



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## DIPLOMARBEIT

### Anwendung eines Simulationsmodells zur raumakustischen Verbesserung einer Musikschule

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

**Associate Prof. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn.**

**Matthias Wilhelm Schuß**

E 259/3 Forschungsbereich für Bauphysik und Bauökologie  
Institut für Architekturwissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Wien**

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

**Lorenz Thaddäus Schreiner**

Matrikelnr.: 00825950

Wien, Mai 2023

# ABSTRAKT

Die vorliegende Fallstudie ist eine Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse von Nachhallzeitmessungen und den Simulationsergebnissen der Auralisationssoftware Odeon. Die Messungen fanden in einer Musikschule statt, die vier unterschiedlich dimensionierte Unterrichtsräume bzw. Veranstaltungsräume betreibt. Ein virtuelles Raummodell wurde erstellt und konnte dank der großen Materialdatenbank der Software Odeon mit passenden Oberflächenmaterialien versehen und berechnet werden. Aufgrund der ersten Simulationen wurde klar, dass teilweise deutliche Anpassungen notwendig waren, um den Messergebnissen näher zu kommen. Die Anpassungen bzw. Kalibrierungsschritte wurden genau dokumentiert und konnten durch die vier verschiedenen gemessenen Räume überprüft werden. Mit Hilfe der kalibrierten Simulationen konnten Vorschläge zur akustischen Verbesserung der Räume nach den Standards der ÖNORM B3822 erarbeitet werden.

Schlagwörter: Raumakustik, Musikschule, Nachhallzeit, ODEON, Kalibrierung

The present case study is a comparison and analysis of the results of the reverberation time measurements and the simulation results of the auralisation software Odeon. The measurements took place in a music school that operates four differently sized rehearsal and event rooms. A virtual room model was calculated with suitable surface materials, thanks to the large material database of Odeon. Based on the first simulations it became clear that in some cases significant adjustments were necessary to get closer to the measurement results. The adjustments and calibration steps were precisely documented and were cross-checked through the four different measured rooms. With the calibrated room simulations, it was possible to develop proposals for the acoustic improvement of the rooms according to the standards of ÖNORM B3822.

Tags: Room acoustics, music school, reverberation time, ODEON, calibration

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung .....	1
1.1	Überblick .....	1
1.2	Motivation .....	2
1.3	Grundlagen.....	3
1.3.1	Nachhallzeit.....	4
1.3.2	Schalldruck und Schallausbreitung .....	5
1.3.3	Schröder-Frequenz .....	6
1.3.4	Raumresonanzen (Raummoden bzw. stehende Wellen).....	7
1.3.5	Absorption .....	9
1.3.6	Raumakustik in Räumen für Musik.....	20
2	Methode .....	24
2.1	Überblick .....	24
2.2	Beschreibung der Musikschule .....	26
2.3	Auswertung der Fragebögen.....	31
3	Messung der Nachhallzeit.....	35
3.1	Das Equipment für die Messung der Nachhallzeit .....	37
3.2	Die Ergebnisse der Nachhallzeitmessung.....	37
4	Simulation .....	40
4.1	Simulationswerkzeuge .....	40
4.2	3D-Modell und Import.....	40
4.3	Kalibration und Simulationsergebnisse .....	41
4.4	Simulierte Maßnahmen der akustischen Verbesserung.....	54
5	Diskussion.....	62

5.1	Die Kalibration der Simulation .....	62
5.2	Die Simulation der Verbesserungsmaßnahmen.....	63
6	Schlussfolgerung .....	65
7	Verzeichnis .....	66
7.1	Abbildungsverzeichnis.....	66
7.2	Tabellenverzeichnis.....	69
7.3	Formelverzeichnis .....	70
8	Literatur.....	71
	Anhang.....	74

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Überblick

Die vorliegende Arbeit ist in 6 Kapitel unterteilt.

Im 1. Kapitel werden raumakustische Themen beleuchtet, insbesondere die verschiedenen technischen Möglichkeiten die Raumakustik zu verändern, und die Besonderheiten für Räumlichkeiten in denen musiziert wird.

Das 2. Kapitel gibt einen Überblick der Vorgangsweisen der wissenschaftlichen Arbeit, dokumentiert die relevanten Räume der Musikschule und präsentiert die Ergebnisse der Fragebögen.

Im Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Nachhallzeitmessungen präsentiert und die Messungsbedingungen dargestellt.

Das Kapitel 4 beschreibt den Vorgang der Anpassung bzw. Kalibrierung des Simulationsmodells auf Basis der Nachhallzeitmessungen. Das kalibrierte Simulationsmodell diente in weiterer Folge als Basis für die Simulation von raumakustischen Verbesserungsmöglichkeiten. Diese Simulationen wurden durch das Programm Odeon 11.0 berechnet.

Kapitel 5 diskutiert die Ergebnisse der Anpassung der Simulation und die Verbesserungsmöglichkeiten.

Im Kapitel 6 werden Schlussfolgerungen präsentiert und die Vorschläge zusammengefasst dargestellt.

## 1.2 Motivation

Die Möglichkeit Räume auch akustisch zu gestalten ist faszinierend. Dieser Gestaltungsaspekt wird leider trotzdem sehr häufig von Auftraggebern und Planern übersehen. Der Klang eines Raumes kann sehr entscheidend sein, wie ein Raum empfunden wird und wie gut er genutzt werden kann. Das Wissen über Raumakustik ist seit der ersten Definition der Nachhallzeit durch Wallace Clement Sabine im Jahr 1900 deutlich gewachsen. Mittlerweile kann durch computerbasierte Simulationen die Ausbreitung von Schall in geschlossenen Räumen dargestellt und die Berechnung unterschiedlicher akustischer Parameter ermöglicht werden.

Das eröffnet neue Chancen die Planung der Raumakustik möglichst früh in die gesamte Gebäudeplanung einzubinden. Die im Vergleich relativ hohen Mehrkosten für nachträgliche Adaptionen könnten vermieden werden. Außerdem ergeben sich auch viele Möglichkeiten die raumakustisch wirksamen Elemente in die Innenraumgestaltung zu integrieren.

In den meisten Fällen wird aber erst nachträglich wegen Beschwerden gehandelt die beim Arbeiten, Lernen, oder Musikzieren auftreten. Auch im Fall von nachträglichen Adaptionen können Auswirkungen von verschiedenen raumakustischen Verbesserungen mittels computerbasierter Simulationen dargestellt und berechnet werden. Dadurch wird eine relativ genaue Abschätzung der neuen Klangeigenschaften eines Raumes ermöglicht.

In diesem Zusammenhang verglich die folgende Forschungsarbeit die in-situ Nachhallzeitmessungen nach ÖNORM EN ISO 3382-2 mit den akustischen Simulationen durch das Akustikprogramm Odeon. Mit Hilfe der kalibrierten Simulationen wurden akustische Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet.

## 1.3 Grundlagen

Die drei Hauptbereiche der Raumakustik sind die *wellentheoretische*, die *geometrische* und die *statistische Raumakustik*.

Die *wellentheoretische Raumakustik* begründet sich auf Wellengleichungen und wird insbesondere zur Ermittlung von Eigenresonanzen von Räumen herangezogen deren Dimensionen ungefähr gleich der Wellenlängen sind, und unterhalb der volumen-abhängigen Grenzfrequenz bzw. Schröder-Frequenz (Kapitel 1.3.3) liegen. (Newell P., 2012)

Die *geometrische Raumakustik* vereinfacht Schallwellen zu Strahlen, wie auf Abbildung 1 zu sehen ist. An den Reflexionsflächen sorgt die frequenzabhängige Absorption oder Streuung durch das Oberflächenmaterial zur Reduktion der Schallenergie und einer Veränderung der Abstrahlrichtung. Diese Methode ist meistens nur für mittlere bis hohe Frequenzen einsetzbar, weil Wellenlängen kürzer sein müssen als die Abmessungen der Reflexionsflächen und die Raumdimensionen oberhalb der Grenzfrequenz (Schröder-Frequenz, Kapitel 1.3.3) liegen.

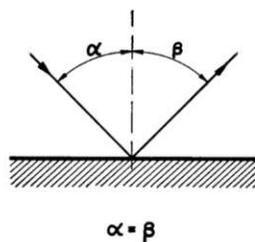


Abbildung 1 Reflexionsgesetz der geometrischen Akustik (Furrer u. Lauber 1972)

Durch die Vielzahl von Reflexionen entsteht bei höheren Frequenzen ein diffuses Schallfeld, in dem die Schallenergie im Raum gleich verteilt ist. Der Direktschall überlagert sich mit dem diffusen Schallfeld und erzeugt den Nachhall eines Raumes (siehe Kapitel 1.3.2.). Die Berechnung der Nachhallzeit wird durch die *statistische Raumakustik* möglich (Siehe Kapitel 1.3.1). (Lerch R. et. al 2009)

### 1.3.1 Nachhallzeit

Einer der wichtigsten Parameter der akustischen Eigenschaften eines Raumes ist die Nachhallzeit. Sie wurde erstmals im Jahr 1900 durch unzählige empirische Versuche von Wallace Clement Sabine definiert. (Sabine 1927) Die Nachhallzeit ist immer noch der am häufigsten verwendete Parameter, um akustische Voraussagen eines Raumes zu berechnen. Auch im Fall dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Nachhallzeit.

Die Nachhallzeit  $[T_{60}]$  ist die Zeit, in der ein Schallimpuls auf minus 60dB abklingt und somit für das menschliche Gehör nicht mehr wahrnehmbar ist (siehe Abbildung 2). Die Berechnung (Formel 1) ist Teil der statistischen Raumakustik, dafür wird das Raumvolumen in Relation zu allen Absorptionsflächen gestellt und mit einem definierten Faktor multipliziert. (Fasold u. Veres 2003)

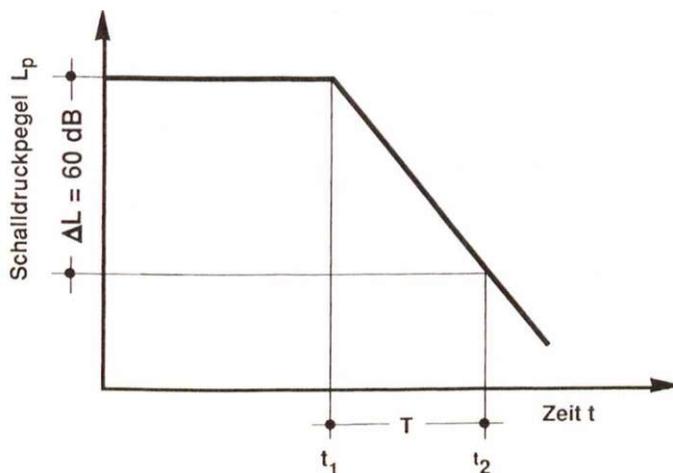


Abbildung 2 Nachhallvorgang für Schalldruck  $L_p$  (Fasold u. Veres 2003)

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A} [s] \quad (1)$$

$$V = \text{Raumvolumen} [m^3]$$

$$A = \text{Absorptionsfläche} [m^2]$$



### 1.3.3 Schröder-Frequenz

Für welche Frequenzbereiche die Anwendung der wellentheoretischen oder der geometrischen Raumakustik sinnvoll ist, kann durch die Schröder-Frequenz eingegrenzt werden. (Newell 2012)

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

$$f_s = \text{Schröder Frequenz [Hz]}$$

$$T = \text{Nachhallzeit [s]}$$

$$V = \text{Raumvolumen [m}^3\text{]}$$

Das Ergebnis (Formel 3) ist eine genaue Frequenz, die aber in der Praxis eher als fließender Übergang verstanden werden sollte. Die Betrachtung der Schallausbreitung unterhalb der Schröder Frequenz wird mit dem wellentheoretischen Modell beschrieben. Die in-situ gemessenen und die berechneten Werte der Nachhallzeit nach Wallace Clement Sabine sind in diesem Frequenzbereich nicht genau genug und müssen daher tolerant interpretiert werden. (Cox T.J. u. D'Antonio P. 2009)

### 1.3.4 Raumresonanzen (Raummoden bzw. stehende Wellen)

In einem geschlossenen Raum entstehen immer Raumresonanzen, die vom Abstand der Begrenzungsflächen des Raumes abhängig sind. Raummoden bzw. stehende Wellen betreffen Frequenzen unterhalb der Schröder-Frequenz. Daher sind Räume mit kleinem Volumen problematischer, weil die unangenehmen akustischen Effekte (punktuelle Schallpegeldifferenzen) der Raummoden auf höheren Frequenzen hörbar werden und damit meist lauter wahrgenommen werden.

Störend werden hauptsächlich einzelne stehende Wellen empfunden, die ein Dröhnen in einem einzelnen Frequenzbereich hörbar machen. Frequenzmäßig sehr nahe beieinander auftretende Moden werden als charakteristischer Nachhall eines Raumes wahrgenommen bzw. erzeugen eine längere Nachhallzeit in einem bestimmten Frequenzspektrum. Je nach Raumnutzung sollten Raummoden, die zu lange Nachhallzeiten erzeugen, absorbiert werden. In sehr großen Räumen entstehen erst bei deutlich tieferen Frequenzen stehende Wellen und können daher außerhalb des hörbaren Bereichs bleiben oder sehr schwach wahrnehmbar sein.

Bei der Reflektion einer Schallwelle, mit einer Wellenlänge die genau halb so lang wie der Abstand der schallharten Begrenzungsflächen ist  $[\lambda/2]$ , ergibt sich eine stehende Welle. Darüber hinaus entstehen auch durch das ganzzahlige und ungerade Vielfache von  $[\lambda/2]$  und  $[\lambda/4]$  Raumresonanzen (Fasold u. Veres 2003). Abbildung 4 stellt die weiteren Ordnungen der stehenden Wellen zwischen zwei parallelen Begrenzungsflächen dar.



Abbildung 4 Axiale Moden 1. bis 3. Ordnung (Fasold u. Veres 2003)

Zusätzlich zu axialen Moden zw. gegenüberliegenden Begrenzungsflächen, treten in rechteckigen Räumen zwischen gegenüberliegenden Raumkanten tangentiale Moden und diagonale bzw. oblique Moden zwischen allen Hauptdiagonalen auf (Abbildung 5). Je nach Raumgeometrie kommt es daher zu unzähligen stärkeren und schwächeren Moden.

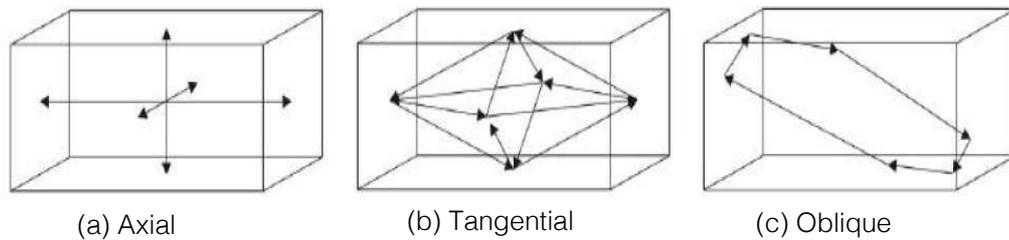


Abbildung 5 Raummoden (Newell 2012)

Die Schallenergie vieler verschiedener stehender Wellen bzw. Raummoden sammelt sich in den Raumkanten (Newell 2012). Der Schalldruckpegel ist dadurch nicht an allen Positionen im Raum gleich. Auf Abbildung 6 ist die Schalldruckverteilung bei Tangentialmoden grafisch dargestellt und zeigt deutlich die Druckmaxima (1 od. -1) und die Nullstellen (0).

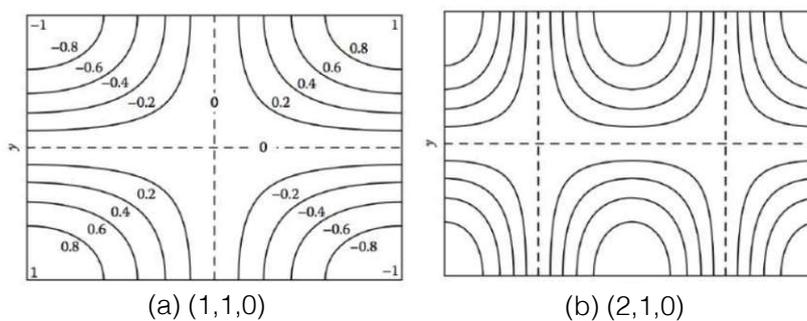


Abbildung 6 Schalldruckverteilung bei Tangentialmoden für  $(n_x, n_y, n_z)$  (Kleiner u. Tichy 2014)

Die Pegelanhebungen gehen hauptsächlich von axialen Moden aus, sie sind zwei Mal energiereicher als tangentiale Moden und vier Mal energiereicher als oblique Moden. (Kleiner u. Tichy 2014)

In dieser Arbeit werden die Raummoden nicht berechnet, da der Fokus auf der Simulation und Gegenüberstellung der in-situ Messung liegt. Die Ungenauigkeiten der Nachhallzeit im Bassbereich werden dadurch verständlicher.

### 1.3.5 Absorption

Absorption entsteht durch die Umwandlung von Energie durch ein Medium. **Luft** reduziert einen Teil der Schallenergie durch Reibung, je nach Luftfeuchtigkeit und Temperatur und wandelt sie in Wärme um. Für die praktische Anwendung kann eine Reduktion der Schallenergie von ca. 2 dB/km bei 1000 Hz angenommen werden. Luft absorbiert aber nicht alle Frequenzen gleichmäßig. Die Absorptionsfähigkeit des Mediums Luft steigt mit der Frequenz zum Quadrat an. Daher werden in sehr großer Entfernung hauptsächlich tiefe Frequenzen einer Schallquelle wahrgenommen. (ArAc-Multibook of Architectural Acoustics 2015)

Die Absorption durch **Oberflächenmaterialien** funktioniert ebenfalls durch Reibung, wenn eine Schallwelle auf das Material trifft und sie durchdringt. Dabei gilt: Je größer die Reibungsoberfläche für eine durchdringende Schallwelle ist, desto besser wird sie absorbiert. Die Effektivität der Absorptionsmaterialien wird vom längenspezifischen Strömungswiderstand (Reibung) entscheidend beeinflusst. (Fuchs 2017)

Der Wandabstand des Absorptionsmaterials vor einer schallharten Oberfläche hat einen weiteren Einfluss auf dessen Effektivität. Die optimale Absorberschichtdicke ist abhängig von der gewählten tiefsten Frequenz, die absorbiert werden soll. Auf Abbildung 7 ist zu sehen, dass der optimale Wandabstand für poröse Absorber ein Viertel der längsten zu absorbierender Wellenlänge beträgt, weil bei diesem Abstand die maximale Schallschnelle auftritt. (Fasold u. Veres 2003)

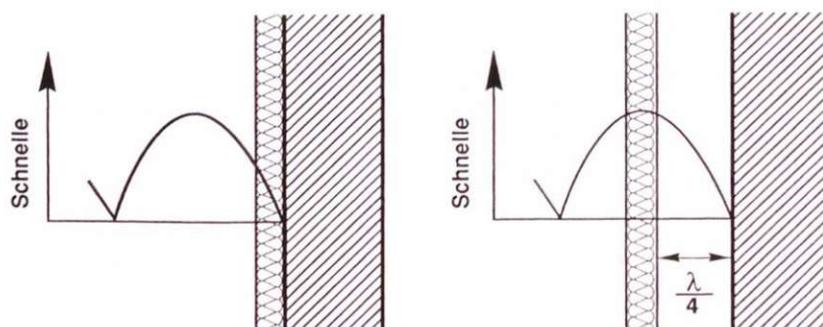


Abbildung 7 Zur Erhöhung der Wirksamkeit poröser Absorber durch deren Anordnung im Schnellemaximum (Fasold u. Veres 2003)

Wie auf Abbildung 8 zu sehen ist, treten rechnerisch (rote Line) bei einer dünnen Schichtdicke (z.B.: Vorhang) und weitem Abstand zur schallharten Oberfläche regelmäßige Einbrüche im Frequenzspektrum der Absorber auf. In der praktischen Anwendung ist dieser Effekt vernachlässigbar und hauptsächlich bei glatt hängenden Vorhängen oder Textilien ausschlaggebend. Daher ist es von Vorteil Vorhänge gewellt aufzuhängen. (Eggenschweiler 2016)

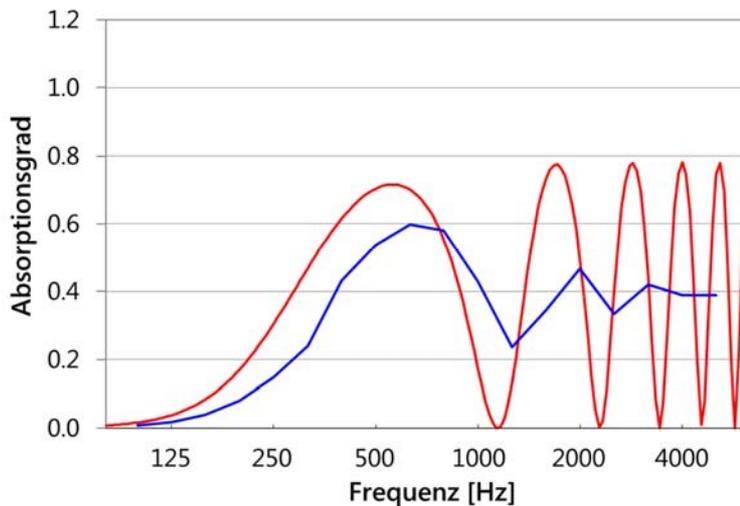


Abbildung 8 Gerade hängender Flächenvorhang vor schallhartem Abschluss (Rot, berechnete Absorption, Blau im Hallraum gemessene Absorption) Wandabstand 150mm Flächengewicht 100 g/m<sup>2</sup> Spezifischer Strömungswiderstand: 150 Pa s/m (Eggenschweiler 2016)

Poröse und offenporige Materialien wie Glaswolle, Steinwolle, Melaminharzschaum oder extrudierte Polymere eignen sich sehr gut als Absorptionsmaterial, aber auch Textilien, wie schwere Vorhänge oder spezielle Vorhänge mit mikroperforierten Folieneinlagen.

Das Publikum, als ein besonderes „Oberflächenmaterial“ bzw. poröser Absorber, muss immer bei der Berechnung der Nachhallzeit berücksichtigt werden. Alle oben erwähnten Absorber-Materialien folgen dem Prinzip der Reibung.

Der strömungsspezifische Längenwiderstand eines porösen Absorbers ist immer der entscheidende Faktor für dessen Effektivität. Hohe Frequenzen können mit einem hohen Strömungswiderstand absorbiert werden, wie zum Beispiel mit dichtem Filz. Tiefe Frequenzen benötigen auf Grund der Wellenlänge eher niedrige Strömungswiderstände, um tief in den porösen Absorber eindringen zu können. Andererseits kann sich ein schwerer dichter Vorhang im tiefen Frequenzspektrum ähnlich wie ein Membranabsorber verhalten.

Ein anderes Wirkprinzip machen sich **Membranabsorber** oder **Plattenresonatoren** zu Gute, das sogenannte Masse-Feder-System. Meistens wird diese Art von Absorber für tiefen Frequenzen eingesetzt, hohe Frequenzen werden nahezu vollständig reflektiert. Dabei wird die auftreffende Schallenergie im Bereich der Eigenfrequenz der Platte am stärksten absorbiert bzw. in Bewegung umgewandelt. Die Platte beginnt zu schwingen und entzieht dadurch dem Raum Schallenergie. Die Feder stellt die dahinterliegende abgeschlossene Luftschicht dar. Um die Absorptionsfähigkeit zu verbessern wird die Luftschicht meistens mit einem porösen Absorber gefüllt, ohne die frequenzabgestimmte Membran zu berühren. Wie auf Abbildung 11 am Beispiel (b) (Verbundplattenresonator nach Fuchs) zu sehen ist, kann eine Membran aus Stahlblech auch direkt den Dämmstoff berühren. Die Seitenflächen sind offen daher ergibt sich keine abgeschlossene Luftschicht und die gemessenen Absorptionseigenschaften sind hervorragend. (Fuchs 2017)

**Helmholtz-Resonatoren** gehören ebenfalls zur Gruppe der Masse-Feder-Absorber und werden meist zur Absorption von tiefen Frequenzen eingesetzt. Der Aufbau ähnelt einem Behälter mit Flaschenhals. Dabei ist die Luft im Behälter die Feder und der Flaschenhals die Masse, beides muss auf die zu absorbierende Frequenz abgestimmt werden. Die Absorptionsfähigkeit ist auf ein schmales Frequenzband reduziert. Daher eignen sich Helmholtz-Resonatoren eher zur Abschwächung von einzelnen Raummoden. Die korrekte Abstimmung eines Helmholtz-Resonators auf eine bestimmte Frequenz berechnet man über das Volumen und die Flaschenhalslänge. Die Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau eines Helmholtz-Resonators. (Frieesecke 2007)

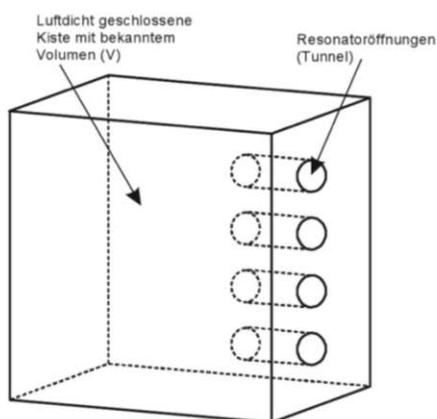


Abbildung 9 Konstruktion eines Helmholtz-Resonators (Frieesecke 2007)

Eine Sonderform der Helmholtz-Resonatoren sind die **mikroperforierten Absorber**. Sie wirken im Vergleich breitbandiger, haben aber ein deutliches Absorptionsmaximum, welches durch den Abstand zu einer schallharten Rückwand bestimmt ist. Die Löcher dienen wieder als Masse, die Luft im Zwischenraum als Feder. Das Lochflächenverhältnis liegt optimal bei 1%. Wie auf Abbildung 10 zu sehen ist, kann durch die Schichtung von zwei mikroperforierten Folien mit einem Abstand von 3cm, die Effektivität deutlich gesteigert werden. (Fuchs 2017)

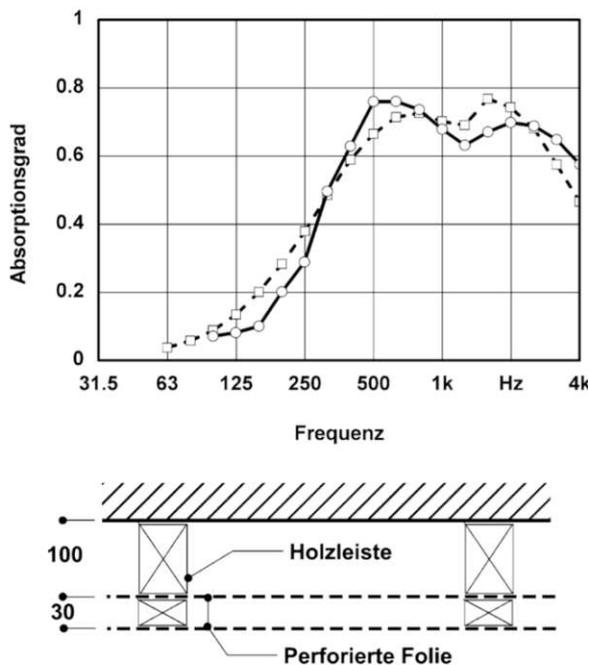


Abbildung 10 Absorptionsgrad  $\alpha_s$  bei diffusem Schalleinfall auf eine zweilagige mikroperforierte Absorberfolie, Messung. (○) Rechnung (□) (Fuchs 2017)

### Kombinationen aus porösen Absorbern und Membranabsorbern

Bei der Kombination aus porösen Absorbern und Membranabsorbern werden die verschiedenen Absorber-Typen in Schichten übereinandergelegt. Sie werden nach Fasold und Veres (2003) *Kombinationsabsorber* genannt und nach Fuchs (2017) *Breitband-Kompakt-Absorber (BKA)* wobei die zweite Variante in der Herstellung technisch anspruchsvoller ist. Sie ist laut Messungen auf Abbildung 11 sehr effektiv und wird von der Firma Renz Solutions in Deutschland produziert. Die einfache Variante nach Fasold und Veres (2003) besteht aus mehreren Schichten eines klassischen Trockenbaus. Die erste Schicht bestehend aus gelochten Gipskartonplatten und Dämmung an der Rauminnenseite funktioniert als Absorber ab ca. 500 Hz aufwärts. Die zweite Schicht aus Gipskartonplatten und Dämmung direkt dahinter dient als Plattenschwinger. Den meisten Anwendungen und Budgets könnte diese Variante gerechter sein, wobei der nachträgliche Einbau erheblich mehr Aufwand erzeugt.

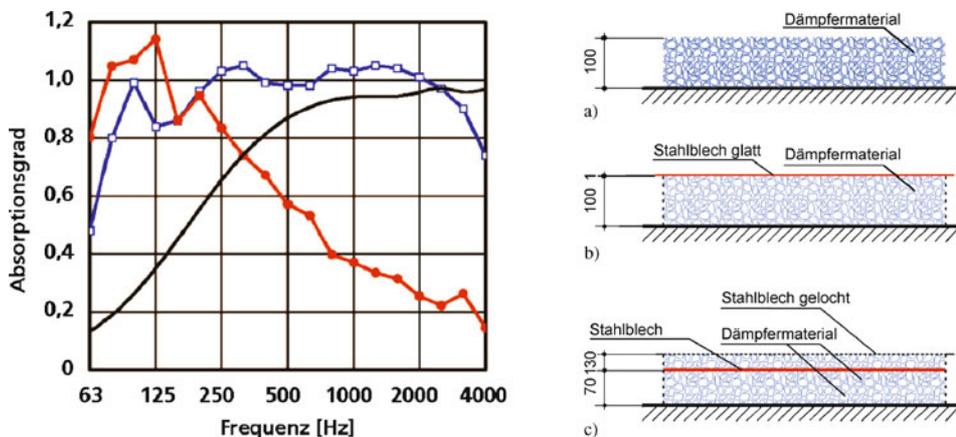


Abbildung 11 Nach DIN EN ISO 354-2001 gemessener Absorptionsgrad  $\alpha_s$  von jeweils Absorber 100 mm dicken Verbundplattenresonator (○) Breitbandkompaktabsorber (□) Rechnung für 100 mm faserporösen Absorber (-) (Fuchs 2017)

Die **Absorption von Bassfrequenzen** ab ca. 125 Hz (bzw. je nach Raumgröße und Schröderfrequenz) abwärts kann durch mehrere abgestimmte Helmholtz-Resonatoren, Plattenschwinger oder Kantenabsorber gewährleistet werden. Schalldruckmaxima treten in den Raumkanten auf, daher können sie mit Kantenabsorbern absorbiert werden. Sie werden an den Innenraumkanten entlang

positioniert und benötigen einen relativ großen Querschnitt von ca. 40 cm x 50 cm um laut Fuchs (2017) am effektivsten zu funktionieren.

Wie Abbildung 12 zeigt hat ein Kantenabsorber eine perforierte Seite und eine schallharte Seite. Der dahinter liegende Dämmstoff muss dabei nicht das volle Volumen ausfüllen um den besten Absorptionsgrad zu erreichen. Die Lage und Größe der Kantenabsorber muss individuell betrachtet werden und ist abhängig vom möglichen Bassschalldruck. Diese Art Absorber wird meistens in Tonstudios bzw. Regieräumen angewendet und hinter den Lautsprechern positioniert.

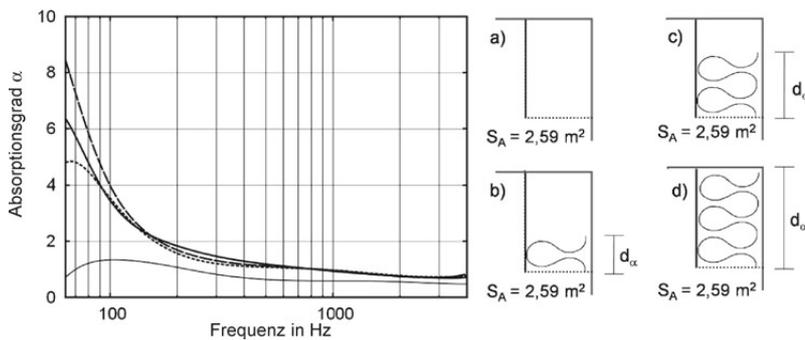


Abbildung 12 Absorptionsgrad eines Kantenabsorbers gemäß Abbildung 13, jeweils bezogen auf  $S_A = 2,59 \text{ m}^2$ . Lange Seite: Gipskartonplatte, Kurze Seite: Lochblech **a)** leer (dünn durchgezogen), **b)**  $d_\alpha = 160 \text{ mm}$  (gepunktet), **c)**  $d_\alpha = 320 \text{ mm}$  (gestrichelt), **d)**  $d_\alpha = 500 \text{ mm}$  (fett durchgezogen) (Fuchs 2017)

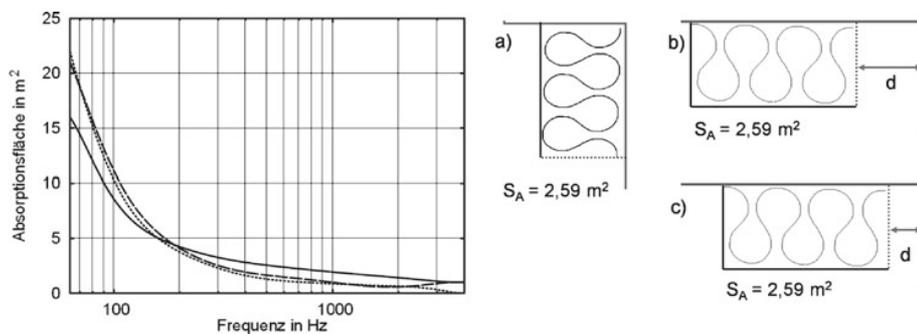


Abbildung 13 (Fuchs 2017)

Laut Messungen von Fuchs (2017) steigt der Absorptionsgrad ab 200 Hz abwärts sehr stark an. Die Kantenabsorber müssten deutlich größer dimensioniert sein um das Schallschnellemaximum  $[\lambda/4]$  zu bedämpfen. Der hohe Wirkungsgrad ist wahrscheinlich durch den sehr hohen Schalldruck in den Rauminnenkanten zu erklären. (Fuchs 2017)

In Tonstudios sind Kantenabsorber weltweit im Einsatz und erzeugen messbare Verkürzungen der Nachhallzeit im Bassbereich.

### 1.3.6 Reflexion

Akustische Reflexionen entstehen immer dann, wenn Schall auf harte und glatte Oberflächen trifft. Eine Schallschnelle lässt sich mit einem Vektor beschreiben, der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel. Unterschiedliche Oberflächenformen erzeugen unterschiedliche Arten der Reflexion (Abbildung 14).

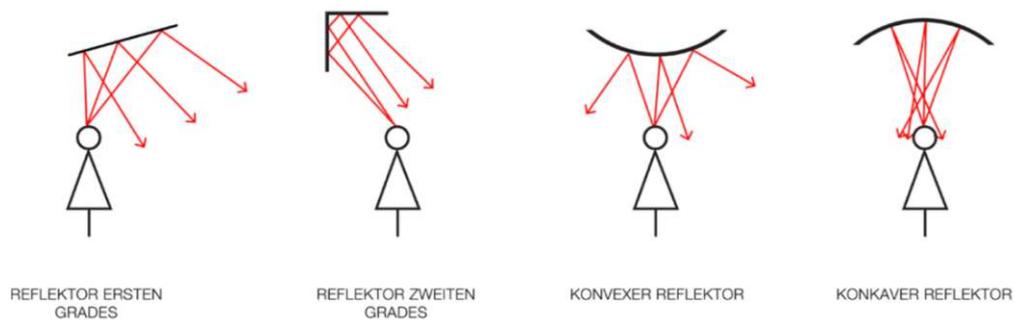


Abbildung 14 Reflektorarten (AcAr- Multibook of Acoustics 2015)

Wenn Oberflächen zur Schalllenkung eingesetzt werden muss bei den Abmessungen wieder die Wellenlänge  $[\lambda]$  beachtet werden. Wie auf Abbildung 15 zu sehen ist, darf die Wellenlänge  $[\lambda]$  bei senkrechtem Schalleinfall nicht größer sein als die Seitenlänge (d) des Reflektors.

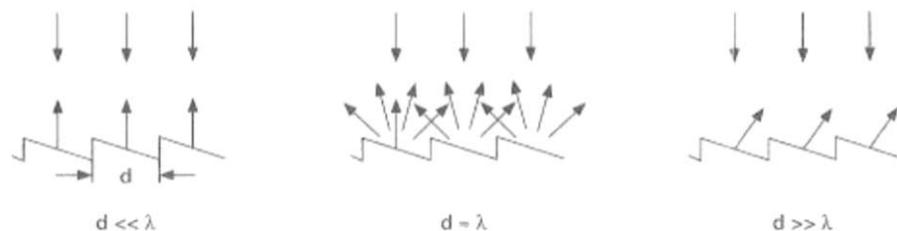


Abbildung 15 Die Schallstreuung an einer Sägezahnstruktur bei ideal senkrechtem Schalleinfall (Kuttruff 2004)

In realer Umgebung wird Schall mit einer bestimmten Richtcharakteristik von einem Medium abgestrahlt. Idealisiert kann von einer Kugel ausgegangen werden, daher entsteht selten senkrechter Schalleinfall. Wenn durch Reflektor-Oberflächen Schall tiefer in den Raum weitergeleitet werden soll, treffen Schallwellen zwangsweise mit einem flacheren Winkel auf den Reflektor. Dies verkürzt die effektive Reflektor-Seitenlänge im Verhältnis zum Winkel.

Ein Beispiel aus dem Werk *Schallschutz + Raumakustik in der Praxis* von Fasold und Veres:

Für einen in 5m Entfernung zur Quelle befindlichen Reflektor von 2m Seitenlänge ergibt sich aus (Abbildung 16) bei senkrechtem Schalleinfall für 13m Entfernung eine untere Grenzfrequenz von etwa 600Hz. Für einen Schalleinfallswinkel von 30°; erhöht sich  $f_u$  auf ca. 800Hz für 45° auf ca. 1000Hz. Das ist für Sprache zur Verbesserung der Verständlichkeit noch nutzbar. Für Musik müsste die Wirkung bei tiefen Frequenzen durch Vergrößern der Reflektorfläche erhöht werden. (Fasold u. Veres 2003)

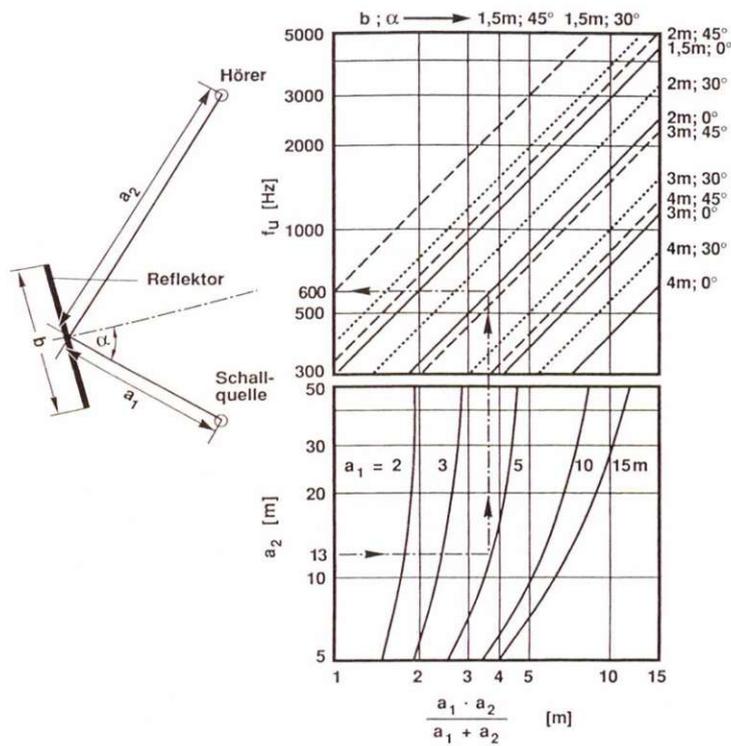


Abbildung 16 Mindestgröße von Flächen für spiegelnde Reflexionen (Fasold u. Veres 2003)

### 1.3.7 Diffusion

Ein Schallfeld wird durch komplexe Oberflächenstrukturen diffuser, das bedeutet dass der Direktschall gebeugt, gebrochen und in unterschiedliche Richtungen reflektiert wird. Konzertsäle, die um die Jahrhundertwende und davor gebaut wurden, weisen durch ihre verzierten Schmuckelemente auf Wänden und Decken ein gutes diffuses Schallfeld auf. Die Moderne als Stilepoche bringt sehr viele minimalistische glatte und ebene Wand- und Deckenflächen mit sich, dadurch ergeben sich deutlich stärkere und direktere Reflektionen und Flatterechos zwischen parallelen Wandoberflächen oder Decken und Fußböden. Diese negativen Effekte können zum einen durch das Platzieren von Absorbern gedämpft oder durch Diffusoren bzw. komplexe Oberflächen gestreut werden. Die Nachhallzeit eines Raumes wird durch Diffusoren nur unwesentlich reduziert, es wird hauptsächlich die Direktheit der ersten Reflektionen entschärft. Je nach Bauart des Diffusors wird der auftreffende Schall in einem bestimmten Frequenzbereich sowohl räumlich als auch zeitlich gestreut.

Cox stellte in seiner wissenschaftlichen Veröffentlichung (*Acoustic Diffusers: the good, the bad and the ugly*) fest, dass ein periodischer bzw. numerischer Schroeder Diffusor (Abbildung 17) eine bessere zeitliche Streuung erzeugen kann, was zu einem besseren Hörerlebnis führt als ein halber Zylinder, welcher zwar räumlich sehr gut streut, aber nicht zeitlich. Dies kann zu Interferenzen mit dem Direktsignal führen.

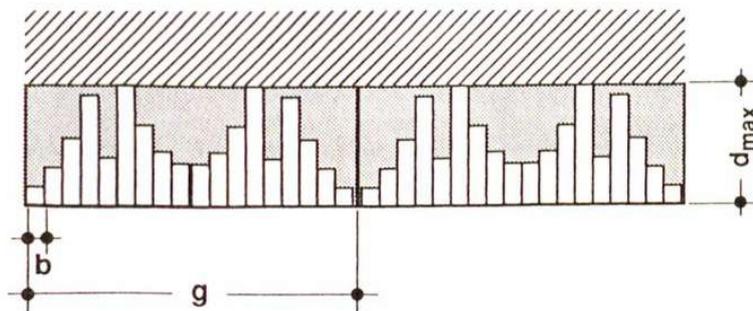


Abbildung 17 Diffus reflektierende Oberflächenstruktur nach dem Prinzip der  $\lambda/2$ -Transformation (Schroeder-Diffusor)  $d_{max}$  maximale Strukturtiefe,  $b$  Strukturbreite,  $g$  Strukturperiode (Fasold u. Veres 2003)

Eine Weiterentwicklung des klassischen Schroeder Diffusors wurde 2011 von Vatter Acoustics aus Österreich auf den Markt gebracht. Wie auf Abbildung 17 erkennbar ist, lassen die Abtreppungen der Strukturfolge Parabeln erkennen. Diese Grundform macht sich der sogenannte Parabolic Wave Diffusor (Abbildung 18) von Vatter zu nutze. Der Vorteil dieser Oberfläche ist eine bessere Diffusionsleistung auch bei höheren Frequenzen. (Vatter Acoustics 2011)

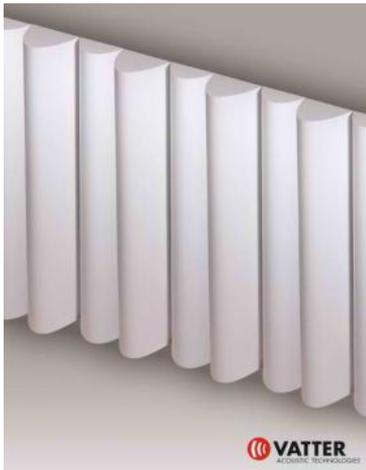


Abbildung 18 Weiterentwicklung eines Quadratic Schroeder Diffusor zu einem Parabolic Wave Diffusors durch VATTER Acoustics 2011

Die oben genannten Diffusoren (Quadratic Schroeder Diffusor, Parabolic Wave Diffusors) streuen den Schall nur eindimensional. Wenn Schall in alle Raumrichtungen gleichmäßig gut gestreut werden soll, können Oberflächen komplexer gestaltet werden. Abbildung 19 zeigt den Entwurf einer zweidimensionalen Diffusoroberfläche die periodische Folgen in zwei Richtungen anwendet.

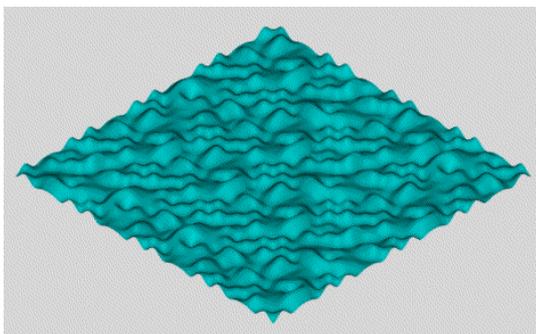


Abbildung 19 Entwurf einer zweidimensionalen Diffusoroberfläche aufgrund von Berechnungen von zwei quadratischen Residuenfolgen mit den Primzahlen  $N_1 = 5$  bzw.  $N_2 = 7$  (Cox)

Abbildung 20 zeigt den Innenraum des kleinen Saales der Elbphilharmonie. Der Akustiker Yasuhisa Toyota hat hier freie Hand bekommen und konnte eine dreidimensional gefräste Holzverkleidung realisieren lassen, die einer zweidimensionalen Diffusoroberfläche sehr ähnlich ist.



Abbildung 20 Elbphilharmonie kleiner Saal mit speziell gefrästen Eichenholzelementen  
Fotograf: Michael Zapf

Auch der große Saal der Elbphilharmonie mit seinen speziell gefrästen Gipselementen ist mit unzähligen feinen diffusorartigen Oberflächen ausgestattet (siehe Abbildung 21). Laut Pressestimmen deutscher Medien polarisierte die spezielle Akustik der Elbphilharmonie immer wieder. Die Meinungen gehen von sehr klar, hochauflösend und unverzeihlich bis zu undeutlich für Sänger (wie Jonas Kaufmann) (NDR 2021, Deutschland Funk 2019).



Abbildung 21 Elbphilharmonie © NDR

### 1.3.6 Raumakustik in Räumen für Musik

Die Klangeigenschaften eines Raumes für Musikdarbietungen sollten sich grundlegend von Arbeitsräumen oder Unterrichtsräumen unterscheiden. Je nach Musikstil und Raumvolumen kann die optimale Nachhallzeit im Diagramm (Abbildung 22) nach ÖNORM B8115-3 bzw. ÖNORM EN 12354-6 abgelesen werden.

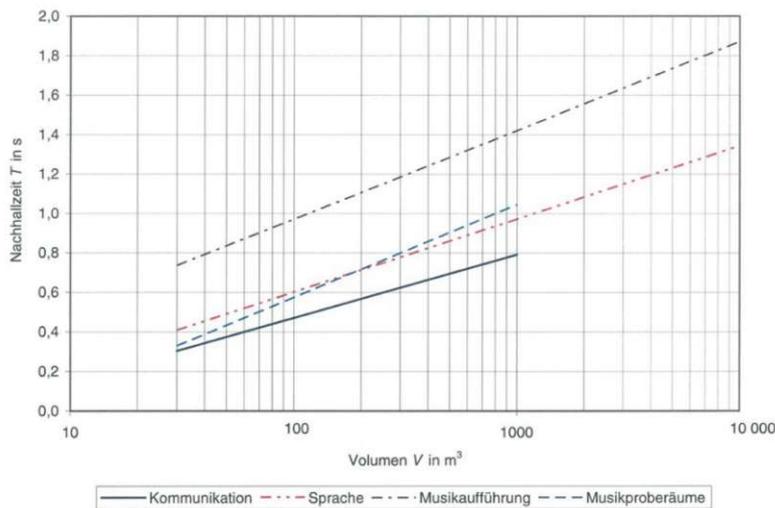


Abbildung 22 ÖNORM B8115-3 (2005)

Für die weiteren Beurteilungen der richtigen Nachhallzeit der Räume, die für diese Arbeit untersucht werden, wurde die ÖNORM B8115-3 herangezogen. Auf Abbildung 23 im Diagramm von Fasold u. Veres ist der Bereich erweitert auf bis zu 3 Sekunden Nachhallzeit und 40000  $m^3$  Raumvolumen. Beide Diagramme zeigen Werte, die von den jeweiligen Autoren als optimal definiert werden, aber nicht 100% übereinstimmen.

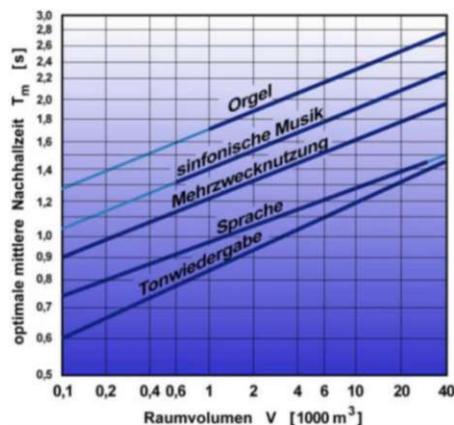


Abbildung 23 Optimale mittlere Nachhallzeiten bei 500Hz bis 1000Hz für verschiedene Raumfunktionen in Abhängigkeit vom Raumvolumen (Fasold u. Veres 2003)

Abbildung 24 zeigt die Messergebnisse von unterschiedlichen europäischen Konzertsälen als Referenz. Bei der Messung wurden Stoffbahnen über die gesamte Bestuhlung gelegt, um einen voll besetzten Raum nachzuahmen. (Lorenz-Kierakiewtz u. Vercammen 2009)

Octave band /Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500-2k	125-4k
<b>Hall</b>								
Royal Festival Hall (03)	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5
Bad Kissingen <sup>□</sup>	1,1	1,4	1,7	1,7	1,7	1,4	1,7	1,5
Aula Universität zu Köln	1,5	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,7	1,6
Tonhalle Düsseldorf (2006)	1,9	1,9	1,8	1,9	1,9	1,5	1,9	1,8
Kurhaus Wiesbaden <sup>□</sup>	2,0	2,0	2,1	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0
Herkulesaal <sup>□</sup>	2,1	2,0	2,1	2,1	2,1	1,7	2,1	2,0
De Doelen Rotterdam	2,0	2,0	2,3	2,3	2,2	1,8	2,3	2,1
Philharmonie am Gasteig	2,3	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1
Stadtcasino Basel <sup>□</sup>	2,5	2,6	2,1	2,1	2,0	1,7	2,1	2,2
Mercatorhalle (2001)	1,9	2,2	2,4	2,3	2,3	1,8	2,3	2,2
Concertgebouw A'dam <sup>□</sup>	2,8	2,4	2,3	2,4	2,2	1,8	2,3	2,3
Musikverein Wien <sup>□</sup>	2,6	2,6	2,5	2,5	2,3	1,9	2,4	2,4
Rudolfinum Prag <sup>□</sup>	2,2	2,4	2,7	2,9	2,8	2,3	2,8	2,5
Tonhalle Zürich <sup>□</sup>	3,2	3,2	2,8	2,5	2,2	1,8	2,5	2,6
<b>Minimum</b>	<b>1,1</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
<b>Average</b>	<b>2,3</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>	<b>2,1</b>	<b>1,8</b>	<b>2,2</b>	<b>2,1</b>
<b>Maximum</b>	<b>4,2</b>	<b>3,6</b>	<b>3,2</b>	<b>2,9</b>	<b>2,8</b>	<b>2,3</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>

Abbildung 24 Nachhallzeit Messung Konzertsäle (Lorenz-Kierakiewtz u. Vercammen 2009)

Wie man am Beispiel des Wiener Musikvereins erkennen kann (Abbildung 24), der weltweit für seine besonders gute Akustik geschätzt wird, ist die Nachhallzeit im Bassbereich bei 125 Hz 2,6 Sekunden lang und nimmt auf 1,9 Sekunden bei 4000 Hz ab.

Dieses leichte Ungleichgewicht des Bassverhältnisses stört den Höreindruck bei klassischer Musik im Saal nicht bzw. ist ein weltweit anerkannter „Referenzklang“. Auch laut ÖNORM B8115-3 (2005) darf die Nachhallzeit in Konzertsälen ab 250 Hz bis 63 Hz deutlich ansteigen.

Für Pop-, Rock-, oder Elektronische-Musik Konzerte empfiehlt sich eine kurze und gleichmäßige Nachhallzeit von maximal 1,0 s über das gesamte Frequenzspektrum, inklusive der Bassfrequenzen, da sie meistens von Verstärkern mit hohem Schalldruck auf ein hörbares und spürbares Niveau angehoben werden. (Mommertz E. u. Müller-BMM 2008)

Die Absorption von Bassfrequenzen in Räumen für klassische Musik wird von Akustikern kontrovers diskutiert. Fuchs (2017) vertritt die Meinung, dass mögliche

akustische Überdeckungseffekte von Bassinstrumenten, am besten vermieden werden können, wenn man die Bassfrequenzen absorbiert. Dafür hält er eine längere Nachhallzeit im Mittenbereich von Vorteil für Streichinstrumente und Stimmen. (Fuchs 2017)

Die Hörgewohnheit bei klassischer Musik lässt eine etwas längere Nachhallzeit im Bassbereich zu, außerdem erreichen die wenigsten klassischen Instrumente einen hohen Schalldruckpegel im Bassbereich. Selbst ein Flügel hat zwar praktisch die Möglichkeit tiefe Bässe wiederzugeben (bis ca. 27 Hz), doch Messungen am Flügel mit Dr. Matthias Schuß, vor Ort in der Musikschule, haben gezeigt, dass der Pegel der Bassfrequenzen des angeschlagenen Basstons sehr gering ist und Obertöne des Grundtons den Hauptanteil des Pegels ausmachen. Daher kann aus musikalischer Sicht angenommen werden, dass selbst bei einem Flügel das Obertonspektrum des Basstons den harmonischen Kontext herstellt, und nur zu einem sehr kleinen Anteil der Grundton selbst.

Durch die meist sehr großen Dimensionen von klassischen Konzertsälen, sollten Raummoden unterhalb des hörbaren Bereichs liegen. Abbildung 25 zeigt das Lautstärkeempfinden des Gehörs abhängig von der Frequenz. Tiefe Bässe müssen demnach deutlich lauter sein, um überhaupt hörbar zu sein. Für klassische Musik besteht sehr selten die Notwendigkeit Bassfrequenzen gleich stark zu absorbieren wie hohe Frequenzen, tiefe Bässe in hoher Lautstärke treten selten auf.

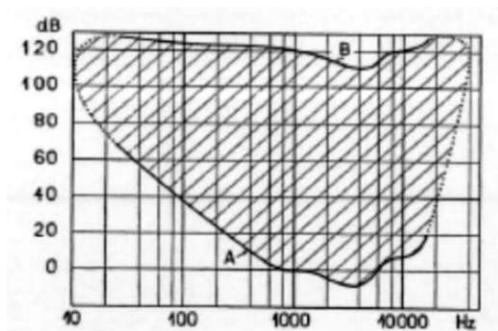


Abbildung 25 Hörfläche / A Hörschwelle / B Schmerzgrenze (Furrer 1956)

Ein Ungleichgewicht im Nachhall eines Raumes oder die Verdeckung hoher durch tiefe Frequenzanteile, kann trotzdem zu einem Problem werden, da jedes Instrument zusätzlich zum Obertonspektrum auch unterhalb des Grundtons schwingt. In diesem besonderen Fall sind Wissenschaftler unterschiedlicher Meinung. Fuchs vertritt den Standpunkt, dass ein Anstieg der Nachhallzeit im Bereich der Bassfrequenzen die Hörbarkeit aller Instrumente im Mittentonbereich verschlechtert. (Fuchs 2017)

In Proberäumen können Raumresonanzen und Raummoden auftreten, weil sie meistens deutlich kleiner als Konzertsäle sind. Es ist von großem Vorteil, wenn Raumresonanzen keine ungleichmäßige Nachhallzeit in einem bestimmten Frequenzspektrum erzeugen.

Die Bolt-Fläche (bzw. Bolt-Area) gibt vorteilhafte Raumdimensionen für rechteckige Räume an, innerhalb derer eine homogenere Raummodenverteilung zu erwarten ist. Dargestellt ist die Fläche im Diagramm (Abbildung 26) durch eine strichlierte Linie.

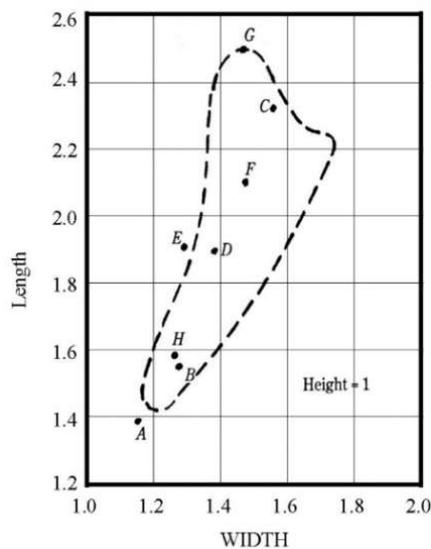


Abbildung 26 Die strichlierte Linie markiert die Außenlinie der „Bolt-Area“ (Everest u. Pohlman 2009)

## 2 METHODE

### 2.1 Überblick

Diese Forschungsarbeit legte den Fokus auf den Vergleich von Nachhallzeitmessungen in den Unterrichtsräumen einer Musikschule und den Anpassungen der Simulationsmodelle an die in-Situ Nachhallzeitmessungen. In weiterer Folge dienten die kalibrierten Modelle der Simulation akustischer Verbesserungsmaßnahmen.

Dafür wurden Daten gesammelt, analysiert und diskutiert. Die folgende Auflistung ist ein Überblick der Vorgangsweise. Auf Abbildung 27 wird die Struktur der Forschungsarbeit dargestellt.

- I) Dokumentation der Geometrie und der Materialeigenschaften aller Oberflächen der Musikschule.
- II) Fragebogen zur Bewertung der Raumakustik der Musikschule
- III) Nachhallzeitmessung nach ÖNORM ISO 3382-2 (2009)
- IV) 3D-Modellierung aller vier Unterrichtsräume und Export nach ODEON 11.0
- V) Simulationen mit Oberflächenmaterialien aus ODEON 11.0
- VI) Vergleich der gemessenen und der simulierten Nachhallzeit
- VII) Anpassung der Oberflächenmaterialien der Simulationsmodelle
- VIII) Simulation der akustischen Verbesserungsmaßnahmen am kalibrierten Modell
- IX) Analyse und Diskussion der Resultate

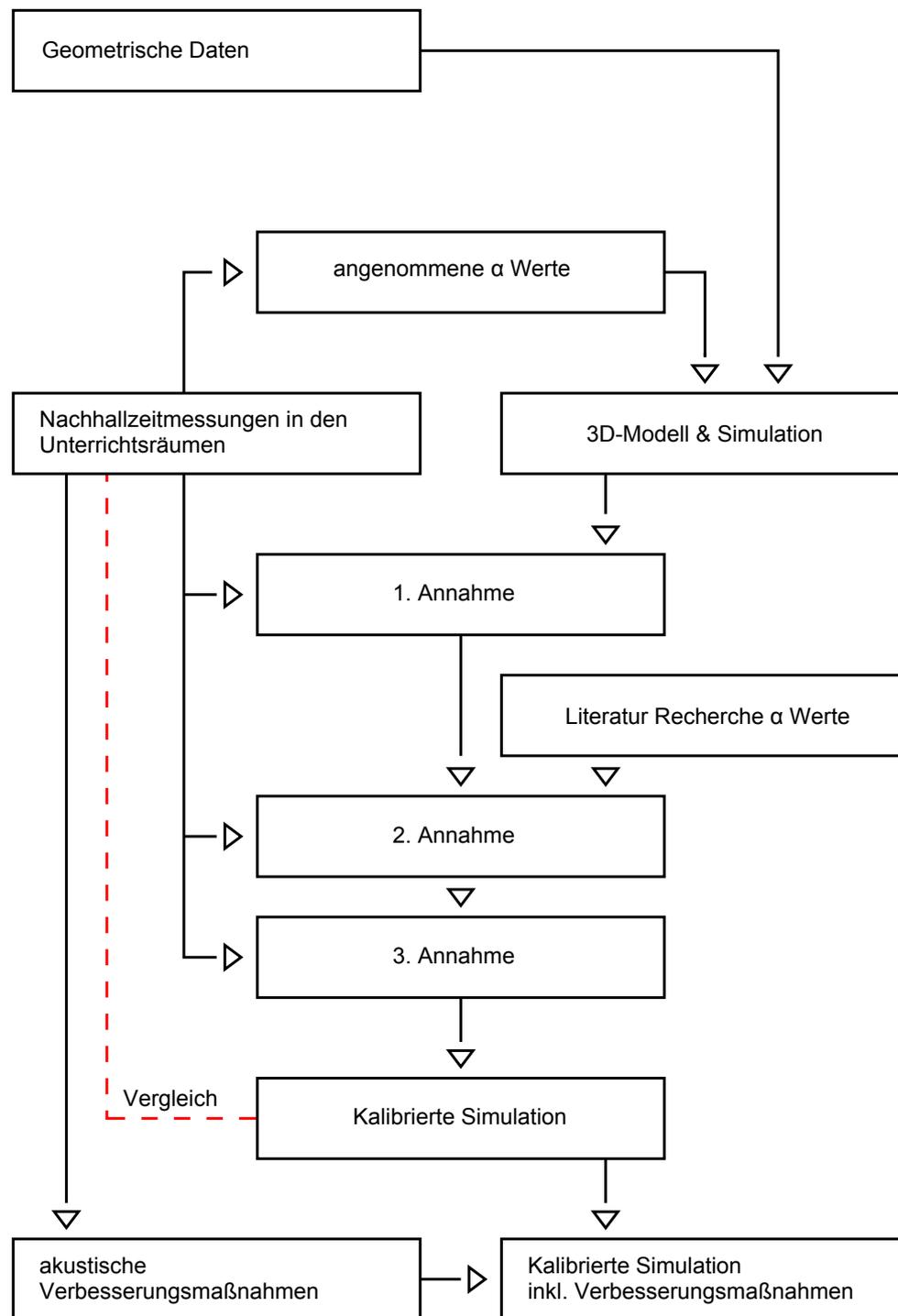


Abbildung 27 Struktur der Forschungsarbeit (eigene Darstellung)

## 2.2 Beschreibung der Musikschule

Zum Zeitpunkt der Messung sind vier Räume (siehe Abbildung 28) für Konzerte oder zu Unterrichts- und Übungszwecken in Verwendung. Die Räume unterscheiden sich durch ihre Proportionen und Oberflächenmaterialien. Dadurch ergeben sich verschiedene akustische Raumeigenschaften. Die Räume befinden sich im Erdgeschoß eines Wiener Altbaus mit üblichen Gewölbedecken zum ersten Oberschoss. Die Raumhöhe am Scheitelpunkt der Gewölbe liegt bei durchschnittlich 3,30 m.

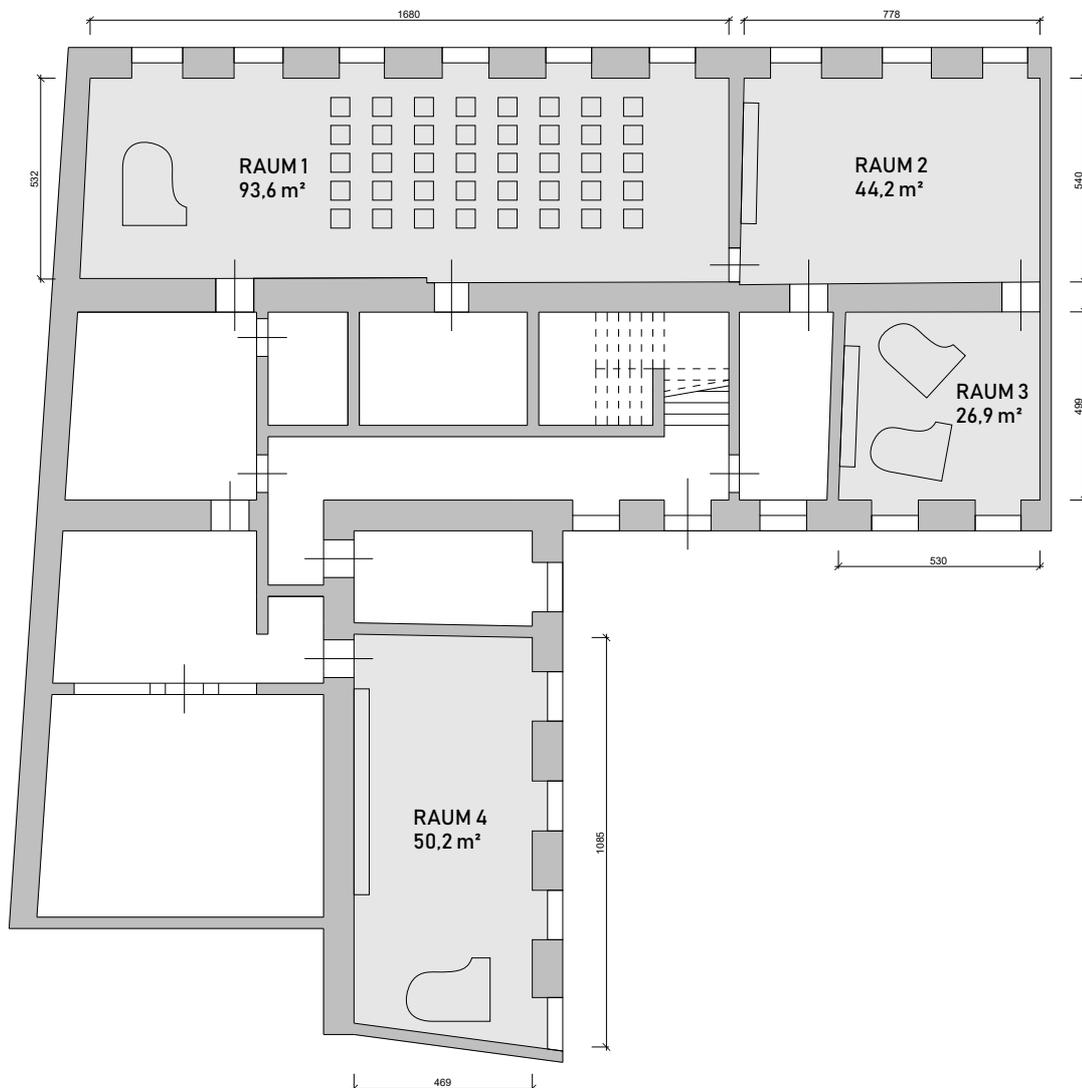


Abbildung 28 Übersichtsplan der Musikschule (M 1:200), grau markierte Räume wurden untersucht.

## Raum 1



Abbildung 29 Raum 1 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien)

Bei Raum 1 (Abbildung 29) handelt es sich um einen 16,8 m langen, 5,32 m breiten und ca. 3,30 m hohen Raum, der als Konzertsaal und Unterrichtsraum genützt wird. In Tabelle 1 werden alle Oberflächen von Raum 1 aufgelistet. Grundsätzlich kann man anmerken, dass die Raumproportionen ungünstig für die Nutzung sind, weil die hinteren Reihen deutlich weniger erste Reflektionen hören, als die vorderen Reihen. Im Fall vollbesetzter Publikumsreihen reduziert sich die Nachhallzeit im hohen Frequenzbereich (siehe Ergebnisse des Fragebogens). Durch das große Raumvolumen ergibt sich eine lange Nachhallzeit, die eine Nutzung als Unterrichtsraum eher erschwert. Für Streichinstrumente kann der Nachhall sehr angenehm klingen, weil er Fehler verzeiht.

Tabelle 1 Oberflächen Raum 1

Putz (bemalt)	166,40 m <sup>2</sup>
Massivholztür	6,00 m <sup>2</sup>
einfaches Fensterglas	11,65 m <sup>2</sup>
Holzboden, schwimmend	95,78 m <sup>2</sup>
Gipskarton 12,5 mm, Luft 100 mm	77,51 m <sup>2</sup>
Gipskarton 12,5 mm, Dämmung 100 mm	14,80 m <sup>2</sup>
<b>Gesamt</b>	<b>372,14 m<sup>2</sup></b>

## Raum 2



Abbildung 30 Raum 2 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien)

Bei Raum 2 (Abbildung 30) handelt es sich um einen 7,78 m langen, 5,40 m breiten und ca. 3,30 m hohen Raum der als Unterrichtsraum für Streichinstrumente und Akustikgitarren genutzt wird. In Tabelle 2 werden alle Oberflächen von Raum 2 aufgelistet. Durch das geringere Raumvolumen als Raum 1 ist die Nachhallzeit kürzer und dadurch etwas besser als Proberaum einsetzbar. Ansonsten sind sich die beiden Räume sehr ähnlich, weil sie die gleichen Oberflächenmaterialien aufweisen. Auch die Auswertung der Fragebögen ergaben ähnliche Ergebnisse. Raum 1 und 2 haben eine wichtige Gemeinsamkeit wie sich bei der Anpassung der Simulation herausgestellt hat. Der schwimmend verlegte Holzboden.

Tabelle 2 Oberflächen Raum 2

Vorhänge	6,60 m <sup>2</sup>
Putz (bemalt)	77,40 m <sup>2</sup>
25 mm Holz mit Luftraum	10,89 m <sup>2</sup>
Holzboden, schwimmend	43,84 m <sup>2</sup>
Massivholztür	6,10 m <sup>2</sup>
einfaches Fensterglas	5,96 m <sup>2</sup>
Gipskarton 12,5 mm, Luft 100 mm	20,94 m <sup>2</sup>
Gipskarton 12,5 mm, Dämmung 100 mm	5,50 m <sup>2</sup>
<b>Gesamt</b>	<b>177,20 m<sup>2</sup></b>

### Raum 3



Abbildung 31 Raum 3 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien)

Bei Raum 3 (Abbildung 31) handelt es sich um einen 5,30 m langen, 4,99 m breiten und ca. 3,30 m hohen Raum der als Unterrichtsraum und Übungsraum für Klaviermusik verwendet wird. In Tabelle 3 werden alle Oberflächen von Raum 3 aufgelistet. Der erste Eindruck unterscheidet sich stark von Raum 1 und 2. Ein deutlich geringeres Volumen und stärkere Absorption hoher Frequenzen durch Vorhänge und Teppichboden, erzeugen eine kürzere Nachhallzeit mit warmem Klangbild (siehe Ergebnisse des Fragebogens).

Tabelle 3 Oberflächen Raum 3

Putz (bemalt)	62,30 m <sup>2</sup>
25 mm Holz mit Luftraum	13,56 m <sup>2</sup>
Vorhänge	5,57 m <sup>2</sup>
einfaches Fensterglas	3,80 m <sup>2</sup>
Massivholztür	2,00 m <sup>2</sup>
Nadelfilz	26,66 m <sup>2</sup>
Gipskarton 12,5 mm, Luft 100 mm	17,00 m <sup>2</sup>
Gipskarton 12,5 mm, Dämmung 100 mm	5,99 m <sup>2</sup>
<b>Gesamt</b>	<b>136,90 m<sup>2</sup></b>

## Raum 4



Abbildung 32 Raum 4 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien)

Bei Raum 4 (Abbildung 32) handelt es sich um einen 10,85 m langen, 4,69 m breiten und ca. 3,30 m hohen Raum der als Unterrichts-, Seminar- und Übungsraum für alle Arten von Instrumenten verwendet wird. In Tabelle 4 werden alle Oberflächen von Raum 4 aufgelistet. Die starke Absorption hoher Frequenzen, durch große Flächen von Teppichboden und Vorhängen sowie durch ein Sofa, erzeugt einen ähnlichen Eindruck wie in Raum 3, aber wie aus den Messergebnissen hervorgeht, ist die Nachhallzeit im Bassbereich sehr lang.

Tabelle 4 Oberflächen Raum 4

Putz (bemalt)	148,02 m <sup>2</sup>
schwer gepolstert	3,82 m <sup>2</sup>
25 mm Holz mit Luftraum	13,74 m <sup>2</sup>
Vorhänge	9,18 m <sup>2</sup>
einfaches Fensterglas	8,33 m <sup>2</sup>
Massivholztür	2,00 m <sup>2</sup>
Unterseite Sofa (Teppich)	2,39 m <sup>2</sup>
Nadelfilz	49,86 m <sup>2</sup>
<b>Gesamt</b>	<b>237,34 m<sup>2</sup></b>

## 2.3 Auswertung der Fragebögen

Ein Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Raumakustik ausgearbeitet. Er besteht aus drei Teilen. Teil 1, allgemeine Informationen über die Teilnehmenden (Tabelle 5), Teil 2 stellt genau definierte Fragen zur Raumakustik und Teil 3 gibt die Möglichkeit offene Fragen zu beantworten.

Im Teil 2 werden die Fragen ähnlich zu einem „multiple-choice-test“ durch eine 5-Punkte Beurteilungsskala definiert, die zwischen -2 und +2 die Möglichkeit der Beurteilung zwischen stark und schwach geben (siehe Anhang). (Oppenheim 2001 Questionare Design)

Tabelle 5 Allgemeine Informationen der Teilnehmenden

	Kategorie	Anzahl der Teilnehmer
<b>Geschlecht</b>	weiblich	12
	männlich	5
	*	0
<b>Alter</b>	0-10	0
	11-20	5
	21-30	8
	31-40	4
	41-50	0
	51-60	0
	<60	0
<b>Wie viele Stunden verbringen Sie durchschnittlich pro Wochen der Musikschule?</b>	0-10	5
	11-20	6
	21-30	4
	31-40	2
<b>Wie lange arbeiten oder lernen Sie schon in den Räumlichkeiten der Musikschule?</b>	Weniger als 6 Monate	2
	6-12 Monate	4
	über ein Jahr	10
	nur zu Gast	1

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Fragebögen. Die Teilnehmenden konnten auf einer 5 Punkte Skala zwischen -2 bis +2 angeben wie intensiv (+) oder schwach (-) sie die aufgelisteten Parameter bzw. Begriffe je Raum bewerten.

Durch die offenen Fragen vom Teil 3 des Fragebogens konnte festgestellt werden, dass die Konzentration in Raum 2 schwerfällt und dass unangenehme Flatterechos zwischen Gewölbedecke und Fußboden auftreten. Raum 3 wurde für Streichinstrumente als zu trocken beschrieben, aber Unterricht am Klavier ist in Ordnung.

Die Balkendiagramme auf den folgenden Abbildungen (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35, Abbildung 36, Abbildung 37) zeigen die Durchschnittswerte aller Antworten pro Begriff je Raum.

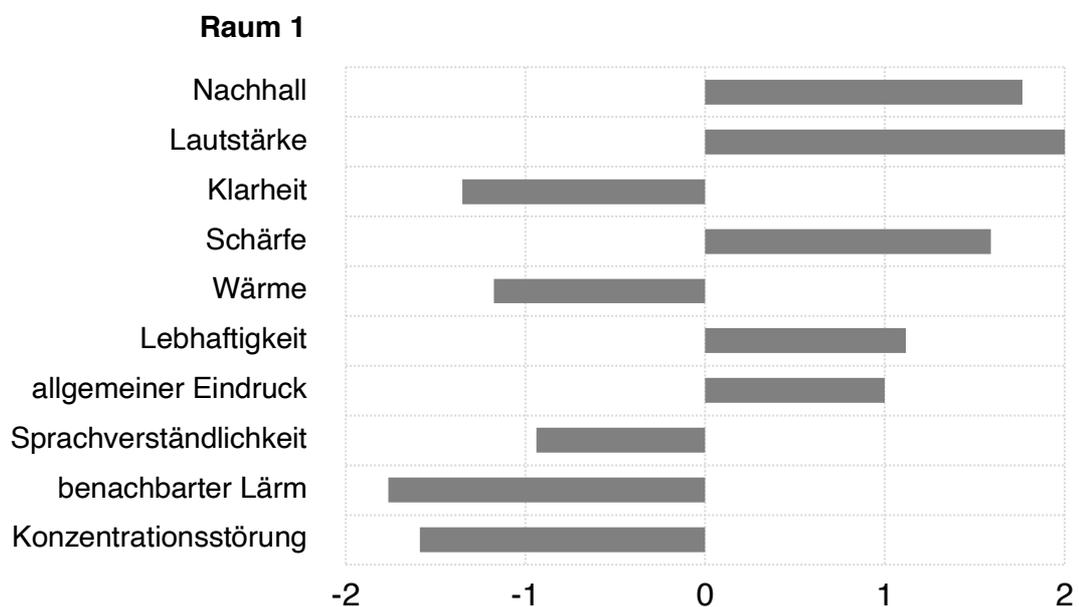


Abbildung 33 Interviewauswertung Raum 1 (eigene Darstellung)

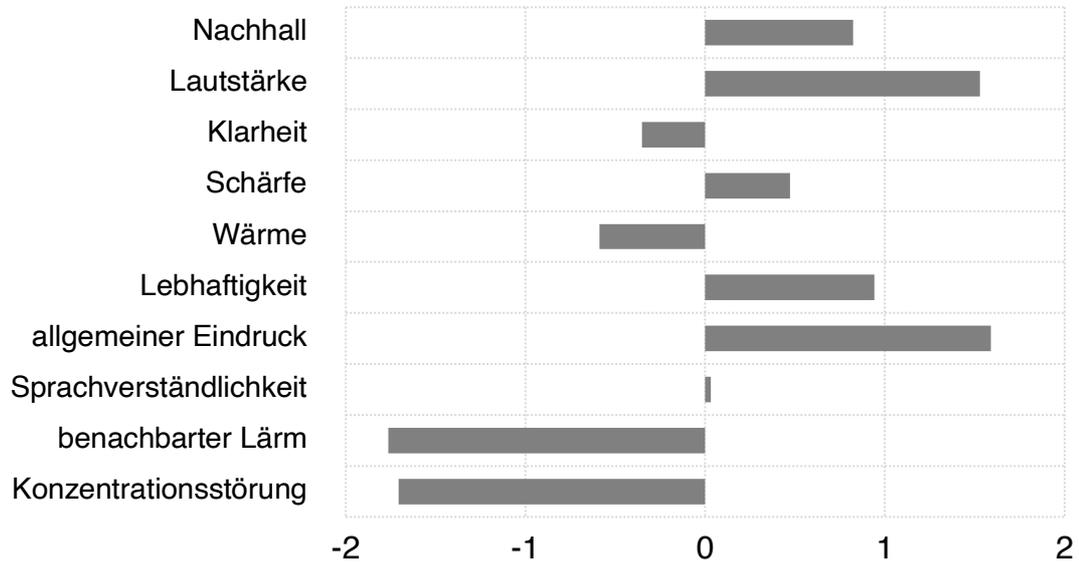
**Raum 1 + Publikum**

Abbildung 34 Interviewauswertung Raum 1 + Publikum (eigene Darstellung)

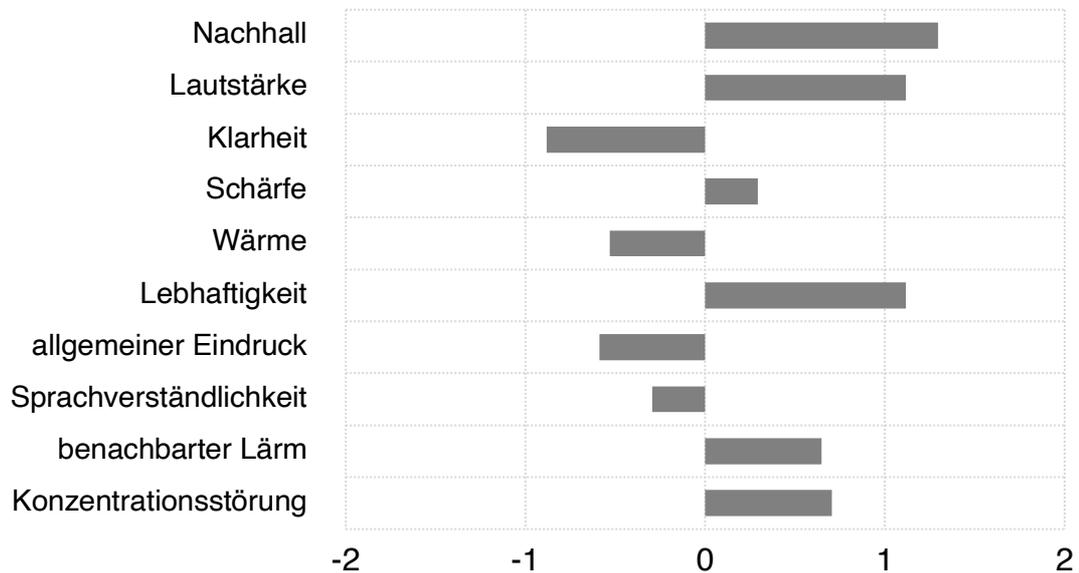
**Raum 2**

Abbildung 35 Interviewauswertung Raum 2 (eigene Darstellung)

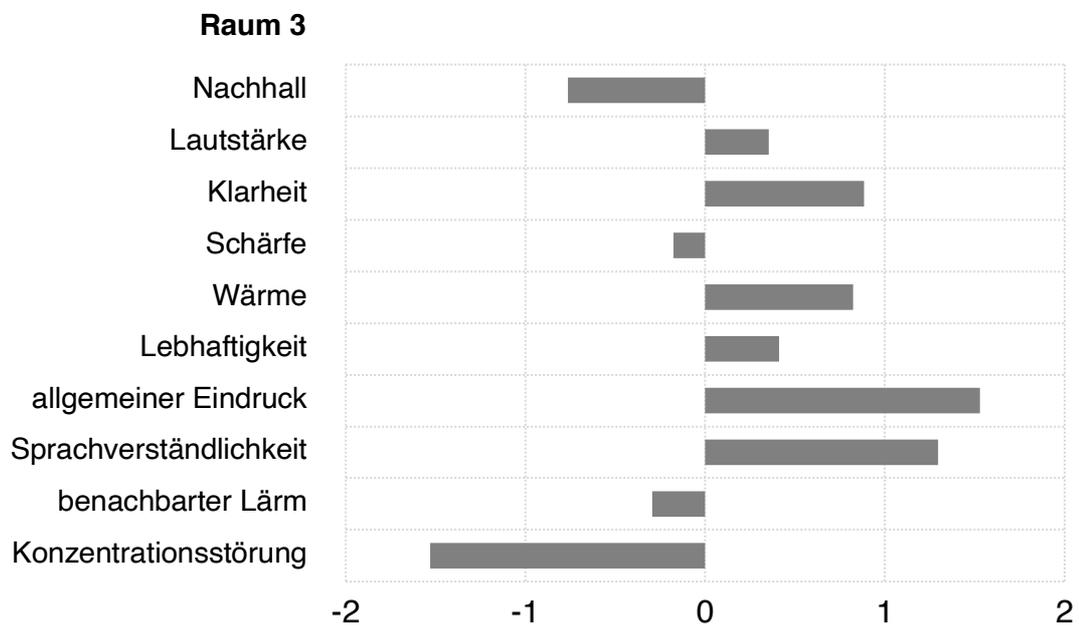


Abbildung 36 Interviewauswertung Raum 3 (eigene Darstellung)

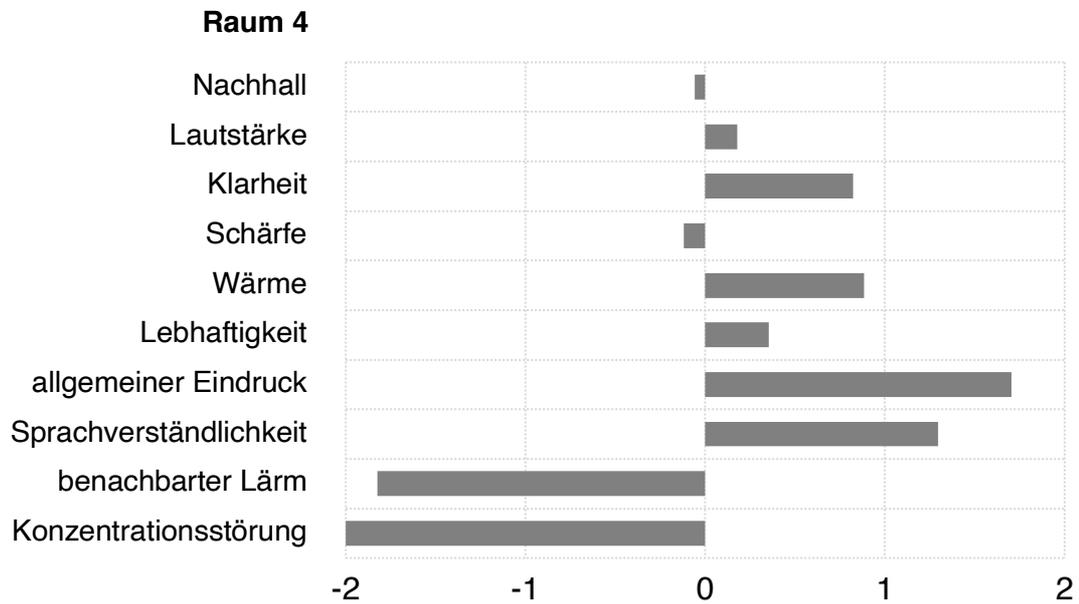


Abbildung 37 Interviewauswertung Raum 4 (eigene Darstellung)

### 3 MESSUNG DER NACHHALLZEIT

Die Messungen in Raum 1 bis 4 verliefen nach den Vorgaben der ÖNORM EN ISO 3382-2 (2009) ab. In jedem Raum wurden zwei verschiedene Positionen für den Lautsprecher gewählt (LS1 und LS2) und passend zur Raumgröße die Anzahl der Mikrofonpositionen (M1-M6). Der Lautsprecher wurde in einer Höhe von ca. 180 cm aufgestellt und das Mikrofon in einer Höhe von 150 cm. Der Abstand ( $d_{min}$ ) zwischen Lautsprecher und Mikrofon wurde eingehalten, welcher laut ÖNORM EN ISO 3382-2 (2009) in der Formel 4 wie folgt definiert wird.

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \text{ [m]} \quad (4)$$

$V$  = Volumens des Raums [ $m^3$ ]

$c$  = Schallgeschwindigkeit [ $m/s$ ]

$T$  = geschätzte Nachhallzeit RT [ $s$ ]

Für jede Lautsprecher-Mikrofon Kombination wurde für 2 x 10 Sekunden ein weißes Rauschen mit einem Schalleistungspegel von  $L_w = 120\text{dB}$  abgestrahlt. Die Messung erfasst Frequenzen zwischen 50Hz und 5000Hz. Für die weitere Gegenüberstellung mit der Simulationssoftware ODEON wurden die üblichen Oktavbänder 63Hz bis 4000Hz verwendet. In Abbildung 38 sind die Positionen der Lautsprecher (LS1 und LS2) mit den Farben rot und grün dargestellt, die mit M1 bis M6 markierten Kreise zeigen in Farbe welches Signal das Mikrofon auf welcher Position empfängt.

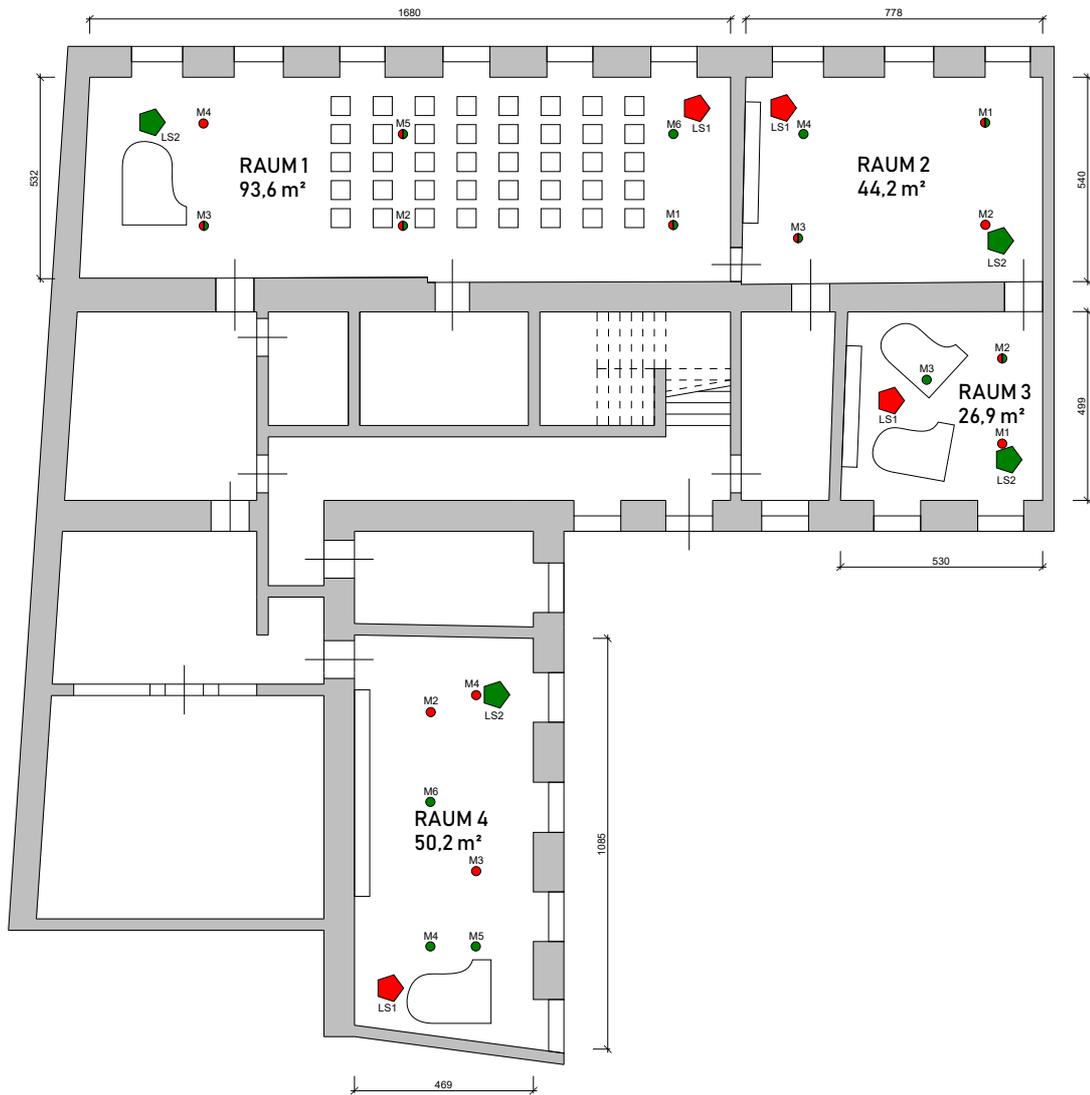


Abbildung 38 Übersichtsplan (M 1:200) der Lautsprecher- und Mikrofonpositionen in Raum 1 bis 4 (eigene Darstellung)

### 3.1 Das Equipment für die Messung der Nachhallzeit

Für die Messung der Nachhallzeit wurde das Equipment der Tabelle 6 verwendet. Auf Abbildung 39 ist das Equipment bildlich dargestellt.

Tabelle 6 Auflistung des akustischen Messungsequipments

Software	Control-Build und Nor-Build
Omidirektionaler Lautsprecher	Nor270
Verstärker	Nor280
Schallpegelmesser (inkl. Mikrophon)	Nor140
Transportkoffer	Nor515
Drahtloses Bauakustik System	Nor1516B



Abbildung 39 Messungsequipment (basierend auf den NORSONIC Katalog)

### 3.2 Die Ergebnisse der Nachhallzeitmessung

Die Diagramme auf den folgenden Abbildungen, zeigen die Messergebnisse der Nachhallzeit pro Raum. Die Werte der Nachhallzeit im Diagramm sind die gemittelten Werte aller Mikrophonpositionen des jeweiligen Raumes.

Bei den Ergebnissen fällt auf, dass Raum 1 (Abbildung 40) und Raum 2 (Abbildung 41) einen ungewöhnlichen Einbruch der Nachhallzeit bei 500 Hz aufweisen. Raum 3 (Abbildung 42) und Raum 4 (Abbildung 43) zeigen ein unbalanciertes Bassverhältnis.

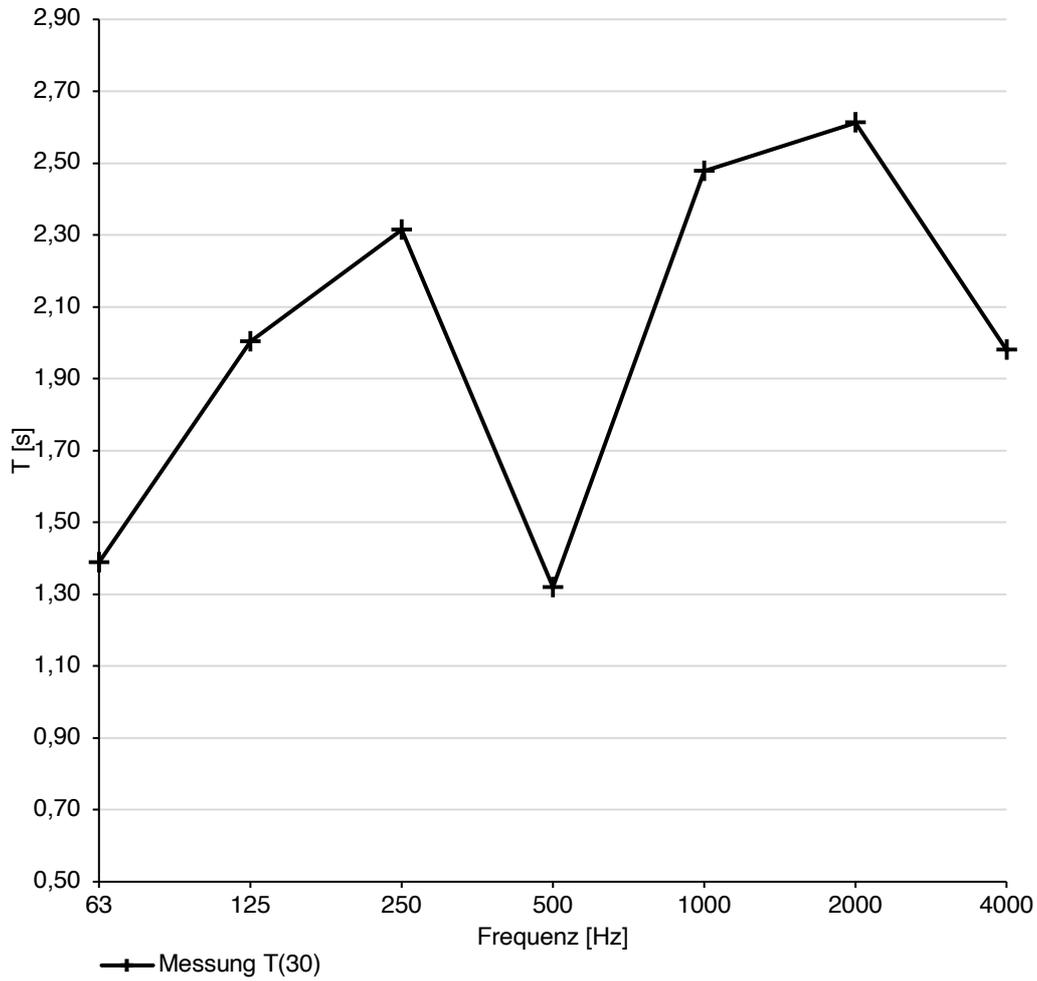
**Raum 1 Nachhallzeitmessung**

Abbildung 40 Raum 1 Ergebnis Nachhallzeitmessung

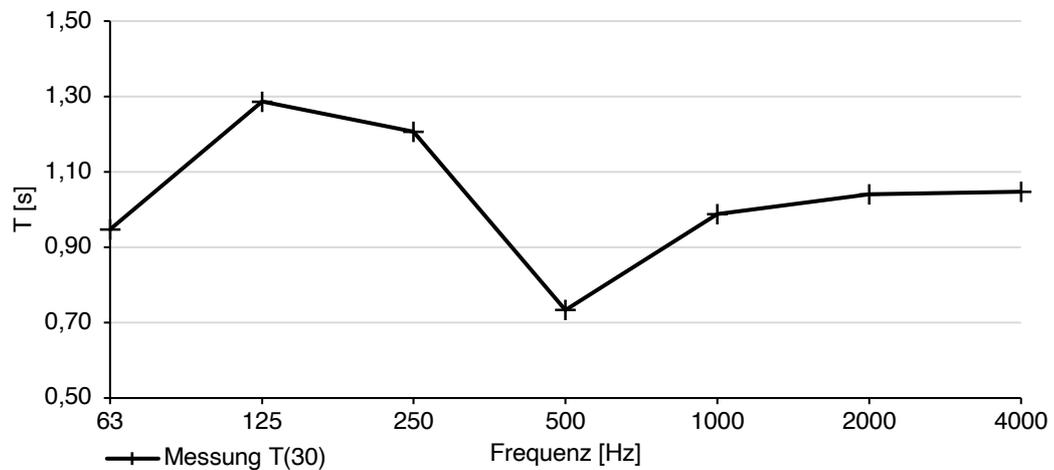
**Raum 2 Nachhallzeitmessung**

Abbildung 41 Raum 2 Ergebnis Nachhallzeitmessung

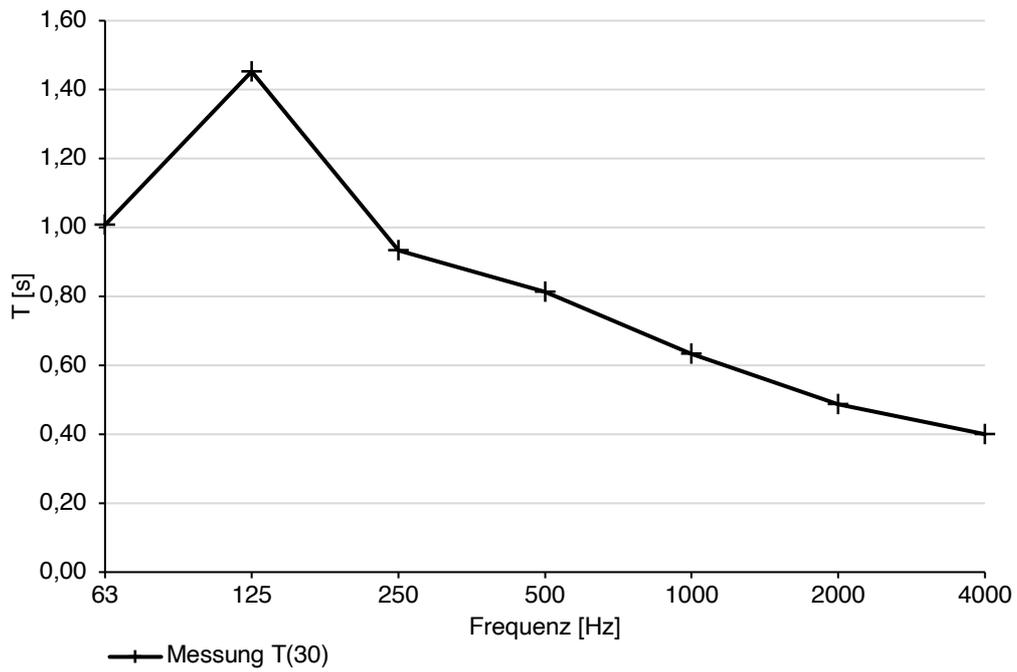


Abbildung 42 Raum 3 Ergebnis Nachhallzeitmessung

#### Raum 4 Nachhallzeitmessung

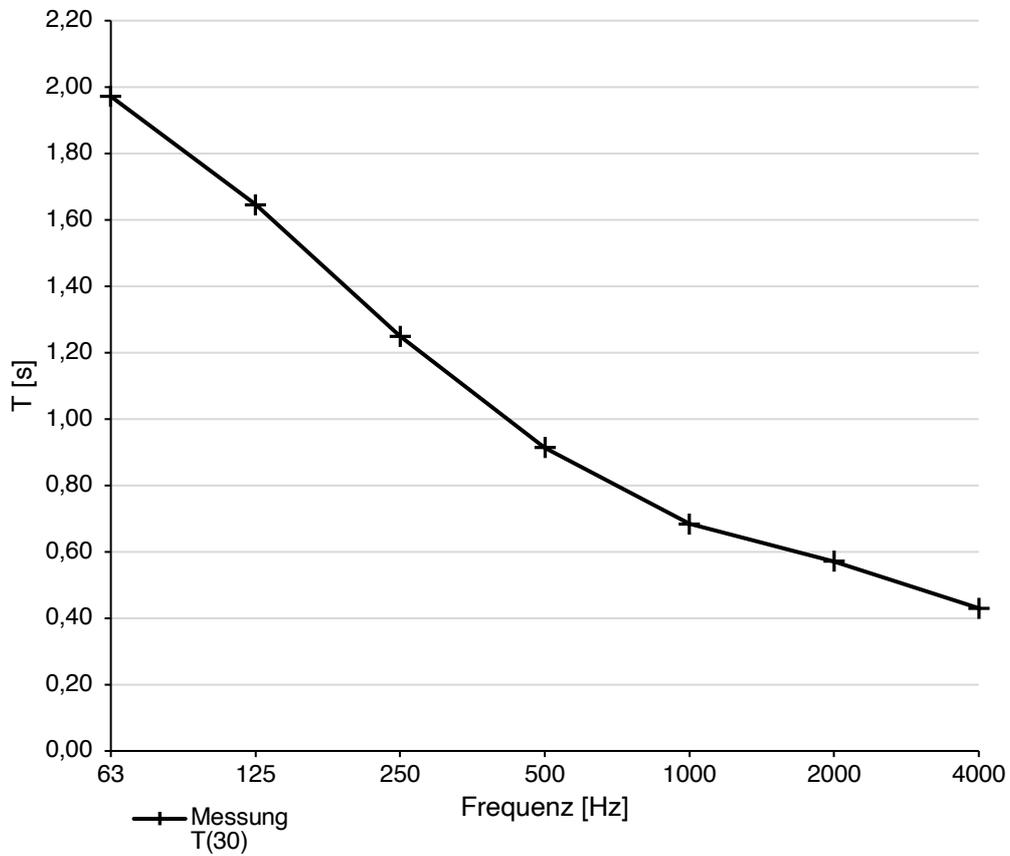


Abbildung 43 Raum 4 Ergebnis Nachhallzeitmessung

## 4 SIMULATION

### 4.1 Simulationswerkzeuge

Im Zuge dieser Arbeit wurde Odeon Room Acoustics Programm Version 11.0 als Simulationssoftware ausgewählt. Diese Software ermöglicht eine hybride Berechnung von punktförmigen Schallquellen. Die ersten Reflektionen werden durch eine Kombination aus Image Source Modell und Ray Tracing berechnet, für die späten Reflektionen kommt eine speziellen Ray Tracing Methode zu Anwendung, die mit Hilfe von generierten Sekundären Schallquellen berechnet wird. (Christensen 2008)

### 4.2 3D-Modell und Import

Im ersten Schritt wurde ein 3D-Modell mit Hilfe des Programms Rhino erstellt. Die Modellierung in Odeon 11.0 ist möglich aber die Komplexität der Raumgeometrie spricht dagegen, effizienter ist die Verwendung einer 3D-Modellierungs-Software. Das Programm Rhino erzeugt Kurvenflächen und kann daher die Gewölbe ohne Segmentierung abbilden (Abbildung 44). Für die Verwendung im Programm Odeon 11.0 ist es allerdings notwendig das 3D-Modell in ein vereinfachtes und geschlossenes 3D-Netzmodell umzuwandeln. Das 3D-Modell inklusive definierter Layer, wurde importiert und in Odeon 11.0 weiterbearbeitet.

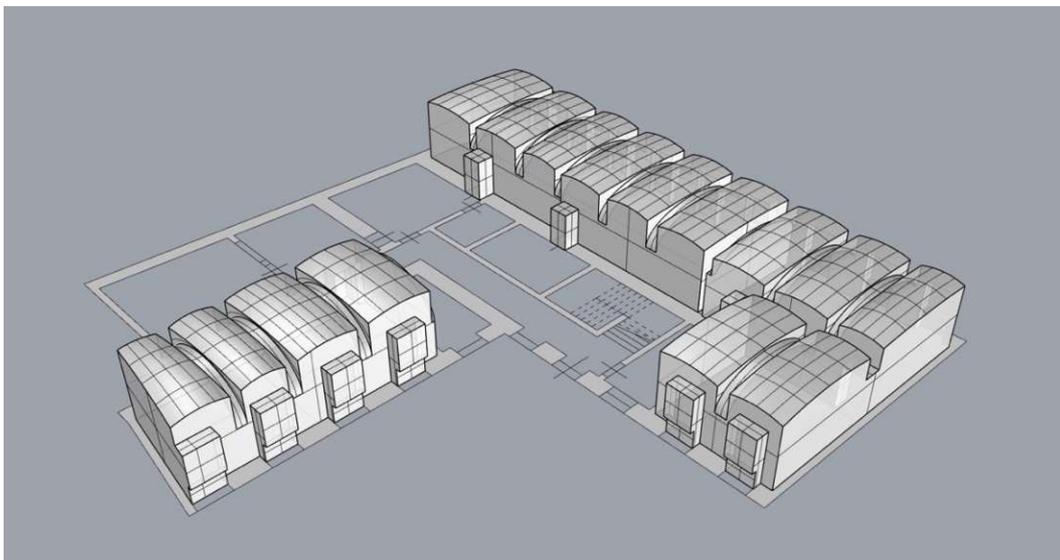


Abbildung 44 3D Darstellung der untersuchten Räume (eigene Darstellung)

## 4.3 Kalibration und Simulationsergebnisse

Die ersten Ergebnisse der Simulation durch Odeon haben im Vergleich zu den Nachhallzeit-Messungen deutliche Abweichungen gezeigt. Die ersten Annahmen basierten auf den Absorptionswerten der Standard-Materialdatenbank von Odeon.

Durch die Anwendung eigens erstellter Materialien mit angepassten Absorptionswerten, konnte eine erste Verbesserung der Ergebnisse erzeugt werden. Die Absorptionswerte stützen sich dabei auf Messergebnisse anderer Wissenschaftler. Zusätzlich kamen auch virtuelle Absorber zum Einsatz um eine weitere Feinabstimmung des Simulationsmodells zu ermöglichen.

### Raum 1

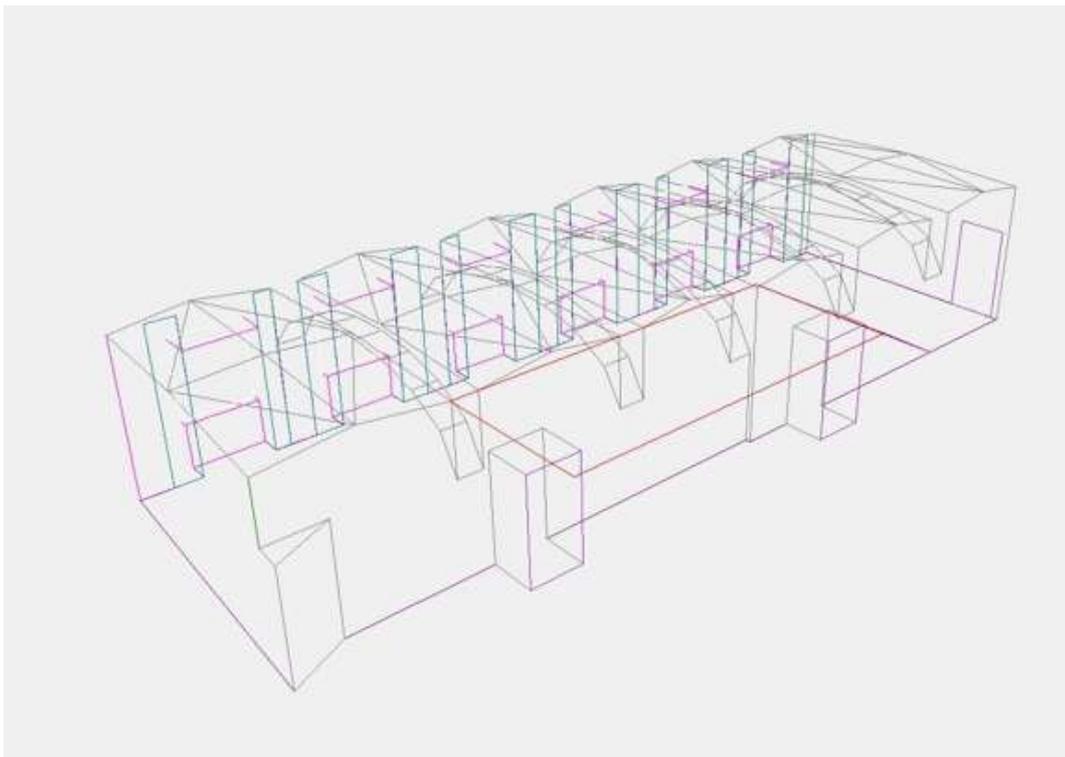


Abbildung 45 Raum 1 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung)

Abbildung 45 zeigt den großen Saal (Raum 1) der Musikschule als Drahtmodell nachdem er in das Programm Odeon 11.0 importiert wurde. Die farbigen Begrenzungslinien auf den Objektkanten wurden zuerst als Layer definiert und stellen die unterschiedlichen Oberflächen dar. Im Materialeditor von Odeon 11.0

wurden die angenommen Materialeigenschaften bzw. Absorptionswerte der Oberflächen zugewiesen.

Die Materialliste ist in Tabelle 7 zu finden. Zusätzlich zu den Materialien in der Liste, ist im Drahtmodell auch die Publikumsfläche (rot) eingetragen und Flächen für eventuelle Vorhänge (türkis) eingezeichnet. Für die Anpassung der Simulation sind diese aber nicht im Einsatz sondern die Flächen der Vorhänge als Wand und die Publikumsfläche als Holzboden aktiv.

Tabelle 7 Materialliste der Simulation Raum 1 (Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  nicht kalibriert)

Elemente	Ref. Nr.	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	m <sup>2</sup>
Putz (bemalt)	4000	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	166,4
Massivholztür	10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	6,00
einfaches Fensterglas	10006	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04	11,65
Holzboden, schwimmend	3001	0,10	0,10	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	95,78
Gipskarton 12,5mm, Luft 100mm	4042	0,08	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	77,51
Gipskarton 12,5mm, Dämmung 1	4043	0,30	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	14,8

Bei den Messungsergebnissen von Raum 1 wird ein Einbruch der Nachhallzeit bei 500 Hz erkennbar (Abbildung 46). Die 1. Annahme auf Basis der Standard Materialbibliothek von Odeon (siehe Tabelle 7) ergaben ein deutlich anderes Ergebnis als die Nachhallzeit Messungen.

In Raum 1 und Raum 2 wurde ein Laminatboden auf einem vorhandenen Teppichboden schwimmend verlegt. Er besteht aus 6mm MDF und einer dünnen Dekorfolie als Belag, die in der Berechnung als Masse vernachlässigt wird. Der Teppichboden erzeugt eine 3mm hohe Luftschicht zwischen Estrich und Laminatboden, daher wurde die gesamte Bodenfläche wie ein Plattenschwinger betrachtet. Im folgenden Rechenweg wurde die Resonanzfrequenz des Fußbodens berechnet:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{s'}{m}} \quad (5)$$

$$m = d * \rho \quad (6)$$

$$s' = \frac{E}{d'} \quad (7)$$

$f_r$  ... Resonanzfrequenz des Fußbodens [Hz]

$m$  ... Masse der schwingenden Schicht [kg]

$d$  ... Dicke des MDF-Laminatbodens: 0,006 [m]

$\rho$  ... Dichte MDF (laut holzdata.eu): 780 [kg/m<sup>3</sup>]

$s'$  ... dynamische Steifigkeit der Luftschicht [N/m<sup>3</sup>]

$E$  ... Elastizitätsmodul [Pa]  $E_{Luft} = 140000$  Pa

$d'$  ... Dicke der Luftschicht: 0,003 [m]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{140000}{0,003} * \left(\frac{1}{0,006 * 780}\right)} = 502,2 \text{ Hz} \quad (8)$$

Das Ergebnis aus Formel 8 gibt Grund zur 2. Annahme für Raum 1. Die Absorptionskoeffizienten des Fußbodens mit einem Maximum beim Frequenzband von 500 Hz wurden in Odeon angepasst. Beim Vergleich der Absorptionskoeffizienten des Holzbodens der Standard Materialbibliothek von Odeon (siehe Tabelle 7) und des virtuellen Absorber 01 (siehe Tabelle 8), können deutliche Unterschiede bei den tiefen und hohen Frequenzbändern festgestellt werden.

Es handelt sich um eine Annahme, die laut der Berechnung realistisch sein könnte, trotzdem wurden die Absorptionskoeffizienten so gewählt, dass möglichst wenig Abweichung zur in-Situ Messung entsteht (siehe Abbildung 46). Daher diene die gesamte Fläche des Fußbodens als virtueller Absorber.

Tabelle 8 angenommene Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  des virtueller Absorber 01

	Absorptionskoeffizienten $\alpha$						
<b>Virtueller Absorber 01</b>	63	125	250	500	1000	2000	4000
Laminatboden	0,03	0,03	0,05	0,22	0,06	0,03	0,03

Die Ergebnisse und prozentuellen Abweichungen der Simulation sind in Tabelle 9 aufgelistet. Da die Absorptionswerte des virtuellen Absorbers sehr gering sind und trotzdem eine sehr genaue Anpassung ermöglichen, werden die restlichen Absorptionswerte aller Oberflächenmaterialien aus der Odeon Datenbank nicht verändert und gelten daher für den Rest der Musikschule. Das betrifft vor allem Putzoberflächen, die einen großen Anteil der Oberfläche des Raumes haben, und auch bei kleinen Änderungen Einfluss auf die Nachhallzeit haben können. Im Fall dieser Studie wird davon ausgegangen das jeder Raum der Musikschule auf die gleiche Art verputzt wurde. Da der Fußbodenaufbau in Raum 2 gleich ist wird der virtuelle Absorber 01 auch in Raum 2 unverändert angewendet.

## Raum 1 Simulationsergebnisse

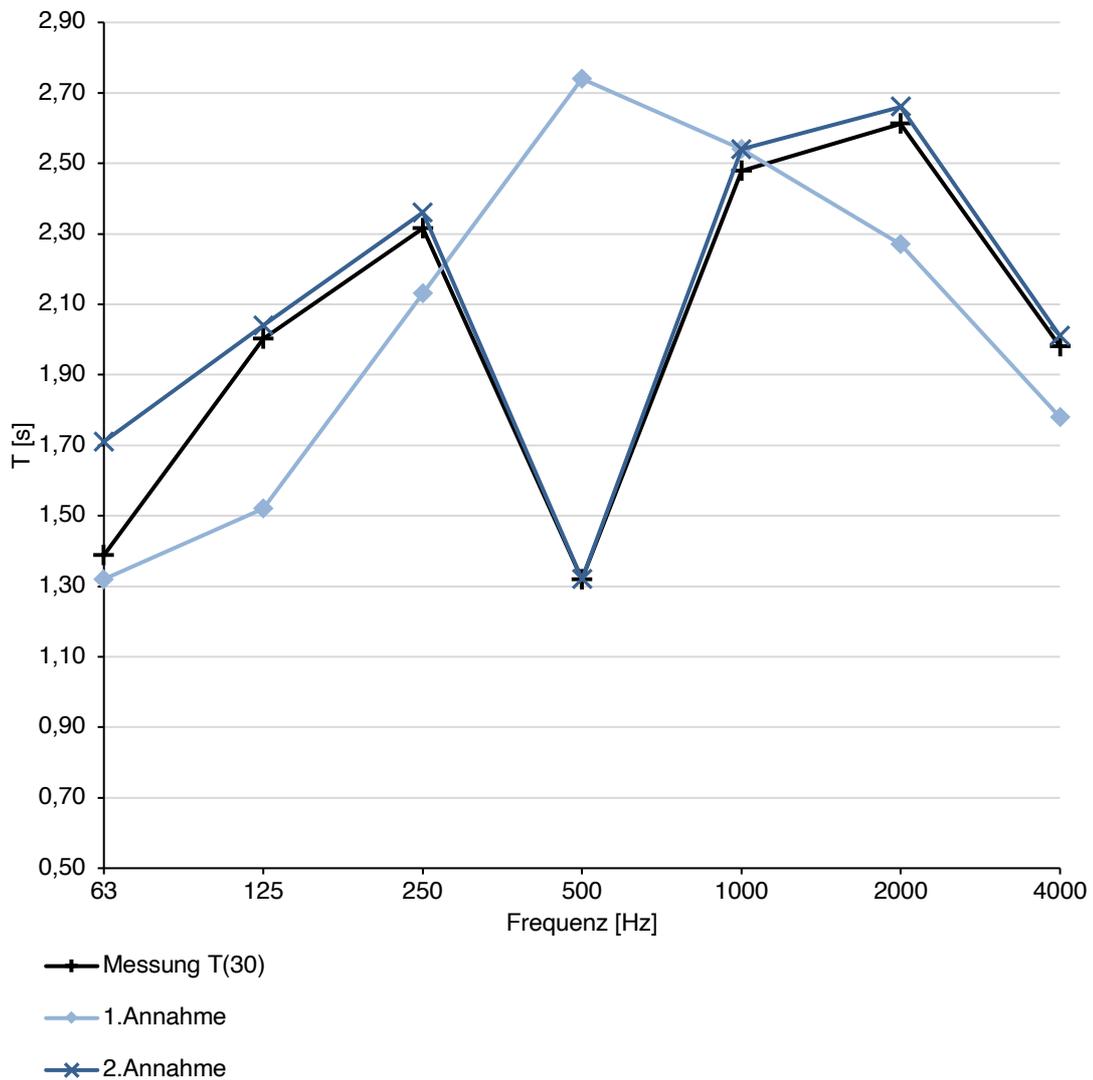


Abbildung 46 Raum 1 gemessene, simulierte Werte und kalibrierte Werte (eigene Darstellung)

Tabelle 9 Raum 1 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%]

	Frequenzen [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Messung T(30)	1,39	2,00	2,32	1,32	2,48	2,61	1,98
1. Annahme	1,32	1,52	2,13	2,74	2,54	2,27	1,78
Kalibration	1,71	2,04	2,36	1,32	2,54	2,66	2,01
<b>Abweichungen [%]</b>							
1. Annahme	-4,90	-24,11	-7,99	107,58	2,50	-13,09	-10,10
Kalibration	23,20	1,85	1,94	0,00	2,50	1,84	1,52

## Raum 2

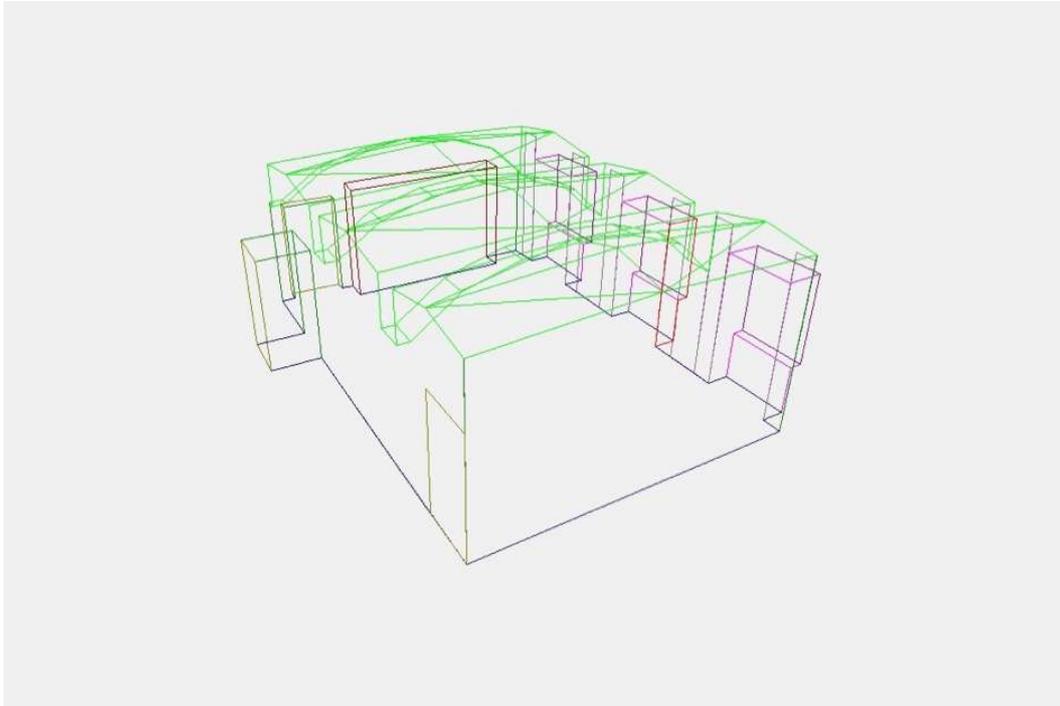


Abbildung 47 Raum 2 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung)

Abbildung 47 zeigt den benachbarten Raum 2 als Drahtmodell nachdem er in das Programm Odeon 11.0 importiert wurde. Die farbigen Begrenzungslinien auf den Objektkanten stellen die unterschiedlichen Oberflächen dar. Im Materialeditor von Odeon 11.0 wurden die angenommen Materialeigenschaften bzw. Absorptionswerte der Oberflächen zugewiesen. Die Materialliste ist in Tabelle 10 zu finden. Zusätzlich zu den Materialien in Raum 1 wurde die Kastenfläche (dunkelrot) als „25 mm Holz mit Luftraum“ definiert und Flächen der Vorhänge (grau) eingezeichnet. Ansonsten haben alle Räume die gleichen Oberflächenmaterialien.

Tabelle 10 Materialliste der Simulation Raum 2 (Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  nicht kalibriert)

Element	Ref. Nr.	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	m <sup>2</sup>
Vorhänge	8006	0,05	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73	0,73	6,60
Putz (bemalt)	4002	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	77,4
25mm Holz mit Luftraum	3065	0,19	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	10,89
Holzboden, schwimmend	3001	0,10	0,10	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	43,84
Massivholztür	10007	0,14	0,14	0,10	0,30	0,40	0,40	0,40	0,30	6,10
einfaches Fensterglas	10006	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04	5,96
Gipskarton 12,5mm, Luft 100mm	4042	0,08	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	20,94
Gipskarton 12,5mm, Dämmung 100mm	4043	0,30	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	5,5

In Raum 2 konnte der virtuelle Absorber 01 (siehe Tabelle 8) der auch in Raum 1 zum Einsatz kommt, erste deutliche Verbesserungen für die 2. Annahme der Simulation bewirken. Die Vorhänge, die in Raum 2 neben den Fenstern positioniert sind, haben einen weiteren Unterschied bewirkt. Vor Ort hängen schwere und eng gefaltete Baumwollplüsch Vorhänge. Durch Literaturrecherche (Fasold, Sonntag 1972) konnte ein passender gemessener Vorhang gefunden werden (Tabelle 11). Die Absorptionswerte der Vorhänge aus der Standard Materialbibliothek von Odeon waren nicht ausreichend. Mit Hilfe der verbesserten Absorptionswerte konnte eine 3. Annahme getroffen werden die den in-situ Messungsergebnissen deutlich näher kam (siehe Abbildung 48).

*Tabelle 11 Vergleich der Vorhangabsorptionswerte in Odeon und nach Recherche (Fasold, Sonntag 1972)*

	Absorptionskoeffizienten $\alpha$						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Vorhänge Odeon	0,05	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73
Baumwollplüsch eng gefaltet (Fasold, Sonntag)	0,10	0,20	0,67	0,86	0,84	0,97	1,02

In Raum 2 kommt für den letzten Anpassungsschritt ein zweiter virtueller Absorber zum Einsatz und zwar wird die Oberfläche des Kastens verwendet. Die Absorptionsfähigkeit des Materials aus der Odeon Bibliothek, die für die Kastentüren angenommen wurde, ist nicht ausreichend. Die Kastentüren schließen das dahinter liegende Volumen nicht luftdicht ab und die Kastenfächer sind auch unterschiedlich befüllt. Die hohen Absorptionswerte ab 500 Hz aufwärts (Tabelle 12), sind so nicht zu erklären, aber die Fläche übernimmt so ihre Funktion als virtueller Absorber.

*Tabelle 12 Raum 2 virtueller Absorber 02*

	Absorptionskoeffizienten $\alpha$						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
<b>Virtueller Absorber 02</b>							
Kasten Raum 2	0,30	0,20	0,25	0,50	0,50	0,50	0,25

Das Simulationsmodell von Raum 2 benötigte somit drei Schritte der Anpassung die in Tabelle 13 aufgelistet sind und auf Abbildung 48 als Diagramm dargestellt ist.

## Raum 2 Simulationsergebnisse

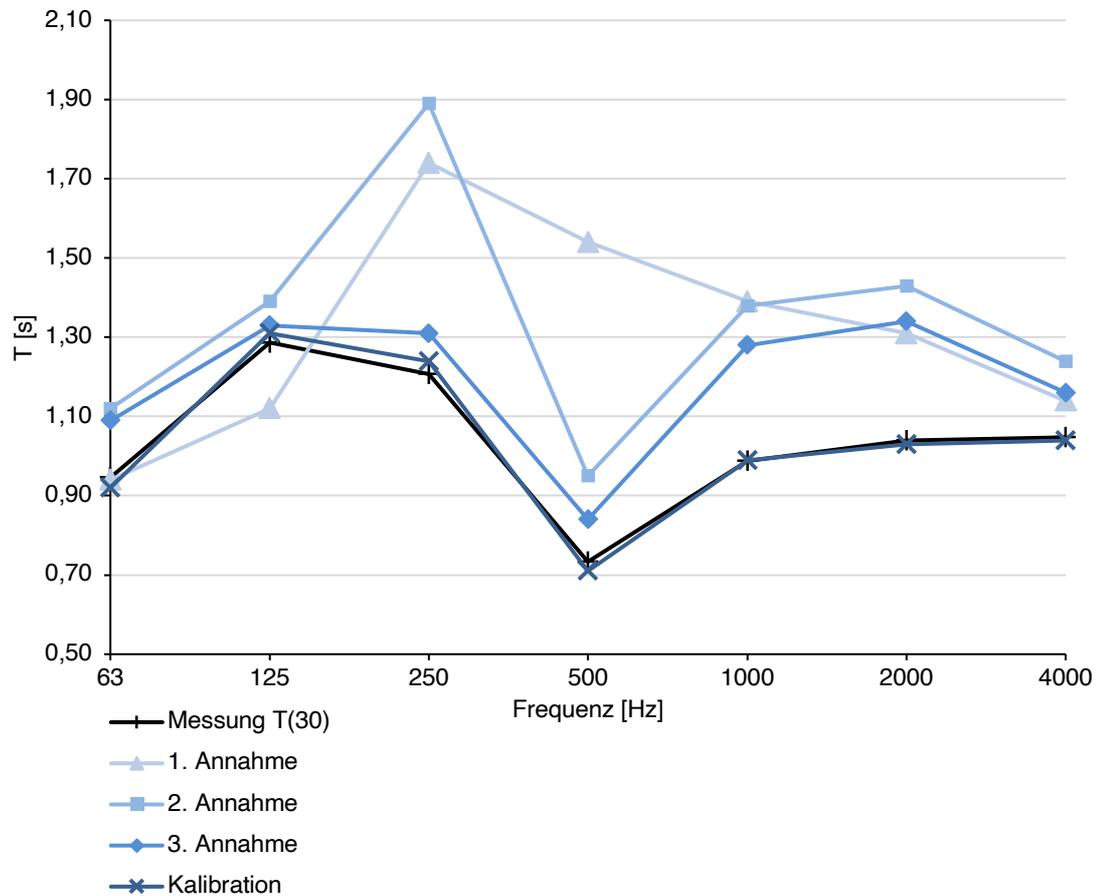


Abbildung 48 Raum 2 gemessene, simulierte Werte (eigene Darstellung)

Tabelle 13 Raum 2 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%]

	Frequenzen [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Messung T(30)	0,95	1,29	1,21	0,73	0,99	1,04	1,05
1. Annahme	0,94	1,12	1,74	1,54	1,39	1,31	1,14
2. Annahme	1,12	1,39	1,89	0,95	1,38	1,43	1,24
3. Annahme	1,09	1,33	1,31	0,84	1,28	1,34	1,16
Kalibration	0,92	1,31	1,24	0,71	0,99	1,03	1,04

Abweichungen [%]							
1. Annahme	0,70	12,95	-44,20	-110,00	-40,64	-25,96	-8,92
2. Annahme	18,31	8,03	56,63	29,55	39,63	37,50	18,47
3. Annahme	15,14	3,37	8,56	14,55	29,51	28,85	10,83
Kalibration	-2,82	1,81	2,76	-3,18	0,17	-0,96	-0,64

### Raum 3

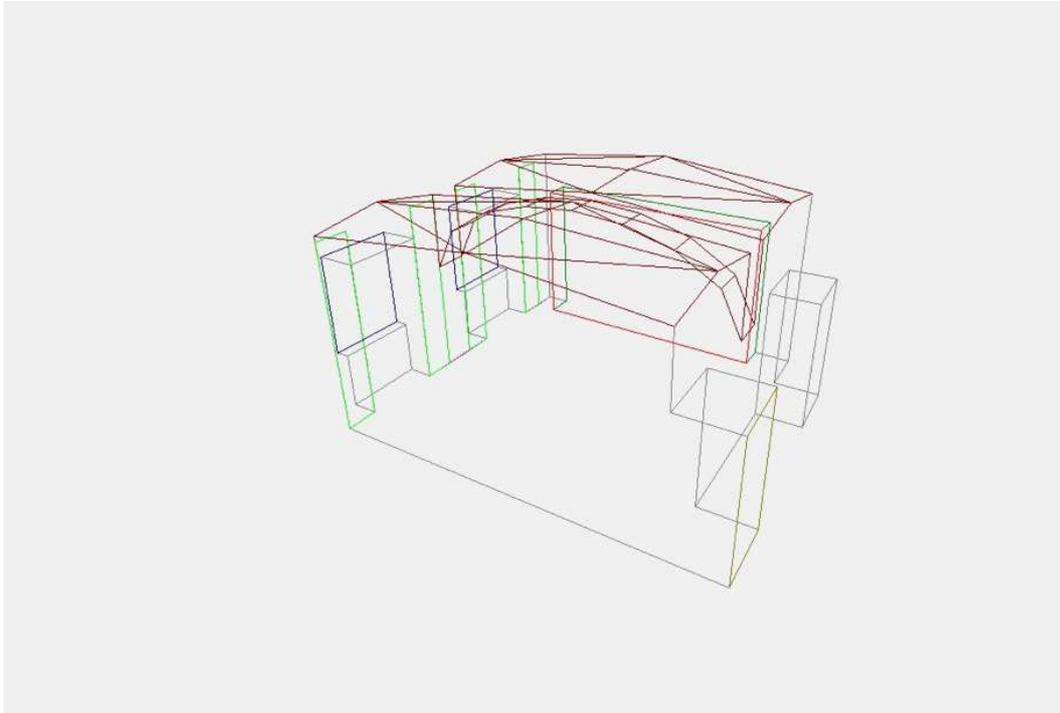


Abbildung 49 Raum 3 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung)

Abbildung 49 zeigt den Raum 3 als Drahtmodell nachdem er in das Programm Odeon 11.0 importiert wurde. Die farbigen Begrenzungslinien auf den Objektkanten stellen die unterschiedlichen Oberflächen dar. Im Materialeditor von Odeon 11.0 wurden die angenommen Materialeigenschaften bzw. Absorptionswerte der Oberflächen zugewiesen. Die Materialliste ist in Tabelle 14 zu finden. Wie in Raum 2 wurde die Kastenfläche (dunkelrot) als „25 mm Holz mit Luftraum“ definiert und Flächen der Vorhänge (grün) eingezeichnet. Bis auf den Nadelfilz am Boden haben alle Räume die gleichen Materialien.

Tabelle 14 Materialliste der Simulation Raum 3 (Absorptionskoeffizienten  $\alpha$ )

Element	Ref. Nr.	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	m <sup>2</sup>
Putz (bemalt)	4002	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	62,30
25 mm Holz mit Luftraum	3065	0,19	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	13,56
Vorhänge	8006	0,05	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73	0,73	5,57
einfaches Fensterglas	10006	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04	3,80
Massivholztür	10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	2,00
Nadelfilz	7000	0,01	0,01	0,02	0,05	0,15	0,30	0,40	0,40	26,66
Gipskarton 12,5mm, Luft 100mm	4042	0,08	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	17,00
Gipskarton 12,5mm, Dämmung 100mm	4043	0,30	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	5,90

Die 1. Annahme in Raum 3 wich sehr stark von den in-Situ Messungen ab, vor allem im Frequenzband von 250 Hz. Die Vorhänge, die in Raum 2 neben den Fenstern positioniert sind (siehe Tabelle 11), gibt es in gleicher Form und anderer Dimension auch in Raum 3. So konnte bei der 2. Annahme eine deutliche Verbesserung erreicht werden (siehe Abbildung 50).

Für den letzten Anpassungsschritt im Raum 3 kommt auch ein virtueller Absorber an den Flächen der Kastenfronten zum Einsatz. Die Absorptionswerte der virtuellen Absorber an den Kastenfronten ähneln sich, aber nicht die Dimensionen, was Grund zur Annahme gibt, dass die Kastenfronten mehr absorbieren könnten als die Standard Oberfläche laut Odeon.

Die Absorptionswerte des virtuellen Absorber 03 sind in Tabelle 15 aufgelistet.

*Tabelle 15 Raum 3 Virtueller Absorber 03*

	Absorptionskoeffizienten $\alpha$						
<b>Virtueller Absorber 03</b>	63	125	250	500	1000	2000	4000
Kasten Raum 3	0,30	0,20	0,40	0,45	0,58	0,50	0,70

Wie aus den Ergebnissen auf Abbildung 50 hervorgeht konnte mit Hilfe des virtuellen Absorbers 03 ein sehr genau kalibriertes Simulationsmodell erstellt werden.

Das Simulationsmodell von Raum 3 benötigte somit zwei Anpassungen die in Tabelle 16 aufgelistet sind

## Raum 3 Simulationsergebnisse

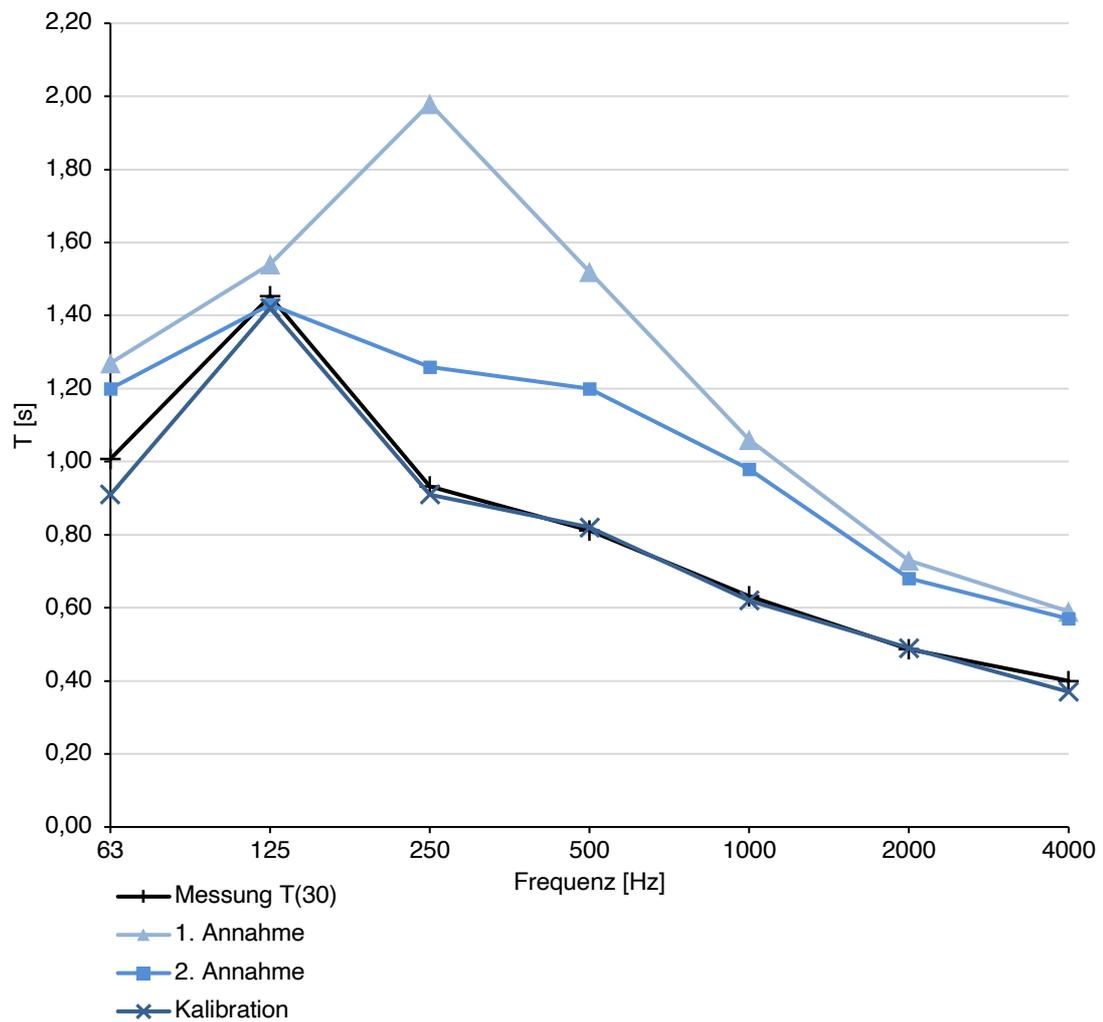


Abbildung 50 Raum 3 gemessene, simulierte Werte (eigene Darstellung)

Tabelle 16 Raum 3 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%]

	Frequenzen [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Messung T(30)	1,01	1,45	0,93	0,81	0,63	0,49	0,40
1. Annahme	1,27	1,54	1,98	1,52	1,06	0,73	0,59
2. Annahme	1,20	1,43	1,26	1,20	0,98	0,68	0,57
Kalibration	0,91	1,42	0,91	0,82	0,62	0,49	0,37
Abweichungen [%]							
1. Annahme	26,16	6,02	112,33	87,08	67,59	49,74	47,50
2. Annahme	19,21	-1,55	35,12	47,69	54,94	39,49	42,50
Kalibration	-9,60	-2,24	-2,41	0,92	-1,98	0,51	-7,50

## Raum 4

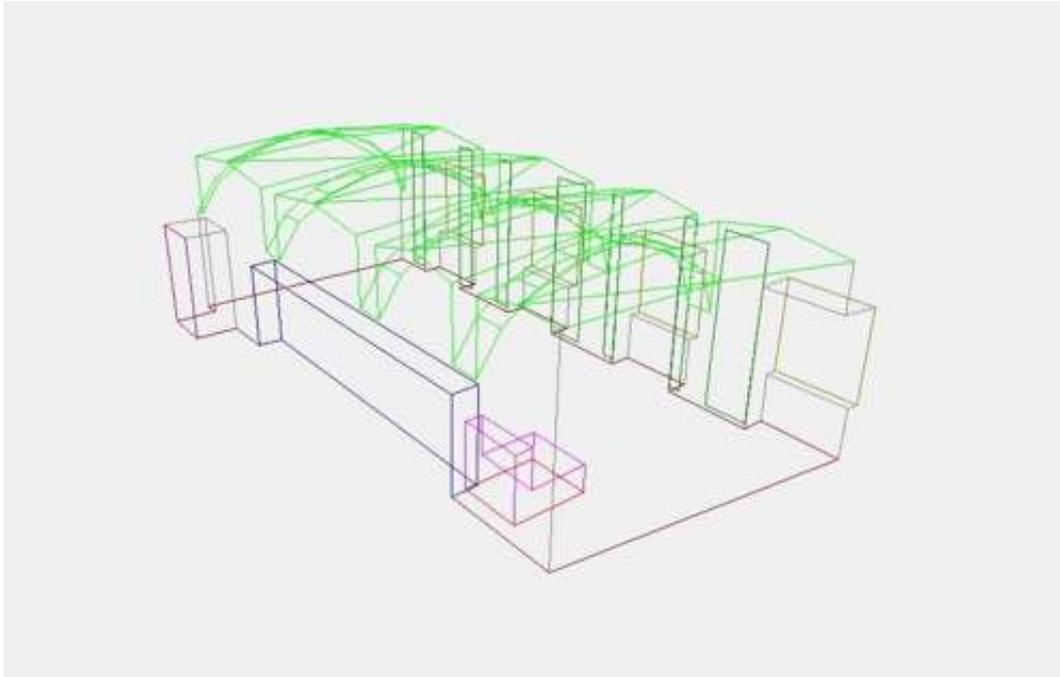


Abbildung 51 Raum 4 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung)

Abbildung 51 zeigt den Raum 4 als Drahtmodell nachdem er in das Programm Odeon 11.0 importiert wurde. Die farbigen Begrenzungslinien auf den Objektkanten stellen die unterschiedlichen Oberflächen dar. Im Materialeditor von Odeon 11.0 wurden die angenommen Materialeigenschaften bzw. Absorptionswerte der Oberflächen zugewiesen. Die Materialliste ist in Tabelle 17 zu finden. Wie in Raum 2 wurde die Kastenfläche (violett) als „25 mm Holz mit Luftraum“ definiert und Flächen der Vorhänge (grün) eingezeichnet. Bis auf den Nadelfilz am Boden haben alle Räume die gleichen Materialien.

Tabelle 17 Materialliste der Simulation Raum 3 (Absorptionskoeffizienten  $\alpha$ )

Element	Ref. Nr.	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	m <sup>2</sup>
Putz (bemalt)	4002	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	148,02
schwer gepolstert	11056	0,72	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79	0,79	3,82
25 mm Holz mit Luftraum	3065	0,19	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05	13,74
Vorhänge	8006	0,05	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73	0,73	9,18
einfaches Fensterglas	10006	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04	8,33
Massivholztür	10007	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	2,00
Unterseite Sofa (Teppich)	7002	0,03	0,03	0,09	0,20	0,54	0,70	0,72	0,72	2,39
Nadelfilz	7000	0,01	0,01	0,02	0,05	0,15	0,30	0,40	0,40	49,86

Die 1. Annahme in Raum 4 wich ähnlich wie in Raum 3 sehr stark von den in-Situ Messungen ab, ebenfalls vor allem im Frequenzband von 250 Hz (siehe Abbildung 50). Raum 3 und Raum 4 haben eine ähnliche Ausstattung und die gleichen Oberflächenmaterialien daher überraschen die ähnlichen Probleme der Simulationen von Raum 3 und Raum 4 nicht.

Die Vorhänge (siehe Tabelle 11), die auch in Raum 2 und Raum 3 neben den Fenstern positioniert sind gibt es in gleicher Form und anderer Dimension auch in Raum 4. Die 2. Annahme konnte dank der veränderten Absorptionswerte der Vorhänge deutlich näher an die in-Situ Messung herankommen (siehe Abbildung 50).

Auch im Raum 4 kommt ein virtueller Absorber an den Flächen der Kastenfronten zum Einsatz. Der virtuelle Absorber 04 (siehe Tabelle 18) hat ähnliche Absorptionswerte wie die virtuellen Absorber auf den Kastenfronten in Raum 2 und Raum 3. Die Kästen wurden in allen Räumen aufgestellt, außer in Raum 1, das lässt die Annahme zu, dass die Kastenfronten mehr absorbieren könnten als die Standard Material Bibliothek von Odeon 11.0 vorgeben würde. Die hohen Absorptionswerte ab 500 Hz aufwärts sind so trotzdem nicht ableitbar.

Die Absorptionswerte des virtuellen Absorber 04 sind in Tabelle 18 aufgelistet.

*Tabelle 18 Raum 4 Virtueller Absorber 04*

	Absorptionskoeffizienten $\alpha$						
<b>Virtueller Absorber 04</b>	63	125	250	500	1000	2000	4000
Kasten Raum 4	0,18	0,35	0,45	0,65	0,73	0,50	0,70

Wie aus den Ergebnissen auf Abbildung 52 hervorgeht konnte auch in Raum 4 durch den Einsatz eines virtuellen Absorbers ein genau kalibriertes Simulationsmodell erstellt werden.

Die zwei Anpassungsschritte der Simulation für Raum 4 sind in der Tabelle 19 aufgelistet.

## Raum 4 Simulationsergebnisse

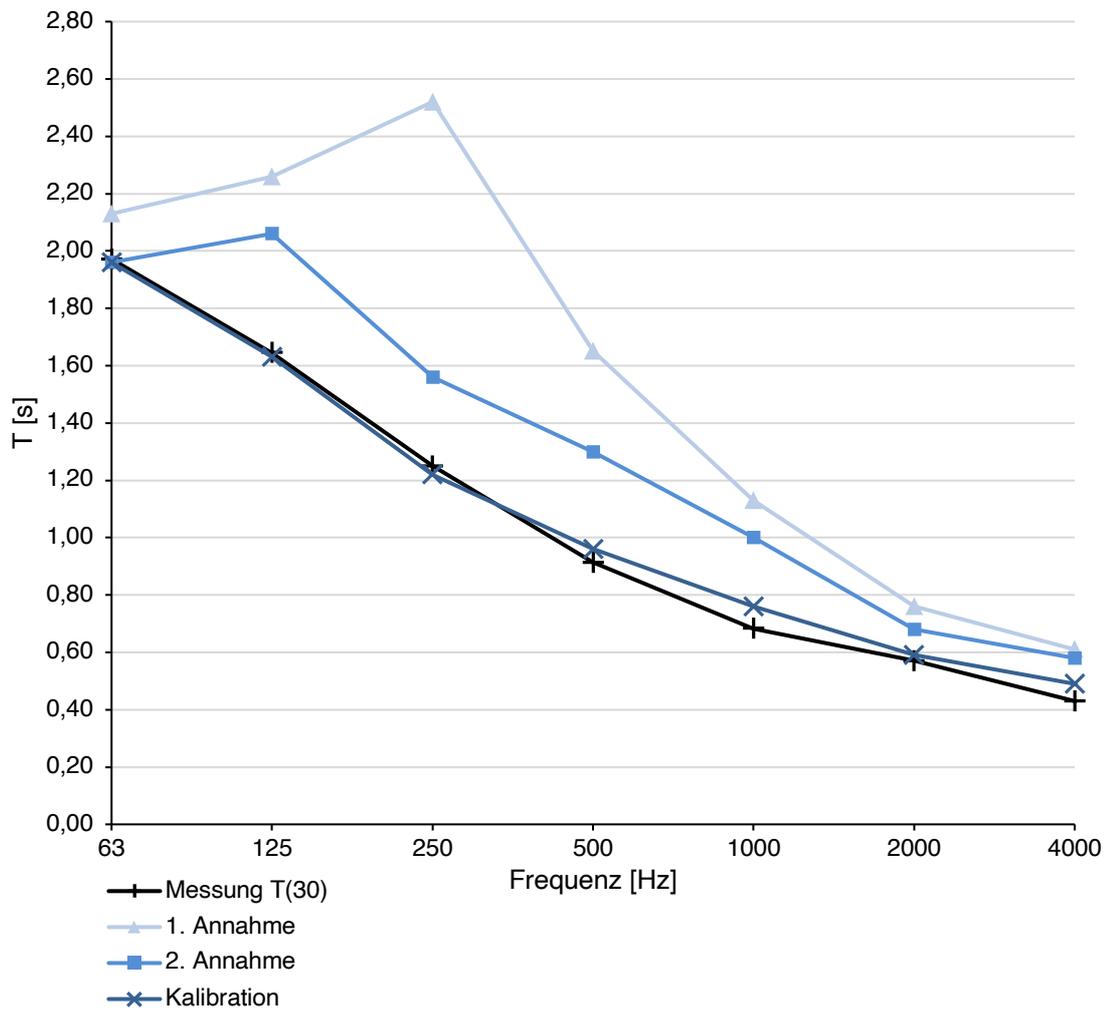


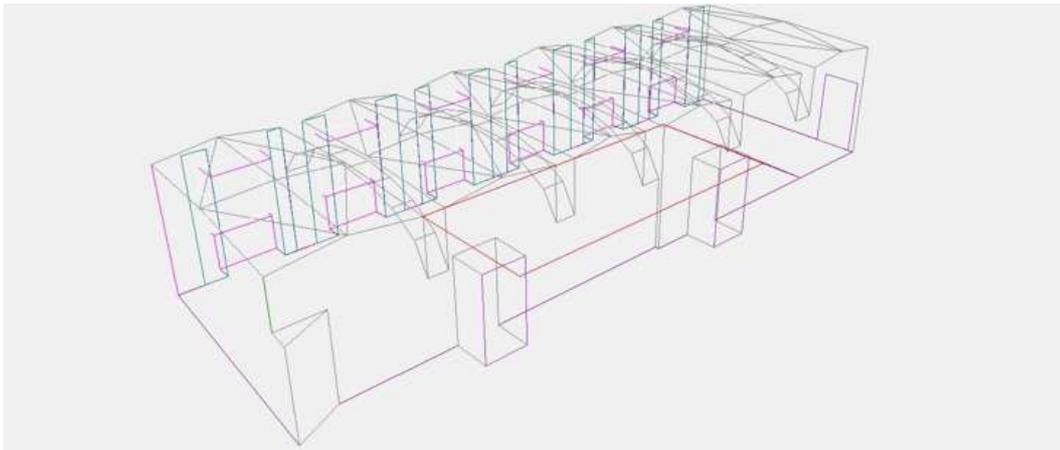
Abbildung 52 Raum 4 gemessene, simulierte Werte (eigene Darstellung)

Tabelle 19 Raum 4 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%]

	Frequenzen [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Messung T(30)	1,97	1,65	1,25	0,91	0,68	0,57	0,43
1. Annahme	2,13	2,26	2,52	1,65	1,13	0,76	0,61
2. Annahme	1,96	2,06	1,56	1,3	1	0,68	0,58
Kalibration	1,96	1,63	1,22	0,96	0,76	0,59	0,49
<b>Abweichungen [%]</b>							
1. Annahme	8,03	37,39	101,73	80,66	65,37	33,14	41,86
2. Annahme	-0,59	25,23	24,88	42,34	46,34	19,12	34,88
Kalibration	-0,59	-0,91	-2,33	5,11	11,22	3,36	13,95

## 4.4 Simulierte Maßnahmen der akustischen Verbesserung

In **Raum 1** ist der Verlauf der Nachhallzeit ähnlich wie in Raum 2 nicht balanciert und hat einen starken Einbruch bei 500 Hz (siehe Abbildung 46). In diesem Raum sind ebenfalls, wie in allen anderen Räumen, Baumwollplüsch Vorhänge vom Team der Musikschule angedacht. Daher wird dieser Fall simuliert. Außerdem gibt es eine große Publikumsfläche, die ebenfalls simuliert wird. Das heißt es werden drei verschiedene Kombinationen simuliert. Erstens der Fall Unterrichtsraum mit „Vorhängen ohne Publikum“. Zweitens die Konzertsaalnutzung mit „Vorhängen und Publikum“ und drittens der Fall „Publikum ohne Vorhänge“. *Abbildung 53* zeigt das passende Modell dazu.



*Abbildung 53 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 1 + Maßnahmen (eigene Darstellung)*

Raum 1 hat ein Raumvolumen von  $285,80\text{m}^3$ . Die folgende Berechnung  $T_{\text{soll}}=0,45 \cdot l_{\text{gV}} + 0,07[\text{s}]$  (9) ermittelt die optimale Nachhallzeit laut ÖNORM B 8115-3.

$$T_{\text{soll}} = 0,45 \cdot l_{\text{gV}} + 0,07[\text{s}] \quad (9)$$

$$T_{\text{soll}} = 1,18 \text{ s laut ÖNORM B 8115-3}$$

Das Ergebnis der Simulation (Abbildung 54) zeigt dass der Fall „Publikum ohne Vorhänge“ (mit grünem Kreis markiert) noch am vorteilhaftesten wäre. In diesem Fall bleiben die Resultate der Simulation sogar fast im Toleranzbereich der ÖNORM B 8115-3 (2005).

Der Fall „Vorhänge und Publikum“ (mit rotem Quadrat markiert) erzeugt ein eher ungleiches Bassverhältnis und eine zu kurze Nachhallzeit bei hohen Frequenzen.

Daher wäre es vorteilhafter schwer gepolsterte Stühle in den Publikumsbereich zu stellen, anstatt wichtige Reflexionsflächen an den Seitenwänden mit Vorhängen zu bedämpfen. Der Fall „Vorhänge ohne Publikum“ (mit gelbem Dreieck markiert) schwächt die deutlich zu lange Nachhallzeit im hohen Frequenzbereich ab, trotzdem bleiben die Ergebnisse knapp außerhalb der Toleranzbereiches der ÖNORM B 8115-3.

### Raum 1 simulierte akustische Verbesserung

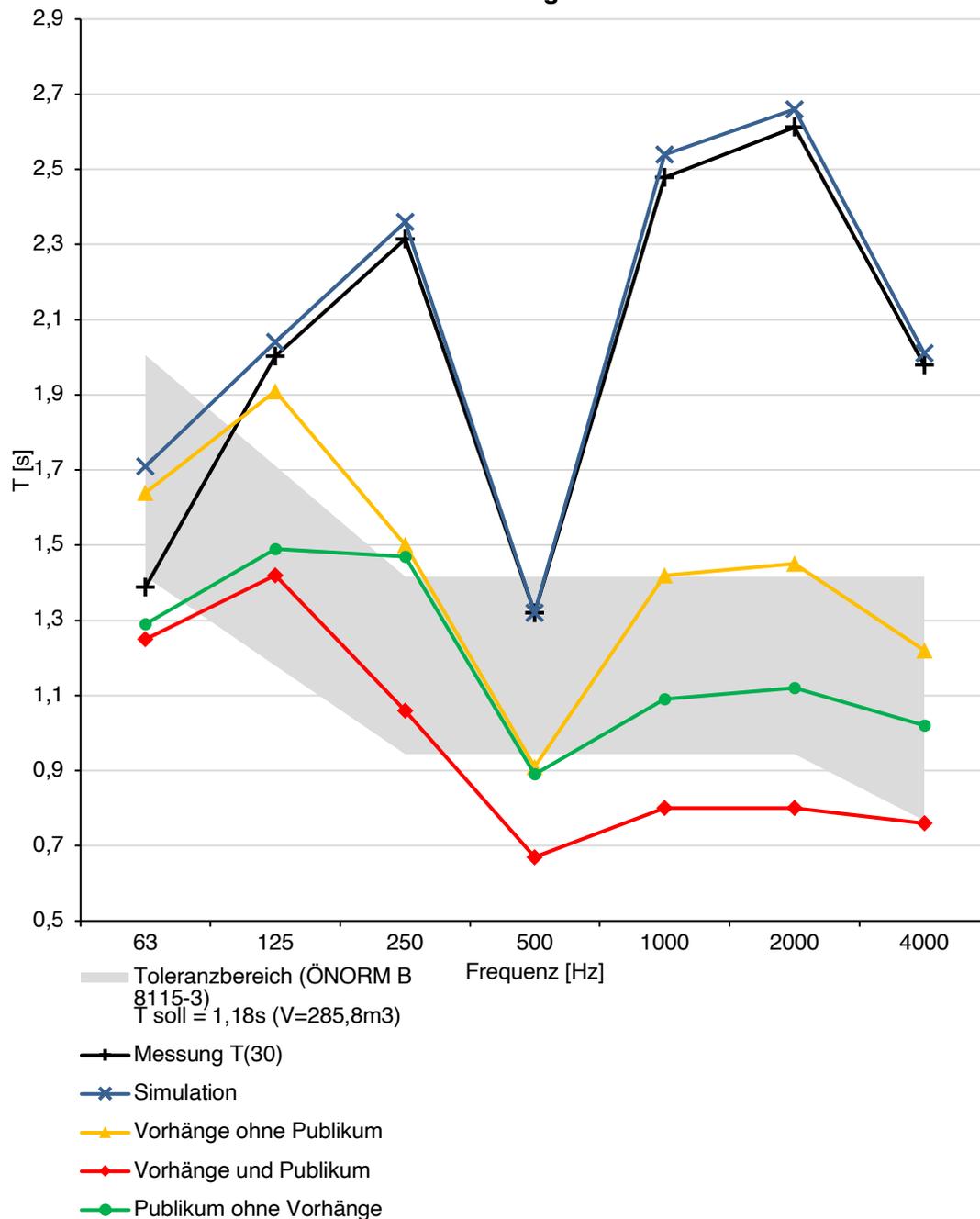


Abbildung 54 Raum 1, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung)

**Raum 2** wird laut der Auswertung der Fragebögen am unangenehmsten wahrgenommen. Der Verlauf der Nachhallzeit ist ähnlich wie in Raum 1 nicht balanciert und hat einen starken Einbruch bei 500 Hz (siehe Abbildung 48).

Raum 2 hat ein Raumvolumen von 133,40 m<sup>3</sup>.

$$T_{soll} = 0,45 * lgV - 0,37[s] \quad (10)$$

$$T_{soll} = 0,63 \text{ s laut ÖNORM B 8115-3}$$

Mittels VPR-Modulen (Verbundplatten Resonatoren, Fuchs 2017) könnte der Bassbereich und der untere Mittenbereich ab 250 Hz absorbiert werden (Tabelle 20). Zusätzlich könnte mit einer großen Teppichfläche in der Mitte des Raumes die Nachhallzeit ab ca. 1000 Hz aufwärts reduziert werden (Siehe Tabelle 20).

*Tabelle 20 zusätzliche Absorber und deren Absorptionswerte*

zusätzliche Absorber	Absorptionskoeffizienten $\alpha$						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
VPR-Module (Fuchs 2017)	0,80	1,15	0,80	0,60	0,40	0,25	0,15
Teppich (Odeon 11.0)	0,01	0,01	0,02	0,05	0,15	0,30	0,40

Auf Abbildung 55 ist das Drahtmodell von Raum 2 dargestellt. Die verschiedenen Fälle bzw. Varianten konnten in einem Modell berechnet werden. Die definierten Flächen (blau für VPR, rot für Teppich) wurden entsprechend der Variante eingestellt.

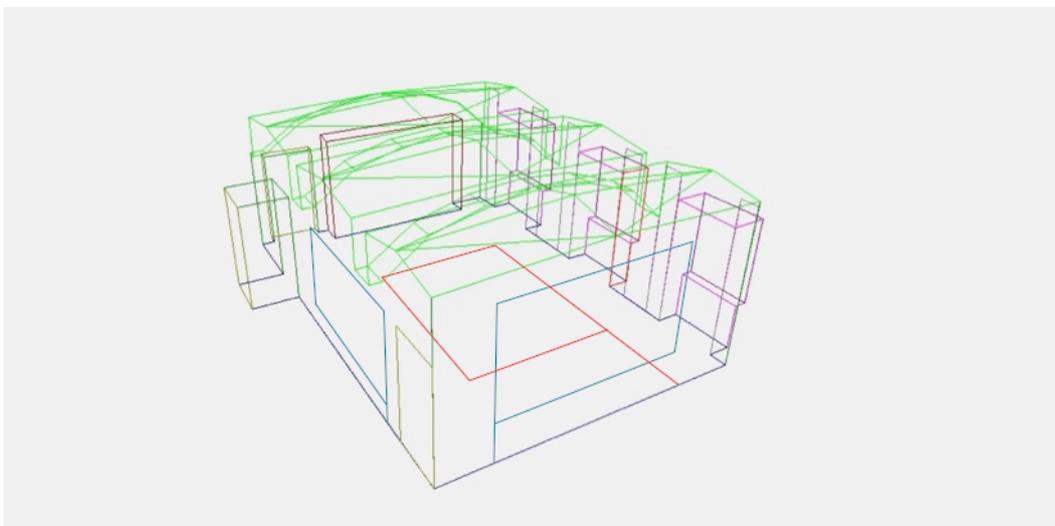


Abbildung 55 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 2 + Maßnahmen (eigene Darstellung)

Auf Abbildung 56 ist zu erkennen, dass der Fall *VPR (14,8m<sup>2</sup>) mit Teppich (10m<sup>2</sup>)* laut Simulation einen fast linearen Frequenzverlauf der Nachhallzeit bei  $T_{\text{soll}}$  von 0,63 [s] ermöglichen würde (mit grünem Kreis markiert). Der Fall *VPR (6m<sup>2</sup>) und Teppich (10m<sup>2</sup>)* wäre die Nachhallzeit ab 500 Hz aufwärts im Toleranzbereich und könnte ausreichend sein für die Nutzung mit klassischen Instrumenten (mit gelben Dreieck markiert). Der Fall *VPR (6m<sup>2</sup>)* (mit rotem Quadrat markiert) würde ausschließlich das Bassverhältnis verbessern, die Nachhallzeit wäre aber zu lange.

### Raum 2 simulierte akustischen Verbesserung

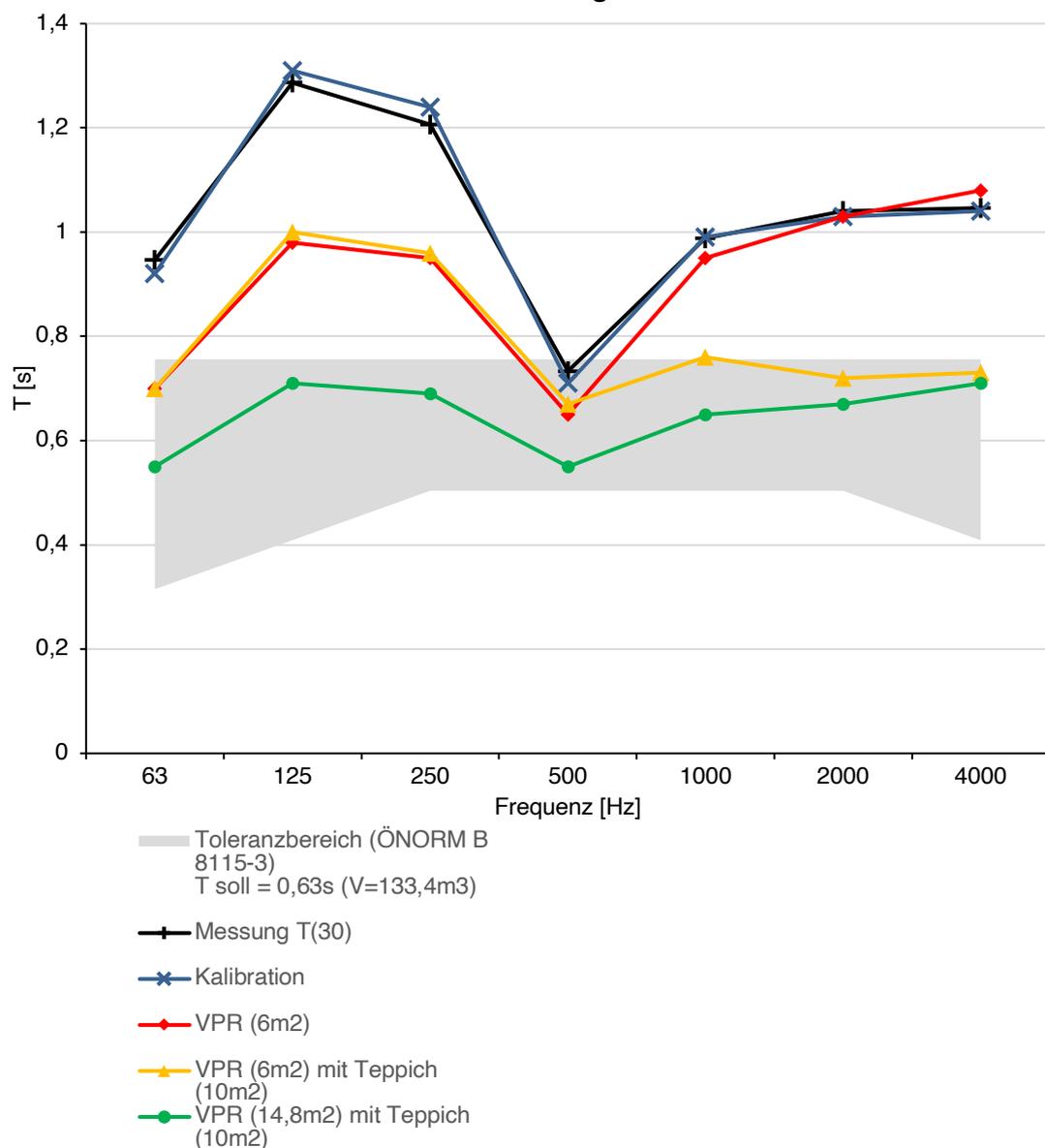


Abbildung 56 Raum 2, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung)

Der kleinste aller untersuchten Räume ist **Raum 3** (Abbildung 57). Er fällt durch sehr kurze Nachhallzeiten bei hohen Frequenzen auf (siehe Abbildung 50). Er wird zu „trocken“ empfunden für Streichinstrumente aber für Unterricht am Klavier ist der Raum in Ordnung (Siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Raum 3 hat ein Raumvolumen von 84,92 m<sup>3</sup>.

$$T_{soll} = 0,45 * lgV - 0,37[s] \quad (11)$$

$$T_{soll} = 0,54 \text{ s laut ÖNORM B 8115-3}$$

Laut Messung ist die Nachhallzeit im Bassbereich sehr hoch, das heißt auch in diesem Fall könnte wieder mit VPR-Modulen (Tabelle 20) Schallenergie reduziert werden.

Auf *Abbildung 57* ist das Drahtmodell von Raum 3 dargestellt und die verschiedenen Fälle bzw. Varianten wurden wieder in einem Modell berechnet. Die definierten Flächen (blau für VPR) wurden entsprechend der Variante eingestellt.

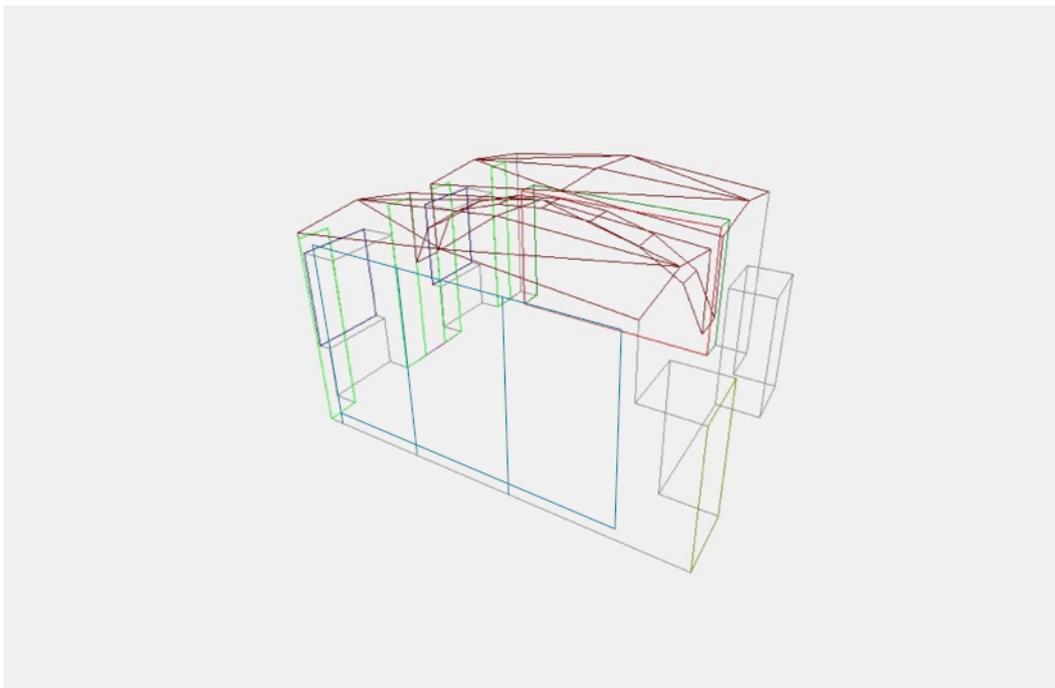


Abbildung 57 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 3 + Maßnahmen (eigene Darstellung)

Wie auf Abbildung 58 zu sehen ist können die Fälle  $4,5 \text{ m}^2 \text{ VPR}$  (mit rotem Quadrat markiert) und  $9,0 \text{ m}^2 \text{ VPR}$  (mit gelben Dreieck markiert) eine Verbesserung des Bassverhältnis erreichen. Die Nachhallzeit der hohen Frequenzen bleibt aber im unteren Toleranzbereich. Ein fast linearer Frequenzverlauf kann mit dem Fall  $13,5 \text{ m}^2 \text{ VPR ohne Vorhänge}$  (mit grünem Kreis markiert) erreicht werden. Auch in Raum 3 fällt auf, dass ein Weglassen der Vorhänge von Vorteil ist um dem Raum die „Trockenheit“ im hohen Frequenzbereich zu nehmen.

### Raum 3 simulierte akustische Verbesserung

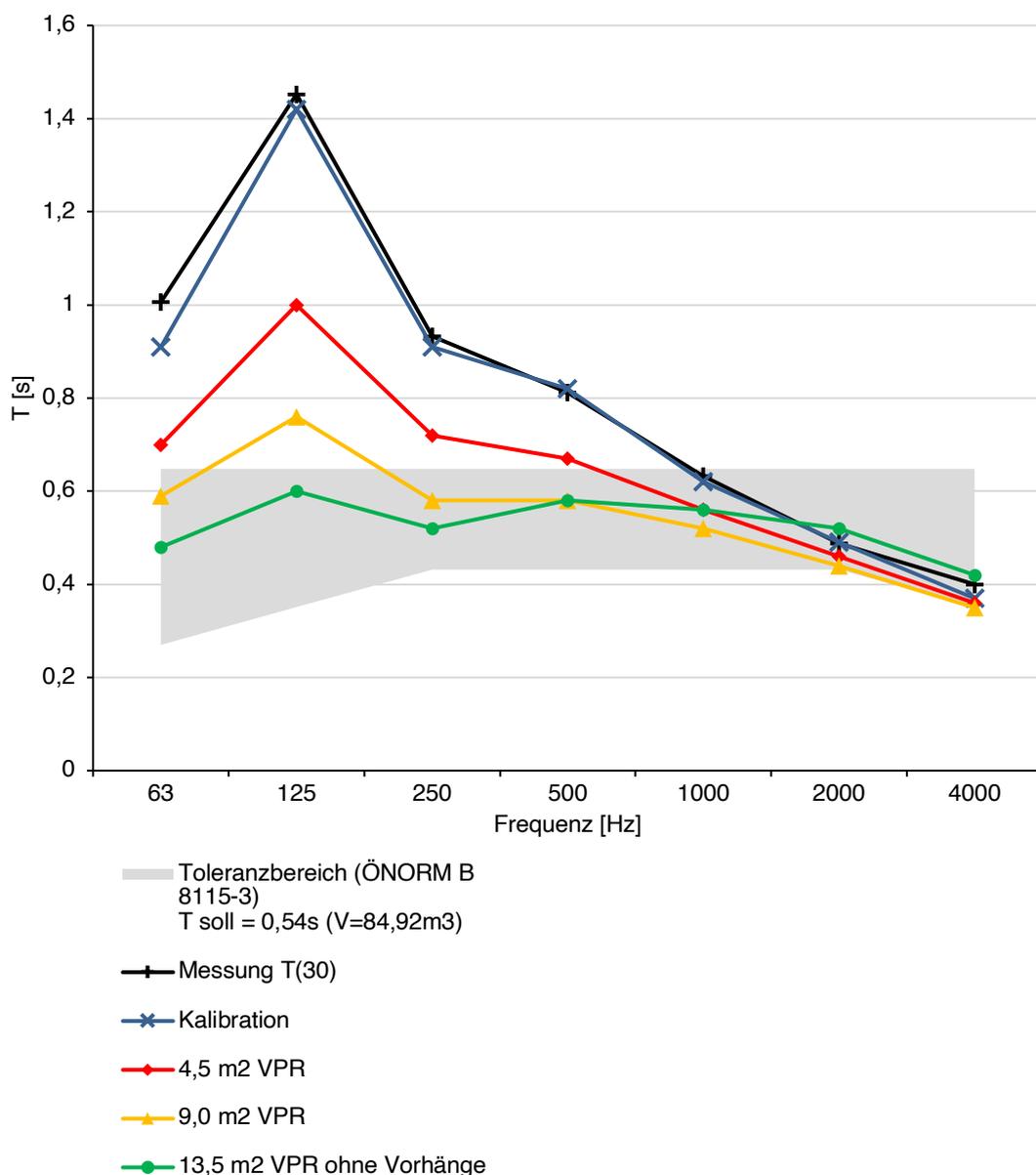


Abbildung 58 Raum 3, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung)

**Raum 4** hat Ähnlichkeiten zu Raum 3, er ist „trocken“ im Bereich hoher Frequenzen und hat eine viel zu lange Nachhallzeit im Bassbereich (Siehe Abbildung 52). In diesem Fall könnten auch hier wieder VPR-Module (Tabelle 20) zum Einsatz kommen um die Nachhallzeit im Bassbereich zu reduzieren.

Raum 4 hat ein Raumvolumen von  $168,39 \text{ m}^3$ .

$$T_{soll} = 0,45 * lgV - 0,37[s] \quad (12)$$

$$T_{soll} = 0,68 \text{ s laut ÖNORM B 8115-3}$$

Auf Abbildung 59 ist das Drahtmodell von Raum 4 inklusive aller Flächen der VPRs. Die verschiedenen Fälle bzw. Ausbaustufen konnten wieder in einem Modell berechnet werden. Die definierten Flächen (blau für VPR, dunkelgrün für Vorhänge) wurden entsprechend der Variante eingestellt.

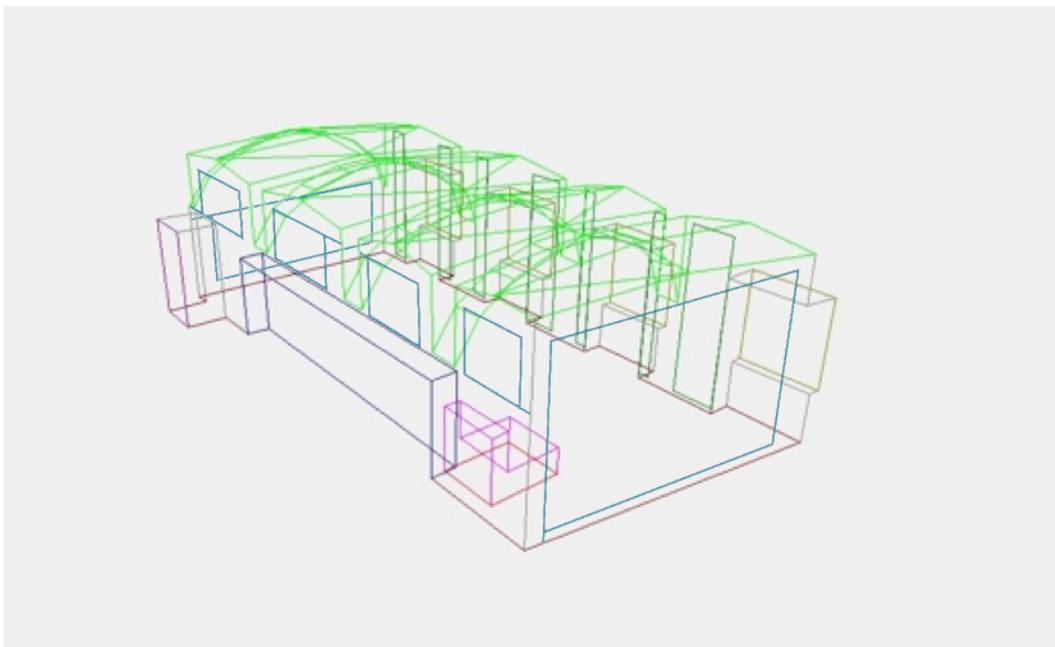


Abbildung 59 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 4 + Maßnahmen (eigene Darstellung)

Die Abbildung 60 zeigt das bereits ab der Variante von  $13,5 \text{ m}^2$  VPRs (mit rotem Quadrat markiert) eine Reduktion der Nachhallzeit im Bassbereich erreicht werden könnte, die für akustische Instrumente und Stimmen eine deutliche Verbesserung bedeuten würde. Die nächste Variante,  $18,0 \text{ m}^2$  VPRs ohne Vorhänge (mit gelben Dreieck markiert), zeigt dass es von Vorteil ist die Vorhänge weg zu lassen und mit Hilfe der VPRs ein besseres Bassverhältnis zu erreichen. Um den

Anforderungen der ÖNORM B 8115-3 zu genügen, wäre die Variante mit  $27,0 \text{ m}^2$  VPRs ohne Vorhänge (mit grünem Kreis markiert) notwendig. Durch das Weglassen der Vorhänge und  $27,0 \text{ m}^2$  VPRs an den Wänden verteilt, könnte diese Kombination einen fast linearen Frequenzverlauf erreichen.

#### Raum 4 simulierte akustische Verbesserung

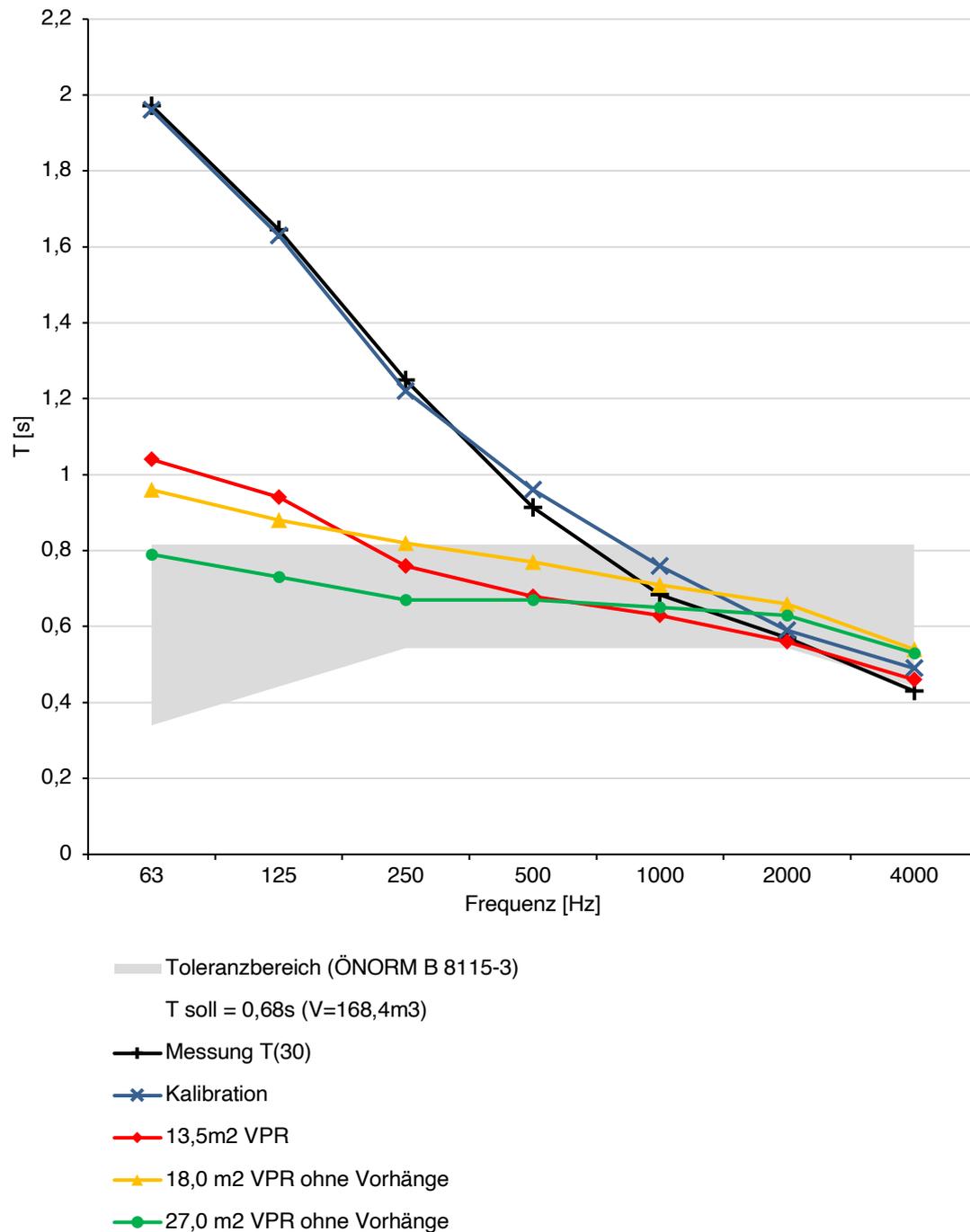


Abbildung 60 Raum 4, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung)

## 5 DISKUSSION

### 5.1 Die Kalibration der Simulation

Die Ergebnisse der ersten (nicht kalibrierten) Simulationen wichen stark von den Messungen ab. Die Abweichungen beruhten auf den Unsicherheiten hinsichtlich der Materialien und Absorptionskoeffizienten  $[\alpha]$ . Die Oberflächenmaterialien und ihr Absorptionskoeffizient  $[\alpha]$  konnte vor Ort nicht gemessen werden, daher war die interne Materialbibliothek von ODEON der Ausgangspunkt für die ersten Annahmen. Vor allem im Bereich von 250 Hz waren die Abweichungen (außer in Raum 1) am größten. Durch Literaturrecherche konnten bessere Werte für einen Vorhang (in Raum 2, 3 und 4 neben allen Fenstern aufgehängt) gefunden werden und führten zu einer deutlichen Verbesserung.

In Raum 1 und 2 wurde ein Laminatboden über einem Teppichboden verlegt. Der Absorptionswert dieses Fußbodenaufbaus wurde in Folge annäherungsweise als Plattenschwinger bzw. virtueller Absorber berechnet. Die Absorptionswerte wurden in der Simulation getestet und entsprechend als virtueller Absorber in beiden Räumen angewendet.

In den Räumen 2, 3 und 4 waren weitere Anpassungsschritte notwendig um möglichst nahe an die Ergebnisse der in-situ Nachhallzeitmessung zu gelangen (siehe Abbildung 46, Abbildung 48, Abbildung 50, Abbildung 52). Weitere virtuelle Absorber ermöglichten sehr genaue Anpassungen des Simulationsmodells. Die fertig kalibrierten Simulationsmodelle wiesen nur noch geringe Abweichungen zur Nachhallzeit-Messung auf und waren bereit für weitere Analysen der raumakustischen Verbesserungsmöglichkeiten.

## 5.2 Die Simulation der Verbesserungsmaßnahmen

Die Räume wurden bezüglich der optimalen Nachhallzeit laut ÖNORM B 8115-3 (2005) überprüft und auf Basis der Ergebnisse konnten die passenden Absorber am kalibrierten Modell simuliert werden. Generell kann angemerkt werden, dass die Räume der Musikschule nicht gut geeignet sind für diese Nutzung. Raum 1 wird für Konzerte, Veranstaltungen und Proben genutzt. Raum 1 ist lang und schmal wird aber als Konzertraum verwendet, weil er der größte Raum ist. Durch seine Raumproportionen ist er aber nicht optimal für diese Zwecke geeignet. Im Falle eines Konzerts bekommen die hinteren Reihen des Publikums überwiegend Klanginformationen über die Reflexionen als über den Direktschall der Instrumente am anderen Ende des Raumes. Die Überlegung mittels Reflektor-Flächen erste Reflexionen tiefer in den Raum zu lenken scheitert an den beengten Raumdimensionen. Um nicht nur hohe Frequenzen gezielt zu reflektieren braucht es große Flächen, die im richtigen Winkel positioniert werden (siehe Abbildung 16).

Das Ansinnen der Betreiberinnen Vorhänge neben die Fenster zu hängen würde zu einer Reduktion der Nachhallzeit im hohen Frequenzbereich führen und Probensituationen verbessern (siehe Abbildung 54). Wie die Simulation zeigt führen Vorhänge neben allen Fenstern, im Falle eines Konzerts mit voll besetztem Publikumsbereich, jedoch zu einer zu starken Reduktion Nachhallzeit im hohen Frequenzbereich.

Die Überprüfung der Raumdimensionen über die Bolt-Fläche hat ergeben, dass nur Raum 2 wenige unvorteilhaften Moden zu erwarten hat. Die in-situ Nachhallzeit-Messung aller Räume lässt aber keine auffälligen, einzelnen Moden erkennen.

Die Auswertung des Fragebogens (siehe Auswertung der Fragebögen) hat ergeben, dass vor allem Raum 2 als sehr unangenehm wahrgenommen wird, weil es zu Flatterechos zwischen Gewölbedecke und Fußboden kommt. Deshalb wurde noch zusätzlich ein Teppich in der Mitte des Raumes simuliert. Dieser soll die unangenehmen Reflexionen der Gewölbedecke abschwächen und die Nachhallzeit ab 1000 Hz aufwärts reduzieren. Um auch die Nachhallzeit Bassbereich zu reduzieren

konnte über mehrere Varianten gezeigt werden wie viel Fläche an VPR-Modulen welchen Effekt erzielen (siehe Abbildung 56).

Raum 3 hat eine relativ kurze Nachhallzeit ab 1000 Hz aufwärts und wird daher als „zu trocken“ für Streichinstrumente wahrgenommen. Daher konnte wieder der Fall simuliert werden keine Vorhänge aufzuhängen und stattdessen mittels VPR-Modulen die Nachhallzeit im Bassbereich zu reduzieren. Dadurch können die Anforderungen der ÖNORM B 8115-3 (2005) simuliert werden (siehe Abbildung 58). Dabei wird deutlich, dass die Vorhänge in Raum 3 kein akustischer Vorteil sind, weil sie die Nachhallzeit ab 1000 Hz zu stark reduzieren und zusätzlich erste Reflektionen an Wänden bedämpfen.

Raum 4 fällt durch ein sehr unausgewogenes Bassverhältnis auf. In der Auswertung des Fragebogens wird das von den Teilnehmenden aber nicht negativ erwähnt. Trotzdem konnte durch die Simulation von mehreren Varianten von VPR-Modulen eine Verkürzung der Nachhallzeit berechnet werden (Siehe Abbildung 60). Auch in Raum 4 wurde klar, dass die Vorhänge neben den Fenstern die Nachhallzeit ab 1000hz zu stark reduzieren und keinen akustischen Vorteil bringen.

## 6 SCHLUSSFOLGERUNG

Diese Arbeit legte den Schwerpunkt auf den Vergleich der gemessenen und der simulierten Nachhallzeit. Es wurden vier unterschiedliche Räume einer Musikschule untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse zeigten, dass eine kalibrierte Simulation via Odeon auf Basis einer in-situ Nachhallzeit-Messung eine gute Grundlage für die Bestimmung akustischer Verbesserungsmaßnahmen bildet. Insbesondere konnten Maßnahmen so lange am kalibrierten Modell getestet bzw. simuliert werden, bis die jeweiligen Anforderungen erfüllt sind.

Die ersten Simulationen basieren auf den Standardmaterialparametern und wiesen starke Abweichungen zu den in-situ Nachhallzeit-Messungen auf. Um zuverlässige Simulationen zu berechnen ist eine umfangreiche Materialdatenbank unterschiedlichster Oberflächenmaterialien mit deren Absorptionseigenschaften erforderlich. Im Fall dieser Arbeit konnten einige Materialien der Odeon Datenbank verwendet werden. Der Vergleich mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten zeigte, aber dass diese unzureichend sein kann. Durch die Anpassungen der Absorptionswerte einzelner Oberflächenmaterialien konnten deutliche Verbesserungen der Simulation erreicht werden. Trotzdem waren weitere Verbesserungen erforderlich, um so den in-situ Messergebnissen näher zu kommen. Weitere Anpassungen durch virtueller Absorber zur Modellierung des Fußbodens und der Kastenoberflächen erzeugten schlussendlich sehr gut abgestimmte Simulationen.

## 7 VERZEICHNIS

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Reflexionsgesetz der geometrischen Akustik (Furrer u. Lauber 1972).....	3
Abbildung 2 Nachhallvorgang für Schalldruck $L_p$ (Fasold u. Veres 2003) .....	4
Abbildung 3 Schalldruckpegelabnahme im diffusen Schallfeld (Fasold u. Veres 2003) .....	5
Abbildung 4 Axiale Moden 1. bis 3. Ordnung (Fasold u. Veres 2003) .....	7
Abbildung 5 Raummoden (Newell 2012) .....	8
Abbildung 6 Schalldruckverteilung bei Tangentialmoden für $(n_x, n_y, n_z)$ (Kleiner u. Tichy 2014) .....	8
Abbildung 7 Zur Erhöhung der Wirksamkeit poröser Absorber durch deren Anordnung im Schnellemaximum (Fasold u. Veres 2003).....	9
Abbildung 8 Gerade hängender Flächenvorhang vor schallhartem Abschluss (Rot, berechnete Absorption, Blau im Hallraum gemessene Absorption) Wandabstand 150mm Flächengewicht 100 g/m <sup>2</sup> Spezifischer Strömungswiderstand: 150 Pa s/m (Eggenschweiler 2016) .....	10
Abbildung 9 Konstruktion eines Helmholtz-Resonators (Friesecke 2007).....	11
Abbildung 10 Absorptionsgrad $\alpha_s$ bei diffusem Schalleinfall auf eine zweilagige mikroperforierte Absorberfolie, Messung. (○) Rechnung (□) (Fuchs 2017) .....	12
Abbildung 11 Nach DIN EN ISO 354-2001 gemessener Absorptionsgrad $\alpha_s$ von jeweils Absorber 100 mm dicken Verbundplattenresonator (○) Breitbandkompaktabsorber (□) Rechnung für 100 mm faserporösen Absorber (–) (Fuchs 2017).....	13
Abbildung 12 Absorptionsgrad eines Kantenabsorbers gemäß Abbildung 13, jeweils bezogen auf $S_A = 2,59 \text{ m}^2$ . Lange Seite: Gipskartonplatte, Kurze Seite: Lochblech <b>a)</b> leer (dünn durchgezogen), <b>b)</b> $d_a = 160 \text{ mm}$ (gepunktet), <b>c)</b> $d_a = 320 \text{ mm}$ (gestrichelt), <b>d)</b> $d_a = 500 \text{ mm}$ (fett durchgezogen) (Fuchs 2017) .....	14
Abbildung 13 (Fuchs 2017).....	14
Abbildung 14 Reflektorarten (AcAr- Multibook of Acoustics 2015) .....	15
Abbildung 15 Die Schallstreuung an einer Sägezahnstruktur bei ideal senkrechtem Schalleinfall (Kuttruff 2004) .....	15

Abbildung 16 Mindestgröße von Flächen für spiegelnde Reflexionen (Fasold u. Veres 2003).....	16
Abbildung 17 Diffus reflektierende Oberflächenstruktur nach dem Prinzip der $\lambda/2$ -Transformation (Schroeder-Diffusor) $d_{\max}$ maximale Strukturtiefe, b Strukturbreite, g Strukturperiode (Fasold u. Veres 2003).....	17
Abbildung 18 Weiterentwicklung eines Quadratic Schroeder Diffusor zu einem Parabolic Wave Diffusors durch VATTER Acoustics 2011 .....	18
Abbildung 19 Entwurf einer zweidimensionalen Diffusoroberfläche aufgrund von Berechnungen von zwei quadratischen Residuenfolgen mit den Primzahlen $N_1 = 5$ bzw. $N_2 = 7$ (Cox) .....	18
Abbildung 20 Elbphilharmonie kleiner Saal mit speziell gefrästen Eichenholzelementen Fotograf: Michael Zapf.....	19
Abbildung 21 Elbphilharmonie © NDR.....	19
Abbildung 22 ÖNORM B8115-3 (2005) .....	20
Abbildung 23 Optimale mittlere Nachhallzeiten bei 500Hz bis 1000Hz für verschiedene Raumfunktionen in Abhängigkeit vom Raumvolumen (Fasold u. Veres 2003).....	20
Abbildung 24 Nachhallzeit Messung Konzertsäle (Lorenz-Kierakiewtz u. Vercammen 2009).....	21
Abbildung 25 Hörfläche / A Hörschwelle / B Schmerzgrenze (Furrer 1956).....	22
Abbildung 26 Die strichlierte Linie markiert die Außenlinie der „Bolt-Area“ (Everest u. Pohlman 2009).....	23
Abbildung 27 Struktur der Forschungsarbeit (eigene Darstellung) .....	25
Abbildung 28 Übersichtsplan der Musikschule (M 1:200), grau markierte Räume wurden untersucht.....	26
Abbildung 29 Raum 1 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien) ....	27
Abbildung 30 Raum 2 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien) ....	28
Abbildung 31 Raum 3 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien) ....	29
Abbildung 32 Raum 4 der Musikschule (Foto, Musikschule VIMAC, 1030 Wien) ....	30
Abbildung 33 Übersichtsplan (M 1:200) der Lautsprecher- und Mikrofonpositionen in Raum 1 bis 4 (eigene Darstellung).....	36
Abbildung 34 Messungsequipment (basierend auf den NORSONIC Katalog) .....	37
Abbildung 35 Raum 1 Ergebnis Nachhallzeitmessung .....	38
Abbildung 36 Raum 2 Ergebnis Nachhallzeitmessung .....	38

Abbildung 37 Raum 3 Ergebnis Nachhallzeitmessung .....	39
Abbildung 38 Raum 4 Ergebnis Nachhallzeitmessung .....	39
Abbildung 39 Interviewauswertung Raum 1 (eigene Darstellung) .....	32
Abbildung 40 Interviewauswertung Raum 1 + Publikum (eigene Darstellung) .....	33
Abbildung 41 Interviewauswertung Raum 2 (eigene Darstellung) .....	33
Abbildung 42 Interviewauswertung Raum 3 (eigene Darstellung) .....	34
Abbildung 43 Interviewauswertung Raum 4 (eigene Darstellung) .....	34
Abbildung 44 3D Darstellung der untersuchten Räume (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 45 Raum 1 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung).....	41
Abbildung 46 Raum 1 gemessene, simulierte Werte und kalibrierte Werte (eigene Darstellung).....	44
Abbildung 47 Raum 2 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung).....	45
Abbildung 48 Raum 2 gemessene, simulierte und kalibrierte Werte (eigene Darstellung).....	47
Abbildung 49 Raum 3 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung).....	48
Abbildung 50 Raum 3 gemessene, simulierte und kalibrierte Werte (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 51 Raum 4 ODEON 3D Modell (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 52 Raum 4 gemessene, simulierte und kalibrierte Werte (eigene Darstellung).....	53
<i>Abbildung 53 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 1 + Maßnahmen (eigene Darstellung).....</i>	<i>54</i>
Abbildung 54 Raum 1, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung) .....	55
Abbildung 55 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 2 + Maßnahmen (eigene Darstellung).....	56
Abbildung 56 Raum 2, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung) .....	57
<i>Abbildung 57 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 3 + Maßnahmen (eigene Darstellung)</i> Wie auf Abbildung 58 zu sehen ist können die Fälle $4,5 \text{ m}^2 \text{ VPR}$ (mit rotem Quadrat markiert) und $9,0 \text{ m}^2 \text{ VPR}$ (mit gelben Dreieck markiert) eine Verbesserung des Bassverhältnis erreichen. Die Nachhallzeit der hohen Frequenzen bleibt aber im unteren Toleranzbereich. Ein fast linearer Frequenzverlauf kann mit dem Fall $13,5 \text{ m}^2 \text{ VPR ohne Vorhänge}$ (mit grünem Kreis markiert) erreicht werden.	

Auch in Raum 3 fällt auf, dass ein Weglassen der Vorhänge von Vorteil ist um dem Raum die „Trockenheit“ im hohen Frequenzbereich zu nehmen.....	58
Abbildung 58 Raum 3, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung) .....	59
Abbildung 59 3D Darstellung Drahtmodell von Raum 4 + Maßnahmen (eigene Darstellung).....	60
Abbildung 60 Raum 4, gemessene u. simulierte Werte der akustischen Verbesserungen (eigene Darstellung) .....	61

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Oberflächen Raum 1 .....	27
Tabelle 2 Oberflächen Raum 2 .....	28
Tabelle 3 Oberflächen Raum 3 .....	29
Tabelle 4 Oberflächen Raum 4 .....	30
Tabelle 5 Auflistung des akustischen Messungsequipments.....	37
Tabelle 6 Allgemeine Informationen der Teilnehmenden .....	31
Tabelle 7 Materialliste der Simulation Raum 1 (Absorptionskoeffizienten $\alpha$ nicht kalibriert) .....	42
Tabelle 8 angenommene Absorptionskoeffizienten $\alpha$ des virtueller Absorber 01 .....	43
Tabelle 9 Raum 1 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%].....	44
Tabelle 10 Materialliste der Simulation Raum 2 (Absorptionskoeffizienten $\alpha$ nicht kalibriert) .....	45
Tabelle 11 Vergleich der Vorhangabsorptionswerte in Odeon und nach Recherche (Fasold, Sonntag 1972).....	46
Tabelle 12 Raum 2 virtueller Absorber 02.....	46
Tabelle 13 Raum 2 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%].....	47
Tabelle 14 Materialliste der Simulation Raum 3 (Absorptionskoeffizienten $\alpha$ ).....	48
Tabelle 15 Raum 3 Virtueller Absorber 03.....	49
Tabelle 16 Raum 3 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%].....	50
Tabelle 17 Materialliste der Simulation Raum 3 (Absorptionskoeffizienten $\alpha$ ).....	51

Tabelle 18 Raum 4 Virtueller Absorber 04.....	52
Tabelle 19 Raum 4 gemessene, simulierte Werten in absoluten Zahlen / Abweichung [%].....	53
Tabelle 20 zusätzliche Absorber und deren Absorptionswerte.....	56

## 7.3 Formelverzeichnis

(1) Nachhallzeit (T60).....	4
(2) Schalldruck .....	5
(3) Schröder-Frequenz.....	6
(4) Mindestabstand, d min.....	35
(5) Resonanzfrequenz.....	42
(6) Masse der schwingenden Schicht .....	42
(7) dynamische Steifigkeit der Luftschicht.....	42
(8) Resonanzfrequenz des Fußbodens .....	43
(9) optimale Nachhallzeit laut ÖNORM B 8115-3 .....	54
(10) optimale Nachhallzeit laut ÖNORM B 8115-3 .....	56
(11) optimale Nachhallzeit laut ÖNORM B 8115-3 .....	58
(12) optimale Nachhallzeit laut ÖNORM B 8115-3 .....	60

## 8 LITERATUR

### a. Buch, ein Autor

Fuchs, H.V., 2017. *Raum-Akustik und Lärm-Minderung. 4. Auflage.* Berlin-Schlachtensee: Springer Verlag

Friesecke, A., 2015. *Studio Akustik. 5. Auflage.* Bergkirchen: PPV Medien.

Friesecke, A., 2007. *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker.* München: K. G. Saur Verlag

Kuttruff H., 2004. *Akustik – Eine Einführung.* Leipzig: S. Hirzel Verlag Stuttgart

Newell,P., 2012. *Recording Studio Design 3.Auflage.* Oxford: Focal Press

Oppenheim, A. N. 2001. *Questionnaire Design, Interviewing and Attitude Measurement.* London: Continuum

Sabine W.C., 1927. *Collected Papers on Acoustics.* Cambridge. Harvard University Press

Christensen, C. L. 2008. *Odeon Room Acoustics Program Version 9.1 User Manual-Industrial Auditorium and combined Editions.* Lyngby: Technical University of Denmark

### b. Buch, mehr als ein Autor

Everest, F. A., Pohlman, K. C. 2009. *Master Handbook of Acoustics; Fifth Edition.* New York: McGraw-Hill Companies, Inc..

Fasold W., Krad W., Schirmer W., 1984 *Taschenbuch Technische Akustik Teil 2.* Koblenz: VEB Verlag Technik

Fasold W., Sonntag E., 1972. *Bauphysikalische Entwurfslehre Band 4 Bauakustik.* Köln-Braunsfeld: Herausgeber, Müller.

Lerch R., Sessler G., Wolf D., 2009. *Technische Akustik.* Heidelberg: Springer-Berlin.

Mommertz E. u. Müller-BMM. 2008. Akustik und Schallschutz München: Fachbuch aus Redaktion DETAIL

Fasold W., Veres E., 2003. *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und Konstruktive Lösungen 2. Auflage*. Berlin: Huss-Medien

Furrer W. und Lauber A., 1972. *Raum- und Bauakustik, Lärmabwehr*, Basel: Birkhäuser

Lorenz-Kierakiewitz, K. H.; Vercammen, M., 2009. *Acoustical Survey of 25 European Concert Halls*. Düsseldorf: Peutz Consult GmbH

Kleiner M., Tichy J., 2014. *Acoustics Of Small Rooms*. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group.

Cox T.J. u. D'Antonio P., 2009. *Acoustic Absorber and Diffusers* New York: Taylor & Francis

#### c. Buch, online

Karolina Jaruszewska; Monika Rychtarikova; Thomas Wulfrank; Joanna Jablonska; Magadelna Boeck. 2015. *ArAc- Multibook of Acoustics*. Wroclaw, Leuven, Brussels, Wroclaw, Berlin: Elsevier Ltd.

#### d. Beitrag bei einer Konferenz

Eggenschweiler K., 2016. *Textilien in der akustischen Raumgestaltung*. 12. Akustik-Forum Raum und Bau in Köln. Abteilung Akustik/Lärminderung Empa Dübendorf, Schweiz

#### e. Wissenschaftliche Artikel ohne DOI

Cox J. Acoustic Diffusers: *the good, the bad and the ugly*. Salford University

#### f. Normen

ÖNORM EN ISO 3382-2. 2009. *Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*. Wien: Austrian Standards

ÖNORM B8115-3. 2005. *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Teil 3: Raumakustik*. Wien: Austrian Standards

#### g. Internet Dokument

Norsonic Katalog. <https://www.norsonic.de/produkte.html>

Baunetzwissen. 2023. Online Fachlexikon; Homepage: [www.baunetzwissen.de](http://www.baunetzwissen.de).

Hunecke, 2021. <https://www.hunecke.de>.

VATTER Acoustic Solutions, 2011. <https://www.vatter.at>.

ODEON 11 Odeon Room Acoustics Program 11.0 <https://www.odeon.dk>

Pressestimmen 2021: <https://www.ndr.de/kultur/musik/Elbphilharmonie-Die-besondere-Akustik-des-Konzerthauses,elphijubilaem104.html>

Pressestimmen 2019: <https://www.deutschlandfunk.de/debatte-um-elbphilharmonie-akustikdesigner-musiker-muessen-100.html>

Pressestimmen 2019: <https://www.deutschlandfunkkultur.de/akustik-der-elbphilharmonie-erst-hochgelobt-dann-verrissen-100.html>

#### h. Diplomarbeiten oder Dissertationen

Freudhofer, V., 2004. *Die Raumakustische Verbesserung denkmalgeschützter Räume eine Fallstudie*. Diplomarbeit: Technische Universität Wien.

Jacic, N., 2016. *Applicatipon and accuracy of computer simulation for the room acoustical improvement of gastronomic facilities: a case study*. Master thesis: Vienna University of Technology.

Tugrul, A., 2012. *Application of a Calibrated Room acoustic Model for retrofit Support*. Master thesis: Vienna University of Technology

# ANHANG

## Fragebogen zur Bewertung der Raumakustik der Musikschule

### Teil 1) Allgemeine Informationen zu den Teilnehmenden

Bitte wählen Sie eine Möglichkeit aus.

- 1) Geschlecht  weiblich  männlich  \*
- 2) Alter  0-10  11-20  21-30  31-40  41-50  51-60  <61
- 3) Wie viele Stunden verbringen Sie durchschnittlich pro Woche der Musikschule?  
 0-10  11-20  21-30  31-40 Stunden
- 4) Wie lange arbeiten oder lernen Sie schon in den Räumlichkeiten der Musikschule?  
 Weniger als 6 Monate  6-12 Monate  über ein Jahr  nur zu Gast

### Teil 2) Fragen zur Raumakustik im Allgemeinen

Bitte beurteilen Sie die nächsten 10 Fragen zur raumakustischen Wahrnehmung auf einer 5 Punkte Skala.

- 5) Wie schätzen Sie den **Nachhall** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	hallig	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	trocken
<b>Raum 1 + Publikum</b>	hallig	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	trocken
<b>Raum 2</b>	hallig	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	trocken
<b>Raum 3</b>	hallig	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	trocken
<b>Raum 4</b>	hallig	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	trocken

6) Wie schätzen Sie die **Lautstärke** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	laut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	leise
<b>Raum 1 + Publikum</b>	laut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	leise
<b>Raum 2</b>	laut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	leise
<b>Raum 3</b>	laut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	leise
<b>Raum 4</b>	laut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	leise

7) Wie schätzen Sie die **Klarheit** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	klar	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unklar
<b>Raum 1 + Publikum</b>	klar	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unklar
<b>Raum 2</b>	klar	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unklar
<b>Raum 3</b>	klar	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unklar
<b>Raum 4</b>	klar	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unklar

8) Wie schätzen Sie die **Schärfe** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	schrill	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dumpf
<b>Raum 1 + Publikum</b>	schrill	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dumpf
<b>Raum 2</b>	schrill	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dumpf
<b>Raum 3</b>	schrill	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dumpf
<b>Raum 4</b>	schrill	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dumpf

8) Wie schätzen Sie die **Wärme** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	warm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	kalt
<b>Raum 1 + Publikum</b>	warm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	kalt
<b>Raum 2</b>	warm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	kalt
<b>Raum 3</b>	warm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	kalt
<b>Raum 4</b>	warm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	kalt

10) Wie schätzen Sie die **Lebhaftigkeit bzw. Helligkeit** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	hell	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dunkel
<b>Raum 1 + Publikum</b>	hell	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dunkel
<b>Raum 2</b>	hell	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dunkel
<b>Raum 3</b>	hell	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dunkel
<b>Raum 4</b>	hell	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	dunkel

11) Wie schätzen Sie den **allgemeinen Eindruck** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	angenehm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unangenehm
<b>Raum 1 + Publikum</b>	angenehm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unangenehm
<b>Raum 2</b>	angenehm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unangenehm
<b>Raum 3</b>	angenehm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unangenehm
<b>Raum 4</b>	angenehm	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	unangenehm

12) Wie schätzen Sie den **Sprachverständlichkeit** der folgenden Unterrichtsräume ein?

<b>Raum 1</b>	gut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	schlecht
<b>Raum 1 + Publikum</b>	gut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	schlecht
<b>Raum 2</b>	gut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	schlecht
<b>Raum 3</b>	gut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	schlecht
<b>Raum 4</b>	gut	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	schlecht

13) Ist Musik oder Lärm benachbarter Räume störend und zu laut?

<b>Raum 1</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 1 + Publikum</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 2</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 3</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 4</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark

14) Haben die aktuellen akustischen Bedingungen eine negative Auswirkung sich über einen längeren Zeitraum zu konzentrieren?

<b>Raum 1</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 1 + Publikum</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 2</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 3</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark
<b>Raum 4</b>	überhaupt nicht	<input type="checkbox"/> +2	<input type="checkbox"/> +1	<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2	sehr stark

### Teil 3) Offene Fragen

*Bitte antworten Sie mit eigenen Worten.*

15) Haben Sie in den Räumen 1 bis 4 **Bereiche** bemerkt die **akustisch besonders störend** sind?

16) Wie erleben Sie Raum 1 bis 4 **mit ihrem Instrument**?

17) Wie erleben Sie Raum 1 bis 4 **mit ihrem Instrument in einem Ensemble**?