

BACHELORARBEIT

Raumakustische Optimierung des Ligeti-Zentrums

vorgelegt am 11. Februar 2024

Barbaros Bali, [REDACTED]

Eddie Ness, [REDACTED]

Erstprüferin: Prof. Dr. Robert Mores

Zweitprüfer: Jonathan Hammoor

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik

Finkenau 35

22081 Hamburg

Zusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit widmet sich der eingehenden Analyse und akustischen Optimierung des „Production Labs“ im Ligeti-Zentrum. Angesichts des wachsenden Bedarfs an multifunktionalen Räumen rücken die akustische Gestaltung sowie das reibungslose Zusammenspiel von Technologie und Raum in den Fokus.

Das methodische Vorgehen zur Analyse und Optimierung dieses Raumes beinhaltet einerseits die eingehende Auseinandersetzung mit den Anforderungsprofilen im Hinblick auf vielfältige Nutzungsszenarien und andererseits eine umfassende Analyse sämtlicher akustisch relevanter Parameter. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird ein Konzept zur raumakustischen Optimierung entwickelt.

Dieses Konzept umfasst die Ausarbeitung eines maßgeschneiderten Absorber Designs, das den spezifischen Anforderungen des Raumes gerecht wird. Zudem erfolgt eine digitale Simulation des Raumes mithilfe des Programms EASE. Das resultierende Konzept präsentiert einen Entwurf zur optimalen Platzierung der Absorber im Raum, mit dem Ziel, problematische Frequenzen zu dämpfen und eine optimierte Nachhallzeit zu erreichen.

Die in der Projektübersicht dargestellte Grafik ist in der digitalen Version mit Hyperlinks zu den dazugehörigen Themen verknüpft.

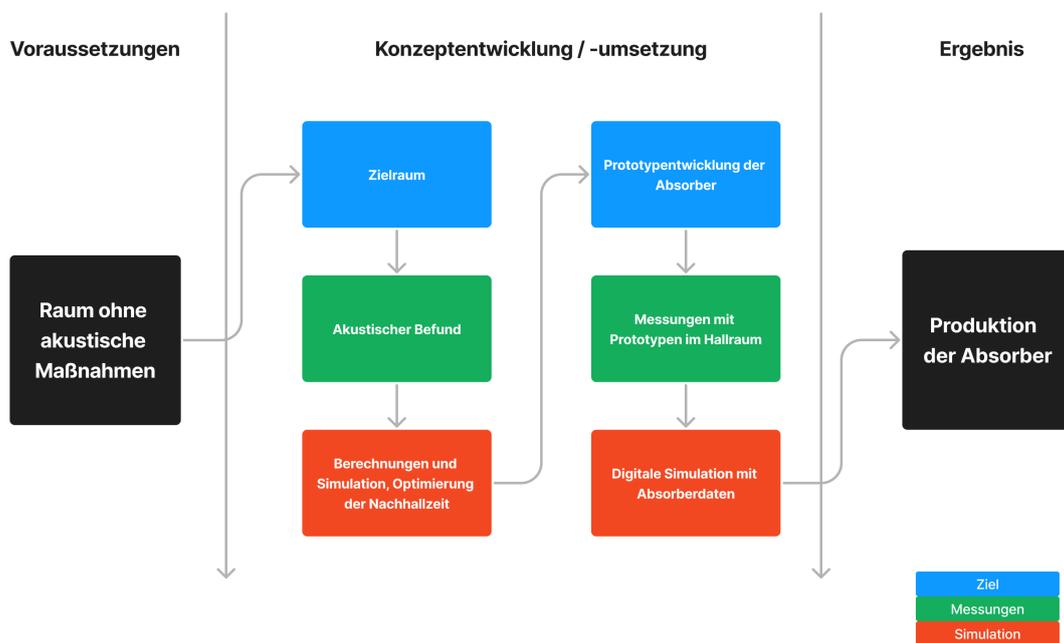


Abbildung 1: Voraussetzung, Konzeptentwicklung/ -umsetzung und Ergebnis als Übersicht

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1 Theoretische Grundlagen	1
1.1 Akustische Reflexionen	1
1.2 Nachhallzeit	2
1.3 Hallradius	3
1.4 Diffuses Schallfeld	3
1.5 Absorptionsgrad α	4
1.6 Äquivalente Absorptionsfläche	5
1.7 Impulsantwort und ETC	6
1.8 Energiekriterien C50, C80 und TS	6
1.8.1 Schwerpunktzeit TS	6
1.8.2 Klarheitsmaß	7
1.8.3 Deutlichkeitsmaß	7
1.9 Zusammenfassung zur Bewertungsgrundlage von Raumakustik	8
2 Absorbertypen	10
2.1 Poröse Absorber	10
2.1.1 Basotect G+	11
2.2 Resonanzabsorber	12
2.3 Helmholtz-Absorber	12
3 Beschreibung und Nutzungsplan	14
4 Akustische Messungen im Ligeti-Zentrum	18
4.1 Auswertung der akustischen Messungen	19
4.2 Bewertung der Nachhallzeit	20
4.3 Auswertung der Energiekriterien	21
5 Entwicklung des Absorber-Prototypen	23
5.1 Frontplatten	23

5.2	Umsetzung der Produktion	26
6	Messungen mit Absorbern im Hallraum der HAW	29
6.1	Vorbereitung der Absorbermessungen	32
6.2	Auswertung der Absorbermessungen	33
7	Akustische Computersimulation	36
7.1	Spiegelschallquellenverfahren	36
7.2	Strahlverfolgung (Raytracing)	38
7.3	Simulation mit EASE und verwendete Daten	39
7.4	Implementierung des Prototyp-Absorbers in die Simulation und Auswertung der Computersimulation	39
8	Fazit	42
	Literatur	44

Abbildungsverzeichnis

1	Voraussetzung, Konzeptentwicklung/ -umsetzung und Ergebnis als Übersicht	2
1.1	Verhalten von Schall auf einer Bauteilfläche (Weinzierl, 2008, S.185)	4
2.1	Datenblatt des Herstellers, Basotect G+	12
2.2	Wirkweise eines Helmholtz-Resonators	13
3.1	Production Lab im Ligeti-Zentrum, Blick zur Straßenseite	15
3.2	Production Lab im Ligeti-Zentrum, Blick zur Wasserseite	16
3.3	Optimale Nachhallzeiten für verschiedene Raumnutzungen und Raumgrößen (YEZOU, 2009)	17
4.1	Impulse-Methode	19
4.2	Sweep-Methode	19
4.3	Messpositionen der Nachhallzeitmessung im Ligeti-Zentrum	19
4.4	Vergleich der Messungen zwischen Sweep- und Impulse- Methode	20
4.5	Messergebnisse RT Ligeti-Zentrum	20
4.6	Vergleich: Vorberechnung und Messergebnisse RT Ligeti-Zentrum	21
5.1	Ein BAD-Panel und seine Einzelteile (Cox & d’Antonio, 2016, S.314)	23
5.2	Absorptionsverlauf verschiedener BAD-Panels, (Cox & d’Antonio, 2016, S.314)	24
5.3	Produktion der Frontplatten im Lasercutter	27
5.4	Fertige Frontplatte	28
6.1	Messaufbau Absorbermessungen im Hallraum der HAW	32
6.2	Absorptionsgrad der gemessenen Absorber mit und ohne Frontplatten in Abhängigkeit zur Frequenz	33
6.3	Durchführung der Messungen für Absorberplatte 1 im Hallraum der HAW	35
7.1	Das Spiegelschallquellenverfahren (Weinzierl, 2008, S.245)	37
7.2	Das Raytracing Verfahren (Weinzierl, 2008, S.246)	38
7.3	Vergleich der Nachhallzeit im Raum und der Simulation mit Toleranzschlauch	40
7.4	Screenshot aus der Computersimulation I	41
7.5	Screenshot aus der Computersimulation II	41

Tabellenverzeichnis

4.1	Messergebnisse Energieverteilung	22
5.1	Durchmesser und Lochzahl Platte 1	25
5.2	Durchmesser und Lochzahl Platte 2	26
7.1	Verwendete Absorptionsgrade α der Materialien	39

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Akustische Reflexionen

Die akustische Qualität eines Raumes oder einer Hörposition wird nicht nur durch die Nachhallzeit bestimmt. Bei der Bewertung von Hörumgebungen spielt auch die zeitliche und räumliche Struktur von Schallreflexionen eine entscheidende Rolle.

Die zeitliche Struktur von Schallreflexionen kann in Direktschall, frühe Reflexionen und späte Reflexionen unterteilt werden. Es ist erwiesen, dass insbesondere frühe Reflexionen einen erheblichen Einfluss auf den Höreindruck und die Wahrnehmung haben, wobei vorteilhafte Reflexionen gemeinhin als „nützliche“ Reflexionen bezeichnet werden. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass späte Reflexionen nicht unbedingt als störend eingestuft werden sollten. Insbesondere bei der Wiedergabe von Musik ist ein gewisses Maß an Nachhall und räumlicher Ausdehnung notwendig, um eine optimale Klangqualität zu gewährleisten (Weinzierl, 2008, S. 187).

Für die Praxis der Raumakustik ist es wichtig zu verstehen, welche Reflexionen als nützlich angesehen werden können und welche Merkmale eine störende Schallreflexion definieren. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Zeitverzögerung zwischen Direktschall und Schallreflexion, wobei die Unschärfeschwelle als Übergangsbereich dient. Diese Schwelle variiert zwischen Sprache und Musik. Für Sprache wird eine Unschärfeschwelle von ca. 30 ms bis 100 ms als relevant angesehen, während für Musik ein Wert von 80 ms berechnet wird (Weinzierl, 2008, S.219).

Es wird beobachtet, dass Reflexionen bis zu ihrer jeweiligen Schwelle die Sprachverständlichkeit fördern und die Transparenz der musikalischen Struktur verbessern. Reflexionen oberhalb der Unschärfeschwelle können die Sprachverständlichkeit beeinträchtigen, tragen aber vor allem zur räumlichen Wahrnehmung von Musik bei. Seitliche Reflexionen, insbesondere mit einer Verzögerung von 25 ms bis 80 ms, haben sich als besonders günstig für den räumlichen Eindruck erwiesen (Fasold et al., 1976, S.35).

Im Gegensatz zur klaren Abgrenzung bei der Sprachverständlichkeit, wird bei der Transparenz in der Musik das Erreichen optimaler Werte angestrebt, wobei ein ausgewogenes Verhältnis

zwischen frühen und späten, eher diffusen Reflexionen entscheidend ist (Fasold et al., 1976, S. 151).

Die Wahrnehmung von Reflexionen als Echos erfolgt erst ab einer Zeitdifferenz von 100 ms, während eine Abfolge schwächerer Echos, den so genannten Flatterechos, als stark störend empfunden werden können. Um das Reflexionsverhalten zu untersuchen, werden die Energie-Zeit-Kurve (ETC) und die Impulsantwort verwendet. Verschiedene Echokriterien, wie Schwerpunktzeit, Klarheitsindex und Deutlichkeitsindex bieten Bewertungsansätze für die Echogefährdung von Sprache oder Musik (Weinzierl, 2008, S.197).

(Eddie Ness)

1.2 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist ein wichtiger Parameter in der Raumakustik, da sie Auswirkungen auf die Klangqualität und die Verständlichkeit von Sprache in einem Raum hat. Die Raumgröße und Nutzung bestimmt die erforderliche Nachhallzeit. Zum Beispiel benötigen Konzertsäle eine längere Nachhallzeit, um eine reiche Klangumgebung zu schaffen, während Konferenzräume oder Klassenzimmer kürzere Nachhallzeiten bevorzugen, um die Verständlichkeit von gesprochener Sprache zu verbessern. Auch in Tonstudios ist eine kürzere Nachhallzeit erwünscht als in Konzertsälen. Für die Berechnung der Nachhallzeit wird die Sabinsche Formel angewendet (Weinzierl, 2008, S.188):

$$T(s) = 0,163 \frac{V}{A} \quad (1.1)$$

T(s): Nachhallzeit

V: Raumvolumen in m³

A: äquivalente Schallabsorptionsfläche in m²

Die Begriffe „T20“ und „T30“ beziehen sich in der Raumakustik auf die Nachhallzeit, also die Dauer, die Schallwellen benötigen, um nach dem Abschalten einer Schallquelle auf einen bestimmten Pegel abzuklingen.

T20: Dies ist die Zeit, die benötigt wird, damit der Schallpegel im Raum um 20 dB abklingt, nachdem die Schallquelle abgeschaltet wurde. Dieser Wert wird oft verwendet, um die Anfangsphase des Nachhalls zu beschreiben, wenn der Schallpegel von seinem Höchstwert beginnt abzufallen.

T30: Definiert die Zeit, die es dauert, bis der Schallpegel im Raum um 30 dB abgeklungen ist. Im Gegensatz zur T20 gibt die T30 einen umfassenderen Einblick in die gesamte Nachhallzeit

und berücksichtigt auch die spätere Phase des Nachhalls, wenn der Schallpegel weiter abfällt (Weinzierl, 2008, S.188).

(Eddie Ness)

1.3 Hallradius

Als Hallradius bezeichnet man den Abstand zur Schallquelle in einem Raum, bei dem der Direktschall w_d den gleichen Schalldruckpegel aufweist wie der Diffusschall w_r ($w_d = w_r$). Dies bedeutet, dass sich der Direktschall und der Diffusschall überlagern. Außerhalb des Hallradius dominiert der Diffusschall und erst ab diesem Punkt sind raumakustische Absorber effektiv. Aus diesem Grund ist es wichtig, den genauen Abstand – den Hallradius – zu kennen. Für eine Schallquelle mit kugelförmiger Richtcharakteristik lautet die Formel (Weinzierl, 2008, S. 183):

$$r_h = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \approx 0,141 \sqrt{A} \quad (1.2)$$

r_h : Hallradius in m

A : Fläche in m^2

Wenn man die Luftabsorption vernachlässigt und die Sabine'sche Formel berücksichtigt, kann diese noch etwas vereinfacht werden (Weinzierl, 2008, S. 183):

$$r_h \approx 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (1.3)$$

r_h : Hallradius in m

V : Volumen in m^3

T : Zeit in s

(Barbaros Bali)

1.4 Diffuses Schallfeld

Das Schallfeld einer Schallquelle breitet sich in alle Richtungen annähernd strahlenförmig aus und verliert mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle an Schalldruckpegel ($w_d = 1/r$). Anders verhält es sich in geschlossenen Räumen.

Dort überwiegt bei Schallquellen außerhalb des Hallradius' der Anteil von gebeugtem und an den Wänden reflektiertem Schall. Ein Schallsignal von nur einer Sekunde erzeugt in einem

Raum mit 800 m^3 ungefähr 200.000 Reflexionen, die durch die Wände und die Decke wieder zurück in den Raum geworfen werden. Statistisch gesehen sind in diesem Teil des Schallfelds der Schallpegel und die Ausbreitungsrichtung zum Großteil ausgeglichen und werden deshalb als diffuses Schallfeld definiert (Weinzierl, 2008, S. 182).

Das bedeutet, dass in einem idealen diffusen Schallfeld der Schall aus allen Raumrichtungen und an jedem Punkt im Raum innerhalb eines Frequenzbereiches mit gleicher Wahrscheinlichkeit und Intensität einfällt. Aus diesem Grund werden raumakustische Messungen im diffusen Schallfeld durchgeführt.

(Barbaros Bali)

1.5 Absorptionsgrad α

Der Schallabsorptionsgrad α repräsentiert einen zentralen akustischen Parameter, der die frequenzabhängige Absorptionseigenschaft eines Materials charakterisiert. In seiner grundlegenden Definition gibt der Schallabsorptionsgrad an, in welchem Maße ein Material Schallenergie im Vergleich zur auftreffenden Schallmenge absorbiert (Weinzierl, 2008, S.184). Die Abb. 1.1 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der auftreffenden Schallwelle mit der Leistung I_{ein} auf einer Bauteilfläche.

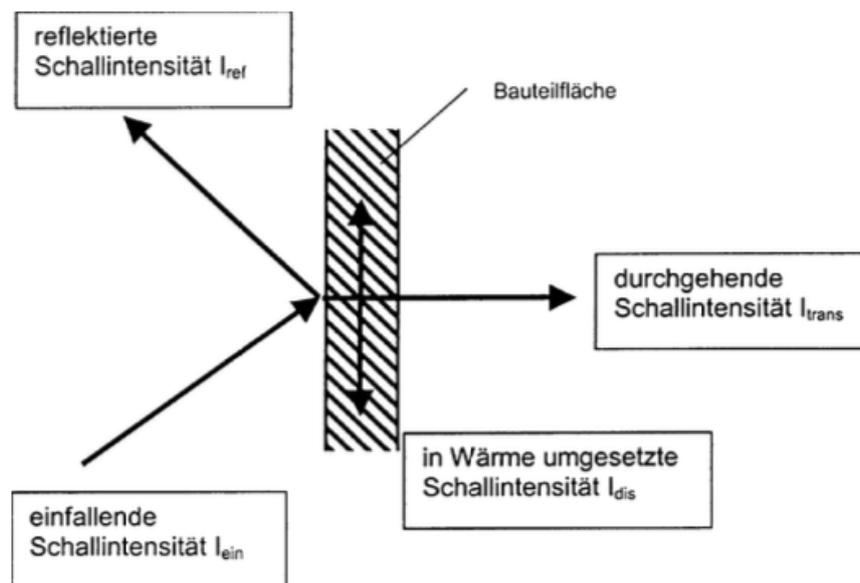


Abbildung 1.1: Verhalten von Schall auf einer Bauteilfläche (Weinzierl, 2008, S.185)

Je nach eingesetztem Material reflektiert ein Teil der einfallenden Schallenergie, dargestellt als I_{ref} , während der verbleibende Teil entweder teilweise oder vollständig absorbiert und

in Form von Wärme umgewandelt wird. Alternativ kann ein Teil der Schallwelle auch das Material durchdringen, wobei dieser Effekt vom Absorptionsgrad abhängt. Das Schallabsorptionsvermögen von Oberflächen zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Frequenz auf. Daher erfolgen Berechnungen für den Schallschutz in der Regel im Frequenzbereich von 125 Hz bis 4000 Hz. Frequenzen unterhalb dieser Grenze sind aufgrund der Wellenlänge komplizierter zu berechnen.

Die mathematische Darstellung des Schallabsorptionsgrads erfolgt durch die Formel, die das Verhältnis der Summe der absorbierten Schallenergie zur einfallenden Schallenergie beschreibt. Der Schallabsorptionsgrad kann theoretisch zwischen 0, was einer vollständigen Reflexion entspricht, und 1, was einer vollständigen Absorption gleichkommt, variieren. Diese Charakterisierungen bilden die Grundlage für die akustische Analyse von Materialien und tragen maßgeblich zur Entwicklung effektiver Schallschutzmaßnahmen bei (Weinzierl, 2008, S. 185).

$$\alpha = \frac{I_{\text{ein}} + I_{\text{ref}}}{I_{\text{ein}}} \quad (1.4)$$

α : Absorptionsgrad

I_{ein} : Auftreffender Schall

I_{ref} : Reflektierter Schall

(BB)

1.6 Äquivalente Absorptionsfläche

Jede Begrenzungsfläche eines Raumes S_i besitzt einen bestimmten Schallabsorptionskoeffizienten α . Multipliziert man die Fläche mit ihrem Absorptionskoeffizienten, erhält man ihre äquivalente Schallabsorptionsfläche A_i . Summiert man die Schallabsorptionsflächen aller Begrenzungsflächen, so erhält man die gesamte äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes A_{ges} . Diese dient als Maß für die Dämpfungseigenschaften des Raumes und gibt an, wie viel Fläche im Raum akustisch vollständig absorbierend wirkt (Weinzierl, 2008, S.190).

$$A_{\text{ges}} = \sum_i \alpha_i S_i \quad (1.5)$$

A_{ges} : Äquivalente Absorptionsfläche in m^2

α : Absorptionsgrad

S_i : Fläche in m^2

(Barbaros Bali)

1.7 Impulsantwort und ETC

Die gemessene Impulsantwort ermöglicht die Beschreibung akustischer Parameter des Raumes. Es lassen unter anderem sich die Nachhallzeit und Energiekriterien daraus ableiten. In diesem Zusammenhang können Zeit- und Pegelunterschiede einzelner Reflexionen extrahiert werden. Dies wird im tutorial der Software Easera ausführlich erklärt. (Easera Tutorial, AFMG)

(Eddie Ness)

1.8 Energiekriterien C50, C80 und TS

Die Energiekriterien zur Beurteilung basieren auf der zeitlichen Verteilung der Schallenergie und umfassen die Schwerpunktzeit TS, das Klarheitsmaß C80 und das Deutlichkeitsmaß C50. Zur Einschätzung von Erwartungswerten können statistische Berechnungen anhand des Hallradius und der Nachhallzeit durchgeführt werden (Weinzierl, 2008, S. 186).

(Eddie Ness)

1.8.1 Schwerpunktzeit TS

Die von Kürer definierte Schwerpunktzeit bezeichnet die Dauer, in der die eintreffende Schallenergie gleich der nachfolgenden Schallenergie nach dem Zeitpunkt ist (Ease, 2003r, S. 124).

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.6)$$

t: Zeit in s

p: Schalldruck in Pa

Im Gegensatz zu anderen Energiekriterien legt sie keine zeitliche Grenze zwischen frühen und späten Reflexionen fest und spiegelt den Zeitpunkt der maximalen Energie im Schall und somit der tatsächlichen akustischen Wirkung genauer wider (Fasold et al., 1976, S. 150). Die Schwerpunktzeit ist sowohl für die Bewertung von Sprache als auch von Musik geeignet. Der akustische Eindruck am Hörerplatz ist räumlicher, wenn die Schwerpunktzeit länger ist (Weinzierl, 2008, S. 197).

Optimale Werte für die Schwerpunktszeit für Sprache liegen unter 80 ms, und für Musik zwischen 60 ms und 80 ms (Weinzierl, 2008, S. 197).

Bei der optimalen Schwerpunktszeit für Sprache geht es um die Einhaltung eines Schwellenwertes, während bei Musik die Balance zwischen Transparenz (frühe Reflexionen) und räumlichem Eindruck (späte diffuse Reflexionen) im Vordergrund steht und damit in einen optimalen Wertebereich fällt.

(Eddie Ness)

1.8.2 Klarheitsmaß

Das Klarheitsmaß C_{80} wird zur Bewertung der Transparenz von Musik verwendet. Dieses Maß bewertet das Verhältnis der Schallenergie, die innerhalb der ersten 80 ms eintrifft, zu der Schallenergie nach 80 ms. Die entsprechende Formel lautet wie folgt:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.7)$$

t: Zeit

p: Schalldruck

- -3 dB: In den ersten 80 ms kommt nur die Hälfte der Schallenergie im Vergleich zur Zeit danach an.
- 0 dB: Innerhalb der ersten 80 ms kommt genauso viel Schallenergie wie in den folgenden 80 ms an.
- 3 dB: Vor Ablauf der ersten 80 ms kommt die doppelte Schallenergie im Vergleich zu den nachfolgenden 80 ms an.

Aus der Literatur kann man entnehmen, dass für $0 \text{ dB} < C_{80}$ hohe Durchsichtigkeit von Musik zu erwarten ist und bei $-3 \text{ dB} < C_{80} < 0 \text{ dB}$ die Musik den Zuhörer „umhüllt“ (Weinzierl, 2008, S. 198).

1.8.3 Deutlichkeitsmaß

Das Deutlichkeitsmaß nach Ahnert kann zur Beurteilung der Transparenz von sprachlichen Strukturen verwendet werden, insbesondere zur Beurteilung der Silbenverständlichkeit. Ähnlich wie der Klarheitsindex vergleicht der Intelligibilitätsindex frühe Reflexionen mit späteren Reflexionen, wobei die Zeitschwelle bei 50 ms liegt. „Bei einem Intelligibility Index

$C_{50} > 0$ dB ist eine hervorragende Silbenverständlichkeit von mehr als 70% gewährleistet“ (Weinzierl, 2008, S. 192).

$$C_{50} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.8)$$

t: Zeit

p: Schalldruck

(Eddie Ness)

1.9 Zusammenfassung zur Bewertungsgrundlage von Raumakustik

Die in den Abschnitten 1 - 1.8.3 dargestellten Grundsätze liefern eine klare Bewertungsgrundlage für die Konzeption der Raumakustik mit dem Ziel, eine möglichst gute Hörbarkeit zu erreichen. Diese einschlägigen Kriterien werden hier in Anlehnung an (Fasold et al., 1976, S. 35) zusammengefasst.

Ausreichende Direktschallenergie: Entscheidend ist eine ausreichende Direktschallenergie, die die Hörerpositionen ungehindert erreicht. Falls erforderlich, kann sie durch kurze Reflexionen bis zu etwa 30 ms unterstützt werden.

Frühe Reflexionen für Transparenz: Frühe Reflexionen, bis zu etwa 50 ms bei Sprache und 80 ms bei Musik, erhöhen die Transparenz, d. h. die Klarheit von Sprache und die Deutlichkeit von Musik.

Seitliches Auftreten von Reflexionen für Räumlichkeit: Seitlich einfallende Reflexionen zwischen 25 ms und 80 ms tragen zur Verbesserung der Räumlichkeit bei, was besonders für musikalische Darbietungen wichtig ist.

Diffuses Auftreten von Reflexionen für den Raumeindruck: Diffus einfallende Reflexionen mit abnehmender Intensität nach 80 ms verbessern den Gesamteindruck des Raumes.

Anpassung der Nachhallenergie an die Raumeigenschaften: Die Nachhall-Energie des Raumes sollte auf die spezifische Nutzung und Größe des Raumes abgestimmt sein.

Vermeidung von störenden Reflexionen: Störende Reflexionen, die Echostörungen, Fehlokalisierungen, Verfärbungen oder Beeinträchtigungen verursachen können, sollten vermieden werden.

Gleichmäßige Schallverteilung für alle Sitzplätze: Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien sollte eine möglichst gleichmäßige Schallverteilung für alle Sitzplätze gewährleistet sein.

Die Erfüllung dieser Anforderungen kann durch objektiv messbare Parameter wie Nachhallzeit, Sprachverständlichkeit, Klarheitsindex usw. bewertet werden.

(Eddie Ness)

2 Absorbertypen

Die konventionellen Absorbertypen die zum Schallschutz benutzt werden, basieren auf drei verschiedenen physikalischen Mechanismen. Diese sind poröse Absorber, Platten- und Helmholtz-Absorber. Poröse Absorber zielen darauf ab, Schallenergie effektiv in Wärme umzuwandeln (Weinzierl, 2008, S. 233). Resonanzabsorber wie Platten- und Helmholtz-Absorber hingegen wirken als Feder-Masse-System (Cox & d'Antonio, 2016, S. 158).

Schallabsorber können wie Weinzierl bereits definiert durch verschiedene Elemente realisiert werden, darunter „Flächen, Einbauten, Einrichtungsgegenstände, Umgebungsbedingungen wie Luft sowie nutzungsbedingte Anordnungen wie Publikum und Dekorationselemente.“ Die Wirkung eines Schallabsorbers wird maßgeblich durch seinen frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad α sowie die äquivalente Schallabsorptionsfläche A bestimmt. Je nach ihrer Wirkung in einem spezifischen Frequenzgebiet werden Schallabsorber als Tiefenabsorber, Mittenabsorber, Höhenabsorber oder Breitbandabsorber klassifiziert (Weinzierl, 2008, S. 233).

Die Unterscheidung zwischen diesen Absorberarten ermöglicht eine gezielte Anpassung an die akustischen Anforderungen eines Raumes. Insbesondere die Berücksichtigung des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades und der äquivalenten Schallabsorptionsfläche ermöglicht eine präzise Charakterisierung und Auswahl von Schallabsorptionsmaterialien und -elementen. Dieser Ansatz ist entscheidend für die Schaffung einer akustischen Umgebung, die den spezifischen Bedürfnissen und Anforderungen eines Raumes gerecht wird (Weinzierl, 2008, S. 233).

(Barbaros Bali)

2.1 Poröse Absorber

Zur effektiven Schallabsorption werden Materialien wie Glas- und Mineralfasern, Textilien oder offenporiger Schaumstoff verwendet. Wenn Schall auf einen porösen Absorber trifft, durchdringt ein Teil der Schallwelle das Material und wird je nach Strömungswiderstand R absorbiert. Diese Absorption erfolgt durch Reibungsverluste der Luftmoleküle an den Poren und Fasern des Absorbers und führt zur Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie (Weinzierl, 2008, S.233).

Die Porosität eines Materials errechnet sich aus dem Verhältnis des zugänglichen Hohlraumgehaltes zu dessen Gesamtvolumen. Da bei gleicher Porosität zweier Absorber die Hohlraumteilvolumina unterschiedlich sein können und der Widerstand für die Luftteilchen somit nicht nur von der Porosität abhängt, wird der spezifische Strömungswiderstand R_s definiert. Das Verhältnis der Druckdifferenz wird als Δp – vor und hinter dem Material – zur Geschwindigkeit der durchströmenden Luft q_v definiert:

$$R_s = \frac{\Delta p A}{q_v} \quad (2.1)$$

R_s : Spezifischer Strömungswiderstand Pasm^{-1}

Δp : Druckdifferenz in Pa

q_v : Durchströmende Luft in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

A : Querschnittsfläche in m^2

(Barbaros Bali)

2.1.1 Basotect G+

Basotect ist ein offenzelliger, flexibler Schaumstoff, der aus Melaminharz gefertigt wird. Dieses Material zeichnet sich durch seine geringe Dichte, leichte Struktur und schallabsorbierenden Eigenschaften aus. Basotect-Schaumstoff zählt zu den führenden Methoden der Schalldämmung und findet weitreichende Anwendung in der Bau- und Raumakustik, der Automobilindustrie und der Veranstaltungstechnik.

Die poröse Struktur von Basotect ermöglicht eine effiziente Absorption von Schallenergie und prädestiniert ihn daher besonders für die Verbesserung der Raumakustik in verschiedenen Umgebungen wie Büros, Kinos und Konzertsälen. Aufgrund seiner flexiblen Formbarkeit lässt sich der Schaumstoff in verschiedene Formen schneiden.

Die Entscheidung Basotect G+5 (die Zahl hinter dem + repräsentiert die Dicke des Schaumstoffs) für das Ligeti-Zentrum zu verwenden, beruht auf seinen ausgezeichneten Absorptionseigenschaften, insbesondere im mittelfrequenten Bereich. Die einfache Handhabung und die platzsparende Dicke machen ihn außerdem ideal für die Platzierung im Raum. Diese gezielte Auswahl unterstreicht die Effektivität und Vielseitigkeit von Basotect als maßgeblichen Beitrag zur Schallabsorption im Kontext des Ligeti-Zentrums. In der Abb. 2.1 sieht man die Schallabsorptionseigenschaften der Basotect G+ Platten und ihre hervorragende Dämpfung im mittel- bis hochfrequenten Bereich. Zudem erzielen die Basotect G+-Platten schon bei relativ niedrigen Frequenzen hohe Absorptionsgrade – trotz geringer Dicke. Die 50 mm dicken Platten absorbieren schon einen beträchtlichen Teil der einfallenden Schallleistung ab 400 Hz und absorbieren nahezu vollständig ab 1000 Hz.

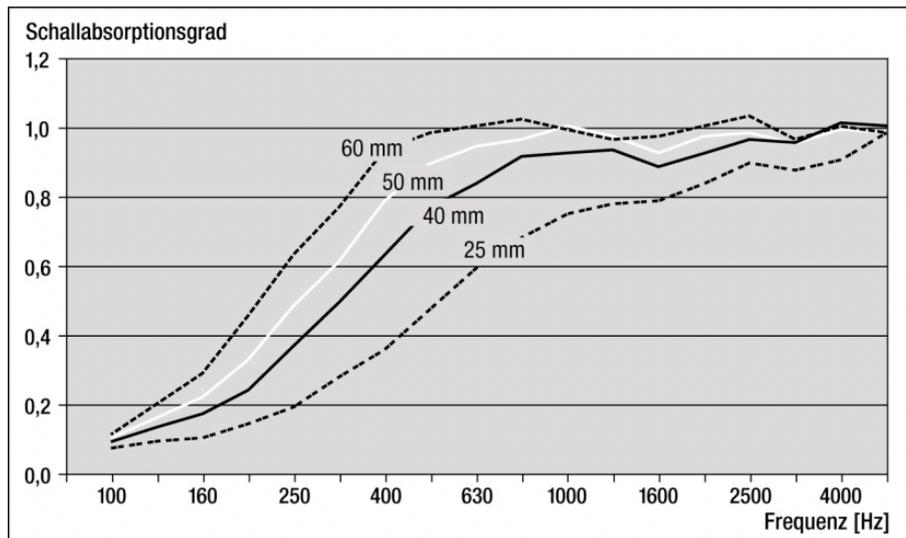


Abbildung 2.1: Datenblatt des Herstellers, [Basotect G+](#)

(Barbaros Bali)

2.2 Resonanzabsorber

Resonanzabsorber oder reaktive Absorber arbeiten nach dem Feder-Masse-Prinzip und übertragen die Schallenergie in eine andere Energieform, wie poröse Absorber den Schall in Wärme umwandeln. Ihr Wirkungsbereich ist schmaler als passive Absorber, funktioniert jedoch in tiefen Frequenzen deutlich besser. Aufgrund des fehlenden Bezuges zu Plattenabsorbern in dieser Arbeit, wird die Definition dieser vernachlässigt und nur auf Helmholtz-Absorber eingegangen.

(Barbaros Bali)

2.3 Helmholtz-Absorber

Der Helmholtz-Absorber ist ein akustisches System, in dem ein eingeschlossenes Luftvolumen, das durch einen oder mehrere Öffnungen mit dem umgebenden Schallfeld verbunden ist und als Feder-Masse-System funktioniert. Das Luftvolumen in den Kanälen wirkt als Masse, die durch das äußere Schallfeld in mechanische Schwingungen versetzt wird. Um den Resonator effektiv an das umgebende Schallfeld zu koppeln, wird absorbierendes Material im Öffnungskanal oder im Luftvolumen platziert. Diese Maßnahme verstärkt die Reibungsverluste, die durch Schwingung der Luftmasse im Kanal entstehen, und führt zu einer verbesserten

Energiegewinnung aus dem Schallfeld (Cox & d'Antonio, 2016, S.158). In Abb. 2.2 sieht man den Aufbau eines Helmholtz-Absorbers. Dieser besteht aus einem Resonatorvolumen V mit einer kreisförmigen Öffnung, bezeichnet mit der Querschnittsfläche S und der Resonatorhalstiefe l . Die Luft innerhalb der Öffnung dient als akustische Masse, während das Volumen selbst die Rolle einer akustischen Feder übernimmt. Im Idealfall führt diese Konfiguration zu einer präzisen Resonanzfrequenz und einer relativ schmalen Bandbreite. Ein großer Vorteil der Helmholtz-Absorber ist die Flexibilität in der Resonanzfrequenz f_R . Sie ist variabel und errechnet sich wie folgt (Weinzierl, 2008, S. 237f):

$$f_R = 2\pi \sqrt{\frac{S}{V(l + 2\Delta l)}} \quad (2.2)$$

- f_R : Resonanzfrequenz
- S : Querschnittsfläche des Resonators
- V : Resonatorvolumen in m^3
- l : Resonatorhalstiefe in m
- $2\Delta l$: Mündungskorrektur

Bei quadratischen Öffnungen gilt $2\Delta l \approx 0,9a$ (Weinzierl, 2008, S. 238). Für kreisrunde Öffnungen mit dem Radius r errechnet sich die Resonanzfrequenz wie folgt:

$$f_R \approx \frac{100r}{\sqrt{V(l + 1.6r)}} \quad (2.3)$$

- f_R : Resonanzfrequenz
- r : Radius des Resonators
- V : Resonatorvolumen in m^3
- l : Resonatorhalstiefe in m

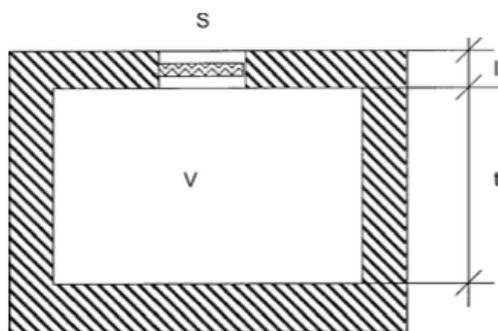


Abbildung 2.2: Wirkweise eines Helmholtz-Resonators

(Barbaros Bali)

3 Beschreibung und Nutzungsplan

Das Production Lab im Ligeti-Zentrum befindet sich im 10. OG eines Neubaus am Harburger Binnenhafen am Veritaskai 1, 21079 Hamburg. Das gesamte Ligeti-Zentrum erstreckt sich über zwei Etagen, in denen an Methoden für die Zusammenwirkung von Musik und Gesundheit geforscht wird und ein allgemeiner Ideen-, Technologie- und Wissenstransfer im audiobezogenen Bereich stattfinden soll.

Der Raum besitzt die Außenmaße 16 m x 12 m (192 m²) und ein Raumvolumen von 750 m³. Die Hauptwände des Production Labs bestehen größtenteils aus Beton (22.4%) und werden von zwei Seiten durch Fenster umrahmt. Diese Fenster befinden sich zum einen zur Straße und zur anderen Seite hat der Raum eine Fensterseite mit Blick auf den Harburger Binnenhafen. Gestützt wird das Production Lab durch drei tragende, massive Betonsäulen. Abgesehen von der Küche ist auf dem Boden über die gesamte Fläche Teppich verlegt. Darunter wird ebenfalls Beton als Baustoff vermutet. Dies konnte nicht verifiziert werden, da es keine Möglichkeit gab unter den Teppich zu sehen. Der Raum wird mit einem Wellblechdach geschlossen, welches von der Mitte aus zu den Fensterseiten ein Gefälle hat. Bei diesem Dach kann man nicht exakt definiert werden, was sich dahinter befindet. Es wird eine unbekannte Isolation vermutet, da bei Regen nicht das typische Prasseln vernehmbar ist. Nichtsdestotrotz werden nicht alle Außengeräusche abgeschirmt und es gelingt ein Teil durch die Fenster, das Dach und die Tür.

Das Production Lab im Ligeti-Zentrum ist ein voll ausgestatteter Raum mit allen notwendigen Anlagen und Anschlüssen. Es gibt eine offene Küche und es befinden sich zwei WCs und weitere kleine Räumlichkeiten, die durch Rigips-Wände getrennt werden.

Zur Wasserseite des Raumes soll ein Technikraum entstehen, um den Anforderungen der dort tätigen KünstlerInnen gerecht zu werden. Dieser Bereich wird nicht durch neue Rigips-Wände getrennt, sondern voraussichtlich durch einen Molton-Vorhang abgehängt. Dieser wird sich ebenfalls positiv auf die Nachhallzeit im Raum auswirken und den Raum besser in den angestrebten Toleranzbereich einordnen.

Das Nutzungsprofil des Production Labs wird in der Forschung an Spatial Audio und Audio zu medizinischen Zwecken dienen. Gelegentlich soll der Raum auch für verstärkte oder nicht verstärkte Konzerte zur Verfügung stehen. In der Regel errechnet sich die Nachhallzeit für Tonstudios aus folgender Rechnung (Weinzierl, 2008, S. 296):

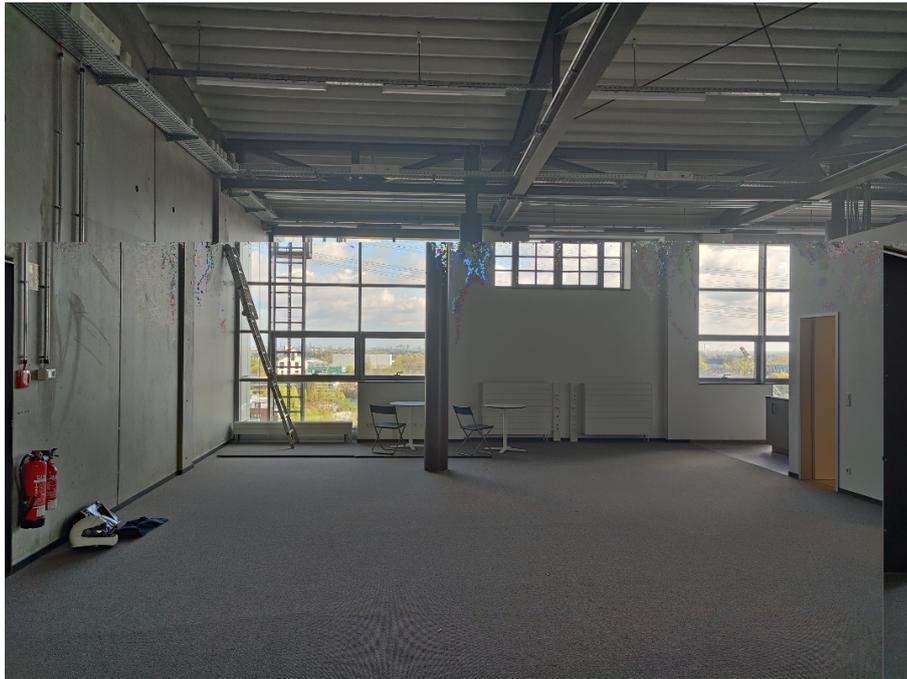


Abbildung 3.1: Production Lab im Ligeti-Zentrum, Blick zur Straßenseite

$$T_m = 0.25 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ s} \quad (3.1)$$

T_m : Mittelwert der Nachhallzeiten in s

V : Volumen in m^3

V_0 : Referenzraumvolumen von 100 m^3

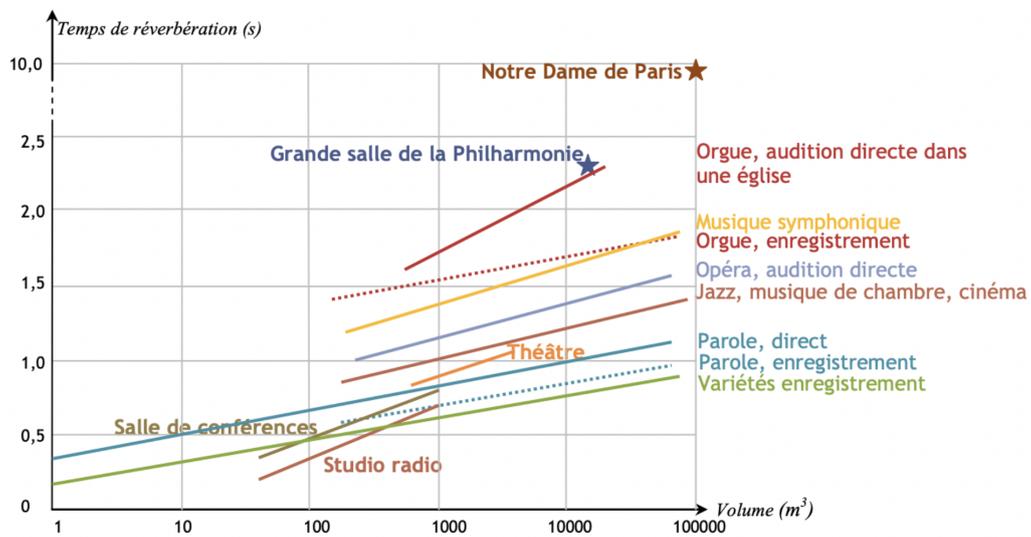
Somit ergibt sich ein Mittelwert der Nachhallzeit für das Production Lab von 0,49 s. Die errechnete Nachhallzeit für den Studiobetrieb ist aus diversen Gründen nicht möglich. Zum einen sind diese Nachhallzeiten aufgrund der räumlichen Voraussetzungen schwer umzusetzen und zum anderen sollen dort gelegentlich Konzerte stattfinden. Deshalb wurde in der Planung der raumakustischen Optimierung berücksichtigt, einen Toleranzbereich zu kreieren, um situativ die Nachhallzeit variieren zu können. In Abb. 3.3 sieht man verschiedene Szenarien und ihre empfohlene Nachhallzeit. Aus vorangegangenen Diskussionen mit allen beteiligten Personen am Projekt wurde ein idealer Toleranzbereich ermittelt. Das Nutzungsprofil wurde als Kompromiss zwischen „Opéra, audition directe“ und „Variétés enregistrement“ festgelegt. Dort haben wir eine untere Grenze von 0,6 s Nachhallzeit, die für jegliche elektronische Klangsynthese förderlich ist, da für diesen Zweck eine Nachhallzeit angestrebt wird, die so kurz wie möglich ist. Die obere Grenze befindet sich bei 1,0 s. Diese Nachhallzeit wird für nicht verstärkte Konzerte angestrebt, da Konzerte mit Instrumenten mit dem Raum zum



Abbildung 3.2: Production Lab im Ligeti-Zentrum, Blick zur Wasserseite

Leben erwachen und von nicht störenden Reflexionen profitieren. Das Ziel erreichen wir durch die modulare Installation der Absorber im Raum. Die Absorber können nach Belieben auf- und abgehängt werden, um so die Nachhallzeit im Raum an die jeweilige Situation anzupassen.

(Barbaros Bali)



Temps de réverbération optimal des auditoriums en fonction de leur volume et de leur utilisation, d'après G. Krauss, F. Kuznik, R. Yezou [4] et d'après d'après R. Lamoral

Abbildung 3.3: Optimale Nachhallzeiten für verschiedene Raumnutzungen und Raumgrößen (YEZOU, 2009)

4 Akustische Messungen im Ligeti-Zentrum

Die raumakustischen Messungen fanden im leeren Zustand des Production Labs im Ligeti-Zentrum statt. Es standen lediglich einige Stühle und Tische im Raum. Die Messungen wurden zusammen mit Clément Lacarde durchgeführt, einem Masterstudenten für Raumakustik aus Frankreich, der zu dieser Zeit am Projekt mitgewirkt hat. Vorab wurde anhand eines Modells eine Vorberechnung ermittelt. Für die Messungen wurde das Programm Room EQ Wizard benutzt, das mit der Abkürzung REW benannt ist und auf einem Laptop mit externer Soundkarte betrieben wurde. Das Signal wurde über einen Dodekaeder-Lautsprecher gesendet und mit einem Kondensatormikrofon (Diffusfeldkapsel, Kugelcharakteristik) aufgenommen. Als Messsignal wurde ein Sweep von 0 Hz bis 20 kHz erzeugt, unter Verwendung von fünf Messpunkten und zwei Lautsprecherpositionen im Raum. Pro Messpunkt wurden drei Messungen durchgeführt, die mit einem Delay von 20 s, um Zeit zum Ausklingen des Signals zu ermöglichen. Es wurde eine Mittelung zwischen allen Messungen berechnet. Die Lautsprecher- und Mikrofonhöhe lag bei 1,5 m.

Es wurden außerdem Messungen mit einem zusätzlich generiertem Impuls durchgeführt, um beide Messmethoden zu vergleichen. Siehe Abb. 4.4. Bei der Impuls-Methode wird ein lauter Knall über das gesamte Frequenzspektrum erzeugt, beispielsweise durch das Platzen eines Ballons. Die gemessenen Nachhallzeiten wurden ebenfalls erfasst, und der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse der beiden Messungen sind sehr ähnlich. Durch das höhere Maß an Kontrolle über den Sweep im Vergleich zum Platzen des Ballons, erlangen wir mehr Kontrolle über das zu messende Signal. Daher haben wir uns entschieden, mit der Sweep-Methode zu arbeiten. Ungeachtet dessen hat das Vergleichen der Messmethoden unsere Messergebnisse bestätigt. Alle Sende- und Empfangspositionen sind in Abb. 4.3 dargestellt

Messgeräte Sweep Methode:

- Kondensatormikrofon Bruel & Kjaer Diffusfeldkapsel
- Mikrofonvorverstärker B & K Type 2610
- Laptop + Mess-Software Room EQ Wizard + RME Audiointerface
- Pentadodekaeder + 2 x 150 W Leistungsverstärker "LAB Typ 300"



Abbildung 4.1: Impulse-Methode



Abbildung 4.2: Sweep-Methode



Abbildung 4.3: Messpositionen der Nachhallzeitmessung im Ligeti-Zentrum

4.1 Auswertung der akustischen Messungen

Die Nachhallzeit wurde über eine Mittelung von zwei verschiedenen Sende- und jeweils fünf Empfangspositionen ermittelt (Abb 4.4) und über einen Pegelabfall von 30 dB bewertet, bei einem Signal-Rauschabstand (SNR) von ca. 20 dB bis 30 dB. Der Verlauf zeigt eine „Problemzone“ zwischen 400 Hz und 2000 Hz. In diesem Bereich gibt es deutlich längere Werte als in anderen Frequenzen darunter.

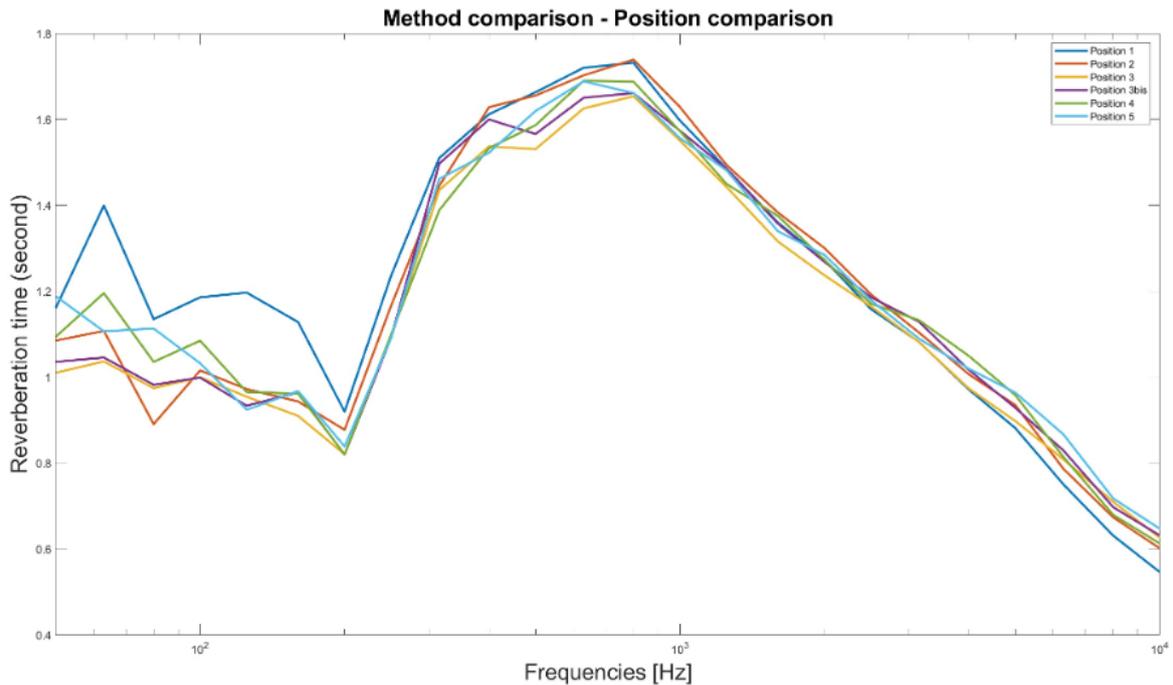


Abbildung 4.4: Vergleich der Messungen zwischen Sweep- und Impulse- Methode

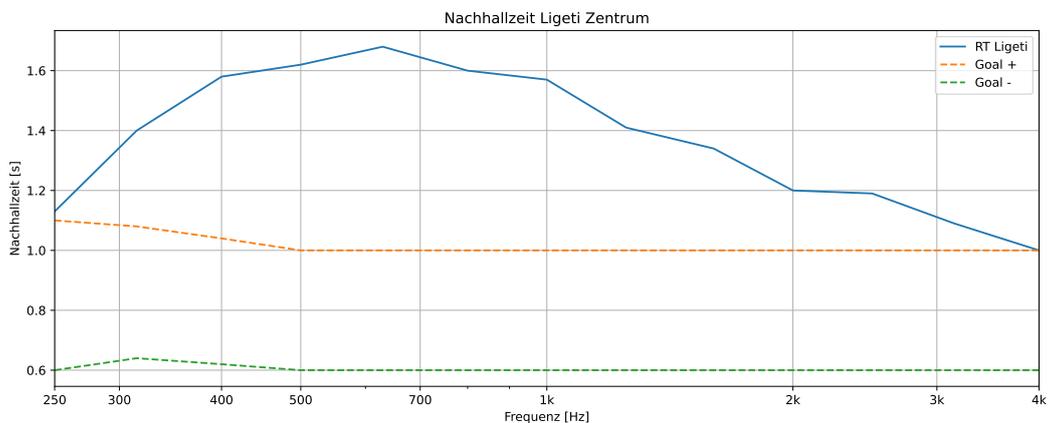


Abbildung 4.5: Messergebnisse RT Ligeti-Zentrum

4.2 Bewertung der Nachhallzeit

Die gemessene Nachhallzeit entspricht ungefähr den vorab berechneten Werten in Abb. 4.6. Zur Bewertung wird der arithmetische Mittelwert in den Terzbändern von 125 Hz bis 4 kHz gebildet. Bei der Bewertung kann zugelassen werden, dass die Werte oberhalb von 4 kHz abfallen und unterhalb von 200 Hz ansteigen. Die Differenz zwischen den Nachhallzeiten in

benachbarten Terzbändern sollte zwischen 200 Hz und 4 kHz nicht mehr als 0,05 s betragen und nicht mehr als 25 % des längeren Wertes unterhalb von 200 Hz überschreiten. (Weinzierl, 2008, S. 296).

Die gemessenen Werte liegen wie erwartet oberhalb der Toleranzgrenze für Regie- und Studioräume in vergleichbarer Größe (Weinzierl, 2008, S.296) und an der unteren Grenze für die empfohlene Nachhallzeit in Konzertsälen. In den DIN-Normen wird für Musikvorstellungen bei einem Volumen von 750 m³ eine Nachhallzeit von 1,3 s empfohlen, mit einer Toleranz von 0,2 s. Für Tonstudios wird gemäß EBU Tech. 3276 und SSF-01.1 eine Nachhallzeit zwischen 0,2 s und 0,4 s empfohlen (Weinzierl, 2008, S. 296). Da, wie in Kapitel 3 beschrieben, eine multifunktionale Nutzung angestrebt wird und der Raum aufgrund der genannten Voraussetzungen keine optimalen Voraussetzungen für ein Tonstudio mit sehr kurzer Nachhallzeit bietet, wurde sich mit den zukünftigen Nutzern auf eine angestrebte Nachhallzeit zwischen 0,6 s und 1 s geeinigt. Auf Grundlage unserer Messungen lässt sich daraus schlussfolgern, dass die Nachhallzeit zwischen 300 Hz und 2000 Hz um 0,8 s bis 1 s zu lang ist. In der Abb. 4.6 sieht man den Vergleich der berechneten und gemessenen Nachhallzeit. In Abb. 4.5 wird die gemessene Nachhallzeit dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich, in dem die optimale Nachhallzeit des Raumes liegen soll.

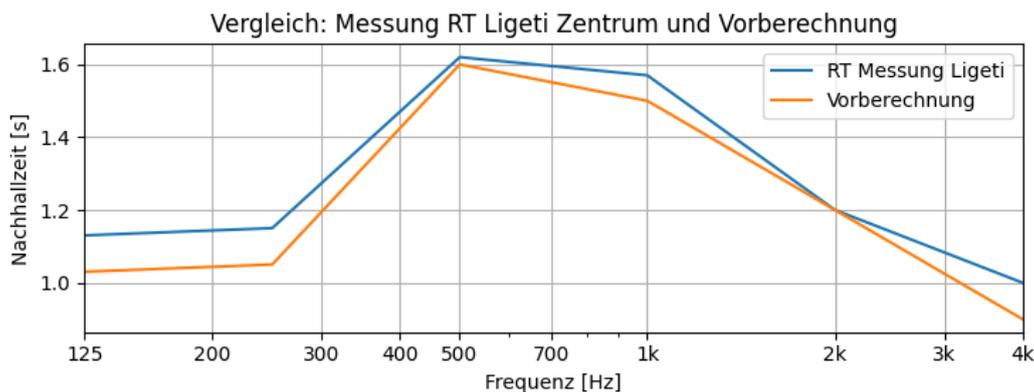


Abbildung 4.6: Vergleich: Vorberechnung und Messergebnisse RT Ligeti-Zentrum

4.3 Auswertung der Energiekriterien

Für die Analyse der zeitlichen Energieverteilung des Schalls betrachtet man die in Abb. 1.8 erklärten Energiekriterien. Zur Bewertung wird der arithmetische Mittelwert zwischen den Frequenzen 125 Hz und 4000 Hz gebildet.

Nach den in Kapitel 1 beschriebenen Bewertungsgrundlagen haben wir im Deutlichkeitsmaß

C_{50} (dB),	C_{80} (dB),	$TS(s)$
-2,19	1,28	99,37

Tabelle 4.1: Messergebnisse Energieverteilung

C_{80} eine gute Durchsichtigkeit der Musik. Das Klarheitsmaß C_{50} liegt im unteren Bereich der Toleranzgrenze. Hier wäre demnach noch eine Verbesserung möglich.

Die Schwerpunktzeit deckt sich mit dem Wert für C_{50} . Hier wird deutlich, dass wir noch fast 30 ms unter dem Wert für eine gute Sprachverständlichkeit liegen. Dieser Wert wäre wie bereits in Kapitel 1.8.1 beschrieben, im optimalen Bereich für Chor und symphonische Musik. Sie ist für den Studiobetrieb jedoch wie im Abschnitt 1.8.1 beschrieben zu lang und sollte zwischen 60 ms und 80 ms liegen (Weinzierl, 2008, S. 197).

(Eddie Ness)

5 Entwicklung des Absorber-Prototypen

5.1 Frontplatten

Die Auswahl des Materials für unsere Frontplatten basierte auf Abwägung verschiedener Faktoren. Letztendlich fiel die Entscheidung auf 3 mm dicke MDF-Platten aufgrund ihrer wirtschaftlichen Aspekte, dem Gewicht im Vergleich zu anderen Holzplatten und der praktischen Handhabung an der Werkbank im Vergleich zu Materialien wie Plexiglas. Dies ermöglichte ebenfalls Kosten zu optimieren und die Arbeitsprozesse bei der Herstellung von Absorbern zu erleichtern. Es wurde auf eine Entscheidung geachtet, die gleichzeitig ökonomische und praktische Überlegungen berücksichtigt.

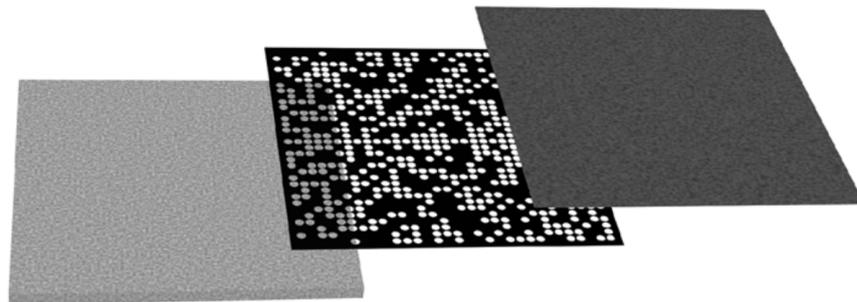


Abbildung 5.1: Ein BAD-Panel und seine Einzelteile (Cox & d'Antonio, 2016, S.314)

Beim Design unserer Frontplatten haben wir uns an der Faustformel von Trevor J. Cox orientiert, die besagt, dass perforierte Frontplatten keine zu große Fläche zum Absorber zulassen sollten und die sichtbare Absorberfläche unter 20% liegen sollte (Cox & d'Antonio, 2016, S. 131f). Mit dieser Grundidee haben wir uns Empfehlungen von verschiedenen Produzenten von Akustikpaneelen eingeholt und haben dieses Wissen mit den von (Cox & d'Antonio, 2016, S. 313) beschriebenen BAD-Paneelen ergänzt. Der Verlauf der Absorptionskurve der BAD-Paneele entspricht nahezu Anforderungsprofil des Production Labs. Durch die zusätzlich schwingende Masse innerhalb der Löcher verschiebt sich die Absorptionskurve

im Frequenzbereich nach unten. Dies führt zu einer zusätzliche Dämpfung im tief- bis mittelfrequenten Bereich – dabei entsteht eine Art Miniatur Helmholtz-Absorber, wie in Kapitel 2.3 beschrieben. Bei hohen Frequenzen hingegen reflektiert die Frontplatte einen Teil der hohen Frequenzen und vermindert die Absorption im hochfrequenten Bereich (Cox & d’Antonio, 2016, S. 313). Die Herleitung der Lochfrequenz und des Lochabstandes für BAD-Paneele basiert auf einer Fourier-Reihe, in der absorbierende Flächen als 0 und reflektierende Flächen als 1 dargestellt werden. Diese Berechnung wird von Trevor J. Cox in (Cox & d’Antonio, 2016, S. 317) ausführlich beschrieben.

In einem Vergleich der Absorptionskurve der BAD-Panels aus Abb. 5.2 mit einer Dicke von 5,1 cm und der 5 cm dicken Basotect G+5 Absorber mit unseren Frontplatten (siehe Platte 1 in Abb. 6.2), zeigen beide einen sehr ähnlichen Absorptionsverlauf über das gesamte Frequenzspektrum und bestätigten die Annahme, die gewünschten Effekte durch die Installation der Frontplatte mit Löchern zu erzielen.

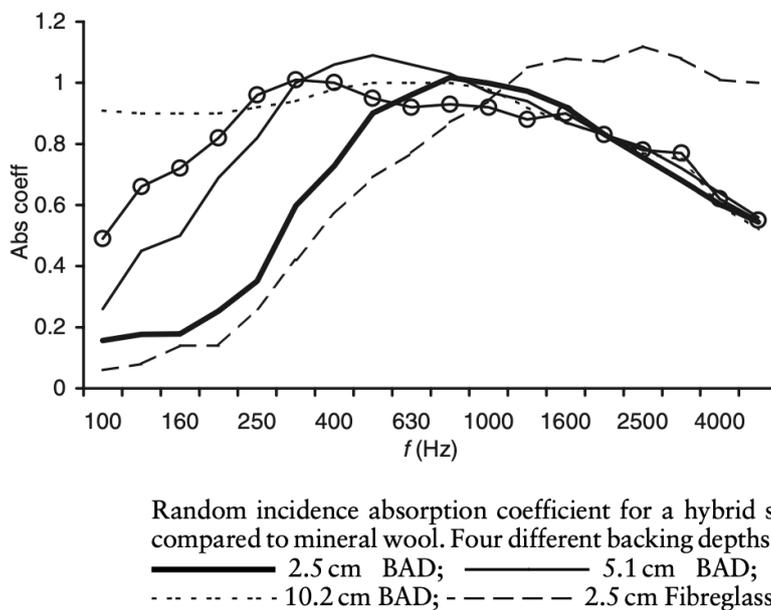


Abbildung 5.2: Absorptionsverlauf verschiedener BAD-Panels, (Cox & d’Antonio, 2016, S.314)

Da die Absorberpaneele einen erheblichen Anteil der geplanten Wandfläche ausmachen, ist es von Bedeutung nicht nur die angestrebte Absorptionskurve zu erreichen, sondern auch sicherzustellen, dass die Paneele der Raumästhetik entsprechen.

Aufgrund der vielen Fenster im Ligeti-Zentrum durch die tiefe Frequenzen entweichen können, statt reflektiert zu werden, wird vermutet dass in diesem Bereich weniger Absorption benötigt wird. Da es für die Nutzer relevant war eine möglichst platzsparende Lösung zur akustischen Optimierung zu finden, wurden Basotect-Platten mit einer Dicke von 5 cm

Diameter	Menge
82 mm	7
42 mm	6
22 mm	12

Tabelle 5.1: Durchmesser und Lochzahl Platte 1

ausgewählt. Dies deckte sich ebenfalls mit unserer Intention, eine stärkere Dämpfung im Frequenzbereich von 400 Hz bis 1000 Hz und eine schwächere Dämpfung in hochfrequenten Bereich zu erzielen. In unseren Recherchen stießen wir auf einen Hersteller, der mit 10 cm dicken Schaumstoffpaneelen die gewünschte Absorptionskurve erreichte. In der Standardausführung des Herstellers wird statt Akustik-Schaumstoff Steinwolle verlegt. Dieser hat im hochfrequenten Bereich die gleichen Absorptionseigenschaften wie Melaminharzschaumstoff, verliert im tief- und mittelfrequenten Bereich jedoch an Dämpfung im Vergleich zu Akustik-Schaumstoffen wie Basotect in Abhängigkeit zur Dicke des Materials. Um den selben Effekt mit Mineralwolle zu erzielen, bräuchte man eine dickere Schicht des Materials.

Eine Angabe zum Verhältnis der Frontplatte und der offenen Absorberfläche konnten wir beim Hersteller nicht finden. Mit dem Vorwissen der oben genannten Faustformel und der angestrebten Absorptionskurve wurde ein erster digitaler Entwurf einer einzelnen Absorberplatte mit den Maßen 100 cm x 50 cm und einer offenen Absorberfläche von 9,97% erstellt. Bei der Anordnung und Größe der Löcher diente der Hersteller als Orientierung. Wir wählten für unsere Frontplatte drei verschiedene Durchmesser aus und setzten die Lochgrößen in einem Intervall an, in dem die Löcher sich pro Schritt verdoppeln. In Tab. 5.1 sieht man die Anzahl der drei genutzten Lochgrößen. Das bedeutet, dass die größten Löcher einen Durchmesser von 82 mm (Dia 1) aufwiesen, die mittleren einen Durchmesser von 42 mm (Dia 2) und die kleinsten Löcher haben einen Durchmesser von 22 mm (Dia 3). Diese Konfiguration ermöglichte es uns, unter Berücksichtigung unserer angestrebten 10%, die optimale Lochanzahl zu bestimmen.

Nach Abschluss der Messungen in Kapitel 6 mit der Platte 1 fiel die Entscheidung, weitere 5% der Frontplatte zu entfernen. Ziel war es, den Einfluss des Verhältnisses zwischen Frontplatte und Absorber auf den Absorptionsverlauf genauer zu beurteilen. Hierfür haben wir die Anzahl der bestehenden Löcher auf insgesamt 38 Löcher erhöht. Die genaue Verteilung kann man Tabelle 5.2 entnehmen. Durch diese Modifikation erhofften wir uns eine präzisere Erfassung der Auswirkungen auf die Absorptionscharakteristiken und damit eine optimierte Feinabstimmung unserer Frontplattenkonstruktion. Erkennbar ist in diesem Fall, dass das Verhalten im tieffrequenten Bereich nicht sonderlich beeinflusst und dort sogar bessere Absorptionsgrade mit weniger Löchern erzielt wurden. Auffällig ist jedoch, dass es einen

Diameter	Menge
82 mm	10
42 mm	12
22 mm	16

Tabelle 5.2: Durchmesser und Lochzahl Platte 2

großen Hub ab 400 Hz gibt, welcher bis 4000 Hz zwar ähnlich wie bei der Platte 1 abklingt aber aufgrund der gesteigerten sichtbaren Absorberfläche höhere Absorptionsgrade in dem Bereich erzielt.

(Barbaros Bali)

5.2 Umsetzung der Produktion

Die ersten Prototypen, die zur akustischen Messung im Hallraum am Berliner Tor benutzt wurden, sind vollends in Handarbeit fertig gestellt worden. Um zu gewährleisten, dass bei allen MDF-Platten die Löcher stets an der gleichen Position sind, wurden die 100 cm x 50 cm MDF-Platten in mehrere, nicht zu hohe Stapel verschraubt. Anschließend wurden die Positionen der Löcher auf der obersten Platte gekennzeichnet und diese Stapel wurden anschließend mit einer Bohrmaschine und Lochkreis-Aufsätzen durchbohrt. Ein großes Problem bei diesem Verfahren sind vor allem Löcher, die nah beieinander liegen und Löcher, die nah am Rand platziert sind. Aufgrund der geringen Dicke der MDF-Platten neigen sie dazu zu brechen. Dieses Problem konnten wir im zweiten Durchlauf – nachdem wir unsere Messungen durchgeführt und positives Feedback bezüglich unserer Frontplatten erhalten haben – vermeiden. Dank Herrn Mores, der uns den Kontakt zum WorkING Lab hergestellt hat, konnten wir die Platten in einem Lasercutter zuschneiden zu lassen. Dieses Verfahren ermöglichte uns erheblich sauberere Schnittkanten und einfachere Arbeitsabläufe.

(Barbaros Bali)



Abbildung 5.3: Produktion der Frontplatten im Lasercutter

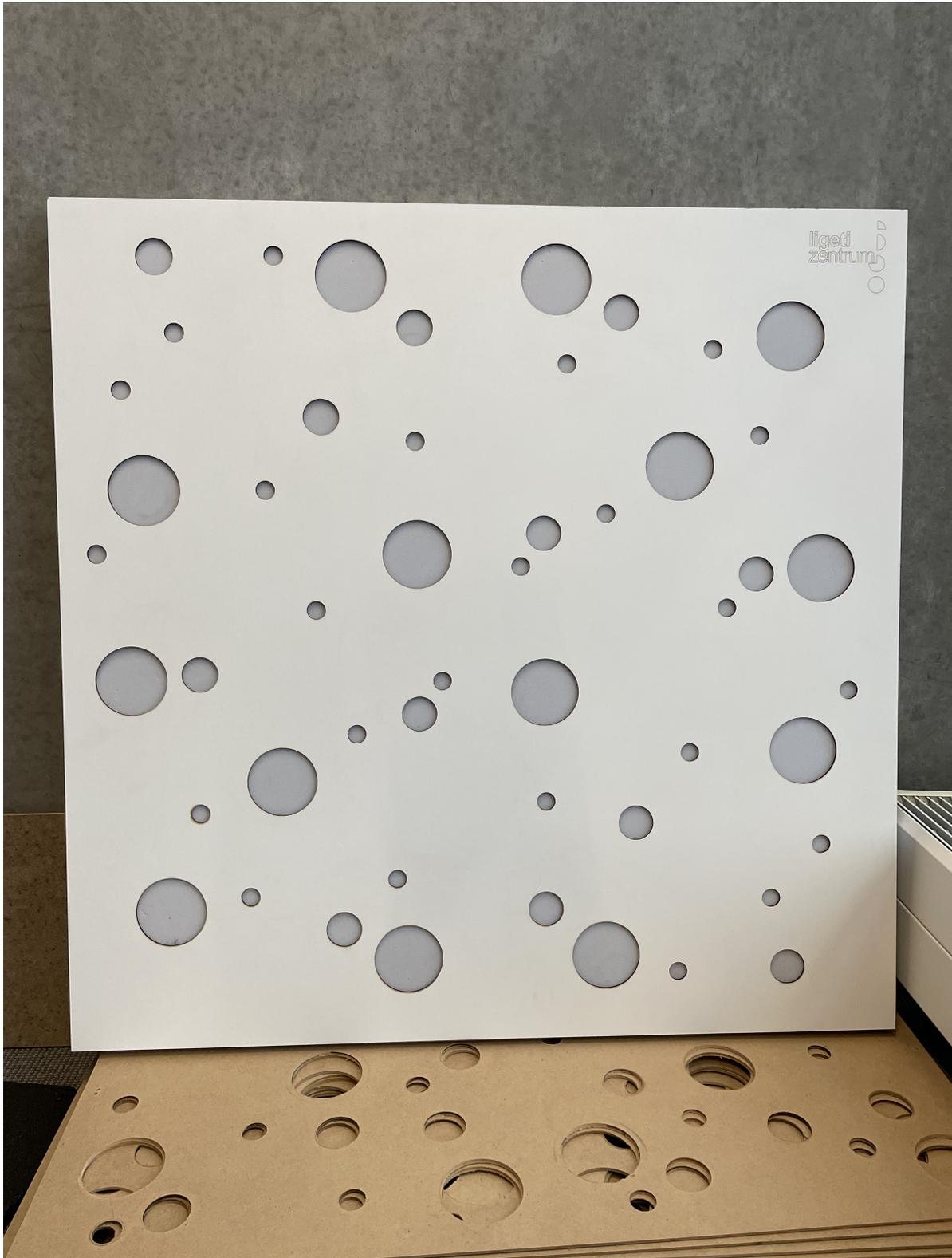


Abbildung 5.4: Fertige Frontplatte

6 Messungen mit Absorbern im Hallraum der HAW

Die Messungen der Absorber fanden im Hallraum der HAW Berliner Tor statt. Ziel der Messungen war es, die Absorptionskoeffizienten der Absorber zu ermitteln, um herauszufinden, welche Absorberkonfiguration im Production Lab die gewünschten Ergebnisse erzielt. Der Absorptionskoeffizient eines Materials wird ermittelt durch die Messung der Nachhallzeit in einem leeren Hallraum und der Messung mit dem zu messenden Material im selben Raum. Ähnlich wie bei der Messung im Ligeti-Zentrum, wird ein Dodekaeder-Lautsprecher und ein Pegelmessgerät verwendet, um die Nachhallzeit zu ermitteln.

Die Datenerfassung wurde unter Verwendung eines Handschallpegelmessgerätes gestartet. Nach einer Ruhezeit von 20 s für das Verlassen des Hallraumes, wurde ein Signal an den Dodekaeder-Lautsprecher gesendet, welcher daraufhin ein rosa Rauschen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 10 kHz generierte.

Die Nachhallzeitmessung im Ausgangszustand erfolgte nach einer Anlaufzeit von 5 s, die zur Bildung des Schallfeldes und zum Einpendeln des Schalldruckpegels erforderlich ist. Anschließend wurde die Schallquelle abgeschaltet. Dieses Verfahren wird als das Verfahren des abgeschalteten Rauschens bezeichnet. Das Handschallpegelmessgerät hat die Zeitspanne eines Pegelabfalls um 30 dB gemessen, beginnend mit einem Trigger-Pegel von 80 dB. Dieser Abfall wurde daraufhin vom Messgerät mithilfe von Regressionsgraden auf einen Pegelabfall von 60 dB extrapoliert.

Die Anzahl der gemessenen Abklingvorgänge pro Mikrofonposition zur Mittelwertbildung wurde am Handschallpegelmessgerät auf drei festgelegt. Aufgrund der Verwendung eines Freifeldmikrofons erfolgte eine integrierte Diffusfeldkorrektur. Der beschriebene Messvorgang wurde für jede der 12 Sender-Mikrofon-Kombinationen wiederholt.

Für die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche des leeren Hallraumes wurde die Luftabsorption berücksichtigt, die unter anderem von den meteorologischen Bedingungen zum Messzeitpunkt abhängig ist. Daher wurden auch die vorherrschende Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Hallraum erfasst und protokolliert. Es ist anzumerken, dass während der Messung das Rohr der Lüftung, das sich hinter der Tür am Boden befand, abgedeckt und die Lüftung ausgeschaltet wurde.

Die Bestimmung der Nachhallzeit erfolgt durch die Messung des Pegelabfalls über den Zeitraum des Abklingvorgangs. Das Ergebnis dieser Messung ist der Verlauf der Nachhallzeit über die Frequenz. Die Norm DIN EN ISO 354 mit dem Titel „Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen“ definiert Rahmenbedingungen für einen Messaufbau für die Nachhallzeitmessung.

Um den Absorptionskoeffizienten aus der Nachhallzeit zu ermitteln, ist die Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche A erforderlich. Hierbei wird die äquivalente Absorptionsfläche des leeren Hallraumes $A_{Hallraum}$ von $A_{Absorber}$ subtrahiert. Die resultierende äquivalente Absorptionsfläche wird durch die Oberfläche des Absorbers dividiert, um die Absorptionskoeffizienten des Absorbers zu erhalten.

Die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche erfolgte anhand der in der DIN EN ISO 354 enthaltenen Formel. Diese Formel stellt eine präzisere Variante der Sabinschen Formel dar, die durch die Einbeziehung meteorologischer Bedingungen erweitert wurde. Hierbei fließen der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit sowie die Absorptionseigenschaften der Luft in die Gleichung ein.

$$A = 55,3 \frac{C}{T} - 4Vm \quad (6.1)$$

A : äquivalente Absorptionsfläche des Hallraumes

V : Raumvolumen in m^3

C : Schallgeschwindigkeit in m/s

T : Nachhallzeit in s

m : Luftabsorption Koeffizient nach ISO 9613-1 mit Klimabedingungen während der Messung in $1/Meter$. Der Wert m kann aus der φ Menge, die in ISO 9613-1 spezifiziert wird, nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$m = \frac{\varphi}{10 \log_{10}(e)} \quad (6.2)$$

Der Luftdämpfungskoeffizient wurde gemäß den Vorgaben der Tabelle in DIN EN ISO 9613-1 abgeleitet. Diese Tabelle bietet verschiedene Werte des Luftdämpfungskoeffizient in Abhängigkeit von unterschiedlichen Temperaturen und relativer Luftfeuchtigkeit. Für die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche wurden die spezifizierten Werte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % gemäß den zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden meteorologischen Bedingungen herangezogen.

Im Anhang A der Norm wird ein Leitfaden für einen Prozess bereitgestellt, bei dem der Absorptionsgrad eines Absorbers ermittelt wird.

Für Hallräume mit einem Volumen von weniger als 200 m^3 sollte die von der Probe abgedeckte Fläche zwischen 10 m^2 und 12 m^2 liegen. Dabei ist die Auswahl eines homogenen porösen Absorbermaterials mit einer Dicke von 5 cm bis 10 cm erforderlich. Der Absorptionsgrad des Materials sollte im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4 kHz über 0,9 liegen.

Die Messung der Schallabsorption des Testobjektes erfolgt gemäß folgender Methode:

- Ohne Diffusoren
- 10 m^2 Diffusoren
- 10 m^2 Absorber mit Reflektionsplatten

Außerdem muss beachtet werden, dass das Absorptionsmaterial einen 1 m großen Abstand zur Wand hat, da es sonst zu dem „Eckeneffekt“ kommen kann (Muehleisen, 2007, S. 304). Dieser Effekt beruht darauf, dass Schallwellen in Ecken reflektiert und verstärkt werden können. Durch das Platzieren von Schallabsorbern in diesen Bereichen wird die Reflektion reduziert, was zu einer verbesserten Absorption und insgesamt effizienteren Schallreduktion führt. Der Eckeneffekt ist besonders relevant, da Ecken oft zu den Stellen gehören, an denen sich Schallwellen stärker aufbauen können. Da die Absorber im Ligeti-Zentrum fast ausschließlich an der Wand und nicht in den Ecken angebracht werden, war es in diesem Fall sinnvoll, die Absorber in die Mitte des Raumes zu platzieren und Messungen durchzuführen.

Anforderungen für den Messaufbau:

- Anzahl Sender/Mikrofone: Es ist erforderlich, mindestens 12 voneinander unabhängige Abklingkurven zu erfassen. Daher sollte sich die Gesamtzahl der Messpositionen durch Multiplikation der Mikrofonpositionen mit den Schallquellenpositionen auf mindestens 12 belaufen. Die Mindestanzahl der Mikrofonpositionen sollte drei betragen, während die Mindestanzahl der Schallquellenpositionen zwei sein muss.
- Senderpositionen: Der Schall im Zuschauerraum muss von einer Schallquelle mit kugelförmiger Abstrahlcharakteristik erzeugt werden (Dodekaeder Lautsprecher). Die Schallquellen müssen an verschiedenen Stellen platziert werden, wobei der Abstand zwischen ihnen mindestens 3 m betragen muss.
- Messpositionen: Für die Durchführung der Messungen sind verschiedene Positionen für die Mikrofone erforderlich, wobei ein Mindestabstand von 1,5 m zwischen den Mikrofonen, 2 m von der Schallquelle und 1 m von den Raumbegrenzungen und dem Testobjekt einzuhalten ist.

Basierend auf den Vorgaben der DIN-Norm wurde der in der Abb. 6.1 dargestellte Messaufbau entwickelt. Die S1- und S2-Punkte markieren die beiden Senderpositionen im Grundriss des Hallraumes, während die orangefarbenen Punkte die Positionen 1 bis 6 der Mikrofone



Abbildung 6.1: Messaufbau Absorbermessungen im Hallraum der HAW

repräsentieren. Die Messpunkte sind auf einer Höhe von 1 m angeordnet, während sich die Sender in einer Höhe von 2 m befinden.

6.1 Vorbereitung der Absorbermessungen

An vier Terminen im Hallraum wurden insgesamt 10 Messungen durchgeführt. Aus didaktischen Gründen wird hier ausschließlich auf die vier aussagekräftigsten und entscheidenden Messungen eingegangen.

Bei der ersten Messung wurde aufgrund der noch nicht verfügbaren Basotect-Absorbern mit Testmaterialien experimentiert. In der zweiten Sitzung erfolgte die Messung und Überprüfung der Basotect-Platten, um die Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den Herstellerspezifikationen zu gewährleisten.

In den letzten beiden Sitzungen wurden die Reflektorplatten vermessen. Jeder Messtag startete mit einer erneuten Messung des leeren Hallraumes, begleitet von einer Überprüfung der

Umgebungsbedingungen, einschließlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Es wurde festgestellt, dass die Messungen des leeren Hallraumes bis auf die erste Dezimalstelle konsistent waren. Die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur blieben während der gesamten Untersuchungsperiode unverändert.

- Messung 1 - komplett leerer Hallraum
- Messung 2 - 10 m² Absorber auf dem Boden
- Messung 3 - 10 m² Absorber mit Platte 1
- Messung 4 - 10 m² Absorber mit Platte 2

6.2 Auswertung der Absorbermessungen

Die Auswertung der Messungen zeigt eine Dämpfung im Frequenzbereich von 250 Hz bis 1000 Hz mit abfallenden Werten zwischen 1 kHz und 2 kHz. Im Hochfrequenzbereich konnten wir die Dämpfung ab 2 kHz reduzieren. Die Platte 2 weist eine 0,15 höhere Dämpfung im Mittelfrequenzbereich (400 Hz - 2000 Hz) und minimal höhere Dämpfung im Hochfrequenzbereich im Vergleich zu Platte 1. Diese Unterschiede lassen sich durch die erhöhte Fläche von Basotect, bedingt durch die zusätzlichen Löcher in Platte 2 im Vergleich zur Reflektorplatte, erklären. Die Ergebnisse bestätigen die Erwartung, dass eine erhöhte Anzahl von Löchern zu einer verstärkten Absorption im Mittelfrequenzbereich führt. Insgesamt ist die Differenz der Dämpfung vom Hoch- und Mittelfrequenzbereich bei der Platte 1 geringer.

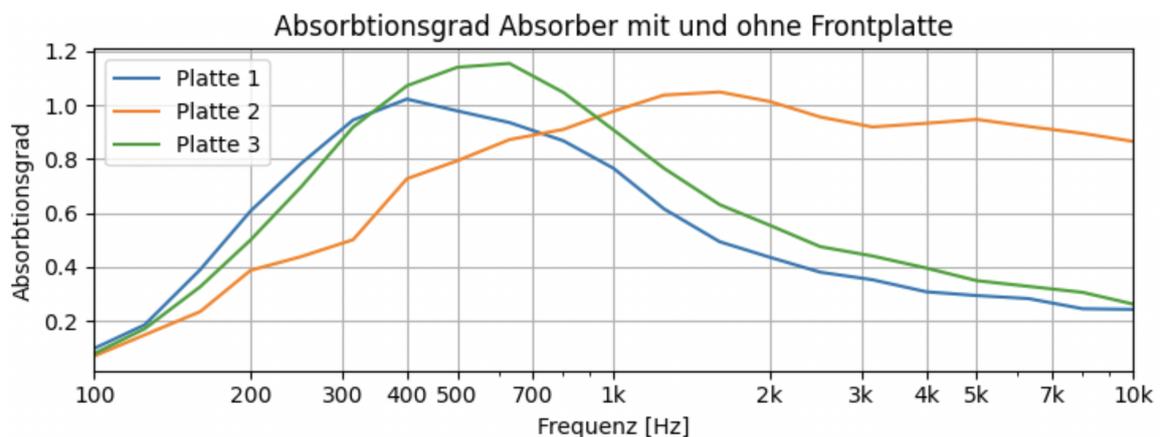


Abbildung 6.2: Absorptionsgrad der gemessenen Absorber mit und ohne Frontplatten in Abhängigkeit zur Frequenz

Die Messungen zeigen, dass Absorptionskoeffizienten über 1 gemessen wurden.

Der Wert 1 entspricht 100 % Absorption und ist in der Regel der Maximalwert. Eine Absorption von über 100 % lässt sich durch die Formel zum Absorptionskoeffizient erklären. (Siehe Gleichung 1.6)

$$\alpha = \frac{A}{S_i} \quad (6.3)$$

α : Absorptionsgrad

A: Äquivalente Absorptionsfläche in m^2

I_{ref} : Fläche Material in m^2

Die Basotect-Platten wurden für den Versuch auf den Boden gelegt und nicht fest verklebt. Aufgrund der Unebenheiten im Hallraumboden und der leichten Neigung der Platten, sich zu wölben, entsteht bei einigen Absorbern ein kleiner Spalt zwischen den Absorbern und dem Boden. Zur Berechnung des Absorptionskoeffizienten wurde nur die sichtbare Fläche einschließlich der Oberfläche und Seitenränder berücksichtigt. Um exakte Ergebnisse zu erhalten, wäre es notwendig, die Absorberplatten auf dem Boden festzukleben und anschließend die Messung durchzuführen. Dies war uns aber leider nicht möglich, da die Testobjekte Schaden genommen hätten. Trotzdem sind die Messergebnisse valide, da sich der Frequenzverlauf lediglich gleichmäßig in der Amplitude ändert, wenn die Fläche des Absorbers zunimmt.

Ein weiterer Grund, warum die Messungen als aussagekräftig einzustufen sind, liegt im direkten Vergleich mit den Basotect-Herstellerangaben, mit denen wir unsere Messungen vergleichen. Der Verlauf der Absorptionskurve ähnelt den Angaben des Herstellers. Allerdings verspricht der Hersteller etwas mehr Dämpfung im tiefen Mittelbereich. (Siehe Abb. 2.1)

In Abb. 6.2 wurde die Absorberfläche um $2 m^2$ erhöht, um den Maximalwert an den Maximalwert des Herstellers anzugleichen. Dies ist daher eine realistischere Bewertung des Absorptionsverhaltens. Interessant ist, dass die Frequenzen im mittleren Bereich bei den Absorbern mit Reflektorplatte deutlich stärker gedämpft werden als bei den Absorbern ohne Reflektorplatte. Dies lässt sich anhand der Aussagen aus Kapitel 2 begründen.

(Eddie Ness)



Abbildung 6.3: Durchführung der Messungen für Absorberplatte 1 im Hallraum der HAW

7 Akustische Computersimulation

Die Computersimulation in EASE bedient sich dem Verfahren des Schallfeldes in einem Raum und bezieht die wellentheoretische Betrachtung unter Einbeziehung aller relevanten Parameter ein. Aufgrund der komplexen Dimensionen und Oberflächen von Räumen in der Realität gestaltet sich die mathematische Beschreibung oft äußerst anspruchsvoll. Die vereinfachten Modellvorstellungen der geometrischen Akustik ermöglichen eine effizientere Berechnung der Schallausbreitung. Hierbei wird die Ausbreitung des Schalls durch Schallstrahlen beschrieben, die sich geradlinig ausbreiten und an den Raumbegrenzungsflächen spiegelnd reflektiert werden. Das Ergebnis dieser Methode ist eine Beschreibung objektiver Schallfeldparameter, die den Grenzen des geometrischen Modells entsprechen. Es ist jedoch zu beachten, dass die geometrische Akustik theoretisch nur für unendlich ausgedehnte Flächen korrekte Ergebnisse liefert, da die Abmessungen der Flächen im Vergleich zur Wellenlänge groß sein müssen. Bei Wellenlängen in der Größenordnung der Fläche oder größer treten Beugungseffekte auf, und nur ein Teil der Schallenergie wird reflektiert.

Da die Wellenlängen im Bereich von einigen Zentimetern bis Metern liegen und somit mit den Abmessungen von Raum- und Flächenstrukturen korrelieren, können durch die geometrische Akustik nicht alle auftretenden Effekte im Raum beschrieben werden. In Computersimulationen werden daher häufig zwei Verfahren für die Ermittlung der Schallstrahlen angewendet: das Spiegelschallquellenverfahren und das Raytracing-Verfahren. Diese Ansätze ermöglichen eine präzisere Modellierung der Schallausbreitung und berücksichtigen dabei verschiedene Einflüsse, um eine realistische Simulation der Raumakustik zu erzielen.

7.1 Spiegelschallquellenverfahren

Die Spiegelschallquellenmethode ist eine fortschrittliche numerische Simulationstechnik im Bereich der Raumakustik. Bei dieser anspruchsvollen Methode wird für jede vorhandene Schallquelle eine Spiegelquelle hinter jeder Oberflächenebene in der akustischen Umgebung erzeugt. Die Bestimmung aller Spiegelquellen reicht bis zur N -ten Ordnung, wobei N die gewählte Ordnung der Reflexionswege bezeichnet.

Die Spiegelquellenmethode ermöglicht die genaue Bestimmung aller denkbaren geometrischen Reflexionswege in einem gegebenen Raum. Es ist jedoch zu beachten, dass der

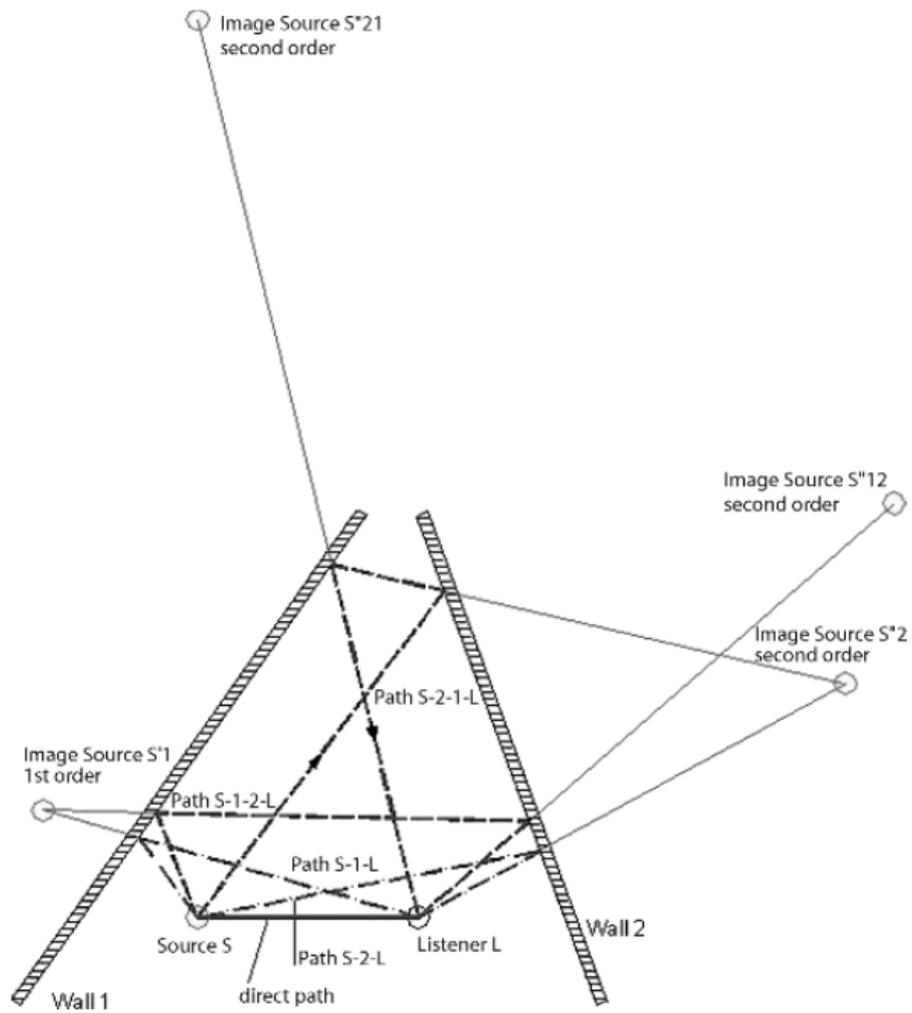


Abbildung 7.1: Das Spiegelschallquellenverfahren (Weinzierl, 2008, S.245)

Rechenaufwand exponentiell mit der Ordnung zunimmt. Dieses exponentielle Wachstum stellt eine erhebliche rechnerische Herausforderung dar, insbesondere wenn die Ordnung der Reflexionspfade zunimmt. Trotz dieses Rechenaufwands wird die Spiegelquellenmethode wegen ihrer außergewöhnlichen Präzision hoch geschätzt und zur Erzeugung detaillierter Impulsantworten eingesetzt, die die Zeitverzögerungen und Pegelverluste aller identifizierten Schallwege im räumlichen Kontext veranschaulichen (Weinzierl, 2008, S. 244f).

7.2 Strahlverfolgung (Raytracing)

Raytracing ist eine rechnerische Technik, die dazu dient, die Ausbreitung von Audiosignalen in einer virtuellen Umgebung zu simulieren. Im Gegensatz zur Spiegelschallquellenmethode werden hier einzelne Schallteilchen verfolgt. Es werden virtuelle Strahlen von einer Schallquelle ausgesendet, und ihre Wechselwirkungen mit allen räumlichen Begrenzungen, einschließlich Reflexionen, Beugungen und Absorptionen, werden simuliert (Weinzierl, 2008, S. 245).

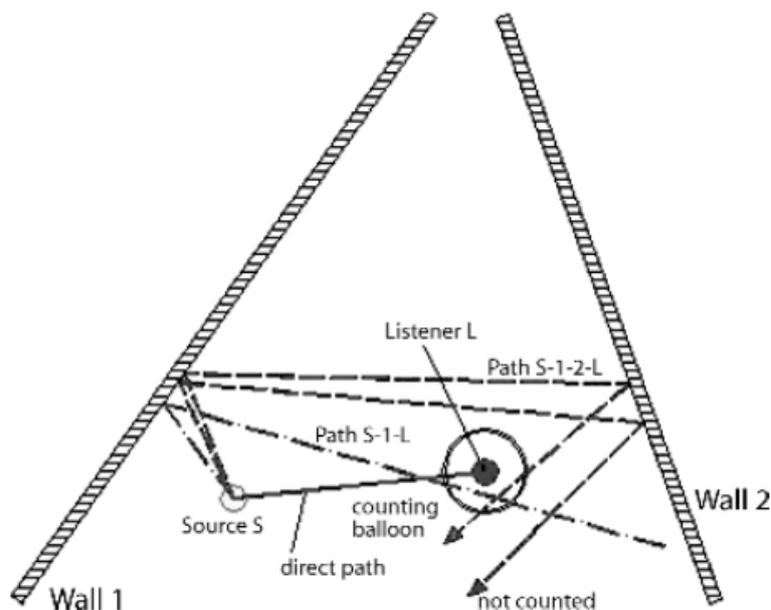


Abbildung 7.2: Das Raytracing Verfahren (Weinzierl, 2008, S.246)

7.3 Simulation mit EASE und verwendete Daten

Die verwendeten Absorptionsdaten für die Materialien in Tab. 7.3 wurden größtenteils der Literatur entnommen. Für die Absorptionsdaten des Daches musste eine Schätzung vorgenommen werden, da es keine genaue Definition der Daten für Wellblechdächer gibt. Außerdem ist anzunehmen, dass über dem Wellblechdach eine Isolation angebracht ist, die sich ebenfalls auf den Absorptionsgrad auswirkt. Oberflächen, deren Absorptionswerte bekannt sind, wie z.B. Beton wurden aus der Literatur übernommen. Für Problemzonen wie das Dach wurden die Absorptionsdaten in der Software so angepasst, dass die Nachhallzeit im Raum der realen Messungen entspricht. Die Absorptionsdaten für den Teppichboden wurden ebenfalls angepasst, da es keine Informationen zu dem Baustoff unterhalb des Teppichs gibt.

Bei der Modellierung des Raumes ist es von großer Bedeutung, dass die großen Hauptflächen korrekt erfasst werden, da sie den meisten Einfluss auf den Raum haben.

Frequenz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorberplatte V.1	0,19	0,78	0,98	0,77	0,44	0,31
Absorberplatte V.2	0,17	0,70	1,00	0,90	0,55	0,40
Basotect G+5	0,17	0,50	0,90	0,90	0,90	0,90
Teppich	0,15	0,18	0,06	0,13	0,20	0,27
Decke	1,00	1,00	0,26	0,22	0,25	0,24
Beton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Vorhänge	0,20	0,20	0,20	0,30	0,35	0,40
Türen	0,30	0,20	0,10	0,10	0,07	0,04
Rigips	0,44	0,32	0,05	0,03	0,07	0,07
Fenster	0,30	0,30	0,05	0,04	0,03	0,02

Tabelle 7.1: Verwendete Absorptionsgrade α der Materialien

7.4 Implementierung des Prototyp-Absorbers in die Simulation und Auswertung der Computersimulation

Nach dem erfolgreichen Transfer der Messdaten des Raumes in die Computersimulation und der Bestimmung des Toleranzbereichs für die Nachhallzeit im Raum, wurden die Basotect-Absorber mit den eigens konstruierten Frontplatten integriert. Da eine homogene Verteilung von Absorptionsflächen im Raum eminent ist, um Orientierungsprobleme zu vermeiden, wurden die Absorber – wie man in Abb. 7.4 und Abb. 7.5 sehen kann – an gegenüberliegenden

Wänden eingeplant. Andernfalls kann es dazu führen, dass Probleme wie ungleichmäßige Schallverteilung und unerwünschte Reflexionen entstehen. Es ist daher nicht zu empfehlen, die gesamte Absorptionsfläche an einer Seite des Raumes zu installieren. Die errechnete Gesamtfläche der Absorber beträgt 38 m^2 . Die Eingangsseite des Production Labs, die ausschließlich aus Beton besteht, bietet sie sich gut an als Hauptabsorberfläche zu dienen. Die Absorber werden zu einem „Schachbrett-Muster“ mit einer Gesamtfläche von 16 m^2 gestaltet. Die restlichen 22 m^2 wurden größtenteils auf der gegenüberliegenden Seite angebracht und teilweise auf der Küchenseite des Raumes.

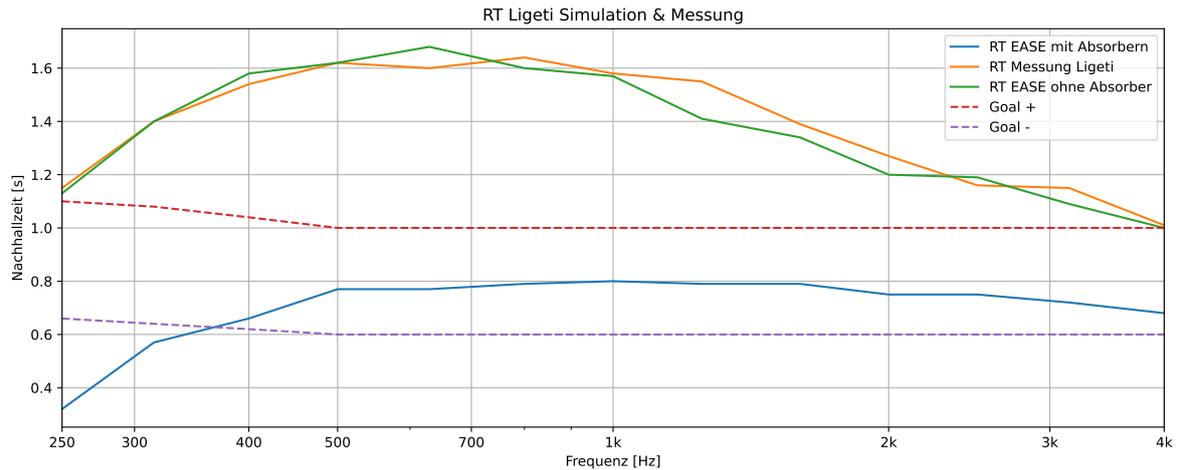


Abbildung 7.3: Vergleich der Nachhallzeit im Raum und der Simulation mit Toleranzschlauch

Der Abb. 7.3 kann man entnehmen, dass durch Anbringung von Frontplatten der bereits genannte Effekt eines Helmholtz-Resonators entsteht und in einer stärkeren Dämpfung im mittelfrequenten Bereich resultiert. Zudem erwarten wir in der geplanten Aufteilung der Absorber einen nahezu linearen Frequenzgang über das Frequenzspektrum von 125 Hz bis 4000 Hz. Die simulierten Werte befinden sich in der Mitte des definierten Toleranzbereichs bei 0,8 s. Aufgrund von Messungenauigkeiten im tieferfrequenten Bereich können wir diese Aussage lediglich für die Frequenzen oberhalb 250 Hz verifizieren, da die entstehenden Wellen mit dem genutzten System nicht bewertet werden können.

(Barbaros Bali)

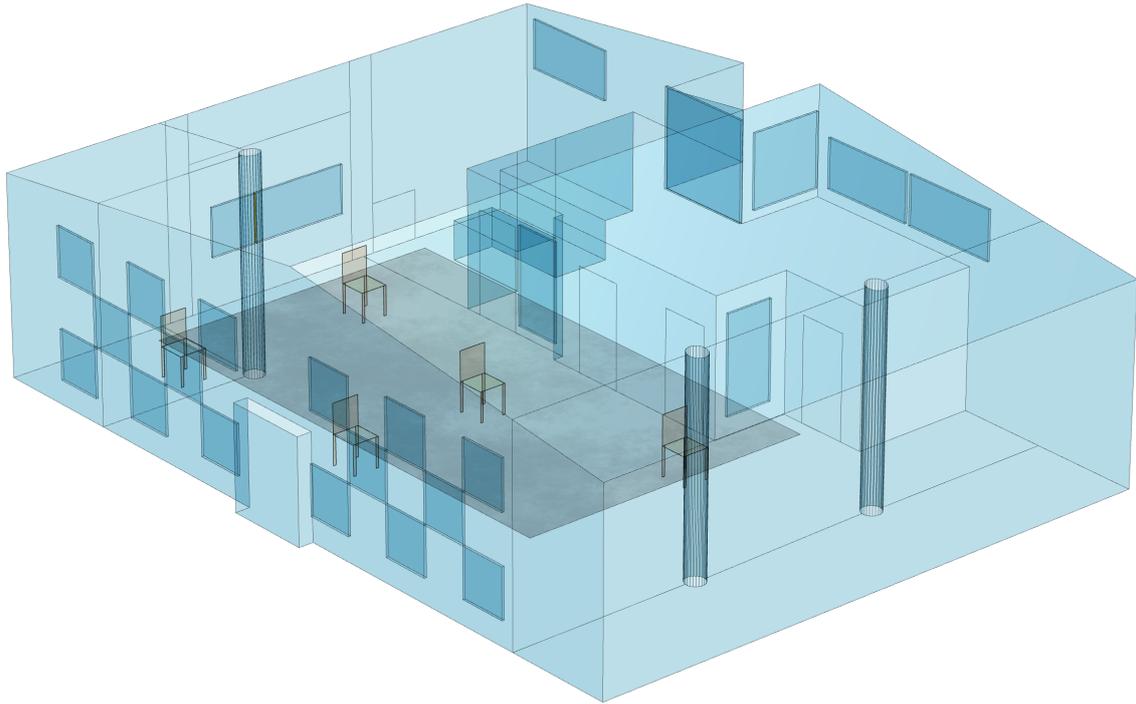


Abbildung 7.4: Screenshot aus der Computersimulation I

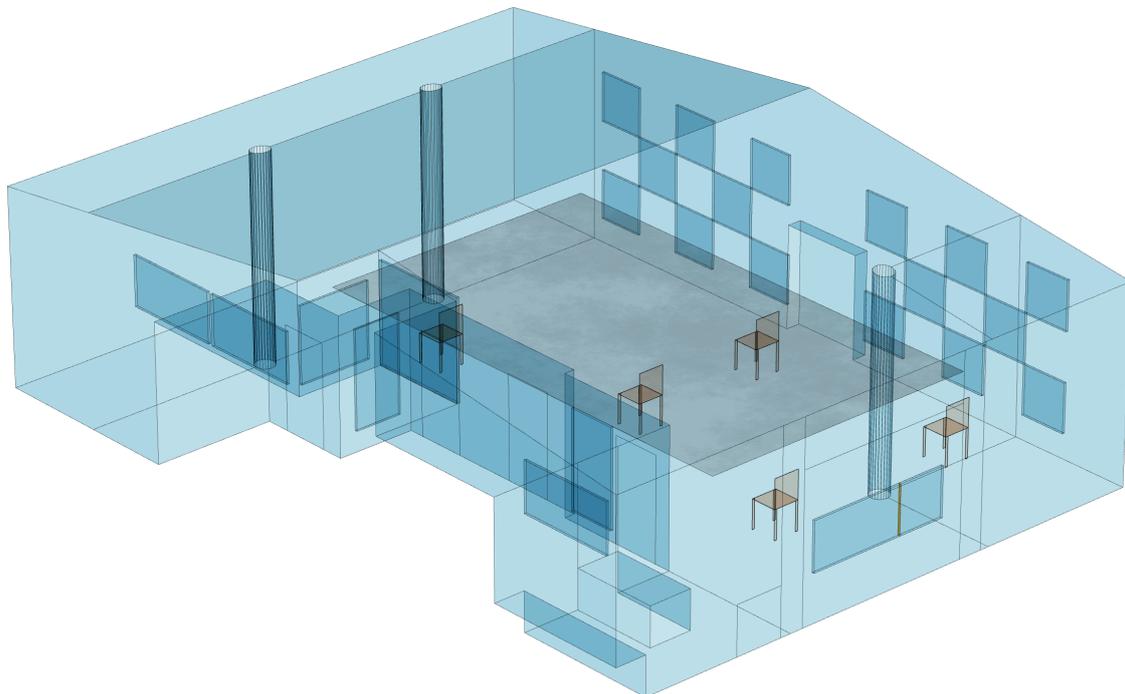


Abbildung 7.5: Screenshot aus der Computersimulation II

8 Fazit

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein umfassendes Konzept zur raumakustischen Optimierung mittels eines eigens konstruierten Absorbers entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Die Prototypen der Absorber wurden im Hallraum der HAW ausgemessen und auf die Ansprüche des Raumes angepasst. Die Effektivität des Absorbers hinsichtlich des Raumes konnte mittels einer Simulation in der Software EASE belegt werden. Insgesamt wurde mit der Software berechnet das mit $\pm 38 \text{ m}^3$ Absorberfläche eine für ein Tonstudio und Konzertsaal geeigneter Nachhallzeitbereich von 0,6 s bis 1,0 s entstehen sollte. Der Toleranzbereich beläuft sich auf \pm , da die Messungen und das Modell von einem leeren Raum ausgehen. In der nächsten Planungsphase wird der Raum mit Technik, Kabeln, Stühlen, Tischen, Traverse und Menschen gefüllt sein, welche sich auf die Nachhallzeit auswirken.

Auf Grundlage unseres Modells wurde die Produktion von 38 Absorbern von der HAW in Auftrag gegeben. Während wir diese Bachelorarbeit fertigstellen, warten wir auf die Lieferung der Materialien um nach Fertigstellung Absorber zu bauen und im Production Lab im Ligeti-Zentrum zu installieren. Nach Abschluss der Installation wird eine weitere Messung durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt sollte das Studio zum größten Teil eingerichtet worden sein. Auf Grundlage der Ergebnisse wird eine Feinjustierung vorgenommen. Zum einen werden die Nachhallzeit und die Energiekriterien überprüft. Diese sollten sich in dem Kapitel 1 genannten Bereich befinden.

Außerdem wird darauf geachtet, ob durch die Veränderung der Raumakustik neue störende Echos, Reflexionen, Überlagerungen und eventuell Resonanzen entstehen, die vorher nicht vorhanden waren. Um das Echo und das Reflexionsverhalten zu ändern, könnte man die Konfiguration der Absorber anpassen und gezielt bestimmte Absorber umhängen, um so die Reflexionen zu brechen. Diese könnten z.B. vom Dach aus kommen, da dort im jetzigen Konzept keine Absorber eingeplant sind. In diesem Fall würde man einen der Absorber in z.B. Segelform im Deckenbereich platzieren. Falls Resonanzen entstehen, würden wir auf Grundlage der Messergebnisse ermitteln, in welchen Frequenzen diese liegen und gegebenenfalls einen Helmholtz-Absorber bauen, der wie in Kapitel 2.3 beschrieben auf eine Resonanzfrequenz abgestimmt ist um diese zu dämpfen. Außerdem wird der tieffrequente Bereich unter 125 Hz überprüft und gegebenenfalls könnten Bassfallen installiert werden. Falls eine kürzere Nachhallzeit für die Anwendung von Spatial Audio gewünscht wird, wäre es möglich, diese durch zusätzliche Basotec-Absorber weiter zu reduzieren. Hierfür könnte beispielsweise

die Fläche auf dem Toilettendach genutzt werden. Zusätzlich ist es möglich, die Fenster mit Molton-Gardinen abzudecken. Die Entscheidung bezüglich der Feinjustierung wird auf Grundlage der Messergebnisse und von Erfahrungswerten aus der Testphase des Studios getroffen.

Literatur

- Cox, T., & d'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.
- Ease. (2003r). EASERA Tutorial 4.
- Fasold, W., Eichler, F., & Winkler, H. (1976). *Bauphysikalische Entwurfslehre. 5. Raumakustik*. Verlag f. Bauwesen.
- Muehleisen, R. T. (2007). Architectural Acoustics by Marshall Long. *Noise Control Engineering Journal*, 55(4), 427–430.
- Weinzierl, S. (2008). *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Science & Business Media.
- YEZOU, F. K. G. K. R. (2009). ACOUSTIQUE DU BATIMENT 4.

Eigenständigkeitserklärung: Barbaros Bali

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

Raumakustische Optimierung des Ligeti-Zentrums

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Da dies eine Gruppenarbeit ist, sind die Teile der Arbeit mit Namen am Ende des Kapitels entsprechend gekennzeichnet.

Hamburg, 10. Februar 2024

Eigenständigkeitserklärung: Eddie Ness

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

Raumakustische Optimierung des Ligeti-Zentrums

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Da dies eine Gruppenarbeit ist, sind die Teile der Arbeit mit Namen am Ende des Kapitels entsprechend gekennzeichnet.

Hamburg, 10. Februar 2024