des Tymphany laut Datenblatt
Pic13.jpg	Sketchup Design der Schallquelle
Pic14.jpg	Autodesk Inventor Modell des Gehäuses der Schallquelle
Pic15.jpg	Foto des 3D gedruckten Gehäuses der Schallquelle

Anhang A. Dateienverzeichnis

Pic16.jpg	Foto der fertiggestellten Schallquelle
Pic17.jpg	Screenshot des HRP_Gui Programms
Pic18.jpg	Foto der vermessenen Absorbermatte
Pic19.jpg	Darstellung der Messpositionen
Pic20.jpg	Grafik der Ergebnisse der Nachhallzeiten des leeren Hallraums
Pic21.jpg	Absorptionsgrad des leeren Hallraumes
Pic22.jpg	Grafik der Ergebnisse der Messung mit Kugeldiffusoren mit und ohne Korrektur des Volumsverlustes
Pic23.jpg	Grafik der Ergebnisse der Messung mit Plattendiffusoren
Pic24.jpg	Vergleich aller drei Diffusivitätsmessergebnisse
Pic25.jpg	Grafik der Ergebnisse der Absorptionsgrade
PicEStT1.jpg	Bild und Frequenzgang des Polaroid Series 600
PicEStT2.jpg	Bild und Frequenzgang des Pro Wave 500ES430
PicPVDF1.jpg	Bild und Frequenzgang eines PVDF Lautsprechers
PicPVDF2.jpg	Konzeptzeichnung eines PVDF Lautsprechers
PicPVDF3.jpg	3D Konzeptzeichnung eines PVDF Lautsprechers
PicPVDF4.jpg	Bild und Frequenzgang eines PVDF Dome-Tweeters
PicPVDF5.jpg	Gemessener Frequenzgang des Kemo Lo10 PZT Lautsprechers
PicPZT1.jpg	Bild und Frequenzgang von US-Abstandssensoren
PicPZT2.jpg	Bild und Frequenzgang eines PZT Lautsprechers
PicPZT3.jpg	3D Konzeptzeichnung einer Lautsprecher-PZT-Kombination

Anhang A. Dateienverzeichnis

PicEStT4.jpg	Bild und Frequenzgang eines PZT-Disk-Tweeters
TDSpeaker.jpg	Bild und Frequenzgang einer US-Laborschallquelle

Anhang B.

Geräteverzeichnis

Gerät	Bezeichnung	Identifikationsnummer
Mikrofonkapsel	G.R.A.S. 40BE 1/4 inch Prepolarized Free-Field Microphone	SNr.: 219718
Mikrofon- vorverstärker	G.R.A.S. 26CB 1/4 inch CCP Standard Preamplifier	SNr.: 244933
CCP Konverter	MMF Radebeul - Charge Amplifier M68D1	SNr.: 003223
CCP Konverter	Brüel und Kjaer Nexus Conditioning Amplifier	SNr.: 2039590, TUGNr.: 0116968
Stereo-Verstärker	Alesis RA 300	(21)A40407044800352
Audio-Interface	RME Fireface 800	TUGNr.: 0116952
Audio-Interface	RME Fireface UCX	SNr.: 23590641
atm. Messgerät	Hygrometer testo 608-H1	TUGNr.: 9528956
Miniaturreinraum	Konstruktion des Projekts	-
Schallquelle	Konstruktion des Projekts	-
Laptop	Apple Macbook Pro 15", 2,5GHz i7, 16Gb RAM	-

Anhang C.

Plattendiffusorenverzeichnis

Plattennr.:	Abmessungen	Beidseitige Fläche
1	19,5cm x 8,7cm x 2mm	0.03393m ²
2	14,5cm x 7cm x 2mm	0.0203m ²
3	23,5cm x 12cm x 2mm	0.0564m ²
4	9cm x 6,45cm x 2mm	0.01215m ²
5	19cm x 8,6cm x 2mm	0.03268m ²
6	10,3cm x 7cm x 2mm	0.01442m ²
7	13,5cm x 12,3cm x 2mm	0.03321m ²
8	20,5cm x 6,7cm x 2mm	0.02747m ²
9	21,5cm x 6,9cm x 2mm	0.02967m ²
10	20,5cm x 9,4cm x 2mm	0.03854m ²
11	15,8cm x 11,3cm x 2mm	0.035708m ²
12	19,5cm x 9,5cm x 2mm	0.03705m ²

Literatur

- A. Duclos B. Gazengel, N. Lhermet (2004). »Study of a dome shaped PVDF loudspeaker«. In: *Congres Francais d'Acoustique, Proceedings 2004*, S. 219–220 (siehe S. 46).
- A. Nicht F. Beyer, M. E. Altinsoy (2016). »Sind existierende Dodekaeder optimale Schallquellen für die bau- und raumakustische Messtechnik?«. In: *Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik, 42. Tagung 2016, Aachen*, S. 325–328 (siehe S. 78).
- D. Bradley M. Mueller-Trapet, J. Adelgren (2014). »Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers«. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 135, S. 1898 (siehe S. 62, 71, 75).
- EN ISO 354 (2003). »Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen«. In: *International Organization for Standardization* (siehe S. viii, 2, 7, 13, 30, 62).
- Gade, A. C. (2006). »Recent experiences in using room acoustic scale models«. In: *Proceedings of the Institute of Acoustics* (siehe S. 2).
- H. E. Bass L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar (1995). »Atmospheric absorption of sound: Further developments«. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 97, S. 680–683 (siehe S. 13, 66).
- I. Chilibon C. Dias, P. Inacio (2007). »PZT and PVDF bimorph actuators«. In: *National Institute of Research and Development for Optoelectronics* 9/6, S. 1939–1943 (siehe S. 50).
- itaToolbox (2016). URL: <http://ita-toolbox.org/index.php> (siehe S. 53).
- Jachmann, H. (2006). »Entwurf und Erprobung eines Modell-Hallraumes im Maßstab 1:10«. Diss. Hochschule Mittweida (siehe S. 2).
- K. Gürkan, A. Akan (2011). »Design of a Broadband Semi-Conical PVDF Ultrasonic Sensor For Obstacle Detection Applications«. In: *Electrical and Electronics Engineering (ELECO) 2011*, S. 333–336 (siehe S. 44).

Literatur

- Keiji, Oguchi (2007). »A Miniature loudspeaker for acoustical scale model test«. In: *International Symposium on Room Acoustics 2007*, S. 43 (siehe S. 30).
- M. Kuze, K. Satoh (2000). »Development of a Piezo-Electric Super Tweeter Suitable for DVD-Audio«. In: *Audio Engineering Society Convention 109*, S. 5222 (siehe S. 49, 50).
- Moeser, M. (2007). »Technische Akustik«. In: Springer Verlag. Kap. 7, S. 222–235 (siehe S. 5, 10).
- Pascal Dietrich Bruno Masiero, Markus Mueller-Trapet (2010). »MATLAB Toolbox for the Comprehension of Acoustic Measurement and Signal Processing«. In: *Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik, Tagung 2010*, S. 517–518 (siehe S. 53).
- R. H. C. Wenmaekers C. C. J. M. Hak, H. J. Martin (2008). »Air Absorption Error in Room Acoustical Modeling«. In: *Proceedings of the 155th ASA conference, Paris 2008*, S. 3129–3134 (siehe S. 14, 77).
- R. Hupke S. Moghaddamnia, J. Peissig (2016). »Ein breitbandiges Ultraschall-Messsystem für raumakustische Anwendungen im physikalischen Modell«. In: *Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik, Tagung 2016* (siehe S. 30).
- R. Lerch G. Sessler, D. Wolf (2009). »Technische Akustik, Grundlagen und Anwendungen«. In: Springer Verlag. Kap. 18 (siehe S. 50).
- T. Hidaka K. Suzuki, Y. Yamada (2010). »A New Miniature Loudspeaker For Room Acoustical Scale Model Experiment«. In: *International Congress on Acoustics 2010* (siehe S. 44).
- Vercammen, M.L.S. (2010). »Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354«. In: *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010* (siehe S. 1).
- Wikipedia (2016a). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinylidene_fluoride (siehe S. 44).
- Wikipedia (2016b). URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Blei-Zirkonat-Titanat> (siehe S. 47).
- ZAMG.ac.at (2016). URL: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/oesterreich/luftdruck/?mode=geo&druckang=red> (siehe S. 66).