

---

# **Project Acoustic 2**

---

Herr/Frau  
**Anja Hofmann**  
**Konrad Peschke**  
**Martin Reuter**

**Akustische Optimierung**  
**Landesmusikakademie**  
**Sachsen**

**Mittweida, 2019**

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis .....	II
Diagrammverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis .....	IV
Formelverzeichnis .....	IV
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....	V
1 Einleitung .....	1
2 Theoretische Grundlagen.....	2
2.1 Nachhallzeit und Schallabsorption.....	2
2.2 Anforderungen an die Raumakustik .....	5
3 Messablauf.....	7
3.1 Ausgangssituation .....	7
3.2 DIN 3382-1 und Messplan .....	10
4 Messergebnisse .....	15
4.1 Kammermusiksaal .....	15
4.2 Mehrzweckhalle .....	18
5 Verbesserungsvorschläge.....	24
5.1 Vorstellung verschiedener Absorber.....	24
5.2 Konkrete Vorschläge .....	28
6 Fazit .....	33
Anhang.....	VI
A-1 Messdaten .....	VI
A-2 Ergänzungen zu Absorbern .....	X
A-3 Abschlussbericht für die Landesmusikakademie Sachsen.....	XI
Literaturverzeichnis .....	XXIV
Selbstständigkeitserklärung .....	XXV

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf der Nachhallzeit <i>RT60</i> .....	2
Abbildung 2: Verlauf der <i>EDT</i> im Vergleich zur <i>RT60</i> .....	4
Abbildung 3: Frequenzabhängige Toleranzbereiche .....	6
Abbildung 4: Unterscheidung der Nutzungsarten .....	6
Abbildung 5: Probe im Kammermusiksaal .....	7
Abbildung 6: Kammermusiksaal mit geöffneten Absorberklappen .....	8
Abbildung 7: Holzvertäfelung mit Lochplatten .....	8
Abbildung 8: Spothalle (Sicht abgewandt vom Trennvorhang) .....	8
Abbildung 9: Hallendecke mit Querbalken und Kunstglaskuppel .....	9
Abbildung 10: Bodenmatten für Veranstaltungen .....	9
Abbildung 11: Sende- und Empfangspositionen im Kammermusiksaal .....	12
Abbildung 12: Sende- und Empfangspositionen in der Mehrzweckhalle .....	12
Abbildung 13: Konfrontationsformen bei rechteckigem Raumgrundriss .....	13
Abbildung 14: Messaufbau im Kammermusiksaal, SP1 .....	15
Abbildung 15: Messaufbau in der Mehrzweckhalle, SP1, MP1 & MP2 .....	18
Abbildung 16: Duromer-Absorber – aixFOAM SH001HMH .....	24
Abbildung 17: Verbund-Platten-Resonator – Renz Systeme VPR .....	25
Abbildung 18: Aufblasbare Absorber – Flex Acoustics aQflex .....	25
Abbildung 19: Akustisch wirksamer Teppich – Carpet Concept CAS Isy V 55026 .....	
Abbildung 20: Deckensegel – aixFOAM SH040KONVEX .....	27
Abbildung 21: Verschiedene Aufhängungsvarianten aixFOAM SH001HMH .....	X
Abbildung 22: Abmessungen Renz Systeme VPR .....	X

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Messkurven (Klappen offen/geschlossen) und Toleranzbereich für die Nachhallzeit.....	15
Diagramm 2: Einfluss der Absorption von 100 Personen.....	16
Diagramm 3: Messkurve und Toleranzbereich für die Nachhallzeit bei sinfonischer sowie Mehrzwecknutzung .....	19
Diagramm 4: Streuung der Einzelmessungen der Nachhallzeit um den arithmetischen Mittelwert an SP1 und SP2 .....	20
Diagramm 5: Streuung der Nachhallzeit zwischen SP1 und SP2 .....	21
Diagramm 6: Vorhandene und benötigte äquivalente Absorptionsfläche $A$ .....	21
Diagramm 7: Messkurve der Nachhallzeit mit und ohne ausgelegte Bodenmatten.....	22
Diagramm 8: Einfluss der Absorption von 200 bzw. 300 Personen.....	23
Diagramm 9: Absorptionsgrad aixFOAM SH001HMH.....	24
Diagramm 10: Absorptionsgrad Renz Systeme VPR.....	25
Diagramm 11: Absorptionsgrad Flex Acoustics aQflex .....	25
Diagramm 12: Absorptionsgrad Carpet Concept CAS Isy V 550 .....	26
Diagramm 13: Absorptionsgrad aixFOAM SH040KONVEX.....	27
Diagramm 14: Nachhallzeit – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels und 60m <sup>2</sup> VPR .....	29
Diagramm 15: Äquivalente Absorptionsfläche – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels und 60m <sup>2</sup> VPR .....	29
Diagramm 16: Nachhallzeit – Veränderung mit 200 Personen und 128 aixFOAM Panels .....	30
Diagramm 17: Äquivalente Absorptionsfläche – Veränderung mit 200 Personen und 128 aixFOAM Panels .....	30
Diagramm 18: Nachhallzeit – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels, 40m <sup>2</sup> VPR, mit/ohne 84m <sup>2</sup> aQflex .....	31
Diagramm 19: Äquivalente Absorptionsfläche – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels, 40m <sup>2</sup> VPR, mit/ohne 84m <sup>2</sup> aQflex .....	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Frequenzabhängige Schallabsorption einer männlichen Person im Anzug, sitzend.....	16
Tabelle 2: Vergleich eigener Messdaten mit Ergebnissen des ABD .....	17
Tabelle 3: Standardabweichung $\sigma(T20)$ in den einzelnen Terzbändern .....	19
Tabelle 4: Noch hinzuzufügende äquivalente Absorptionsfläche $A$ .....	22

## Formelverzeichnis

I Nachhallzeitformel nach Sabine.....	3
II Nachhallzeitformel nach Eyring.....	3
III Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur .....	3
IV äquivalente Absorptionsfläche .....	3
V mittlerer Absorptionsgrad.....	3
VI optimale Nachhallzeit für Räume der Gruppe A1 nach DIN 18041 .....	5
VII Umrechnung von Terz- in Oktavbänder.....	16
VIII Mindestwert für das Produkt von Bandbreite und Nachhallzeit.....	19
IX Standardabweichung der Nachhallzeit nach DIN EN ISO 3382-1 .....	19
X Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche nach Sabine .....	21

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$b$	Breite
$c$	Schallgeschwindigkeit
$f_m$	Mittenfrequenz
$h$	Höhe
$l$	Länge
$n$	Anzahl
$A$	äquivalente Absorptionsfläche
$A_{ges}$	gesamte äquivalente Absorptionsfläche eines Raumes
ABD	Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH
C80	Klarheitsmaß für Musik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDT	Early Decay Time
EN	Europäische Norm
EZW	Einzahlwert
MP	Mess- bzw. Empfangsposition
$N$	Anzahl
ISO	International Organization for Standardization
RT60	Nachhallzeit, Bestimmung über 60dB Abfall
$S_{ges}$	Gesamtoberfläche eines Raumes
$S_i$	Teilfläche
SP	Sendeposition
$T$	Nachhallzeit
$T_{okt}$	Nachhallzeit in einem Oktavband
$T_{terz}$	Nachhallzeit in einem Terzband
T20	Nachhallzeit, Bestimmung über 20dB Abfall
T30	Nachhallzeit, Bestimmung über 30dB Abfall
$V$	Raumvolumen
VPR	Verbund-Platten-Resonator
$\alpha$	Absorptionsgrad
$\alpha_i$	Absorptionsgrad einer Teilfläche
$\alpha_m$	mittlerer Absorptionsgrad
$\theta$	Temperatur
$\sigma$	Standardabweichung

# 1 Einleitung

Für das optimale Klangerlebnis eines Konzertes müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Dabei ist die raumakustische Qualität des Aufführungsortes nicht weniger wichtig als das musikalische Können der Musiker.

Die Landesmusikakademie Sachsen, welche sich im Schloss Colditz befindet, hat regelmäßig exzellente Musiker zu Gast. Jedoch steht für große Ensembles mit Schlagwerk keine geeignete Räumlichkeit für Proben und Aufführungen zur Verfügung. Deshalb wird die Mehrzweckhalle in Colditz, welche vor allem der Sophienschule als Turnhalle dient, immer dann genutzt, wenn der hauseigene Kammermusiksaal nicht ausreicht.

Während der Kammermusiksaal bereits 2009 durch die Ingenieurgesellschaft Akustik Bureau Dresden akustisch optimiert wurde, ist die Mehrzweckhalle in Colditz noch nicht raumakustisch verbessert worden.

Die Aufgabe dieses Projekts bestand darin, Nachhallzeitmessungen sowohl im Kammermusiksaal als auch in der Mehrzweckhalle durchzuführen.

Anschließend sollten die im Abschlussbericht des Akustik Bureau Dresdens genannten Nachhallzeitwerte für den Kammermusiksaal validiert und raumakustische Verbesserungsmaßnahmen für die Halle erarbeitet werden.

Dieser Bericht beschreibt die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung beider Messungen nach DIN EN ISO 3382-1. Am Ende werden drei verschiedene Vorschläge zur Verbesserung der Raumakustik der Mehrzweckhalle vorgestellt und nach ihrem Preis-Leistungs-Verhältnis bewertet.

Innerhalb des Berichts wurden die Abschnitte 2 bis 3.1 von K. Peschke, die Abschnitte 3.2 und 4 von A. Hofmann und der Abschnitt 5 von M. Reuter formuliert.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Nachhallzeit und Schallabsorption

Als Nachhallzeit wird das Zeitintervall bezeichnet, welches bei abruptem Verstummen eines Geräusches benötigt wird, bis der Schalldruckpegel des Geräusches um 60 dB bei Messung der  $RT60$  gegenüber des Anfangswertes gesunken ist. Die Nachhallzeit ist proportional zum Raumvolumen des untersuchten Raumes und umgekehrt proportional zur äquivalenten Absorptionsfläche des Raumes.

Die Messung der Nachhallzeit kann mit Einsatz verschiedenster Schallquellen erfolgen. Häufig verwendet werden Sinus Sweeps oder ein abgeschaltetes weißes oder rosa Rauschen, aber auch platzende Luftballons, Schreckschusspistolen, Starterklappen und Sprengkörper sind verwendbar.

Wichtig ist ein möglichst hoher Schalldruck der erregenden Schallquelle und eine Anregung aller relevanten Frequenzen. Außerdem muss der Schalldruck der eingesetzten Schallquelle zur Messung der Nachhallzeit 60dB stärker sein als der herrschende Grundgeräuschpegel. Da dies mitunter nicht möglich ist, gibt es Näherungsverfahren bei denen der Schalldruck der erregenden Schallquelle den Grundgeräuschpegel nur um 30 dB, zuzüglich früher Abklingphase und Sicherheitsabstand zum Grundrauschen, übersteigen muss ( $T30$ ). Falls dies auch nicht möglich ist, gibt es noch die Möglichkeit einen nur 20 dB höheren Schalldruckpegel zu verwenden ( $T20$ ). Hier gilt es ebenfalls die frühe Abklingphase und den Sicherheitsabstand zum Grundrauschen zu berücksichtigen.

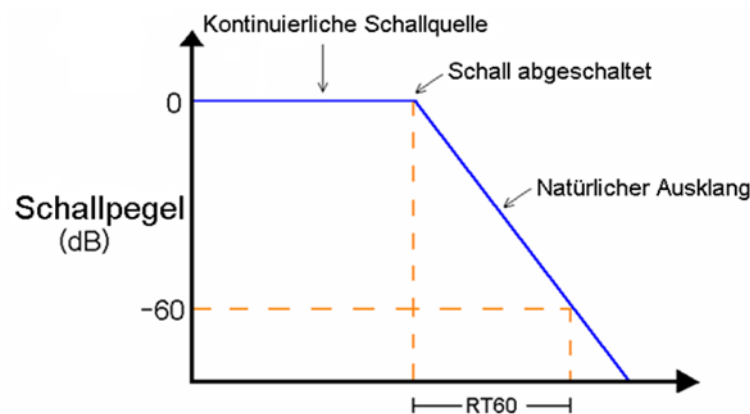


Abbildung 1: Verlauf der Nachhallzeit  $RT60$ <sup>1</sup>

Die Berechnung der Nachhallzeit kann mit drei verschiedenen Formeln erfolgen. Auf nur zwei davon wird an dieser Stelle näher eingegangen.

Meist wird die Nachhallzeit mit Hilfe der Formel von Sabine bestimmt. Diese Formel ist eine angepasste Form der Nachhallzeitformel nach Eyring und ist speziell für mittlere Schallabsorptionsgrade bis  $\alpha_m \leq 0,3$  ausgelegt.

<sup>1</sup> <http://www.sengpielaudio.com/RT60-02.gif> (22.02.19)



Der mittlere Schallabsorptionsgrad  $\alpha_m$  wird gebildet, indem man die äquivalente Absorptionsfläche  $A_{ges}$  durch die Gesamtfläche  $S_{ges}$  des Raumes dividiert (Formel V).

$$\text{Sabine:}^2 \quad T = 0,163 \frac{s}{m} \cdot \frac{V}{A} \quad \text{I}$$

$$\text{Eyring:}^3 \quad T = -0,163 \frac{s}{m} \cdot \frac{V}{S_{ges} \cdot \ln(1-\alpha_m)} \quad \text{II}$$

Bei beiden Formeln gilt es die Temperaturabhängigkeit zu beachten, weil sich veränderte Temperaturen  $\vartheta$  auf die Schallgeschwindigkeit  $c$  und somit auch auf die Nachhallzeit auswirken (Formel III).

Außerdem muss eine ausreichende Diffusität in den untersuchten Räumen vorherrschen und das Verhältnis der Raumabmessungen darf maximal 1:3 betragen. Das bedeutet die Länge  $l$  des Raumes darf maximal das dreifache der Breite  $b$  ergeben.

$$\text{Schallgeschwindigkeitsänderung:}^4 \quad c = 331,5 \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15}} \quad \text{III}$$

Ein wichtiger Parameter für die Nachhallzeit ist die äquivalente Absorptionsfläche  $A$  des untersuchten Raumes. Diese ergibt sich aus den jeweiligen Flächen  $S_i$  des Raumes und den dazugehörigen Absorptionsgraden  $\alpha_i$ . Sie gibt an wie viel Quadratmeter des Raumes einen Absorptionsgrad von  $\alpha = 1$  aufweisen würden, wenn der Rest des Raumes einen Absorptionsgrad von  $\alpha = 0$  besitzt, aber man trotzdem den aktuellen Gesamtabsorptionsgrad des Raumes erhalten will. Der Absorptionsgrad  $\alpha$  gibt an wie viel Schall von einem untersuchten Material reflektiert und wie viel absorbiert wird.

$$A = \sum \alpha_i \cdot S_i \quad \text{IV}$$

$$\alpha_m = \frac{A_{ges}}{S_{ges}} = \frac{1}{S_{ges}} \cdot \sum \alpha_i \cdot S_i \quad \text{V}$$

Wenn der Absorptionsgrad den Wert 1 annimmt, wird kein Schall reflektiert, also der gesamte Schall vom Material absorbiert.

Die Absorption eines Materials erfolgt unterschiedlich stark je nachdem mit welcher Frequenz angeregt wird, somit ist auch der Absorptionsgrad frequenzabhängig.

Der Absorptionsgrad lässt sich auf verschiedenste Arten ermitteln. Beispielsweise mit einer Messung im Hallraum und einem Vergleich zwischen der Nachhallzeit mit und ohne der zu untersuchenden Probe.

<sup>2</sup> Skript „Architectural Acoustics“ S.18

<sup>3</sup> Skript „Architectural Acoustics“ S.18

<sup>4</sup> <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm> (25.02.19)

<sup>5</sup> Formelsammlung „Grundlagen der Akustik“ S.20

<sup>6</sup> Formelsammlung „Grundlagen der Akustik“ S.20

Auch kann die Probe in einem Kundt'schen Rohr untersucht werden, indem vor der Probe der Schalldruck mit zwei Mikrofonen gemessen wird. Der einfallende und der absorbierte Schall geben Aufschluss über das Absorptionsvermögen der Probe.

Ein weiterer Parameter der Nachhallzeit ist die Early Decay Time, kurz *EDT*, welche Informationen über die empfundene Nachhallzeit liefert.

Dabei wird der Abfall der ersten 10 dB betrachtet und dann auf ein Abklingen über 60 dB extrapoliert. Die so ermittelten Werte sind oft aufschlussreicher über das tatsächliche Empfinden der Nachhallzeit als die klassische *RT60*.

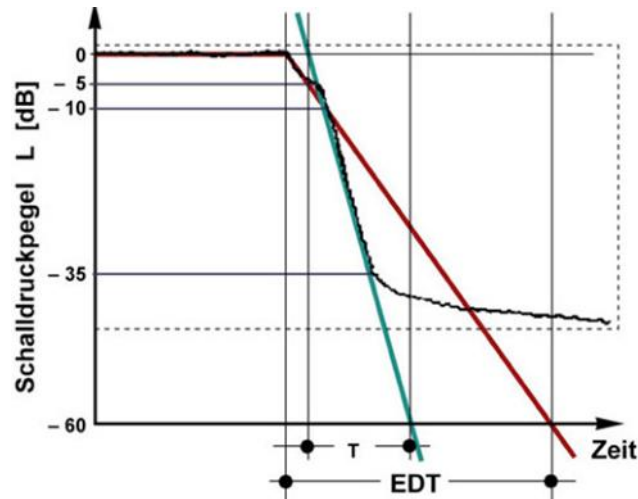


Abbildung 2: Verlauf der *EDT* im Vergleich zur *RT60*<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Quelle: <https://www.baunetzwissen.de/akustik/fachwissen/grundlagen/messung-der-nachhallzeit-und-der-anfangsnachhallzeit-edt-147635/gallery-1/1> (23.02.19)

## 2.2 Anforderungen an die Raumakustik

Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen an die Raumakustik (insbesondere die der Mehrzweckhalle) entstammen der DIN 18041 und beziehen sich auf die Verwendungsgruppe A1. Diese wurde gewählt, da die geplante Verwendung der Mehrzweckhalle am ehesten in diese Gruppe einzuordnen ist.

Die Räume dieser Gruppe sind zum aktiven Musizieren und für gesangliche Darbietungen gedacht. Ziel der Nutzungsart A1 ist es eine gute Hörsamkeit für unverstärkte Musik zu erreichen.

Als Basis einer guten Raumakustik wird für die Gruppe ein optimales Zusammenwirken der Raumgeometrie, Raumgröße, Raumausstattung und des Gesamtstörerschallpegels angegeben. Um diesen so gering wie möglich zu gestalten, müssen die baulichen Gegebenheiten der Trennelemente zu angrenzenden Räumen und möglichen Schallquellen eine ausreichende Schalldämmung aufweisen.

Laut DIN 18041 ist die optimale Nachhallzeit für Räume der Gruppe A1 mit der folgenden Formel zu berechnen.

$$T_{\text{soll,A1}} = \left(0,45 \lg \frac{V}{\text{m}^3} + 0,07\right) \text{s} \quad 30 \text{ m}^3 \leq V \leq 1000 \text{ m}^3 \quad ^8 \quad \text{VI}$$

Die Sollwerte der Nachhallzeit werden gerundet mit zwei Nachkommastellen angegeben. Es gilt zu beachten, dass die Nachhallzeit frequenzabhängig betrachtet werden muss und ein Toleranzbereich mit Abweichungen, welche noch eine optimale Nachhallzeit darstellen, verwendet wird.

Das angegebene Raumvolumen von  $30 \text{ m}^3$  bis  $1000 \text{ m}^3$  für Räume dieser Gruppe wird von der Mehrzweckhalle mit circa  $5900 \text{ m}^3$  deutlich überschritten.

Da das angegebene Raumvolumen der Formel nicht eingehalten wird und sich diese Berechnungsvorschrift auf kleinere Proberäume bezieht, die Mehrzweckhalle sowie auch der Kammermusiksaal aber als Aufführungsräume genutzt werden sollen, wurden Überlegungen zu einer alternativen Ermittlungsform des Toleranzbereiches angestellt.

Eine bessere Bestimmungsmethodik bietet für diesen Fall das Buch *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis* von W. Fasold und E. Veres.

Darin ist die optimale Nachhallzeit nochmal für die jeweiligen Verwendungszwecke aufgeschlüsselt (siehe Abbildung 4). Außerdem liegt das Volumen der Mehrzweckhalle im betrachteten Bereich. Ein weiterer Vorteil ist die Unterscheidung bei den Toleranzbereichen zwischen Musik und Sprache (siehe Abbildung 3), denn diese erfolgt in der DIN 18041 nicht.

---

<sup>8</sup> [DIN 18041, 2016] S.12

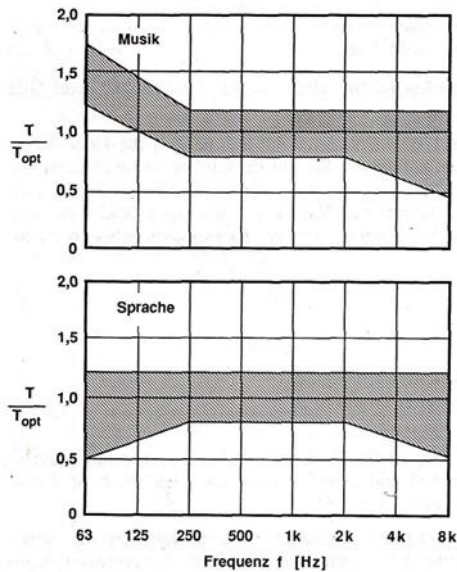


Abbildung 3: Frequenzabhängige Toleranzbereiche<sup>9</sup>

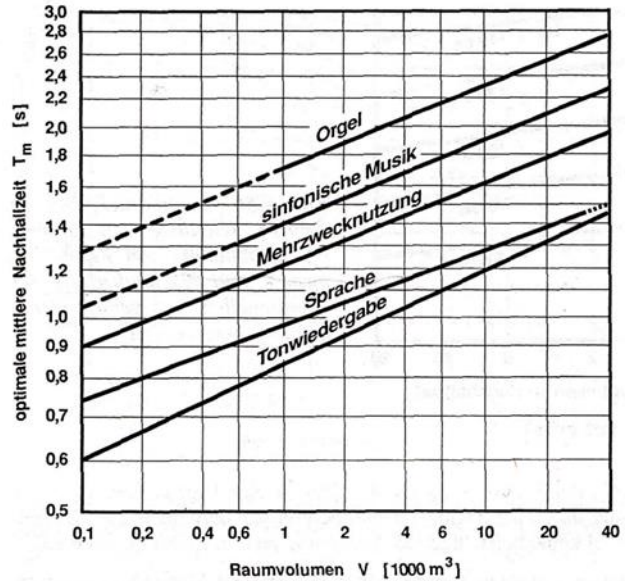


Abbildung 4: Unterscheidung der Nutzungsarten<sup>10</sup>

Abweichungen der Nachhallzeit durch Möblierung und Personen, welche möglicherweise das Messergebnis oder den folgenden Istzustand verfälschen, werden durch den Toleranzbereich berücksichtigt. Wenn Angaben zur Besetzung und Möblierung der betrachteten Räume vorliegen, müssen diese in die Untersuchungen einbezogen werden.

Eine weitere raumakustische Zielstellung, welche nicht in der DIN 18041 verankert ist, ist die Möglichkeit einer variablen Raumakustik. Diese dient zur Optimierung der Nachhallzeit bei schwankenden Besetzungszahlen und zur Anpassung der Raumakustik für die aufführenden Musiker. Zusätzlich gilt es die Schalleitungswege zu beachten und diese nicht mit Absorbermaterialien zu unterbrechen und somit unwirksam zu machen. Das Erreichen eines möglichst linearen Frequenzverlaufes, um keine Frequenz über- bzw. unter zu repräsentieren und somit den natürlichen Klang der Instrumente zu verfälschen, ist ebenfalls erstrebenswert.

<sup>9</sup> [Fasold, 1998] S.139

<sup>10</sup> [Fasold, 1998] S.139

## 3 Messablauf

### 3.1 Ausgangssituation

#### Kammermusiksaal

Als Vorlage für die Verbesserung der Mehrzweckhalle diente der Kammermusiksaal der Landesmusikakademie Sachsen in Colditz, welcher durch das Akustik Bureau Dresden 2009 optimiert wurde. Die Landesmusikakademie befindet sich im Gebäude des Schlosses Colditz. Um diesen als Optimalzustand zu validieren, wurden Vergleichsmessungen durchgeführt. Alle Messungen erfolgten am Mittwoch, den 12. Dezember 2018.



Abbildung 5: Probe im Kammermusiksaal<sup>11</sup>

Der Kammermusiksaal besitzt ein Volumen von  $V \approx 718,2 \text{ m}^3$  und eine Deckenhöhe von  $h \approx 5,7 \text{ m}$ . Er ist ca. 10 m breit und 12,6 m lang.

Der Fußboden besteht aus Parkett. Die Decke ist mit abgehängenen Absorbern verdeckt. Die Wände bestehen aus verputztem Stein und beinhalten Fensternischen.

An der Stirnseite befinden sich zwei Reihen mit variablen Klappen direkt über dem Eingang. An der linken Wand befinden sich drei Streifen mit Klappen. Hinter diesen Klappen befinden sich Absorber welche durch das Öffnen und Schließen der Klappen beliebig wirksam eingestellt werden können (siehe Abbildung 6). An den Querseiten befinden sich Holzvertäfelungen mit Lochplatten (siehe Abbildung 7).

In einer Höhe von ca. 2,6 m beginnt an der rechten Seite eine Empore und setzt sich an der rechten Seite und an einer Querseite fort. Sie ist ca. 1,4 m breit und besitzt ein verglastes Geländer.

---

<sup>11</sup> [http://www.lma-sachsen.de/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_LMA\\_Portrait\\_06\\_cad47d91db.jpg](http://www.lma-sachsen.de/fileadmin/_processed_/csm_LMA_Portrait_06_cad47d91db.jpg) (24.02.19)

Rechts neben dem Eingang befand sich ein Flügel und zwischen den Streifen standen verpackte Kesselpauken (ebenfalls in Abbildung 6 zu erkennen). Fenster und Türen waren während der Messungen geschlossen.



Abbildung 6: Kammermusiksaal mit geöffneten Absorberklappen



Abbildung 7: Holzvertäfelung mit Lochplatten

### Mehrzweckhalle

Bei der zu untersuchenden Mehrzweckhalle handelt es sich um die Sporthalle der Sophienschule in Colditz, welche auch für diverse andere Veranstaltungen genutzt wird und nun akustisch optimiert werden soll.



Abbildung 8: Sporthalle (Sicht abgewandt vom Trennvorhang)

Mit einem Raumvolumen von  $V \approx 5900 \text{ m}^3$  ist die Sporthalle mehr als acht mal größer als der Kammermusiksaal.

Sie besteht aus Betonwänden, welche bis zu einer Höhe von 2,5 m mit einem Gummi-Filz-Belag beklebt sind. Darüber wurden die Wände mit Strukturputz verkleidet. Eine Wand besteht aus einem glatten Trennvorhang aus Gummi.

Die Decke der Sporthalle ist angeschrägt und besitzt eine Kuppel aus Kunstglas im Zentrum (siehe Abbildung 9) Ringsherum ist die Decke mit gelochten Aluminiumschalen ausgekleidet. Außerdem führen Querbalken aus Holz unterhalb der Aluminiumschalen zur gegenüberliegenden Wand.



Abbildung 9: Hallendecke mit Querbalken und Kunstglaskuppel

Der Fußboden besteht aus Hallenparkett. Es sind circa 190 Bodenmatten vorhanden, welche bei Veranstaltungen ausgelegt werden. Diese besitzen eine Größe von 2 x 1 m und bestehen aus einer mit Filz beklebten Gummimatte (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Bodenmatten für Veranstaltungen

Die Nachhallzeit der Sporthalle war vom ersten Eindruck her für musikalische Aufführungen deutlich zu hoch.

Während der Messung wurden nur 2/3 der Halle verwendet, da auch bei Veranstaltungen ein Drittel der Sporthalle durch den Trennvorhang abgetrennt wird. Die Geräteräume dieses Hallenabschnittes waren während der Messung geöffnet, da sie das während Konzerten auch sind, um dort Buffets aufzustellen.

Der Grundgeräuschpegel war durch die Nähe zur Straße und die geringe Schallisolierung der Halle deutlich höher als bei der Messung im Kammermusiksaal.

### 3.2 DIN 3382-1 und Messplan

Die Norm DIN EN ISO 3382 befasst sich mit der akustischen Messung von Parametern der Raumakustik. Der Teil 1 ist dabei auf Aufführungsräume spezialisiert, weshalb er zur Planung der Messung in der Landesmusikakademie Sachsen verwendet wurde.

Konkret werden in der Norm zwei unterschiedliche Verfahren zur Nachhallzeitbestimmung vorgestellt. Beim ersten Verfahren wird die Nachhallzeit über die direkte Aufnahme einer Abklingkurve nach abgeschaltetem Rauschen bestimmt. Das zweite Verfahren beschreibt die Ermittlung der Nachhallzeit über die Schrödderrückwärtsintegration der Impulsantwort eines Raumes.

Im Rahmen dieses Projektes wurde die zuerst genannte Variante ausgewählt, da diese am praktikabelsten war.

Die Norm stellt klare Forderungen an den Messaufbau und die Durchführung, welche bei der Planung, Durchführung und Auswertung der Messung in Colditz Beachtung fanden. Einige dieser Forderungen und ihre Umsetzung vor Ort werden im Folgenden näher beschrieben.<sup>12</sup>

Zum besseren Verständnis werden Angaben, die sich auf die Messung im Kammermusiksaal der Musikakademie beziehen, mit einer (1) und Angaben, die sich auf die Messung in der Mehrzweckhalle der Sophienschule beziehen, mit einer (2) gekennzeichnet.

Als mögliche Besetzungszustände werden in der Norm der unbesetzte, der besetzte sowie der Studiozustand vorgegeben. Bei beiden Messungen waren keine Personen außer den Gruppenmitgliedern, die sie durchführten, im Raum. Deshalb kann der unbesetzte Zustand am ehesten als eingehalten angesehen werden. Es existierten jedoch jeweils Abweichungen von der Beschreibung in der Norm. In beiden Fällen war keine Bestuhlung vorhanden und bis auf den Flügel in (1) und die geöffneten Gerätrräume in (2) konnte der zur Nutzung vorbereitete Zustand der Räume nicht nachgestellt werden.

Temperatur und relative Luftfeuchte wurden mit ausreichender Genauigkeit von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  bzw.  $\pm 4\%$  in beiden Räumen bestimmt. Ebenso wurden die Raummaße mit Hilfe eines Lasermessgerätes auf eine Kommastelle genau in m dokumentiert.

Als möglichst ungerichtete Quelle kam der bereits in zahlreichen Praktikumsmessungen der Hochschule Mittweida erprobte Dodekaeder gemeinsam mit einem Verstärker zum Einsatz.

Dieser Verstärker gewährleistete einen ausreichend großen Rauschabstand. Bei der  $T_{20}$ -Bestimmung beträgt dieser mindestens 35 dB. Die variierbare Verstärkung musste in der Mehrzweckhalle (2) deutlich höher eingestellt werden, da dort das Grundgeräusch deutlich höher als im Kammermusiksaal war. Während aller Messungen in einem der beiden Räume blieb sie jedoch

---

<sup>12</sup> Vgl. [DIN EN ISO 3382-1, 2009]



stets unverändert. Aufgrund der so zustande kommenden hohen Pegel war es notwendig während aller Messungen Gehörschutz zu tragen.

Mit der Nutzung der NTi Audio XL2 als Messgeräte wurden sämtliche Anforderungen an diese erfüllt. Das bedeutet, die eingebauten Mikrofone sind ungerichtet und ihre Membrandurchmesser klein genug, um das auszumessende Schallfeld nicht zu stören.

Aufnahmen mit den Messgeräten sollten von Signalen mit einer Mindestdauer von 5s zuzüglich der jeweils zu erwartenden Nachhallzeit getätigt werden. Die Wahl fiel hier auf Rauschlängen von (1)  $t_1 = 8\text{ s}$  und (2)  $t_2 = 9\text{ s}$ . Letzteres entsprach bereits dem Maximum des verwendeten Rauschgenerators. Die Aufnahme wurde jeweils erst beendet, wenn ausreichend Zeit vergangen und alle Nachhallzeiten der einzelnen Frequenzbänder ermittelt waren.

Die DIN EN ISO 3382-1 enthält ebenfalls Anforderungen an die Anzahl und Verteilung von Sende- und Empfangspositionen im Raum.

Sendepositionen sollten für die Raumnutzung üblich angeordnet sein. Die Mindestanzahl beträgt  $n = 2$  und zur Vermeidung tieffrequenter Änderungen im Abstrahlverhalten beträgt die vorgeschriebene Höhe  $h = 1,5\text{ m}$ . Bei beiden Messsituationen kamen zwei Sendepositionen mit einer durch ein Stativ garantierten Sendehöhe von  $h = 1,5\text{ m}$  zum Einsatz.

Parallel dazu erfolgt die Mikrofonanordnung repräsentativ für vorkommende Zuhörerpositionen. Mikrofone haben einen Mindestabstand von ca. einer halben Wellenlänge ( $\approx 2\text{ m}$ ) untereinander und von ca. einer Viertelwellenlänge zu schallreflektierenden Oberflächen aller Art ( $\approx 1\text{ m}$ ) einzuhalten. Auch dürfen sie nicht zu nah an den Sendepositionen liegen, um den Einfluss des Direktschalls zu minimieren. Im vorliegenden Fall der musikalischen Darbietung ist die Höhe der Mikrofone auf die Ohrhöhe eines durchschnittlichen Zuhörers, also auf  $h = 1,2\text{ m}$  festgelegt. Diese Höhe wurde bei beiden Messungen durch Mikrofonstative garantiert.

Die Entnahme einer nötigen Mindestanzahl an Messpunkten gestaltet sich als problematisch, da im Anhang der Norm die kleinste Zuschauerzahl, die eine Messpunktanzahl zugeteilt wird, 500 Personen beträgt ( $n = 5$ ), was über den zu erwartenden Publikumszahlen der Musikakademie liegt. Da im Fall (1) nur vergleichende Messungen zu bereits vorhandenen Ergebnissen durchgeführt werden sollten und der Kammermusiksaal relativ klein ist, wurde dort an lediglich zwei Punkten gemessen, während in der Mehrzweckhalle (2) diese Anzahl auf vier angehoben wurde. Es standen nur zwei Messgeräte zur Messung zur Verfügung. Darum war es notwendig pro Sendeplatz jeweils zwei Teilmessungen mit je zwei aktiven Messpunkten durchzuführen.

Die folgenden Darstellungen (Abbildung 11 und Abbildung 12) zeigen die zum Einsatz gekommenen Sende- und Empfangspositionen.

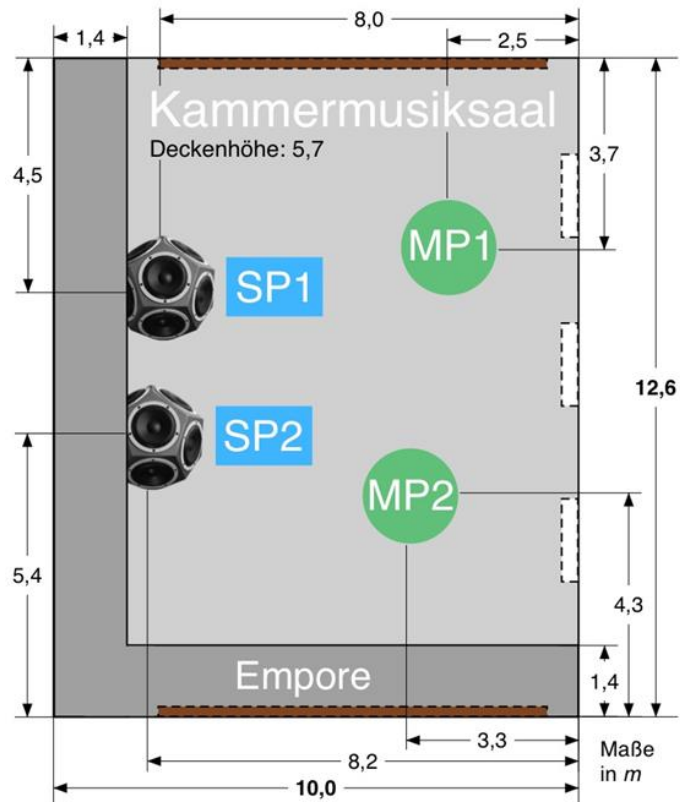


Abbildung 11: Sende- und Empfangspositionen im Kammermusiksaal

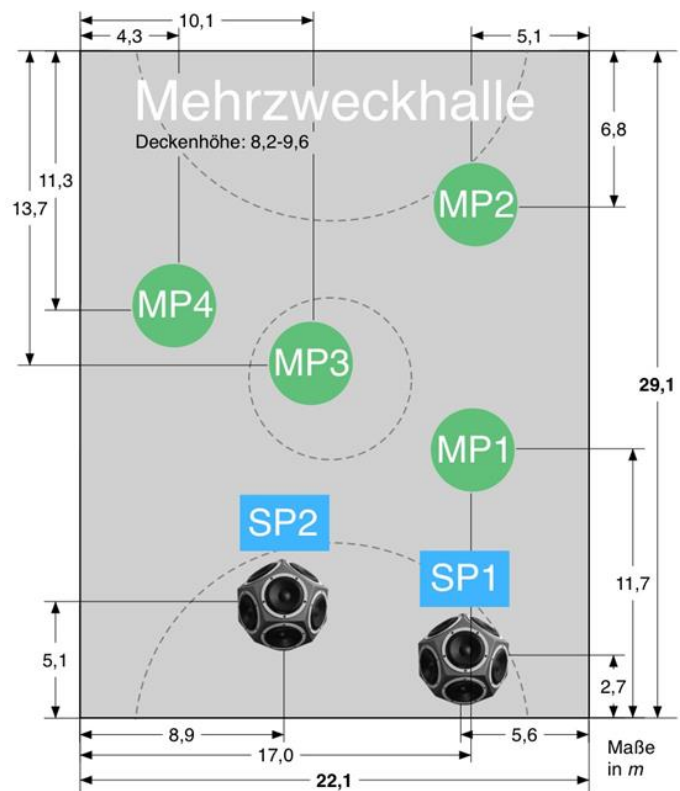


Abbildung 12: Sende- und Empfangspositionen in der Mehrzweckhalle

Aufgrund von fehlenden Kenntnissen über das Aussehen und die Durchführung von Konzerten in der Mehrzweckhalle kam im Vorfeld die Frage auf, wie die Sendepositionen ausgerichtet sein sollten. Als Alternativen boten sich die Varianten B1 und B2 aus Abbildung 13 an.

B3 findet eher bei aufwendigeren Konzertsälen Anwendung, da dort eine günstige Sekundärstruktur gute Hörbedingungen für die Zuschauer hinter und neben dem Orchester garantieren muss.

Zugunsten der Raumakustik fiel die Entscheidung auf den Fall B1, was auch vom Hallenwart als bevorzugte Ausrichtung bestätigt wurde.

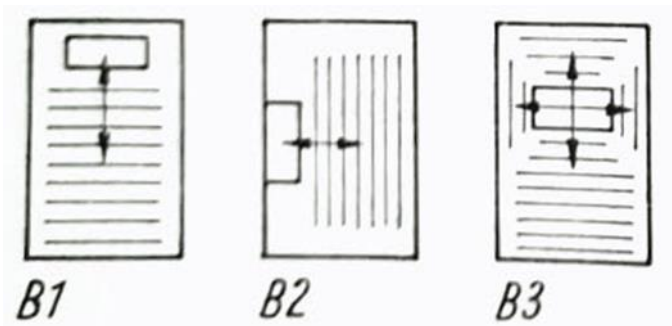


Abbildung 13: Konfrontationsformen bei rechteckigem Raumgrundriss<sup>13</sup>

Auch wenn die Halle nicht in allen Aspekten der bekannten Schuhkarton-Form entspricht, da die Decke zwar verhältnismäßig hoch, jedoch nicht eben ist, ändert das nichts an der Tatsache, dass auf diese Weise alle Zuschauerplätze möglichst geringe Entfernungen zu den Seitenwänden besitzen.

Im Gegensatz dazu wären die Zuschauer in der Hallenmitte bei Variante B2 viel weiter von den Wänden als reflektierende Flächen entfernt, sodass möglicherweise gravierende Unterschiede in der Klangqualität entstehen können. Schließlich sind viele raumakustische Gütekriterien wie bei der Musik z.B. das Klarheitsmaß  $C80$  von der Impulsantwort und damit auch von der Verteilung der Reflexionen abhängig. Eine besondere Rolle spielen dabei die frühen Reflexionen, die im Fall B1 alle Zuschauer mit nur sehr geringem Zeitversatz erreichen.

Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang so ausdrücken, dass „eine relativ hohe Korrelation zwischen der akustischen Qualität eines Konzertsaal und dessen Verhältnis Höhe:Breite“<sup>14</sup> existiert.

Das Verhältnis von Höhe zu Breite ist bei B2 geringer als bei B1, weshalb auch die Klangqualität niedriger ist.

Nach dem Standardverfahren, welches bei sämtlichen Messungen zur Anwendung kam, wurden für jede Messung die Nachhallzeiten der Terzbänder von  $f_m = 100$  Hz bis  $f_m = 5000$  Hz dokumentiert.

<sup>13</sup> [Fasold, 1984] S.1234

<sup>14</sup> [Fasold, 1984] S.1234

Um die Bedingung eines breitbandigen statistischen elektrischen Rauschens zu erfüllen, kam der NTi Audio Minirator MR-PRO mit seinem Pink Noise zum Einsatz.

An den jeweiligen Messpunkten erfolgte jedes Mal aufgrund des Zufallscharakters des wiedergegebenen Rauschens eine zeitliche Mittelung über jeweils  $n = 3$  Durchgänge und anschließend wurden zur Auswertung alle Sende- und Messpositionen ebenfalls räumlich gemittelt.

Weiterhin kann im Zuge der Messauswertung auch ein Einzahlwert gebildet werden, indem die Nachhallzeiten der sechs Terzen von  $f_m = 400$  Hz bis  $f_m = 1125$  Hz ebenfalls arithmetisch gemittelt werden.

Gemessen wurde im Kammermusiksaal (1) sowohl mit geöffneten als auch geschlossenen Klappen und in der zu optimierenden Halle (2) ohne und mit ausgelegten Bodenmatten.

Somit wurden unabhängig von der Nachhallzeitmessung im ersten Schritt für beide Räume Temperatur, relative Raumfeuchte und die Raummaße gemessen.

Anschließend erfolgte die Ermittlung der Nachhallzeit im Kammermusiksaal über sechs (2 Sendepositionen, 2 Messpunkte, Sendeposition 2 erneut mit geschlossenem Absorber) und in der Mehrzweckhalle über zwölf Einzelmessungen (2 Sendepositionen, 4 Messpunkte, Sendeposition 2 erneut mit 55 ausgelegten Bodenmatten).

Die Ergebnisse und deren Auswertung stellen den Inhalt des folgenden Kapitels dar.

## 4 Messergebnisse

### 4.1 Kammermusiksaal

Abbildung 14 zeigt den Messaufbau im Kammermusiksaal der Landesmusikakademie Sachsen gemäß der Beschreibungen aus Abschnitt 3.2. Genauer handelt es sich um die Sendeposition 1 (siehe Abbildung 11) bei geöffneten, also voll wirksamen Klappenabsorbern.



Abbildung 14: Messaufbau im Kammermusiksaal, SP1

Zusätzlich zu den Nachhallzeiten wurde das Raumvolumen mit  $V \approx 720 \text{ m}^3$  bestimmt. Die Raumtemperatur betrug  $\theta = 17,9^\circ\text{C}$  und die relative Luftfeuchte 45 %. Dank des ermittelten Raumvolumens kann aus Abbildung 3 und Abbildung 4 der Toleranzbereich für eine optimale Nachhallzeit in Aufführungsräumen dieser Größe festgelegt werden.

Diagramm 1 enthält die Messkurven bei offenen bzw. geschlossenen Klappen vor den Absorbern und ihre Lage relativ zum Toleranzbereich.

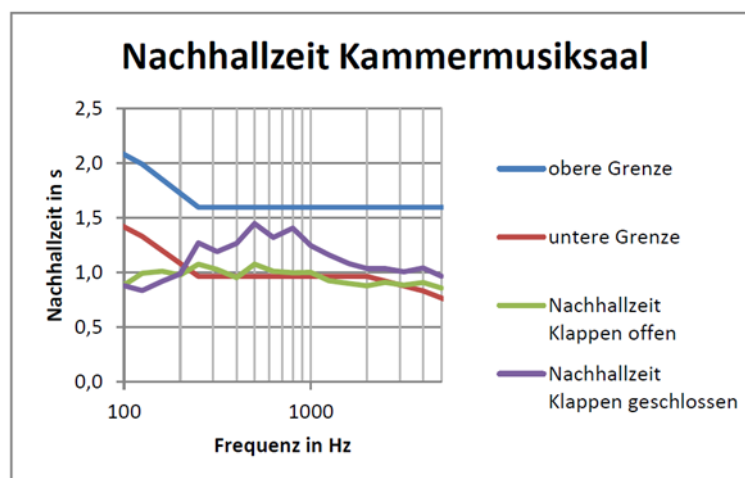


Diagramm 1: Messkurven (Klappen offen/geschlossen) und Toleranzbereich für die Nachhallzeit

Klar zu erkennen ist, dass bereits ohne das Öffnen der Klappen die Nachhallzeit gut im Toleranzbereich liegt. Im tiefen Frequenzbereich scheint sie sogar etwas zu niedrig zu werden. Dies sollte aber nur unter Vorsicht so gewertet werden, da die Messergebnisse der untersten Terzen bei allen Messungen mit sehr hohen Messunsicherheiten von über 30% verbunden waren.

Der Einfluss von Publikum bei musikalischen Veranstaltungen konnte bei den Messungen nicht berücksichtigt werden. Jedoch gibt es die Möglichkeit, den Effekt eines Menschen als Schallabsorber nachträglich in die Ergebnisse hineinzurechnen. Die DIN 18041 verschafft hier Abhilfe. Im Anhang G findet man dort exemplarische Absorptionstabellen, die zur Verwendung bei der Vordimensionierung raumakustischer Maßnahmen gedacht sind.

$f_m$ in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
$A$ in m <sup>2</sup>	0,15	0,25	0,55	0,80	0,90	0,90

Tabelle 1: Frequenzabhängige Schallabsorption einer männlichen Person im Anzug, sitzend<sup>15</sup>

Aussagen des Hausmeisters und der Leiterin der Musikakademie lassen darauf schließen, dass bei Aufführungen etwa 100 Personen (Musiker und Publikum) anwesend sind, bei Proben entsprechend weniger.

Um einen Eindruck von der Wirkung des Publikums als zusätzlicher breitbandiger Absorber zu bekommen, zeigt Diagramm 2 den Originalverlauf der Nachhallzeit sowie den neuen Verlauf mit 100 Personen im Raum. Dazu müssen zuvor allerdings immer je drei Terzbänder per arithmetischer Mittelung zu einem Oktavband zusammengefasst werden, um die äquivalenten Absorptionsflächen aus der DIN 18041 verwenden zu können.

$$T_{\text{okt}} = \frac{(T_{\text{terz},1} + T_{\text{terz},2} + T_{\text{terz},3})}{3}$$

VII

Zur Bestimmung der korrigierten Nachhallzeit wird die Formel nach Sabine (siehe Formel I) angewendet.

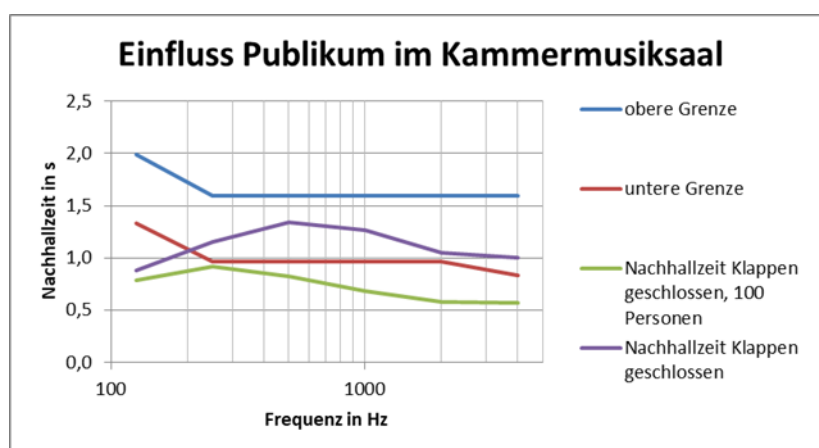


Diagramm 2: Einfluss der Absorption von 100 Personen

<sup>15</sup> [DIN 18041, 2016] S.44

Da sowohl bei offenen Klappen als auch mit Publikum die Nachhallzeit an der unteren Grenze des Toleranzbereiches liegt bzw. diese teilweise auch deutlich unterschreitet (siehe Diagramm 2), ist davon auszugehen, dass die Musikakademie einen etwas trockeneren Klang anstrebt.

Auch wurde der Toleranzbereich unter dem Nutzungszweck Sinfonieorchester bestimmt, welches etwas längerer Nachhallzeiten bedarf als z.B. ein Chor, der scheinbar ebenfalls öfter im Kammermusiksaal auftritt.

Der Vergleich der nach DIN EN ISO 3382-1 berechneten Einzahlwerte mit denen aus dem Messbericht des Akustik Bureau Dresden (ABD) fällt positiv aus. Es treten nur geringe Abweichungen auf, die sich im Bereich der Auswirkung von möglichen Messfehlern bewegen (siehe Tabelle 2).

Klappenstellung	ABD <sup>16</sup>	eigene Messung	Differenz
alle offen	0,97s	0,99	0,02s
alle geschlossen	1,23s	1,31	0,08s

Tabelle 2: Vergleich eigener Messdaten mit Ergebnissen des ABD

Da keine Informationen über den Messablauf beim ABD vorliegen, können die verwendeten Sende- und Empfangspositionen sowie Rauschlängen etc. nicht miteinander verglichen werden. Die sehr geringen Abweichungen der Einzahlwerte zueinander bestätigen jedoch die Zuverlässigkeit der selbst ermittelten Messwerte.

Offen bleibt, ob eine wesentlich andere Nachhallzeit auf der Empore gemessen werden würde. Aus Zeitgründen verzichtete die Gruppe auf eine dritte Empfangsposition direkt über den Sendepositionen 1 und 2. Auch aus dem Messbericht der ABD ist keine solche zusätzliche Messung und ihr Ergebnis ersichtlich.

<sup>16</sup> [Ederer, 2010] S.2

## 4.2 Mehrzweckhalle

Wie im Abschnitt 3.2 beschrieben, zeigt die Abbildung 15 den Messaufbau für die ersten beiden Empfangspositionen in Kombination mit der ersten Sendeposition nach Abbildung 12.

Die Messungen wurden bei  $\theta = 21,3^\circ\text{C}$  und 41 % relativer Raumfeuchte durchgeführt. Da die Deckenform nicht eben ist, setzt sich das berechnete Raumvolumen von  $V \approx 5900 \text{ m}^3$  aus mehreren Teilvolumina zusammen, wobei die Kuppel in der Hallenmitte in guter Näherung als halber Zylinder betrachtet wurde. Das Restvolumen der Halle, das nur über einen flexiblen Vorhang vom ausgemessenen Teil der Halle abgetrennt war, fließt in die Volumenberechnung nicht mit ein.



Abbildung 15: Messaufbau in der Mehrzweckhalle, SP1, MP1 & MP2

Diagramm 3 stellt die Lage der zeitlich und räumlich gemittelten Messkurve relativ zum neu bestimmten Toleranzbereich dar. Die gestrichelten Linien (rot und blau) entsprechen einem alternativen Toleranzbereich speziell für eine Mehrzwecknutzung, während die durchgezogenen Linien genau wie in den vorherigen Diagrammen für sinfonische Musik ausgelegt sind.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Nachhallzeit gerade im Bereich von  $f_m = 250 \text{ Hz}$  bis  $f_m = 1250 \text{ Hz}$  noch deutlich gesenkt werden muss, um den Ansprüchen der Nutzung durch die Musikakademie gerecht zu werden.

Wie bereits bei der Messung im Kammermusiksaal erwähnt, traten auch in der Mehrzweckhalle im tiefen Frequenzbereich hohe Messunsicherheiten auf. Diese gehen aus den ausgegebenen Daten der NTi Audio Messgeräte hervor. So konnte erst ab einer Terzmittenfrequenz von  $f_m = 315 \text{ Hz}$  eine Messunsicherheit von weniger als 15% sichergestellt werden, während bereits ab  $f_m = 100 \text{ Hz}$  aufgezeichnete Werte existieren



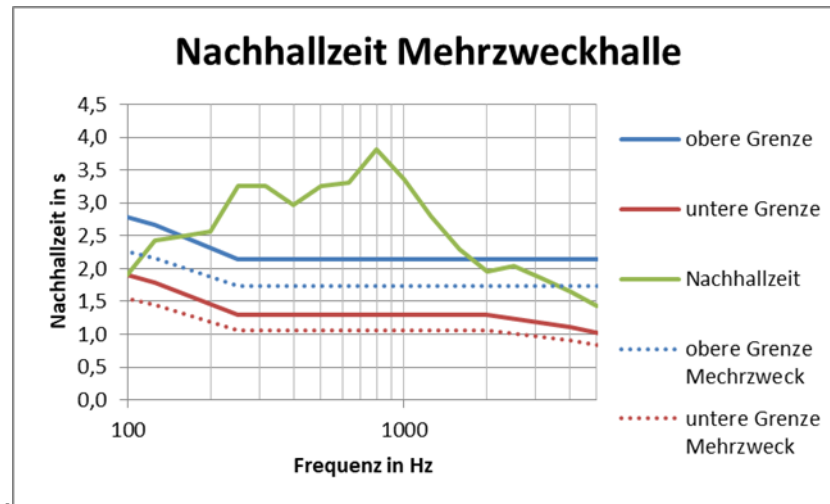


Diagramm 3: Messkurve und Toleranzbereich für die Nachhallzeit bei sinfonischer sowie Mehrzwecknutzung

Die Norm DIN EN ISO 3382-1 hält einige Bemerkungen zu Messunsicherheiten beim Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen bereit. So schreibt sie dem Produkt aus Filterbandbreite  $B_{terz} = 0,23 \cdot f_m$  und gemessener Nachhallzeit  $T20$  ein Mindestwert von 16 zu.

$$0,23 \cdot f_m \cdot T20 > 16 \quad 17$$

VIII

Dieser wird bei allen ausgewerteten Terzbändern deutlich überschritten. Der niedrigste Wert beträgt für  $f_m = 100$  Hz rund 44.

Zusätzlich kann nach der DIN EN ISO 3382-1 die Standardabweichung für die einzelnen Terzbänder berechnet werden. Diese trifft eine Aussage darüber, mit welcher Differenz zum arithmetischen Mittelwert die Einzelwerte durchschnittlich streuen.

$$\sigma(T20) = 0,88 \cdot T20 \sqrt{\frac{1+1,90/n}{N \cdot B \cdot T20}} \quad 18$$

IX

In dieser Formel ist  $n$  die Anzahl der an den einzelnen Positionen gemessenen Abklingvorgänge ( $n = 3$ ) und  $N$  die Anzahl unabhängiger Messpunkte, also dem Produkt aus den Anzahlen an Sende- und Empfangspositionen ( $N = 8$ ).

Tabelle 3 enthält die berechneten Werte für die Standardabweichung der in Diagramm 3 dargestellten Messwerte

$f_m$ in Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$\sigma(T20)$ in s	0,11	0,12	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06

$f_m$ in Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$\sigma(T20)$ in s	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01

Tabelle 3: Standardabweichung  $\sigma(T20)$  in den einzelnen Terzbändern

<sup>17</sup> [DIN EN ISO 3382-1, 2009] S.14

<sup>18</sup> [DIN EN ISO 3382-1, 2009] S.13

Die sehr geringen Werte der somit berechneten Streuung zeigen, dass die Wahl der Anzahl der Messpositionen zweckmäßig war.

Wie stark die Einzelmessungen tatsächlich um den gemittelten Wert streuen, zeigt im Folgenden Diagramm 4.

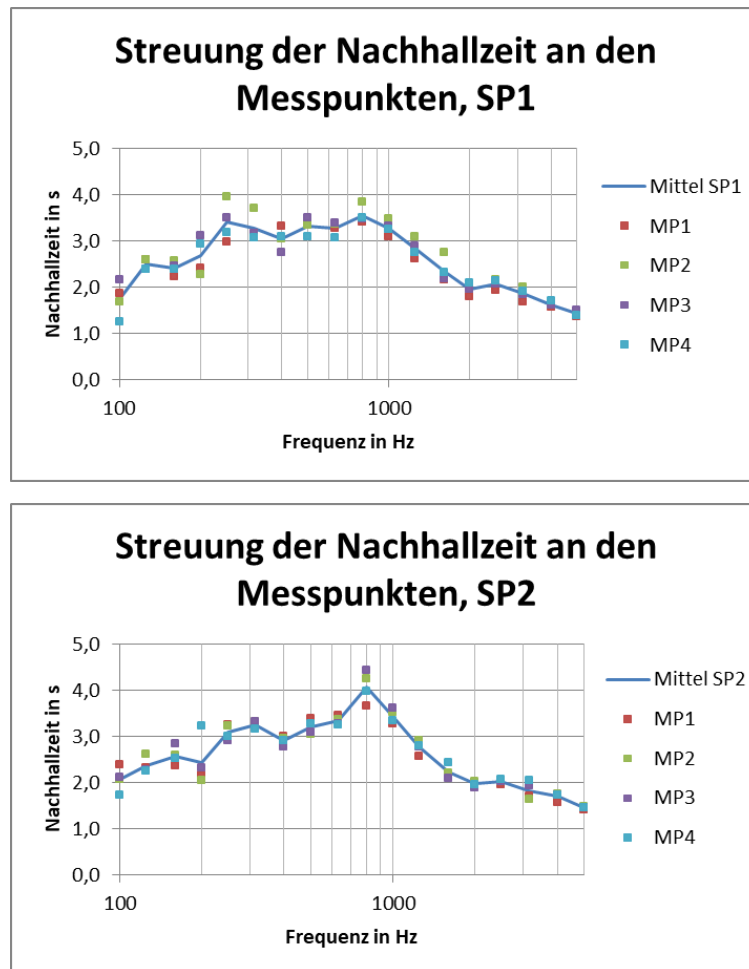


Diagramm 4: Streuung der Einzelmessungen der Nachhallzeit um den arithmetischen Mittelwert an SP1 und SP2

Bis auf einzelne Ausnahmen, die durch eventuell aufgetretene Störungen bei der Messung erklärt werden können, liegen alle Einzelwerte sehr nah an den gemittelten Kurven.

Abgesehen von zwei etwas höheren Abweichungen bei  $f_m = 250$  Hz sowie  $f_m = 800$  Hz stimmen auch die Verläufe der beiden unterschiedlichen Sendepositionen sehr gut überein (siehe Diagramm 5).

Aufgrund des starken Anstieges an der Sendeposition 2 bei  $f_m = 800$  Hz ist zu vermuten, dass es sich hierbei entweder um einen simplen Messfehler oder aber um die Ausbildung einer stehenden Welle handelt, welche die Nachhallzeit erhöht. Währenddessen liegt der zweite auffällige Punkt bei  $f_m = 250$  Hz noch in dem Bereich, in dem laut der Messgeräte noch Messunsicherheiten über 15 % (im Durchschnitt bei  $f_m = 250$  Hz konkret ca. 16 %) vorherrschen. Deshalb sollte diese Abweichung nicht überbewertet werden.

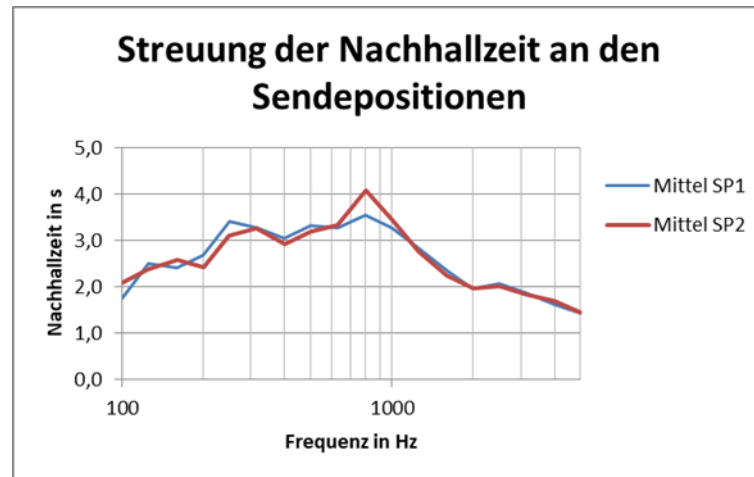


Diagramm 5: Streuung der Nachhallzeit zwischen SP1 und SP2

Die Halle gleich bis auf die etwas ausgefallene Deckenform einem typischen Schuhkarton-artigen. Deshalb entsprechen die Ergebnisse der Messwertstreuung den Erwartungen.

Da im Anschluss an die Messung in Colditz Verbesserungsvorschläge für die Raumakustik der Mehrzweckhalle in Form von Absorbern ausgearbeitet werden sollten, erfolgte mithilfe der Formel für die Nachhallzeit nach Sabine die Berechnung der bereits vorhandenen sowie der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche  $A$ .

$$A = 0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot \frac{V}{T} \quad \text{X}$$

Diagramm 6 zeigt diese beiden frequenzabhängigen Verläufe. Erneut wurde in Oktavbänder umgerechnet. Der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche diente die Mitte des Toleranzbereiches für sinfonische Musik als Grundlage.

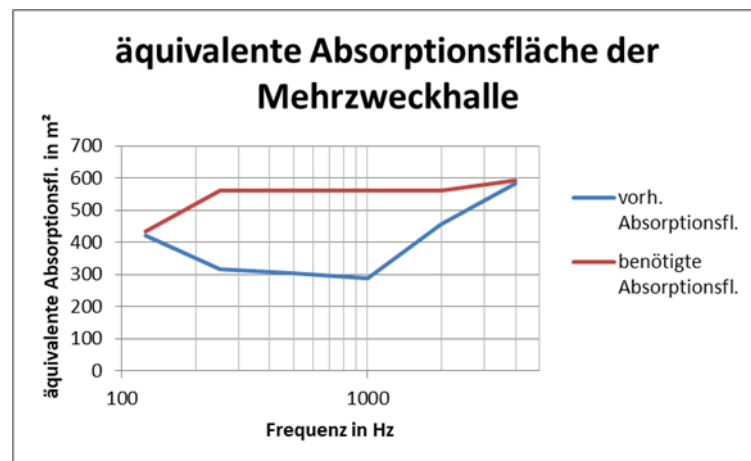


Diagramm 6: Vorhandene und benötigte äquivalente Absorptionsfläche

Aus der Differenz beider Kurven ergibt sich für jedes Oktavband die äquivalente Absorptionsfläche, die durch Schallabsorber noch in die Mehrzweckhalle eingefügt werden muss (siehe Tabelle 4).

$f_m$ in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
$A_{\text{notig}}$ in $\text{m}^2$	10,84	243,66	259,20	272,28	103,64	8,95

Tabelle 4: Noch hinzuzufügende äquivalente Absorptionsfläche  $A$

Als erste nachhallzeitsenkende Maßnahme bietet sich das Auslegen der vorhandenen Bodenmatten an. Deshalb wurde im Anschluss an die abgeschlossene Nachhallzeitmessung mit leerem Boden die Sendeposition 2 erneut mit 55 ausgebreiteten Bodenmatten gemessen.

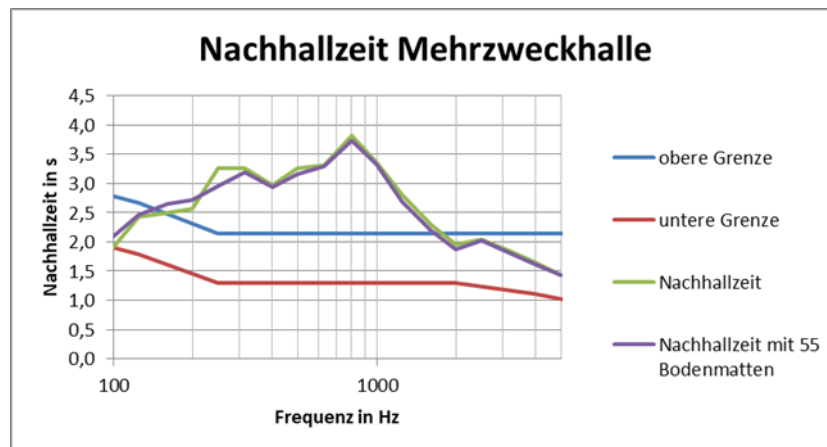


Diagramm 7: Messkurve der Nachhallzeit mit und ohne ausgelegte Bodenmatten

Das Diagramm 7 macht deutlich, dass kein merklicher Effekt durch das Auslegen des Bodens mit den vorhandenen Matten erzielt werden kann. Die Differenzen zwischen den Messkurven bewegen sich in einem so niedrigen Bereich, dass diese auch durch Messfehler entstanden sein können.

Hochgerechnet würde für die gesamte Auslegung des Hallenbodens die Anzahl der vorhandenen Matten auch gar nicht ausreichen ( $319 > 190$ ).

Beide Kurven liegen im Diagramm ab  $f_m = 315$  Hz, den Peak bei  $f_m = 800$  Hz eingeschlossen, fast deckungsgleich aufeinander. Darum ist anzunehmen, dass es sich tatsächlich um eine stehende Welle handelt, die den starken Peak bei Sendeposition 2 im Gegensatz zu Sendeposition 1 hervorruft.

Mithilfe der Werte aus Tabelle 1 kann auch in die Messwerte der Mehrzweckhalle die Schallabsorption durch Publikum einbezogen werden.

Allerdings ist in diesem Fall die Festlegung auf eine Personenanzahl deutlich schwieriger, da noch keine Erfahrungswerte der Musikakademie von Veranstaltungen mit Publikum in der Halle vorliegen.

Laut dem Hallenwart waren ca. 70 Musiker und 130 Zuschauer bei anderen Musikveranstaltungen (nicht von der Musikakademie durchgeführt) anwesend, während die Leiterin der Musikakademie Musikerzahlen größer als 100 und unbekannte Publikumszahlen nannte. Im Kammermusiksaal gab sie Zuschauerzahlen von knapp 100 Personen an.

Auf Grundlage dieser Zahlen wurde der Entschluss gefasst, für die spätere Kalkulation der benötigten Absorbern von 200 anwesenden Personen (Musiker und Publikum) auszugehen.

Diagramm 8 zeigt den Einfluss dieser Personenmenge auf die Nachhallzeit. Zusätzlich wurde eine weitere Kurve gezeichnet, die die Absorption von 300 Personen berücksichtigt, um den Unterschied aufzuzeigen.

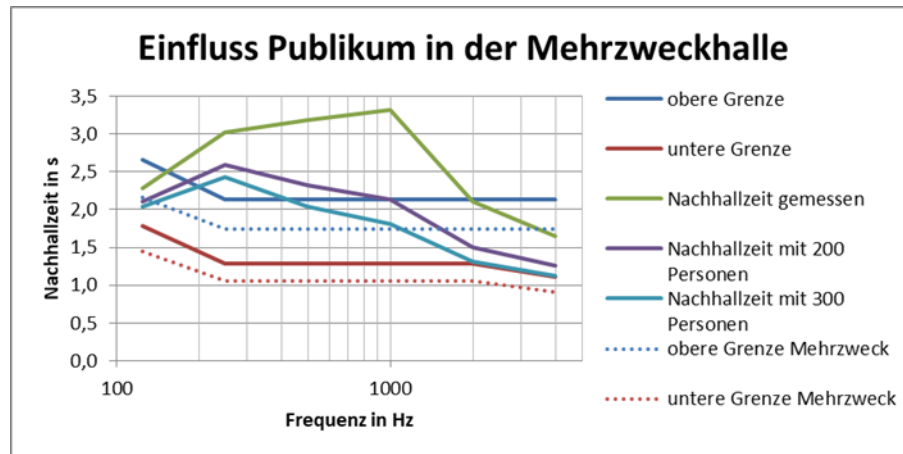


Diagramm 8: Einfluss der Absorption von 200 bzw. 300 Personen

Zu erkennen ist, dass das Publikum bereits eine sehr günstige Wirkung auf die Nachhallzeit hat. Somit verringert sich der nötige Aufwand, der mit zusätzlichen Absorbern aufgebracht werden muss.

Ziel ist es nun vor allem im Bereich von  $f_m = 250$  Hz bis  $f_m = 1000$  Hz wirksame Absorber zu finden, um den Nachhallzeitverlauf möglichst effektiv zu glätten und vollständig innerhalb des Toleranzbereiches zu platzieren.

## 5 Verbesserungsvorschläge

### 5.1 Vorstellung verschiedener Absorber

Bei der vorliegenden, akustisch zu optimierenden Räumlichkeiten handelt es sich, wie bereits erwähnt, um eine Mehrzweckhalle, bei der die schalleitenden Wände nach Möglichkeit freigehalten werden sollten. Aufgrund der Mehrzwecknutzung der Halle muss auch die Prallsicherheit der verwendeten Absorber gewährleistet sein.

Da sich bei den Messungen vor Allem die Nachhallzeit im Bereich von  $f_m = 250$  Hz bis  $f_m = 1000$  Hz mit mehr als drei Sekunden als deutlich zu lang herausstellte, haben wurden die folgenden Absorber anhand ihrer Eigenschaften wie Schallabsorption, Prallsicherheit und Montage in die nähere Betrachtung aufgenommen.

#### Duromer-Absorber (poröse Absorber)



Abbildung 16: Duromer-Absorber – aixFOAM SH001HMH<sup>19</sup>

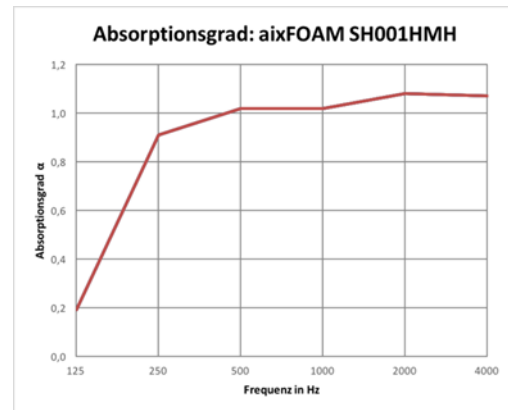


Diagramm 9: Absorptionsgrad aixFOAM SH001HMH<sup>20</sup>

Schallabsorber aus Duromer-Schaumstoffen sind bei der akustischen Behandlung von Sport- und Industriehallen weit verbreitet. Die Elemente mit homogen poröser Oberfläche zeichnen sich durch eine hohe Schallabsorption bei relativ geringer Materialstärke aus, wobei der Schallabsorptionsgrad erst ab  $f_m = 250$  Hz signifikant ist ( $\alpha = 0,91$ ).

Die Elemente sind prallsicher und können vertikal oder horizontal (siehe Anhang A-2) hängend an der Hallendecke angebracht werden. Dies erlaubt ein Freihalten der schalleitenden Wände der Halle.

<sup>19</sup> <https://www.aixfoam.de/akustikelement-sh001h-vertikal> (24.02.19)

<sup>20</sup> <https://www.aixfoam.de/akustikelement-sh001h-vertikal> (24.02.19)

## Verbund-Platten-Resonator (VPR)

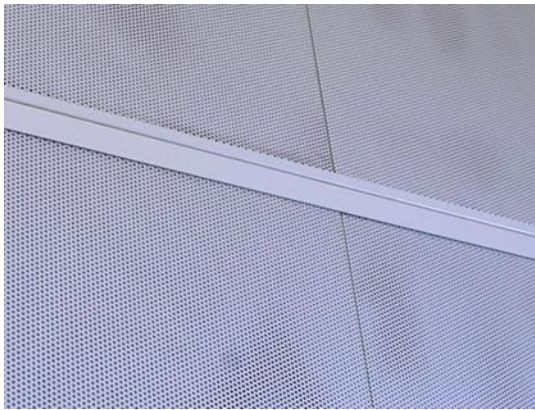


Abbildung 17: Verbund-Platten-Resonator – Renz Systeme VPR<sup>21</sup>

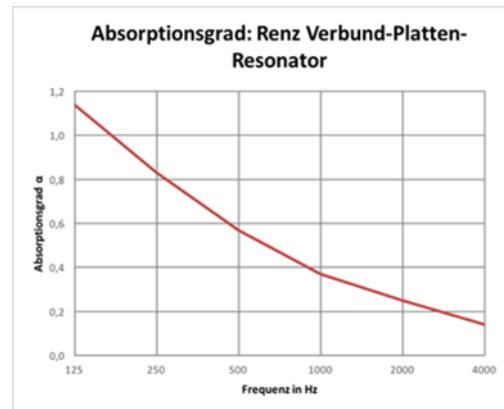


Diagramm 10: Absorptionsgrad Renz Systeme VPR<sup>22</sup>

Der zusammen mit dem Fraunhofer Institut entwickelte Verbund-Platten-Resonator ist vierlagig aufgebaut. Er besteht aus Lochblech, Vlies, Dämpfer, Schwingblech und einem weiteren Dämpfer.

Der hauptsächliche Absorptionsgrad liegt im Bereich von  $f_m = 63 \dots 500$  Hz. Er eignet sich daher vor Allem, um fehlende Absorptionsfläche im tiefen Frequenzbereich einzubringen.

Die Elemente sind prallfest und in einer Vielzahl von Größen erhältlich (siehe Anhang A-2).

## Aufblasbare Absorber

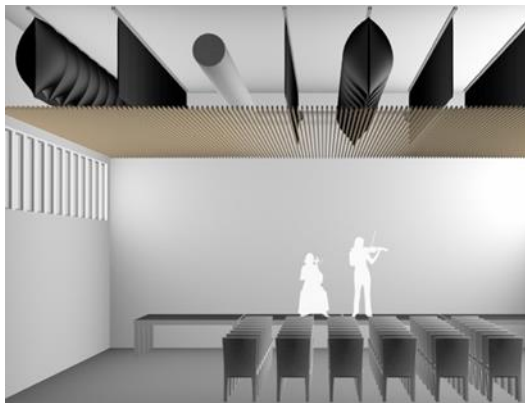


Abbildung 18: Aufblasbare Absorber – Flex Acoustics aQflex<sup>23</sup>

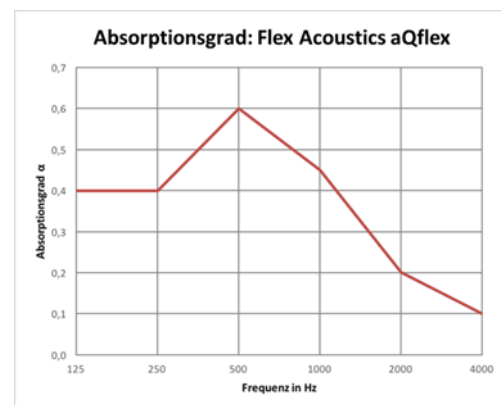


Diagramm 11: Absorptionsgrad Flex Acoustics aQflex<sup>24</sup>

Der aufblasbare Doppelmembranabsorber aQflex von Flex Acoustics zählt ebenfalls zu den Tiefen-Absorbern und lässt sich auf Knopfdruck mit Luft füllen. So kann die Nachhallzeit variabel an die Publikumszahlen sowie die Wünsche der Musiker angepasst werden.

<sup>21</sup> [https://www.faist.de/wp-content/uploads/2016/10/schallabsorber\\_01.jpg](https://www.faist.de/wp-content/uploads/2016/10/schallabsorber_01.jpg) (24.02.19)

<sup>22</sup> [http://www.renz-solutions.de/fileadmin/user\\_upload/Datenblatt\\_VPR.pdf](http://www.renz-solutions.de/fileadmin/user_upload/Datenblatt_VPR.pdf) (24.02.19)

<sup>23</sup> <http://flexac.com/de/produkte/aqflex/> (24.02.19)

<sup>24</sup> <http://flexac.com/de/produkte/aqflex/> (24.02.19)

Der Absorptionsgrad ist bereits bei  $f_m = 125$  Hz hoch ( $\alpha = 0,91$ ), während er bei hohen Frequenzen stetig abfällt. Im luftentleerten Zustand geht der Absorptionsgrad gegen null.

Die Elemente werden in Reihen an der Decke angebracht.

### Akustisch wirksamer Teppich

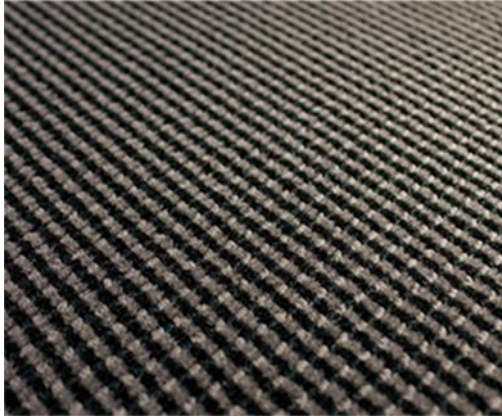


Abbildung 19: Akustisch wirksamer Teppich – Carpet Concept CAS Isy V 550<sup>25</sup>

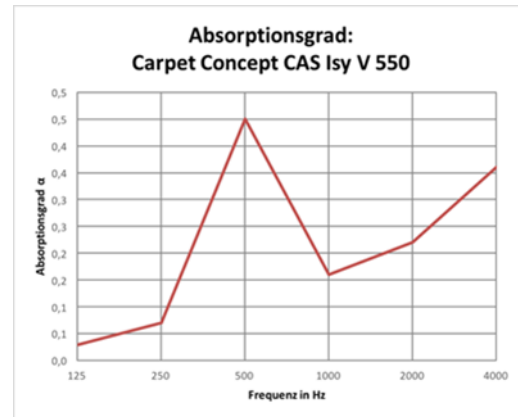


Diagramm 12: Absorptionsgrad Carpet Concept CAS Isy V 550<sup>26</sup>

Akustisch wirksame Teppiche besitzen in der Regel eine Membranschicht und wirken als Absorber für mittlere und hohe Frequenzen. Der Schallabsorptionsgrad erreicht sein Maximum zwischen  $f_m = 250$  Hz und  $f_m = 1000$  Hz. Im Hochtonbereich oberhalb von  $f_m = 1000$  Hz steigt der Absorptionsgrad ebenfalls stetig an.

<sup>25</sup> <https://www.carpet-concept.de/fileadmin/Resources/Public/Images/Products/AcousticSystems/CasCarpets/s/CasIsy-s.jpg> (24.02.19)

<sup>26</sup> <https://www.carpet-concept.de/produkte/acoustic-systems/cas-carpets/cas-isy-v-550.html> (24.02.19)



## Deckensegel

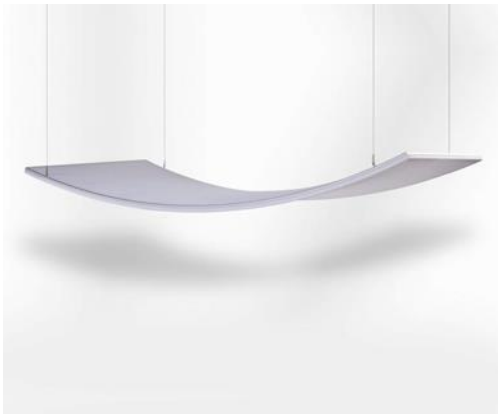


Abbildung 20: Deckensegel – aixFOAM SH040KONVEX<sup>27</sup>

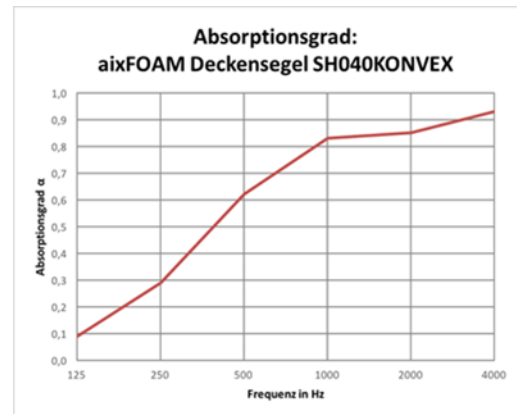


Diagramm 13: Absorptionsgrad aixFOAM SH040KONVEX<sup>28</sup>

Deckensegel bestehen in der Regel aus Aluminiumrahmen, Kernen aus Schaumstoff und/oder akustisch wirksamen Vliesen. Auch Varianten aus PVC-Folie sind gängig. Die Funktionsweise ist ähnlich zu denen der eingehängenen Deckenelemente, jedoch handelt es sich hier in der Regel um Mitten- und Höhenabsorber.

<sup>27</sup> <https://www.aixfoam.de/akustikelement-haengesegel-uni-sh040-konvex>

(24.02.19)

<sup>28</sup> <https://www.aixfoam.de/akustikelement-haengesegel-uni-sh040-konvex>

(24.02.19)

## 5.2 Konkrete Vorschläge

Unter Berücksichtigung der Publikumsabsorption ergibt sich für die Mehrzweckhalle, dass die Nachhallzeit im hochfrequenten Bereich oberhalb von  $f_m = 1000$  Hz durch das Publikum voraussichtlich bereits in ausreichendem Maße gesenkt wird. Somit erscheint die Verwendung von Akustikteppichen oder Deckensegeln (als Mitten- und Höhenabsorber) nicht sinnvoll.

Eine Einbringung von zusätzlicher Absorptionsfläche ist hingegen vorrangig im Bereich von  $f_m = 200$  Hz bis  $f_m = 800$  Hz notwendig.

Aufgrund der höheren Kompaktheit fiel die Entscheidung bei den Duromer-Absorbern auf eine vertikal eingehangene Variante Panels, konkret auf das Modell SH001MHM vertikal in weißgrau von der Firma aixFOAM.

Für Verbund-Platten-Resonatoren wurde das Modell von Renz Systeme und für die variablen, aufblasbaren Absorber das aQflex-System von Flex Acoustics gewählt.

Dem Weiteren wird grundsätzlich empfohlen, das Orchester von der jetzigen Position an der teilweise offenen Hallentrennwand auf die gegenüberliegende Seite der Halle zu verlagern. So würde keine unnötige Leistung an das Volumen auf der anderen Seite der Trennwand abgegeben werden.

### **Variante I: Kombination aus 96 Duromer-Absorber-Panels und 60 m<sup>2</sup> Verbund-Platten-Resonatoren**

Da aufblasbare Absorber äußerst kostspielig sind (siehe Variante III), empfiehlt vorzugsweise eine Kombination aus oben genannten Duromer-Absorbern und Verbund-Platten-Resonatoren.

Für diese Variante sind 96 der vertikal eingehangenen Panels von aixFOAM notwendig (Länge x Höhe x Tiefe: 1,2 x 0,6 x 0,1 m), das ergibt 6 Reihen mit je 16 Elementen auf der kürzeren Hallenseite.

Zusätzlich braucht man 24 Elemente der Renz Systeme VPR (Länge x Breite x Tiefe: 2,5 x 1,0 x 0,1 m), was eine Gesamtfläche von 60 m<sup>2</sup> ergibt, wobei die VPR möglichst in den Ecken der Halle angebracht werden sollten, um die Schalleitung der Wände nicht zu beeinträchtigen.

Wie in Diagramm 14 zu erkennen ist, wird bei dieser Kombination von Absorbern, unter Einbeziehung der Publikumsabsorption (200 Personen angenommen), ein insgesamt sehr gutes Ergebnis erzielt.

Die Nachhallzeit liegt über den gesamten Frequenzbereich in den geforderten Grenzen für musikalische Aufführungsräume und der Nachhallzeitverlauf ist zugleich für eine Halle dieser Größe relativ linear, auch wenn sich die Nachhallzeit der unteren Grenze oberhalb von  $f_m = 2000$  Hz stark annähert.

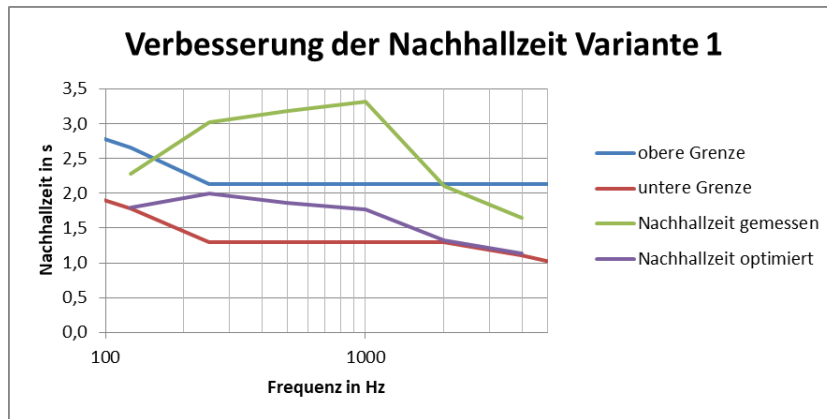


Diagramm 14: Nachhallzeit – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels und 60m<sup>2</sup> VPR

Dies spiegelt sich auch in der Veränderung der äquivalenten Absorptionsfläche wieder (siehe Diagramm 15): Es ist deutlich erkennbar, dass die gewünschte äquivalente Absorptionsfläche (Mittelung zwischen oberer und unterer Grenze) oberhalb von  $f_m = 1000$  Hz bereits deutlich überschritten wird, ebenso leicht unterhalb von  $f_m = 200$  Hz.

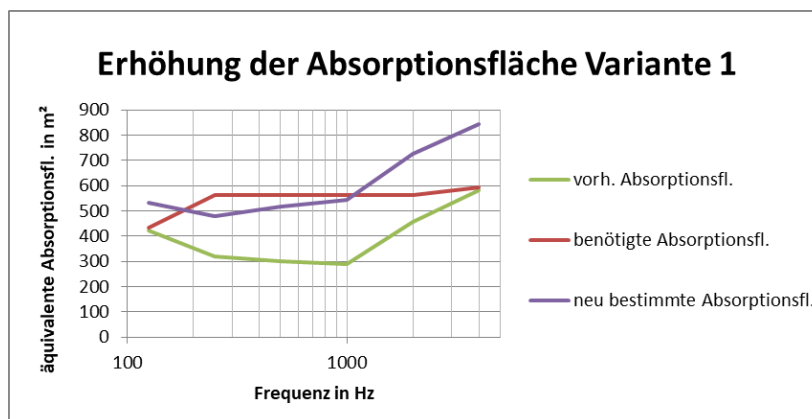


Diagramm 15: Äquivalente Absorptionsfläche – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels und 60m<sup>2</sup> VPR

Die Materialkosten für diese Art der Umsetzung bewegen sich im Rahmen von ca. 16.700 € exklusive der Einbaukosten.

Sie setzen sich zusammen aus ca. 6.500 € für die Duromer-Absorber-Panels (inklusive Aufhängung) und ca. 10.200 € für 60 m<sup>2</sup> Verbund-Platten-Resonatoren.

### Variante II: 128 Duromer-Absorber-Panels

Als weiterer Vorschlag wurde eine möglichst kostengünstige Variante erarbeitet. Dabei wird nur ein Absorbertyp verwendet, der bereits erwähnte Duromer-Absorber von aixFOAM.

Hier würden, unter Einbeziehung der Publikumsabsorption, 128 Elemente von je  $0,72 \text{ m}^2$  Größe ausreichen, um den gewünschten Nachhallzeitkorridor von  $T \approx 1,3 \dots 2,2 \text{ s}$  zu erreichen, dies entspricht 8 Reihen mit je 16 Elementen.

Jedoch ist der Nachhallzeitverlauf (Diagramm 16) hier insgesamt nicht ganz so linear ist wie bei Variante I (vgl Diagramm 14).

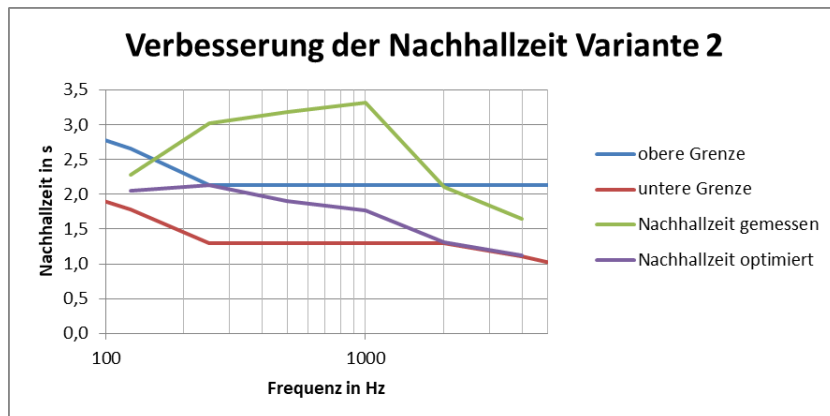


Diagramm 16: Nachhallzeit – Veränderung mit 200 Personen und 128 aixFOAM Panels

Auch bei dieser Variante wird die gewünschte äquivalente Absorptionsfläche im Hochtonbereich (oberhalb von  $f_m = 1000 \text{ Hz}$ ) deutlich überschritten, ebenso minimal unterhalb von  $f_m = 150 \text{ Hz}$ .

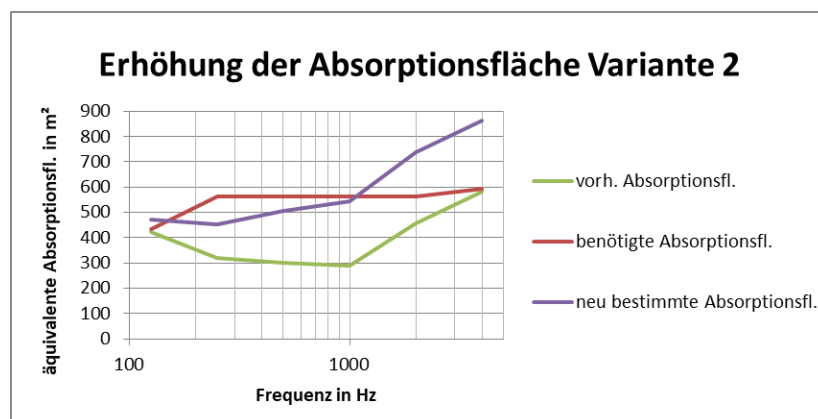


Diagramm 17: Äquivalente Absorptionsfläche – Veränderung mit 200 Personen und 128 aixFOAM Panels

Die reinen Materialkosten (inkl. Aufhängung) belaufen sich für diesen Fall auf ca. 8.000 €.

### Variante III: Kombination aus 96 Duromer-Absorber-Panels, 40m<sup>2</sup> Verbund-Platten-Resonatoren und 84m<sup>2</sup> aufblasbaren Absorbern

Für den Fall dass eine variable Akustik gewünscht ist, wird im Folgenden eine weitere Kombination aus porösem Absorber, Verbund-Platten-Resonator und aufblasbarem Doppelmembranabsorber vorgestellt..

Hierbei kämen 96 der Duromer-Absorber von aixFOAM zum Einsatz (entspricht 6 Reihen mit je 16 Panels), in Verbindung mit 40 m<sup>2</sup> der VPR von Renz Systeme, was sich in diesem Fall zu 16 Elementen ergibt.

Auch hier sollten für eine optimale Schalleitung die VPR möglichst in den Ecken der Halle angebracht werden.

Zusätzlich wären 84 m<sup>2</sup> aQflex einzubauen, was 10 Reihen mit je 21 m auf der kürzeren Hallenseite entspricht (belegte Gesamtdeckenfläche durch aufblasbaren Absorber: 21 m · 7,9 m = 165,9 m<sup>2</sup>).

Wie in Diagramm 18 zu erkennen ist, kann der Einsatz von aQflex die Nachhallzeit im Frequenzbereich von  $f_m = 125$  Hz bis  $f_m = 1000$  Hz zusätzlich um  $\approx 0,2$  s senken oder erhöhen.

So kann der Nachhallzeitverlauf auf Wunsch noch flexibler gestaltet werden (lila und hellblaue Kurve).

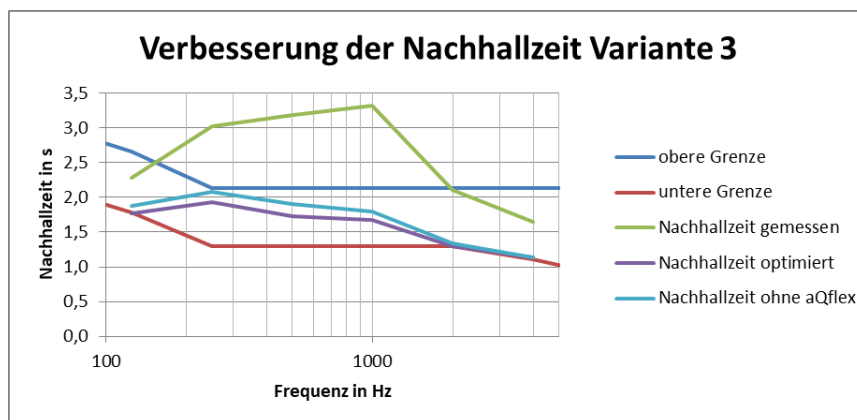


Diagramm 18: Nachhallzeit – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels, 40m<sup>2</sup> VPR, mit/ohne 84 m<sup>2</sup> aQflex

Wie aus Diagramm 19 ersichtlich, kann durch die aufblasbaren Absorber zusätzliche äquivalentente Absorptionsfläche im Bereich von  $f_m = 125$  Hz bis  $f_m = 2000$  Hz eingebracht werden, während sie oberhalb von  $f_m = 2000$  Hz nahezu konstant bleibt.

Im Hochtonbereich findet abermals eine Annäherung an die untere Nachhallzeitgrenze für musikalische Proberäume statt.

Der Gesamtnachhallzeitverlauf ist insgesamt etwas linearer als bei Variante I.

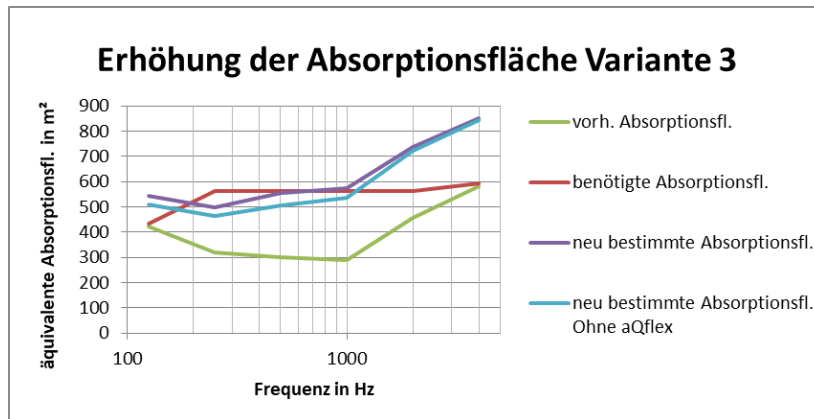


Diagramm 19: Äquivalente Absorptionsfläche – Veränderung mit 200 Personen, 96 aixFOAM Panels, 40 m<sup>2</sup> VPR, mit/ohne 84 m<sup>2</sup> aQflex

Der Gesamtpreis der Materialien (ohne Einbau) ergibt sich zu ca. 68.300€, bestehend aus rund 6.500 € für die Duromer-Absorber, 6.800 € für die Verbund-Platten-Resonatoren und 55.000 € für die aufblasbaren Absorber.

Somit ist diese Variante wesentlich kostenintensiver als die beiden anderen.

### Weitere Einschätzungen

Es lässt sich allgemein festhalten, dass bei allen drei Varianten im Hochtonbereich eine Annäherung an die untere Grenze der empfohlenen Nachhallzeiten für Aufführungsräume stattfindet.

Dies scheint, allein aufgrund der Publikumsabsorption, jedoch nahezu unvermeidlich (vgl. Abschnitt 4.2).

Da außerdem für den konkreten Fall weiterhin eine Mehrzwecknutzung vorgesehen ist, ist der ermittelte Nachhallzeitverlauf im tolerablen Bereich, da sich in Bezug auf die Sprachverständlichkeit vor Allem eine zu lange Nachhallzeit negativ auswirken würde (vgl. alternativer Toleranzbereich aus Abschnitt 4.2).

Darüber hinaus wurde auch bei den zu Vergleichszwecken angestellten Messungen im Kammermusiksaal die Nachhallzeit des dort gültigen Toleranzbereichs teilweise ganz oder zumindest fast unterschritten (vgl. Diagramm 1), was zu dem Schluss führt, dass die neu errechneten Nachhallzeitverläufe für eine Halle dieser Form und Größe akzeptabel sind.

## 6 Fazit

In diesem Bericht wurden verschiedene Maßnahmen zur Optimierung der Raumakustik der Mehrzweckhalle in Colditz auf Grundlage von vorher durchgeführten Nachhallzeitmessungen vorgestellt.

Ziel war es dabei möglichst optimale Bedingungen für musikalische Aufführungen zu schaffen. Die Turnhalle wird von der Landesmusikakademie Sachsen als Alternative zum Kammermusiksaal im Schloss Colditz genutzt, wenn dieser nicht genug Platz bietet.

Der erste Schritt des Projekts bestand darin, sich auf ein Messverfahren und zu erfüllende Anforderungen festzulegen.

Mit der in der DIN EN ISO 3382-1 beschriebenen Herangehensweise über die Aufzeichnung von Abklingvorgängen nach dem Abschalten eines breitbandigen Rauschens wurde das angewandte Verfahren schnell gefunden. Auf dessen Grundlage fanden am 12. Dezember 2018 in Colditz alle Messungen nach einem zuvor ausgearbeiteten Messplan statt. Die Festlegung auf einen erstrebenswerten Zielbereich der Nachhallzeit gestaltete sich dagegen schwieriger.

Die DIN 18041 enthält zwar eine gute Kategorisierung von Räumen und auch Formeln zur Bestimmung optimaler Nachhallzeiten, jedoch eignet sie sich nur bedingt für Aufführungsräume der Größe der Mehrzweckhalle in Colditz. Deshalb fanden stattdessen Angaben aus W. Fasolds und E. Verets *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis* Anwendung.

Des Weiteren beinhaltet dieser Bericht Ausführungen zur nachträglichen Einbeziehung von Publikumsabsorption. Fehlende Angaben zu Besucherzahlen stellten hierbei ein weiteres Problem des Projekts dar.

Zusätzlich zur Messung in der Mehrzweckhalle wurde die Nachhallzeit auch im Kammermusiksaal der Landesmusikakademie bestimmt und mit Werten der Ingenieurgesellschaft Akustik Bureau Dresden mbH verglichen. Die vorgegebenen Werte konnten durch eigene Messungen validiert werden, jedoch war der Saal aufgrund des extremen Größenunterschiedes nur begrenzt als Vergleichsraum für die Turnhalle verwendbar.

Ein Abschlussberichts, der die Messergebnisse und Verbesserungsvorschläge für die Mehrzweckhalle enthält, wird der Landesmusikakademie Sachsen überreicht und markiert den Abschluss des Projekts. Dieser Bericht kann im Anhang A-3 nachgeschlagen werden.

# Anhang

## A-1 Messdaten

### Kammermusiksaal

Ort: 1.1 Kammermusiksaal  
Landesmusikakademie Sachsen  
Schlossgasse 1  
04680 Colditz

Datum: 12. Dezember 2018

Raumtemperatur: 17,9°C

Relative Luftfeuchte: 45 %

Raumvolumen: 718,2 m<sup>3</sup>

$f_m$ in Hz	Klappen offen, $T$ in s				Mittel
	SP 1		SP 2		
	MP 1	MP 2	MP 1	MP 2	
100	1,06	0,89	0,77	0,82	0,89
125	0,89	1,15	0,95	0,98	0,99
160	1,12	0,99	0,90	1,03	1,01
200	1,07	0,91	0,84	1,08	0,98
250	1,03	1,10	1,10	1,07	1,08
315	0,88	1,00	1,12	1,11	1,03
400	0,84	0,92	0,86	1,19	0,95
500	1,00	1,10	1,09	1,11	1,08
630	0,96	0,97	1,02	1,09	1,01
800	1,03	0,97	0,94	1,05	1,00
1000	1,03	0,97	1,02	0,98	1,00
1250	0,94	0,92	0,87	0,97	0,93
1600	0,85	0,92	0,99	0,84	0,90
2000	0,78	0,86	0,89	0,98	0,88
2500	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
3150	0,92	0,87	0,87	0,88	0,89
4000	0,88	0,88	0,94	0,93	0,91
5000	0,79	0,86	0,92	0,86	0,86
EZW	0,97	0,98	0,97	1,07	0,99



$f_m$ in Hz	Klappen geschlossen, $T$ in s		
	SP 2		Mittel
	MP 1	MP 2	
100	0,80	0,96	0,88
125	0,80	0,87	0,84
160	0,88	0,96	0,92
200	0,86	1,11	0,99
250	1,27	1,27	1,27
315	1,20	1,18	1,19
400	1,29	1,24	1,27
500	1,42	1,47	1,45
630	1,23	1,41	1,32
800	1,42	1,39	1,41
1000	1,25	1,24	1,25
1250	1,12	1,20	1,16
1600	1,04	1,12	1,08
2000	0,96	1,11	1,04
2500	1,03	1,04	1,04
3150	0,94	1,07	1,01
4000	0,97	1,11	1,04
5000	0,95	0,98	0,97
EZW	1,29	1,33	1,31

*Mehrzweckhalle*

Ort: Sophienschule Colditz  
 Schulstraße 12  
 04680 Colditz

Datum: 12. Dezember 2018

Raumtemperatur: 21,3°C

Relative Luftfeuchte: 41 %

Raumvolumen: 5904,8 m<sup>3</sup>

$f_m$ in Hz	SP 1, $T$ in s				SP 2, $T$ in s				Mittel, $T$ in s
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	
100	1,87	1,69	2,15	1,26	2,39	2,06	2,12	1,73	1,91
125	2,60	2,59	2,38	2,39	2,32	2,62	2,28	2,26	2,43
160	2,23	2,56	2,46	2,38	2,36	2,59	2,84	2,53	2,49
200	2,40	2,28	3,11	2,94	2,15	2,04	2,31	3,23	2,56
250	2,98	3,95	3,51	3,19	3,26	3,23	2,91	3,01	3,26
315	3,15	3,71	3,16	3,06	3,22	3,32	3,32	3,17	3,26
400	3,31	3,04	2,75	3,08	3,01	2,95	2,78	2,90	2,98
500	3,36	3,33	3,50	3,09	3,38	3,05	3,10	3,28	3,26
630	3,28	3,36	3,39	3,06	3,45	3,37	3,27	3,25	3,30
800	3,40	3,83	3,48	3,51	3,65	4,25	4,42	3,98	3,82
1000	3,10	3,48	3,31	3,24	3,27	3,52	3,61	3,35	3,36
1250	2,61	3,08	2,89	2,75	2,57	2,92	2,77	2,80	2,80
1600	2,16	2,74	2,19	2,32	2,19	2,21	2,10	2,43	2,29
2000	1,80	1,96	1,96	2,10	2,01	2,03	1,88	1,95	1,96
2500	1,93	2,16	2,08	2,13	1,95	2,03	2,03	2,08	2,05
3150	1,69	2,00	1,85	1,92	1,71	1,63	1,94	2,04	1,85
4000	1,56	1,61	1,61	1,70	1,57	1,75	1,74	1,74	1,66
5000	1,37	1,44	1,51	1,39	1,41	1,48	1,46	1,46	1,44
EZW	3,18	3,35	3,22	3,12	3,22	3,34	3,33	3,26	3,25

$f_m$ in Hz	SP 2, 55 Bodenmatten, $T$ in s				Mittel, $T$ in s
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	
100	1,93	2,10	2,43	1,94	2,10
125	2,56	2,29	2,44	2,57	2,47
160	2,41	2,36	3,10	2,70	2,64
200	2,58	2,40	2,83	3,03	2,71
250	3,14	2,78	2,83	3,07	2,96
315	3,02	3,44	3,20	3,13	3,20
400	2,67	3,28	2,63	3,15	2,93
500	3,29	2,96	2,93	3,46	3,16
630	3,20	3,27	3,22	3,50	3,30
800	3,95	3,57	4,08	3,31	3,73
1000	3,33	3,40	3,00	3,57	3,33
1250	2,47	2,88	2,60	2,76	2,68
1600	2,05	2,24	2,13	2,33	2,19
2000	1,82	1,97	1,78	1,92	1,87
2500	1,96	2,13	1,96	2,04	2,02
3150	1,63	1,80	1,91	1,93	1,82
4000	1,55	1,63	1,55	1,74	1,62
5000	1,40	1,35	1,49	1,48	1,43
EZW	3,15	3,23	3,08	3,29	3,19

## A-2 Ergänzungen zu Absorbern

### Duromer-Absorber



Abbildung 21: Verschiedene Aufhängungsvarianten aixFOAM SH001HMH<sup>29</sup>

### Verbund-Platten-Resonator

Die folgende Abbildung 22 enthält mögliche Abmessungen des Renz Systeme VPRs, welche für eine genauere Planung der akustischen Verbesserung notwendig sind.

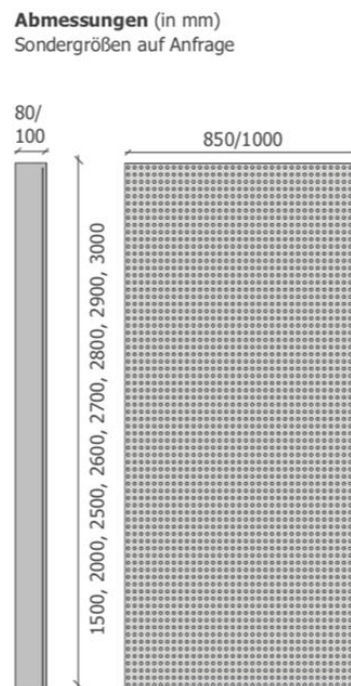


Abbildung 22: Abmessungen Renz Systeme VPR<sup>30</sup>

<sup>29</sup> [https://www.aixfoam.de/media/catalog/product//768/s/h/sh001hmh\\_weissgrau\\_5.jpg](https://www.aixfoam.de/media/catalog/product//768/s/h/sh001hmh_weissgrau_5.jpg) (24.02.19)

[https://www.aixfoam.de/media/catalog/product//768/s/h/sh010plain\\_weissgrau.jpg](https://www.aixfoam.de/media/catalog/product//768/s/h/sh010plain_weissgrau.jpg) (24.02.19)

<sup>30</sup> [http://www.renz-solutions.de/fileadmin/user\\_upload/Datenblatt\\_VPR.pdf](http://www.renz-solutions.de/fileadmin/user_upload/Datenblatt_VPR.pdf) (24.02.19)

## A-3 Abschlussbericht für die Landesmusikakademie Sachsen

Hochschule Mittweida  
Zentrum für Medien und Soziale Arbeit  
Bahnhofsstraße 15  
09648 Mittweida



**Abschlussbericht: Vorschläge zur akustischen Optimierung der Mehrzweckhalle in Colditz für die Nutzung durch die Landesmusikakademie Sachsen**

### Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung .....	2
2 Raumakustische Anforderungen .....	3
3 Vorgehensweise und verwendete Messtechnik.....	4
4 Messergebnisse .....	5
5 Vorschläge zur Verbesserung der Raumakustik .....	6
Variante 1: 96 Duromer-Absorber-Panels und 60 m <sup>2</sup> VPR.....	7
Variante 2: 128 Duromer-Absorber-Panels .....	8
Variante 3: 96 Duromer-Absorber-Panels, 40 m <sup>2</sup> VPR und 84 m <sup>2</sup> aufblasbare Absorber .....	9
Zusätzliche Bemerkungen .....	10
6 Zusammenfassung .....	11
Anhang .....	12
A-1 Messdaten.....	12
A-2 Ergänzungen zu Absorbem.....	13

## 1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Um auch großen Musiker-Ensembles einen passenden Ort mit guter Raumakustik für Proben und Aufführungen bieten zu können, soll die Mehrzweckhalle am Standort der Sophienschule Colditz akustisch optimiert werden.

Die Aufgabe der Studenten der Hochschule Mittweida war es, in der Halle die Nachhallzeit zu messen und anschließend auf Grundlage ihres Frequenzverlaufes Vorschläge zur Verbesserungen der Raumakustik zu erarbeiten.

Mit einem Raumvolumen von  $V \approx 5900 \text{ m}^3$  ist der genutzte Teil der Mehrzweckhalle mehr als achtmal größer als der Kammermusiksaal im Schloss Colditz, welcher von der Landesmusikakademie Sachsen sonst für Proben und Aufführungen von Chören und Ensembles genutzt wird.

Die Halle besitzt Betonwände, die bis zu einer Höhe von 2,5 m mit einem Gummi-Filz-Belag beklebt und darüber mit Strukturputz verkleidet sind. Mit einem Trennvorhang war zum Zeitpunkt der Messung wie auch bei musikalischen Veranstaltungen 1/3 der Halle abgetrennt und damit ungenutzt.

Die Decke ist angeschrägt und besitzt eine Kuppel aus Kunstglas im Zentrum. Ringherum ist sie mit gelochten Aluminiumschalen ausgekleidet. Außerdem führen Querbalken aus Holz unterhalb der Aluminiumschalen zur gegenüberliegenden Wand.

Der Fußboden besteht aus Hallenparkett. Es sind etwa 190 Bodenmatten vorhanden, die bei Veranstaltungen ausgelegt werden können. Sie sind 1 x 2 m groß und bestehen aus einer mit Filz beklebten Gummimatte.

Der Grundgeräuschpegel war durch die Nähe zur Straße und die geringe Schallisolierung leicht angehoben.



Abbildung 1: Hallendecke



Abbildung 2: vorhandene Bodenmatten

## 2 Raumakustische Anforderungen

Da die Nachhallzeit die wichtigste raumakustische Kenngröße ist, gibt es für sie Anforderungen in der Form von Toleranzbereichen, die an die Nutzungsart und Größe eines Raumes angepasst sind.

Sie ist als die Zeit definiert, in welcher der Schalldruckpegel nach abruptem Abschalten einer Schallquelle um 60 dB sinkt.

Die Nachhallzeit ist stark frequenzabhängig und beeinflusst das subjektive akustische Raumempfinden, Klangfarbe und Klarheit des wahrgenommenen Schalls.

Als optimale Nachhallzeit für mittlere Frequenzen von 250 Hz bis 2000 Hz bei einem Raum, in dem sinfonische Musik gespielt wird und der die Größe des verwendeten Teils der Mehrzweckhalle besitzt, konnte  $T_{opt} \approx 1,78 s$  bestimmt werden.

Das folgende Diagramm zeigt den einzuhaltenden Toleranzbereich. Dabei ist die obere Grenze blau und die untere Grenze rot dargestellt.

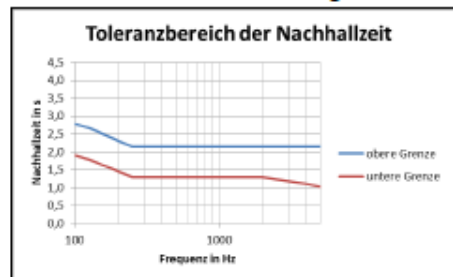


Diagramm 1: Für die Mehrzweckhalle bestimmter Toleranzbereich

Ziel der Auslegung von raumakustischen Verbesserungsmaßnahmen ist es, einen möglichst linearen bzw. ebenen Verlauf der Nachhallzeit innerhalb dieser Grenzen zu erreichen.

Die Nachhallzeit kann näherungsweise mit folgender empirisch ermittelten Formel (Nachhallzeit nach Sabine) berechnet werden:

$$T = 0,163 \frac{s}{m} \cdot \frac{V}{A}$$

Dabei entspricht  $V$  dem Raumvolumen und  $A$  der äquivalenten Absorptionsfläche, also der Fläche eines Raumes, die den Absorptionsgrad  $\alpha = 1$  besitzen muss, wenn der Rest keinerlei Absorption aufweist ( $\alpha = 0$ ) und trotzdem die gleiche gesamte Schallabsorption im Raum auftritt.

Durch das Umstellen dieser Formel kann mit gemessener Nachhallzeit und gegebenem Raumvolumen auf die vorhandene äquivalente Absorptionsfläche geschlossen werden. Im Umkehrschluss ist es auch möglich, zu bestimmen, wie viel Absorptionsfläche durch das Einbauen von zusätzlichen Absorbent für einen optimalen Nachhallzeitverlauf in den Raum eingebracht werden muss.

### 3 Vorgehensweise und verwendete Messtechnik

Gemessen wurde am 12. Dezember 2018 mit dem Verfahren des abgeschalteten Rauschens nach der DIN EN ISO 3382-1.

Die gesamte verwendete Messtechnik stellte die Hochschule Mittweida, unter anderem zwei NTi Audio XL2 Messgeräte, ein Dodekaeder als ungerichtete Schallquelle und ein NTi Audio Minirator MR-PRO als Rauschgenerator für das verwendete neun Sekunden lange rosa Rauschen.

Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurde sowohl zeitlich über drei Durchgänge als auch räumlich über vier Empfangs- sowie zwei Sendepositionen gemittelt, deren Verteilung der Abbildung 3 entnommen werden kann.

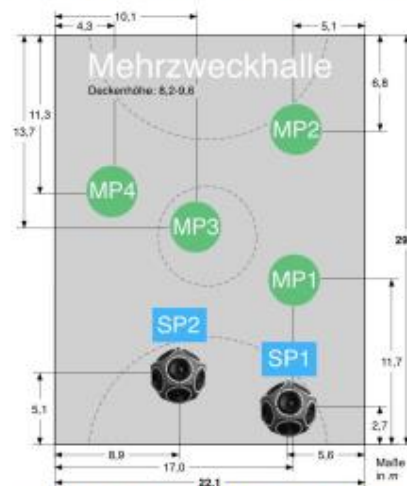


Abbildung 3: Sende- und Empfangspositionen

Die Messung wurde im unbesetzten, unbestuhlten Zustand durchgeführt. Nur die drei Studenten, welche die Technik bedienten, waren im Raum anwesend. Die Absorption durch größeres Publikum in der Halle konnte nachträglich mit Angaben aus der DIN 18041 einbezogen werden.

Die zugänglichen Gerätekammern blieben offen, da diese bei Veranstaltungen verwendet werden, um Buffets aufzustellen und Zugang zu Steckdosen zu gewährleisten.



Abbildung 4: Dodekaeder vorm Trennvorhang



#### 4 Messergebnisse

Bei einer Raumtemperatur von 21,3°C und 41 % relativer Luftfeuchte konnten folgende Nachhallzeitverläufe über die Terzbänder von  $f_m = 100$  Hz bis  $f_m = 5000$  Hz ohne und mit 55 ausgelegten Bodenmatten ermittelt werden:

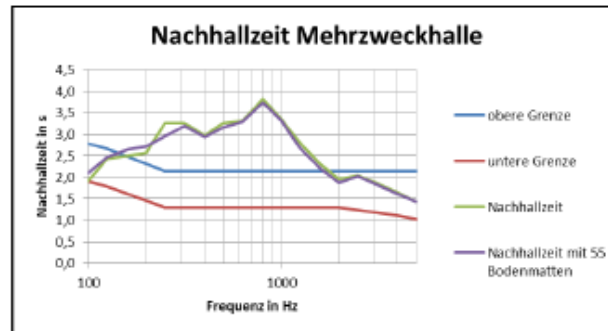


Diagramm 2: Ermittelte Nachhallzeitverläufe

Der Einzahlwert, welcher nach DIN EN ISO 3382-1 durch Mittelung der Terzen von  $f_m = 400 \dots 1250$  Hz gebildet wird, betrug bei der Messung ohne Bodenmatten  $T_{EZW} = 3,25$  s. Wie in Diagramm 2 zu erkennen, haben die ausgelegten Bodenmatten keinen nennenswerten Einfluss auf die Nachhallzeit. Auch würden die vorhandenen rund 190 Stück nicht ausreichen, um den ganzen genutzten Hallenboden auszulegen. Dafür wären 319 Matten erforderlich.

Um das bei Veranstaltungen anwesende Publikum zu berücksichtigen, wurde die Publikumsabsorption von 200 Personen nach DIN 18041 einbezogen. Da dort nur Absorptionswerte für Oktavbänder gegeben sind, mussten zuvor jeweils die Nachhallzeitwerte von drei Terzen zu einer Oktave zusammengefasst (arithmetisch gemittelt) werden.

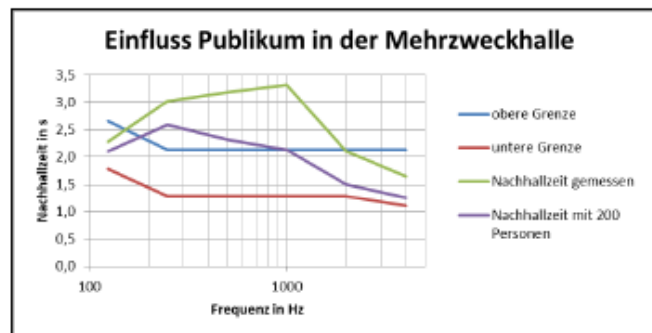


Diagramm 3: Gemessene Nachhallzeit mit Publikumsabsorption

Das Diagramm 3 zeigt, dass zusätzliche Absorptionsfläche im Bereich von  $f_m = 250 \dots 1000$  Hz eingebracht werden muss.

### 5 Vorschläge zur Verbesserung der Raumakustik

Da der Toleranzbereich im hochfrequenten bereits eingehalten wird, müssen Absorber ausgewählt werden, die vor allem im Bereich von  $f_m = 250$  Hz bis  $f_m = 1000$  Hz wirksam sind.

Zusätzlich müssen die Absorber prallsicher sein, wenn sie fest in der Halle installiert werden sollen.

Folgende Absorberarten und -modelle wurden ausgewählt und mit ihnen drei unterschiedliche Varianten erarbeitet<sup>1</sup>:

- (poröse) Duromer-Absorber – aixFOAM SH001HMH, weißgrau
- Verbund-Platten-Resonatoren (VPR) - Renz Systeme VPR
- Aufblasbare Absorber – Flex Acoustics aQflex



Abbildung 5: Duromer-Absorber - aixFOAM SH001HMH, vertikal, weißgrau

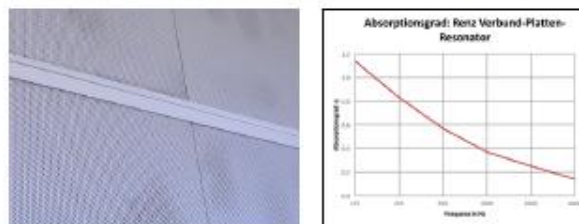


Abbildung 6: Verbund-Platten-Resonator - Renz Systeme VPR

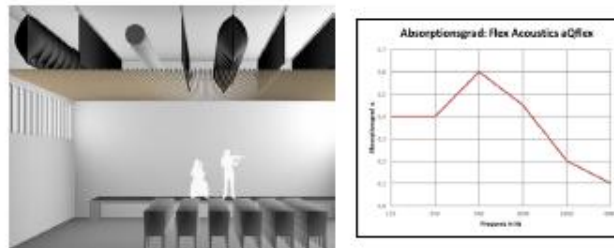


Abbildung 7: Aufblasbare Absorber - Flex Acoustics aQflex

<sup>1</sup> alle Bilder und Absorptionsgrade wurden den jeweiligen Herstellerinformationen entnommen, bis auf Abbildung 6 (Bild): faist.de/wp-content/uploads/2016/10/schallabsorber\_01.jpg (24.02.19)

### Variante 1: 96 Duromer-Absorber-Panels und 60 m<sup>2</sup> VPR

Bei dieser Variante werden die Duromer-Absorber-Panels genutzt, um die Nachhallzeit generell und die VPR, um sie speziell im tieffrequenten Bereich noch etwas stärker zu senken.

Bei einer Panelgröße von  $l \times h \times b = 1,2 \times 0,6 \times 0,1$  m ergeben sich 6 Reihen mit jeweils 16 Elementen auf der kürzeren Hallenseite.

Von den VPR werden 24 Elemente mit einer Größe von  $l \times h \times b = 2,5 \times 1,0 \times 0,1$  m benötigt. Diese sollten nach Möglichkeit in den Ecken der Halle positioniert werden, um die Wände als Schalleitende Flächen frei zu halten.

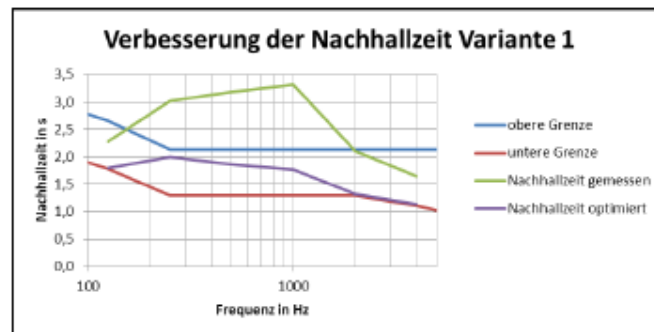


Diagramm 4: Nachhallzeit mit 200 Personen, 96 Duromer-Absorber-Panels und 60m<sup>2</sup> VPR

Diagramm 4 zeigt das zu erwartende Ergebnis dieser Verbesserungsvariante. Dabei wurde bereits die Absorption von 200 anwesenden Personen (Musiker und Publikum) mit einbezogen.

Die Nachhallzeit liegt über den gesamten Frequenzbereich in den geforderten Grenzen für musikalische Aufführungsräume und ihr Verlauf ist zugleich für eine Halle dieser Größe relativ linear, auch wenn sich die Nachhallzeit der unteren Grenze oberhalb von  $f_m = 2000$  Hz stark annähert.

Der Einzahlwert kann durch Umsetzung der Variante 1 von  $T_{EZW} = 3,25$  s auf  $T_{EZW,opt} = 1,82$  s gesenkt werden, was ausreichend nah an  $T_{opt} \approx 1,78$  s (siehe Kapitel 2) herankommt.

Die Materialkosten für diese Art der Umsetzung bewegen sich im Rahmen von ca. 16.700 € exklusive der Einbaukosten.

Sie setzen sich zusammen aus ca. 6.500 € für die Duromer-Absorber-Panels (inklusive Aufhängung) und ca. 10.200 € für 60 m<sup>2</sup> Verbund-Platten-Resonatoren.

### Variante 2: 128 Duromer-Absorber-Panels

Beim Erarbeiten der zweiten Variante wurde besonders auf das Preis-Leistungsverhältnis geachtet und so eine möglichst kostengünstige Variante mit akzeptablem resultierendem Nachhallzeitverlauf erstellt.

Dabei wurde die Entscheidung getroffen, nur eine Absorberart, nämlich die Duromer-Absorber-Panels von aixFOAM zu verwenden.

Mit  $l \times h \times b = 1,2 \times 0,6 \times 0,1$  m ergeben sich hierbei mit 128 Elementen 8 Reihen mit jeweils 16 Panels auf der kürzeren Hallenseite.

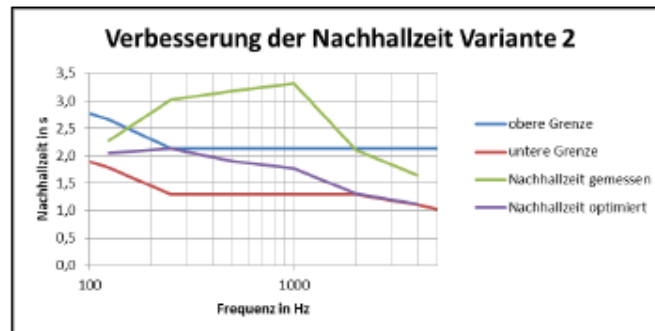


Diagramm 5: Nachhallzeit mit 200 Personen und 128 Duromer-Absorber-Panels

Auch in diesem Fall wird der Toleranzbereich eingehalten, jedoch zeigt das Diagramm 5 deutlich, dass der Nachhallzeitverlauf aufgrund der fehlenden zusätzlichen Absorption im tieffrequenten Bereich durch die Verbund-Platten-Resonatoren insgesamt nicht so linear ist wie im Diagramm 4.

Der Einzahlwert kann durch Umsetzung der Variante 2 von  $T_{EZW} = 3,25$  s auf  $T_{EZW,opt} = 1,84$  s gesenkt werden, was ebenfalls ausreichend nah an  $T_{opt} \approx 1,78$  s (siehe Kapitel 2) herankommt.

Die reinen Materialkosten (inkl. Aufhängung) belaufen sich für diesen Fall auf ca. 8.000 €.

### Variante 3: 96 Duromer-Absorber-Panels, 40 m<sup>2</sup> VPR und 84 m<sup>2</sup> aufblasbare Absorber

Um dem eventuellen Wunsch nach einer variablen Raumakustik, wie sie in den genutzten Räumen des Schlosses Colditz vorhanden ist, gerecht zu werden, beinhalten diese dritte Variante neben den bereits erwähnten Duromer-Absorbem und Verbund-Platten-Resonatoren auch aufblasbare Absorber.

Konkret beinhaltet das Konzept 96 Duromer-Absorber-Panels in Form von 6 Reihen mit je 16 Panels ( $l \times h \times b = 1,2 \times 0,6 \times 0,1$  m; auf der kürzeren Hallenseite), 40 m<sup>2</sup> VPR in Form von 16 Elementen ( $l \times h \times b = 2,5 \times 1,0 \times 0,1$  m; möglichst in den Hallenecken angebracht) und 84 m<sup>2</sup> aufblasbare Absorber (aQflex), was 10 Reihen mit je 21 m Länge auf der kürzeren Hallenseite entspricht.

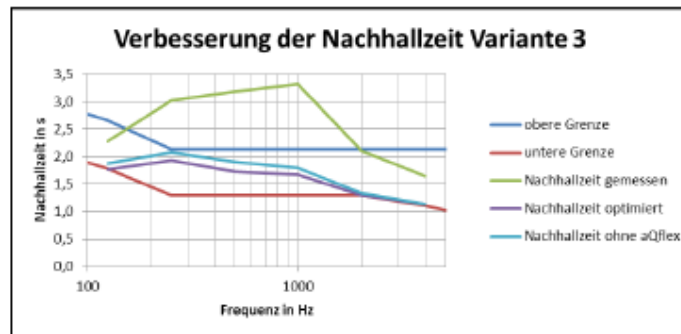


Diagramm 6: Nachhallzeit mit 200 Personen, 96 Duromer-Absorber-Panels, 40m<sup>2</sup> VPR und 84m<sup>2</sup> aufblasbare Absorber aQflex

Wie in Diagramm 6 zu erkennen ist, kann der Einsatz von aQflex die Nachhallzeit im Frequenzbereich von  $f_m = 125$  Hz bis  $f_m = 1000$  Hz zusätzlich um  $\approx 0,2$  s senken oder erhöhen.

So kann der Nachhallzeitverlauf auf Wunsch noch flexibler gestaltet werden (lila und hellblaue Kurve).

Der Einzahlwert kann durch Umsetzung der Variante 3 von  $T_{EZW} = 3,25$  s auf  $T_{EZW,opt} = 1,71$  s bzw.  $T_{EZW,opt} = 1,85$  s gesenkt werden, der einstellbare Bereich deckt somit  $T_{opt} \approx 1,78$  s (siehe Kapitel 2) gut ab und lässt in beide Richtungen noch Platz.

Der Gesamtpreis der Materialien (ohne Einbau) beträgt hier ca. 68.300€, bestehend aus rund 6.500 € für die Duromer-Absorber, 6.800 € für die Verbund-Platten-Resonatoren und 55.000 € für die aufblasbaren Absorber.

Somit ist diese Variante wesentlich kostenintensiver als die beiden anderen.

Hochschule Mittweida

10

Landesmusikakademie Sachsen

**Zusätzliche Bemerkungen**

Es lässt sich allgemein festhalten, dass bei allen drei Varianten im Hochtonbereich eine Annäherung an die untere Grenze der empfohlenen Nachhallzeiten für Aufführungsräume stattfindet. Dies scheint, allein aufgrund der Publikumsabsorption, jedoch nahezu unvermeidlich (vgl. Diagramm 3).

Da außerdem für den konkreten Fall weiterhin eine Mehrzwecknutzung vorgesehen ist, ist der ermittelte Nachhallzeitverlauf im tolerablen Bereich, da sich in Bezug auf die Sprachverständlichkeit vor Allem eine zu lange Nachhallzeit negativ auswirken würde.

Zusätzlich zum Einbau von Absorbem wird grundsätzlich empfohlen, das Orchester von der jetzigen Position an der teilweise offenen Hallentrennwand auf die gegenüberliegende Seite der Halle zu verlagern. So würde keine unnötige Leistung an das Volumen auf der anderen Seite der Trennwand abgegeben werden und damit verloren gehen.

## 6 Zusammenfassung

Zur Bestimmung des Nachhallzeitverlaufs in der Mehrzweckhalle in Colditz wurden am 12. Dezember 2018 von Studenten der Hochschule Mittweida Messungen nach DIN EN ISO 3382-1 durchgeführt.

Dabei kam das Verfahren mit abgeschaltetem rosa Rauschen zum Einsatz. Gemittelt wurde zeitlich und räumlich über 8 unabhängige Messpunkte (2 Sende- und 4 Empfangspositionen).

Nachträglich konnte die Publikumsabsorption nach DIN 18041 für 200 Personen (Musiker und Publikum) in die Ergebnisse eingerechnet werden.

Dieser Abschlussbericht enthält die Beschreibung dreier Varianten, wie die Nachhallzeit und damit die Raumakustik der Mehrzweckhalle für die Nutzung als Probe- und Aufführungsraum durch die Landesmusikakademie Sachsen optimiert werden kann.

Bei allen beschriebenen Varianten wird der zuvor definierte Toleranzbereich eingehalten, auch wenn im Hochtonbereich eine Annäherung an die untere Grenze der empfohlenen Nachhallzeiten für Aufführungsräume stattfindet.

Variante 1 konzentriert sich auf einen möglichst linearen Frequenzverlauf der Nachhallzeit, Variante 2 auf möglichst geringe Materialkosten und Variante 3 auf die Umsetzung einer variablen Raumakustik, welche wesentlich kostenintensiver ausfällt als die beiden zuerst genannten.

Mittweida, den 27. Februar, 2019

A. Hofmann, K. Peschke, M. Reuter

Hochschule Mittweida

12

Landesmusikakademie Sachsen

**Anhang****A-1 Messdaten**

Ort: Sophienschule Colditz  
Schulstraße 12  
04680 Colditz

Datum: 12. Dezember 2018

Raumtemperatur: 21,3°C

Relative Luftfeuchte: 41 %

Raumvolumen: 5904,8 m<sup>3</sup>

$f_m$ in Hz	T in s, Terzbänder, gemittelt	
	ohne Bodenmatten	mit 55 Bodenmatten
100	1,91	2,10
125	2,43	2,47
160	2,49	2,64
200	2,56	2,71
250	3,26	2,96
315	3,26	3,20
400	2,98	2,93
500	3,26	3,16
630	3,30	3,30
800	3,82	3,73
1000	3,36	3,33
1250	2,80	2,68
1600	2,29	2,19
2000	1,96	1,87
2500	2,05	2,02
3150	1,85	1,82
4000	1,66	1,62
5000	1,44	1,43
EZW	3,25	3,19

$f_m$ in Hz	T in s, Oktavbänder					
	gemessen	mit Publikum	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 3 ohne aQflex
125	2,28	2,11	1,80	2,05	1,77	1,88
250	3,03	2,60	2,00	2,13	1,93	2,07
500	3,18	2,32	1,86	1,90	1,73	1,90
1000	3,32	2,13	1,78	1,77	1,68	1,80
2000	2,10	1,50	1,32	1,30	1,30	1,33
4000	1,65	1,25	1,14	1,12	1,13	1,14
EZW	3,25	2,22	1,82	1,84	1,71	1,85



## A-2 Ergänzungen zu Absorbern

### Duromer-Absorber



Abbildung 8: Verschiedene Aufhängungsvarianten aixFOAM SH001HMH<sup>2</sup>

### Verbund-Platten-Resonator

Die folgende Abbildung 9 enthält mögliche Abmessungen des Renz Systeme VPRs, welche für eine genauere Planung der akustischen Verbesserung notwendig sind.

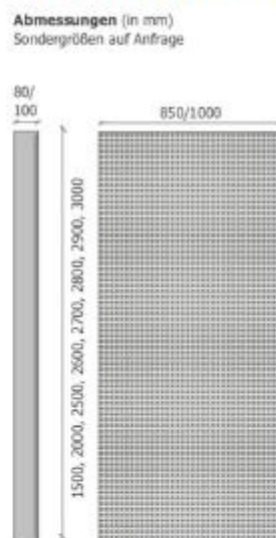


Abbildung 9: Abmessungen Renz Systeme VPR<sup>3</sup>

<sup>2</sup> [https://www.aixfoam.de/media/catalog/product/768/s/h/sh001hnh\\_weissgrau\\_5.jpg](https://www.aixfoam.de/media/catalog/product/768/s/h/sh001hnh_weissgrau_5.jpg) (24.02.19)

[https://www.aixfoam.de/media/catalog/product/768/s/h/sh010plain\\_weissgrau.jpg](https://www.aixfoam.de/media/catalog/product/768/s/h/sh010plain_weissgrau.jpg) (24.02.19)

<sup>3</sup> [http://www.renz-solutions.de/fileadmin/user\\_upload/Datenblatt\\_VPR.pdf](http://www.renz-solutions.de/fileadmin/user_upload/Datenblatt_VPR.pdf) (24.02.19)

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18041 (2016): Hörsamkeit in Räumen. Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung.
- [2] DIN EN ISO 3382-1 (2009): Akustik. Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 1: Aufführungsräume.
- [3] EDERER, H.-J. (2010): Schloss Colditz/Marstall – Sächsische Landesmusikakademie. Aktennotiz Nr.: ABD 2752-16/10: Akustische Abnahmemessungen. Dresden: Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH.
- [4] FASOLD, W.; KRAAK, W.; SCHIRMER, W. (1984): Taschenbuch Akustik. Teil 2, Berlin: VEB Verlag Technik.
- [5] FASOLD, W. & VERES, E. (1998): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen, Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH.

# **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt haben. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 27. Februar 2019

Anja Hofmann, Konrad Peschke, Martin Reuter