

Hoher Anspruch auf kleinem Raum: Tieffrequente Herausforderungen bei der akustischen Sanierung eines Aufnahmeraumes

Valentin Huber, Jan Godde, Jamilla Balint

Technische Universität Graz, 8010 Graz, Österreich

E-Mail: v.huber@student.tugraz.at, godde@student.tugraz.at, balint@tugraz.at

Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Planung und anschließende Sanierung eines professionellen Aufnahmeraumes des Tonstudios der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz. Das Tonstudio verfügt über einen Regieraum, eine Gesangskabine, eine Schlagzeugkabine und zwei Aufnahmeräume. Der primäre Aufnahmeraum (AR1) erfüllt bereits die hohen Anforderungen für Studioaufnahmen, wohingegen der zweite Aufnahmeraum (AR2) optimiert werden soll. Die Akustik von AR2 soll sich an der von AR1 orientieren; Ziel ist dabei eine Linearisierung des Frequenzganges der Nachhallzeit im Frequenzbereich von 31 Hz bis 8 kHz. Um dem bei kleinen Räumen vorhandenen Anstieg der Nachhallzeit zu Frequenzen unterhalb der Schröder-Frequenz ($f \leq 200$ Hz) entgegenzuwirken, werden besondere Anstrengungen unternommen. Eingriffe in die Primärstruktur des Raumes werden nicht vorgenommen.

Kleine Räume weisen bei tiefen Frequenzen in der Regel eine geringe Raummodendichte auf. Die Moden treten isoliert hervor und werden als klangfärbend wahrgenommen. Es ergeben sich lange Nachhallzeiten bei den Resonanzfrequenzen der Raummoden. Um Verdeckung bei mittleren und hohen Frequenzen durch Resonanz bei tiefen Frequenzen zu verhindern, also um die Nachhallzeit zu linearisieren und akustische Transparenz zu ermöglichen, müssen die Raummoden bedämpft werden. Dass akustische Absorption bei tiefen Frequenzen mit einem hohen Platzbedarf einhergeht, stellt eine der Herausforderungen bei der Optimierung kleiner Räume dar.

Im Folgenden werden die Planung und die Simulations- und Messvorgänge präsentiert. Die messtechnischen Herausforderungen im tiefen Frequenzbereich in kleinen Räumen werden ebenfalls diskutiert.

Aufnahmeräume AR1 und AR2

Der Aufnahmeraum AR1 (Nutzfläche 24.5 m^2 , Nutzvolumen 62.4 m^3) ist ein Studioraum, der als Raum-in-Raum-Konstruktion ausgeführt und mit einer Vielzahl von akustischen Maßnahmen ausgestattet ist. Hauptsächlich werden hier Jazz-Ensembles aufgenommen. Der sekundäre Aufnahmeraum AR2 besitzt im Ausgangszustand eine um 30 cm abgehängte Akustikdecke und Akustikvorhänge, eine Grundfläche von 25.6 m^2 und im Leerzustand (d.h. ohne Akustikdecke) ein Volumen von 76.2 m^3 . Vor dem Umbau können hier aufgrund der unzureichenden Akustik nur Quellen hoher Schallpegel nah mikrofoniert aufgenommen werden.

Methode

Es werden die Impulsantworten sowohl in AR1 als auch in AR2 (im Ausgangszustand), angelehnt an ISO 3382 Teil 1 [1] und Teil 2 [2], mit Hilfe eines Dodekaeder-Lautsprechers gemessen. In AR2 wird an 40 Positionen, in AR1 an 10 Positionen gemessen, jeweils auf zwei Höhen. Der Signal-Rausch-Abstand (SNR) in AR2 vor dem Umbau ist ausreichend, in AR1 hingegen werden zusätzliche Subwoofer-Messungen durchgeführt, um das Fehlen von verlässlichen Daten aufgrund eines zu geringen SNR für $f < 62.5$ Hz zu kompensieren.

Die Berechnung und die Auswertung der Nachhallzeit erfolgt in *MATLAB* unter Einsatz der *ITA-Toolbox* [3].

Als Zielvorgabe für AR2 wird, ausgehend von der Nachhallzeit T_{20} in AR1, eine frequenzunabhängige Nachhallzeit von $T = 0.25 \pm 0.05$ s definiert. Die dafür notwendigen akustischen Elemente werden mit Hilfe der raumakustischen Simulationssoftware *CATT-Acoustic* geplant. Das Simulationsmodell wird anhand der Messdaten für den Ausgangszustand kalibriert. Da die Akustikdecke in AR2 aufgrund des Alters und der stark frequenzabhängigen Wirkungsweise entfernt werden soll und keine Messungen des Raumes im Leerzustand vorliegen, muss die Nachhallzeit ohne Akustikdecke, basierend auf den abgeschätzten Absorptionsgraden der Raumelemente, simuliert werden. Sie dient als Ausgangspunkt für die weiteren Simulationen.

Da auch Musikinstrumente aufgenommen werden sollen, die den Raum bei tiefen Frequenzen anregen (Kontrabass, Drumset), muss der gesamte Frequenzbereich von 31 Hz bis 8 kHz berücksichtigt werden. Da die Simulationssoftware erst ab dem Oktavband $f = 125$ Hz Berechnungsergebnisse bereitstellt, erfolgt die Abschätzung der Absorptionsgrade der raumakustischen Maßnahmen für $f < 125$ Hz händisch mittels der Sabineschen Nachhallformel (s. Gl. (1)).

$$T = \frac{55.3}{c} \cdot \frac{V}{A}, \quad (1)$$

wobei T die Nachhallzeit in s, c die Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, V das Raumvolumen in m^3 und A die äquivalente Absorptionsfläche in m^2 ist.

Die Anwendung der Nachhallformel nach Sabine setzt ein diffuses Schallfeld voraus, das im tiefen Frequenzbereich nicht gegeben ist. Dennoch muss aufgrund fehlender Alternativen dieser Ansatz herangezogen werden. Nach Abschluss der Planung werden während der Umbauarbeiten die akustischen Einflüsse der verschiedenen Maßnahmen

nach deren jeweiliger Installation durch weitere Messungen erfasst (4 Messungen auf je zwei Höhen).

Akustische Maßnahmen

Die einzubringenden raumakustischen Elemente werden, ausgehend vom Leerzustand, mit Hilfe der Simulationen ausgewählt und entworfen. Dabei werden folgende Optimierungsschritte geplant:

- Grunddämpfung durch Kantenabsorber
- Einbringen von Verbundplattenresonatoren
- Installation einer speziellen Deckenkonstruktion
- Montage von Akustikvorhängen

Das Entfernen der Akustikdecke schafft zunächst Platz und ermöglicht die Installation wirksamerer Maßnahmen. Die grundlegende Dämpfung (insbesondere tieffrequenter Raummoden) erfolgt durch das Einbringen von Kantenabsorbern (mit Mineralwolle gefüllte und an einer Seitenfläche zu 20 % perforierte Gipskartonkoffer, 24 Laufmeter, Breite 50 cm, Höhe 35 cm) in die Raumkanten (s. Abb. 1). Das Platzieren der Kantenabsorber (KA) richtet sich nach einem größtmöglichen Absorbervolumen bei geringstmöglicher Verkleinerung des Nutzraumes. Die Vorteile dieses Absorbertyps sind eine sehr gute Wirkung bei tiefen Frequenzen, der geringe Platzbedarf, der einfache Aufbau sowie die geringen Kosten. Untersuchungen von Fuchs [4] legen einen hohen Absorptionsgrad von Kantenabsorbern im tieffrequenten Bereich von $\alpha > 1$ nahe.

Da keine Messdaten von KA vorliegen, müssen die Absorptionsgrade aufgrund von Erfahrungswerten, Materialtabellen und den in [4] vorgelegten Daten abgeschätzt werden. Es werden nur die perforierten Flächen als akustisch wirksam angenommen, die anderen Seitenflächen werden als Gipskartonplatten mit Wandabstand modelliert. Für die Simulation der Kantenabsorber wird der in Tab. 1 angegebene Absorptionsgrad α_1 verwendet.

Die Absorptionsgrade entsprechen einer konservativen Annahme der Wirkung vor allem bei tiefen Frequenzen; eine problematische Überdämpfung im Bassbereich ist auch im Falle höherer Absorptionsgrade nicht zu erwarten.

Ergänzende Absorption im Bass- und Mittenbereich soll durch das Installieren von sechs Verbundplattenresonatoren (VPR) mit einer Fläche von je 2 m² und einer Bautiefe von 10 cm an den Seitenwänden erfolgen. VPR weisen bei einem geringen Platzbedarf eine hohe Absorptionwirkung bei tiefen Frequenzen auf. Abbildung 1 zeigt das Modell mit KA und VPR. Eine für den Raum entworfene multifunktionale und variable Deckenkonstruktion soll der Diffusion und der Absorption mittlerer und hoher Frequenzen sowie der Vermeidung von Parallelität zwischen Boden und Decke dienen. Sie besteht aus vier stoffbespannten Holzrahmen, die acht Polyesterfaserplatten einfassen und durch eine Kettenkonstruktion angewinkelt an die Decke angebracht werden können. Die Absorption zu hohen Frequenzen kann durch das Einschieben von Holzplatten zwischen Stoffbespannung und Absorbierschicht verringert werden. Die Raum-

beleuchtung ist in die Deckenelemente integriert. Zur Absorption der mittleren und hohen Frequenzen und zur Abschwächung von Flatterechos wird der Raum mit den bereits vorhandenen Akustikvorhängen mit einem Wandabstand von 25 cm versehen, die ebenfalls eine Flexibilität der Akustik ermöglichen.

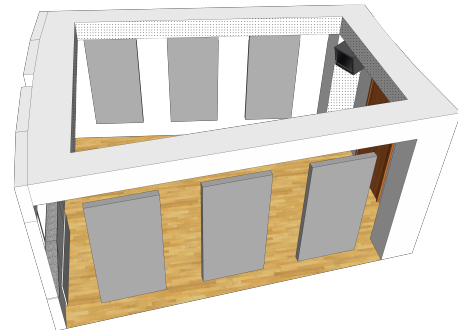


Abbildung 1: KA und VPR in AR2 (3D-Modell)

Mess- und Simulationsergebnisse

Die Wahl der Nachhallzeit T_{20} als grundlegendes Gütemaß ermöglicht aufgrund des ausreichenden SNR eine Messauswertung auch für sehr tiefe Frequenzen ($f < 62.5$ Hz) in AR2. In Abb. 2 ist die über 20 Messungen gemittelte Nachhallzeit T_{20} beider Räume vor dem Umbau gegenübergestellt. Die Flächen markieren den Bereich aller erfassten Messwerte und demonstrieren die Ortsabhängigkeit der Nachhallzeit.

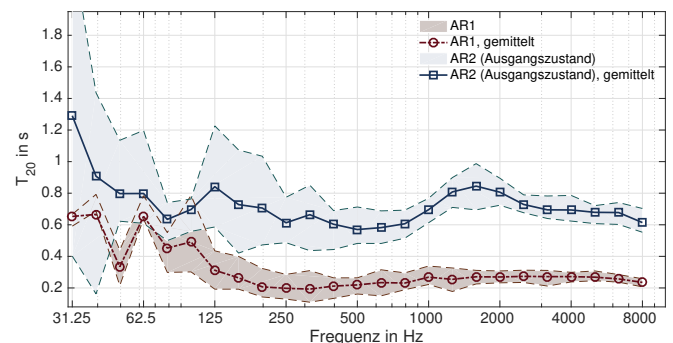


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen Nachhallzeit T_{20} von AR1 und AR2 vor dem Umbau für 20 Messungen (jeweils Bereich aller Messwerte und Mittelwert)

In Abb. 3 sind die Simulations- und Messergebnisse für den Ausgangs- und den Endzustand, sowie der simulierte Leerzustand, dargestellt. Eine gute Übereinstimmung der Simulations- und Messergebnisse ist erkennbar.

Die Messergebnisse in Abb. 4 zeigen die Nachhallzeit in den verschiedenen Sanierungsstadien und damit die Einflüsse der unterschiedlichen Maßnahmen. Die simulierten Daten (für $f \geq 125$ Hz) liegen in Oktavbändern, die Messdaten in Terzbändern vor. Nach dem Einbringen der KA und VPR sind Unterschiede zwischen Simulation und Messung erkennbar, diese sind auf die überschätzten Absorptionsgrade der KA bzw. auf den unterschätzten Einfluss der VPR zurückzuführen. Für

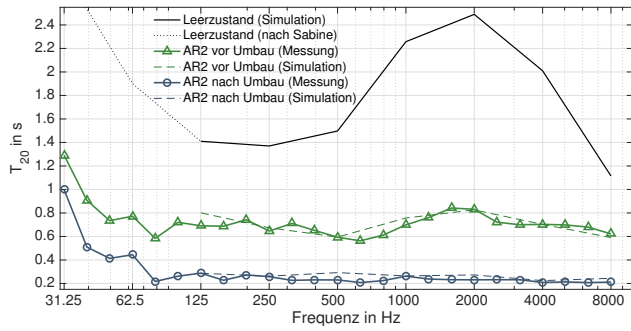


Abbildung 3: Vergleich von Simulations- (*CATT-Acoustic*) und Messergebnissen (Mittelwerte) der Nachhallzeit T_{20} in AR2 vor und nach Umbau (für Leerzustand für $f < 125$ Hz Berechnung nach Sabine, punktiert)

$f < 125$ Hz ist eine starke Absorption durch die KA ersichtlich. Die VPR sorgen im Bassbereich für einen glatteren Verlauf zwischen 80 und 125 Hz; sie wirken zudem im mittleren und hohen Frequenzbereich (vermutlich durch zusätzliche Höhenabsorption durch seitlichen Schalleinfall auf porösen Absorber im VPR-Inneren aufgrund einer Rahmen-Perforation) besser als angenommen. Die Deckenkonstruktion erweist sich als effizientes Mittel für die Absorption mittlerer und hoher Frequenzen. Durch Einbringen der Akustikvorhänge (starke Absorption für $f > 500$ Hz) wird schließlich für $f \geq 80$ Hz der annähernd lineare, angestrebte Nachhallzeitverlauf erreicht.

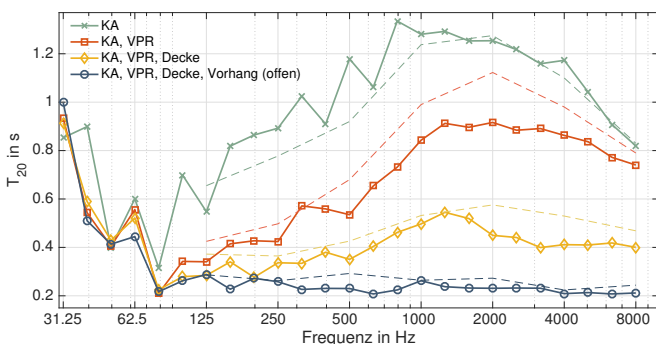


Abbildung 4: Darstellung der Senkung der Nachhallzeit T_{20} durch Einbringen von akustischen Maßnahmen in AR2: Mittelwerte aus 8 Messungen mit den jeweiligen Simulationsergebnissen (gestrichelt)

Um die Wirkungsweise der KA genauer zu überprüfen, muss für den Leerzustand des Raumes zunächst die Nachhallzeit für die Oktavbänder $f = 31.25$ Hz und $f = 62.5$ Hz bestimmt werden, die nicht durch die Simulation vorliegen. Diese Werte werden mit der Sabine'schen Nachhallformel (s. Gl. (1)) anhand eines mittleren Absorptionsgrads, ausgehend von unbehandelten Raumboflächen, abgeschätzt. In Abb. 3 ergänzen die nach Sabine berechneten Werte für $f < 125$ Hz die simulierten Daten für $f \geq 125$ Hz. Die gesamte akustisch wirksame (perforierte) Fläche der KA beträgt 8.41 m^2 , woraus sich mit den in Tab. 1 angegebenen Absorptionsgraden α_1 (in *CATT-Acoustic* ist der maximale Absorptionsgrad $\alpha_{max} = 0.99$) nach Sabine die Nachhallzeit T_1 (nach Ein-

bringen der KA) berechnen lässt. Die gemessene Nachhallzeit T_2 (nach Einbringen der KA) liegt für $f \leq 125$ Hz unterhalb von T_1 ; demzufolge muss der Absorptionsgrad der KA für tiefe Frequenzen größer als 1 sein. Nach Sabine wird der ungefähre Absorptionsgrad α_2 der KA berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Sie basieren auf simulierten und abgeschätzten Werten und dienen lediglich der Veranschaulichung der Absorptionseigenschaften der Kantenabsorber.

Tabelle 1: Angenommener Absorptionsgrad α_1 der KA, berechnete Nachhallzeit T_1 (nach Einbringen der KA), gemessene Nachhallzeit T_2 (nach Einbringen der KA), berechneter Absorptionsgrad α_2 der KA

f (Hz)	31.25	62.5	125	250	500	1k	2k	4k	8k
α_1	0.99	0.99	0.99	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.3
T_1	0.96	0.83	0.72	0.78	0.92	1.27	1.34	1.19	0.90
T_2	0.85	0.58	0.70	0.86	1.00	1.25	1.26	1.18	0.82
α_2	1.20	1.77	1.06	0.63	0.47	0.52	0.57	0.51	0.47

Abb. 5 zeigt eine Gegenüberstellung beider Studioräume nach erfolgter akustischer Sanierung. Für $f \geq 80$ Hz konnten die Zielvorgaben erreicht werden; darunter steigt die Nachhallzeit T_{20} an. Für $62.5 \text{ Hz} \leq f \leq 125 \text{ Hz}$ liegen die Werte unter denen von AR1. Der Anstieg zu tiefen Frequenzen erfolgt in AR2 gleichmäßiger als in AR1, die Ortsabhängigkeit konnte stark reduziert werden.

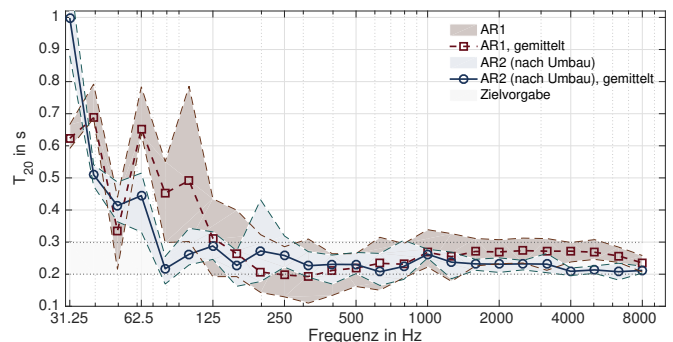


Abbildung 5: Vergleich der Nachhallzeiten T_{20} beider Studioräume nach erfolgter akustischer Sanierung (jeweils Bereich aller Messwerte und Mittelwert sowie Zielvorgabe)

Abbildung 6 zeigt eine Fotografie des Studioraumes AR2 nach erfolgtem Umbau. Zu erkennen sind die Vorhänge, die (mit blauem Stoff bezogenen) VPR und die von den Kantenabsorbern umfasste Deckenkonstruktion.

Diskussion

Da in der vorliegenden Arbeit ein besonderes Augenmerk auf die tiefen Frequenzen ($f \leq 200$ Hz) gelegt wird, sollen hier die dabei auftretenden Schwierigkeiten diskutiert werden. Die Auswertung der Nachhallzeit in kleinen Räumen stellt bei $f \leq 200$ Hz oftmals eine Herausforderung dar, da die Anregung des Schallfeldes nicht einfach zu bewerkstelligen und die Abweichung der Nachhallzeit zwischen einzelnen Messpositionen erheblich ist (s. Abb. 2). Werden die mittels der Schröder-Rückwärtsintegration berechneten Abklingkurven genauer betrachtet, wird ersichtlich, dass



Abbildung 6: AR2 nach erfolgter akustischer Sanierung

kein linearer Abklingvorgang stattfindet, sondern eine gekrümmte Kurve vorhanden ist. Die gekrümmte Abklingkurve im tiefen Frequenzbereich kommt durch die unterschiedlichen Abklingzeiten von axialen, tangentialen und schrägen Moden zustande [5]. Auch Kuttruff untersucht in [6] die Krümmung von Abklingkurven und kommt zu dem Ergebnis, dass nur dann eine gerade Abklingkurve vorhanden sein kann, wenn alle Eigenschwingungen des Raumes die gleiche Dämpfung aufweisen. Bei gekrümmten Abklingkurven hängt die Lage des Knicks von der unterschiedlichen Abklingzeit der einzelnen Moden im Frequenzband ab und ist daher einer stark ausgeprägten örtlichen Schwankung unterlegen. Bereits im Jahr 1964 verwies Schroeder in [7] auf die Wichtigkeit der Berücksichtigung von gekrümmten Abklingkurven. In Abb. 7 ist ein Beispiel für die gemessene Abklingkurve in AR2 (Leerzustand mit KA), sowie die berechneten Regressionsgeraden für die Nachhallparameter EDT , T_{20} und T_{30} bei $f = 125$ Hz dargestellt. Hier ist nicht nur ersichtlich, dass die Abklingkurve eine Krümmung aufweist, sondern auch, dass die Nachhallparameter nur den anfänglichen Teil des Abklingvorganges berücksichtigen, jedoch nicht den viel flacheren Abfallvorgang nach dem Knick. In kleinen Räumen ist aufgrund der physikalischen Bedingungen die Abklingkurve bei tiefen Frequenzen immer gekrümmt. Um den gesamten Abklingvorgang abzubilden, muss auch die Abklingzeit des spät ausklingenden Anteils berücksichtigt werden.

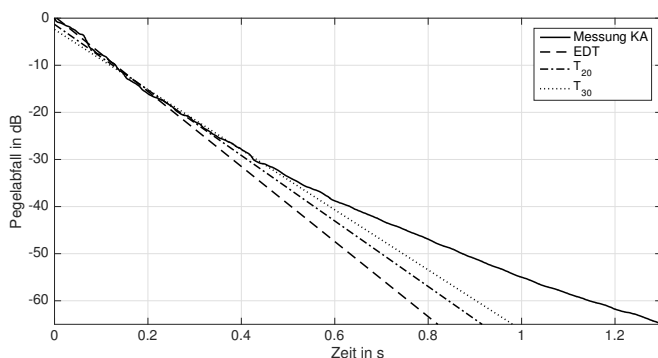


Abbildung 7: Pegelabfall sowie Regressionsgeraden für EDT , T_{20} und T_{30} in AR2 bei 125 Hz

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Maßnahmen sorgen für eine Reduzierung und Linearisierung der Nachhallzeit. Kantenabsorber mit Absorptionsgraden $\alpha > 1$ für $f \leq 125$ Hz können sich als wirksame Akustikmaßnahme für den tiefen Frequenzbereich erweisen. Das Studiopersonal ist mit Akustik und Optik des sanierten Aufnahmerraumes sehr zufrieden und beschreibt die dort realisierten Aufnahmen als akustisch transparent. Im Gegensatz zum Ausgangszustand erlaubt der optimierte Studioraum eine vielseitige Nutzung. Die ähnliche Akustik beider Räume gestattet nun die Realisierung von Aufnahmen, die in beiden Räumen gleichzeitig aufgezeichnet werden.

Insbesondere bei kleinen Räumen ist der Fokus auf den Bereich tiefer Frequenzen von $f < 125$ Hz, auch in Hinblick auf Transparenz und Verdeckung, sinnvoll. Dieser Bereich wird in der Realität selten berücksichtigt. Für akustische Planungen werden zuverlässige Messdaten für diesen Frequenzbereich benötigt, die jedoch selten vorhanden sind. Es fehlen einfache Methoden, um akustische Berechnungen bei tiefen Frequenzen sinnvoll durchführen zu können.

Der folgende QR-Code verweist auf eine Website [8] mit Klangbeispielen aus beiden Aufnahmerräumen.



Literatur

- [1] ISO 3382-1:2009: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces, International Organization of Standardization
- [2] ISO 3382-2:2008: Acoustics – Measurement room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, International Organization of Standardization
- [3] Berzborn et al.: The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing, DAGA Kiel 2017
- [4] Fuchs, H.: Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control. Springer-Verlag, Berlin, 2013
- [5] Jacobsen, F.: Decay rates and wall absorption at low frequencies, J. of Sound and Vibration, 81(3) (1982), 405-412
- [6] Kuttruff, H.: Eigenschaften und Auswertung von Nachhallkurven, Acoustica 8 (1958).
- [7] Schroeder, M.: New Method of Measuring Reverberation Time, J. Acoust. Soc. Am. 37 (1964), 409-412
- [8] https://www.spsc.tugraz.at/student_projects/raumakustische-planung-eines-aufnahmerraumes