
Raumakustik Laborübung

Einheit 3 – Impulsantwort und Gütemaße (28. Mai 2021)

Datum: 1. Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Maximum Length Sequence (MLS)	3
1.2	Exponentieller Sinussweep	4
1.3	Der Stefaniensaal	6
2	Messungen + Ergebnisse	7
2.1	Geräteverzeichnis	7
2.2	Messaufbau	7
2.3	Durchführung der Messungen	9
2.4	Ergebnisse	9
3	Diskussion + Fazit	13
3.1	Analyse unserer Ergebnisse	14
3.2	Fazit	16
	Abbildungsverzeichnis	17
	Tabellenverzeichnis	18
	Literaturverzeichnis	18

1

Einleitung

Die dritte Einheit der Raumakustik Laborübung beschäftigt sich mit Messungen der Impulsantwort eines Raumes. Solche Impulsantworten liefern die Ausgangsbasis zur Berechnung wichtiger raumakustischer Kenngrößen, welche dazu dienen die Akustik eines Raumes zu beschreiben und zu klassifizieren.

Es gibt verschiedene Arten einen Raum anzuregen um eine Impulsantwort zu erhalten. In dieser Übungseinheit wird genauer auf die Anregung mittels zweier Signale eingegangen. Um eine gute Messgenauigkeit zu erhalten und damit die Anregung immer gleich ist werden hierzu deterministische Signale genommen. Das eine Signal ist eine so gen. Maximum Length Sequence (MLS), ein rauschähnliches Signal, und das andere ist ein exponentieller Sinussweep, bei welchem alle Frequenzen innerhalb des menschlichen Hörbereichs angeregt werden. Im Vergleich zur Anregung mit einer Startklappe oder einer Schreckschusspistole, ist die Anregung mittels MLS/Sinussweep immer gleich und liefert außerdem auch einen höheren Energieeintrag in den Raum/Saal. Daraus folgt ein höherer/besser Signal-Rausch-Abstand (SNR).

In den folgenden Abschnitten wird auf die unterschiedlichen Messverfahren und den in der Einheit behandelten Saal genauer eingegangen. In den nachfolgenden Kapiteln werden der Messaufbau und die Ergebnisse dargestellt, sowie auch diskutiert und eine Schlussfolgerung gezogen.

1.1 Maximum Length Sequence (MLS)**Anregungssignal**

Wie schon geschrieben handelt es sich bei einem MLS-Signal um ein rauschähnliches, auch Pseudoräuschen genanntes Signal, welches aus einer periodischen Abfolge der logischen Zustände 0 und 1 besteht. Diese Periodizität bildet den Unterschied zwischen einem echten Rauschsignal, welches komplett zufällig ist, und einem Pseudoräuschen. Die logischen Zustände werden dabei auf die physikalischen Werte -1 und +1 der Vollaussteuerung der D/A-Wandlung bezogen.

Die Länge L einer MLS-Folge ist stark von der geschätzten Nachhallzeit abhängig. Für eine aussagekräftige Messung muss die Dauer der Anregung mittels MLS-Signals mindestens die Länge der geschätzten Nachhallzeit haben. Daher verwendet man lieber ein zu langes, als ein zu kurzes Signal.

Die Folgenlänge kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$L = 2^m - 1 \quad \text{mit } m \dots \text{ Ordnung der MLS} \quad (1.1)$$

Die tatsächliche zeitliche Periodendauer T_{MLS} eines MLS-Signals lässt sich über die Dauer Δt eines logischen Zustandes wie folgt berechnen:

$$T_{MLS} = L \cdot \Delta t = \frac{L}{f_s} \quad \text{mit } f_s \dots \text{ Samplingfrequenz des MLS-Signals} \quad (1.2)$$

Die Frequenzauflösung Δf ist abhängig von der Periodendauer des MLS-Signals:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{MLS}} = \frac{f_s}{L} \quad (1.3)$$

Die mindestens notwendige Ordnung der MLS ergibt sich daraus, dass für eine aussagekräftige Nachhallzeitmessung $T_{MLS} \geq T_{60,\max}$ erfüllt sein muss:

$$m \geq \frac{\log(T_{60,\max} \cdot f_s + 1)}{\log(2)} \quad (1.4)$$

Messung und Berechnung der Impulsantwort

Der zu betrachtende Raum wird über einen Lautsprecher mittels des MLS-Signals angeregt und über verschiedene Mikrofone im Raum wird das Signal wieder aufgezeichnet. Dieses aufgezeichnete Signal wird sich je nach Position des Mikrofons und des Lautsprechers vom Anregungssignal unterscheiden, da der Raum die Schallausbreitung beeinflusst. Das Anregungssignal wird mittels Kreuzkorrelation mit dem aufgezeichneten Signal korreliert und liefert so eine periodische Impulsantwort (PIR).

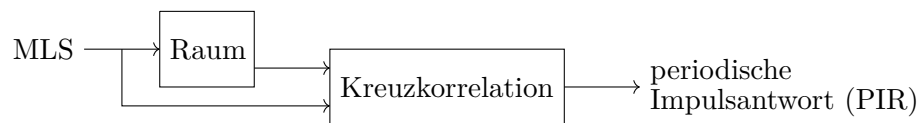


Abbildung 1.1: Schematischer Ablauf einer PIR-Messung mittels MLS.

Vorteile des MLS-Verfahrens

Die MLS-Messung ist unempfindlich gegenüber Störgeräuschen (z.B. Husten, Rascheln, etc.), da diese nicht mit dem MLS-Signal korrelieren. Außerdem lässt sich durch Verringerung der Amplitude des Anregungssignals der effektive Störspannungsabstand vergrößern, da Verzerrungen im Anregungskanal ein erhöhtes Grundrauschen verursachen.

1.2 Exponentieller Sinussweep

Anregungssignal

Wie der Name Sinussweep schon besagt, handelt es sich bei dieser Form der Anregung um ein Signal, welches aus einem Sinussignal besteht und dessen Frequenz kontinuierlich alle Frequenzen des menschlichen Hörbereichs durchläuft. Für das Durchschreiten aller Frequenzen gibt es die Möglichkeit eines linearen Sweeps, dieser besitzt ein Weißes Spektrum, und die Möglichkeit eines exponentiellen Sweeps, dieser besitzt ein Rosa Spektrum. In den meisten Fällen wird ein exponentieller Sweep genutzt, da das Rosa Spektrum der tatsächlichen Energieverteilung in den Frequenzen üblicher Signale (z.B. Konzert) ähnelt. Die Sweep-Rate steigt bzw. sinkt dabei exponentiell, im Gegensatz zum linearen Sweep, dort bleibt sie konstant.

Für die Länge des Sweeps hat sich etabliert, dass sie mindestens die 2 – 4-fache Länge der geschätzten Nachhallzeit betragen sollte, um den Raum mit genug Energie anzuregen. Außerdem wird während der Messung nach Verklingen des Sweeps noch eine gewisse Zeit an Stille angehängt, die mindestens der Dauer der geschätzten Nachhallzeit entspricht, damit die gesamte Raumimpulsantwort ohne Störung aufgezeichnet werden kann.

Auf die Synthese des Sweepsignals wird hier nicht genauer eingegangen. Entsprechendes kann dem Raumakustik Laborübungsskriptum entnommen werden.

Messung und Berechnung der Impulsantwort

Gleich der Messung mittels MLS wird auch bei der Sinussweep-Methode der interessierende Raum mittels des Anregungssignals (hier Sinussweep) angeregt und über verschiedene Mikrofone im Raum wieder aufgezeichnet. Diese Impulsantwort wird nicht wie bei der MLS-Methode mittels Kreuzkorrelation des MLS-Signals mit der Raumimpulsantwort berechnet, sondern entweder durch

Entfaltung im Zeitbereich oder durch Spektraldivision im Frequenzbereich der aufgezeichneten Raumimpulsantwort. Die Abbildungen 1.2 und 1.3 zeigen Blockschaltbilder, wie die Impulsantwort berechnet werden kann.

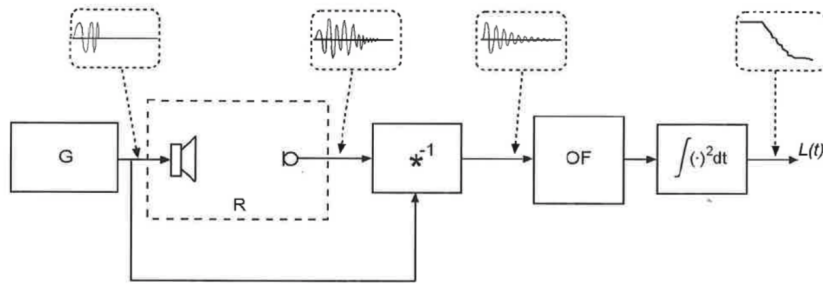


Abbildung 1.2: Blockschaltbild zur direkten Entfaltung [1].

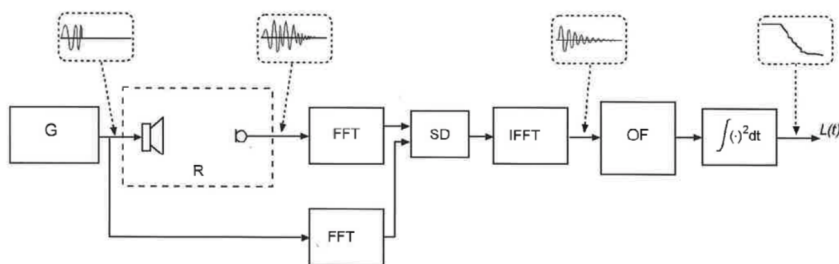


Abbildung 1.3: Blockschaltbild zur Spektraldivision [1].

Mathematisch hängen die direkte Entfaltung und die Spektraldivision wie folgt zusammen:

$$\text{Entfaltung:} \quad y(t) * if(t) = h(t) \quad if(t) * x(t) = \delta(t)$$

$$\text{Spektraldivision:} \quad \frac{Y(s)}{X(s)} = H(s) \quad Y(s) \cdot IF(s) = H(s) \quad IF(s) \cdot X(s) = 1 \quad \left(IF(s) = \frac{1}{X(s)} \right)$$

Vorteile des Sinussweep-Verfahrens

Das Sinussweep-Verfahren unter Nutzung der direkten Entfaltung ist im Vergleich zum Verfahren mittels MLS unempfindlich auf Nichtlinearitäten des Messsystems bzw. des zu messenden Raumes. Auftretende Nichtlinearitäten können durch Zeitfensterung nach der Faltung des Quellsignals mit der inversgefilterten Impulsantwort $if(t)$ eliminiert werden. Der inverse Filter muss folgende Eigenschaft aufweisen:

$$x(t) * if(t) = \delta(t - \tau) \quad \text{mit} \quad \tau \dots \text{Länge der Impulsantwort des inversen Filters in s} \quad (1.5)$$

Berechnung der Impulsantwort

Die Raumimpulsantwort ergibt sich somit durch lineare Faltung mit der Impulsantwort des inversen Filters $if(t)$:

$$h'(t - \tau) = y(t) * if(t) = h(t - \tau) + h_x(t - \tau_2) + \dots + h_n(t - \tau_n) + n(t - \tau) \quad (1.6)$$

$$\text{mit } \tau_n < \tau \text{ und } \tau_n < \tau_{n-1}$$

1.3 Der Stefaniensaal

Bei dem Raum bzw. Saal, welchen wir in der 3. Einheit der Laborübung vermessen haben, handelt es sich um den Stefaniensaal im Grazer Congress. Der Saal wird hauptsächlich für Musikdarbietungen und klassische Konzerte verwendet, es finden gelegentlich aber auch andere Veranstaltungen, wie zB. Messen und Bälle, statt. Er bietet auf dem Parkett und der Galerie für bis zu 1100 Personen Platz. Von der Bauweise her handelt es sich um einen Konzertsaal in "SSchuhkartonform" mit Holzvertäfelungen und kleinen Verzierungen an den Wänden am Parkett und großflächigen Verzierungen und Stuck an den Wänden auf der Galerie und der Decke. Die Rückwand in den Logen und auf der Galerie sind mit einer dünnen gepolsterten Schicht ausgekleidet. Wie auch in Abbildung 1.4 zu sehen, war während unserer Messung der Saal komplett bestuhlt. Lediglich der Flügel auf der Bühne war nicht im Raum.

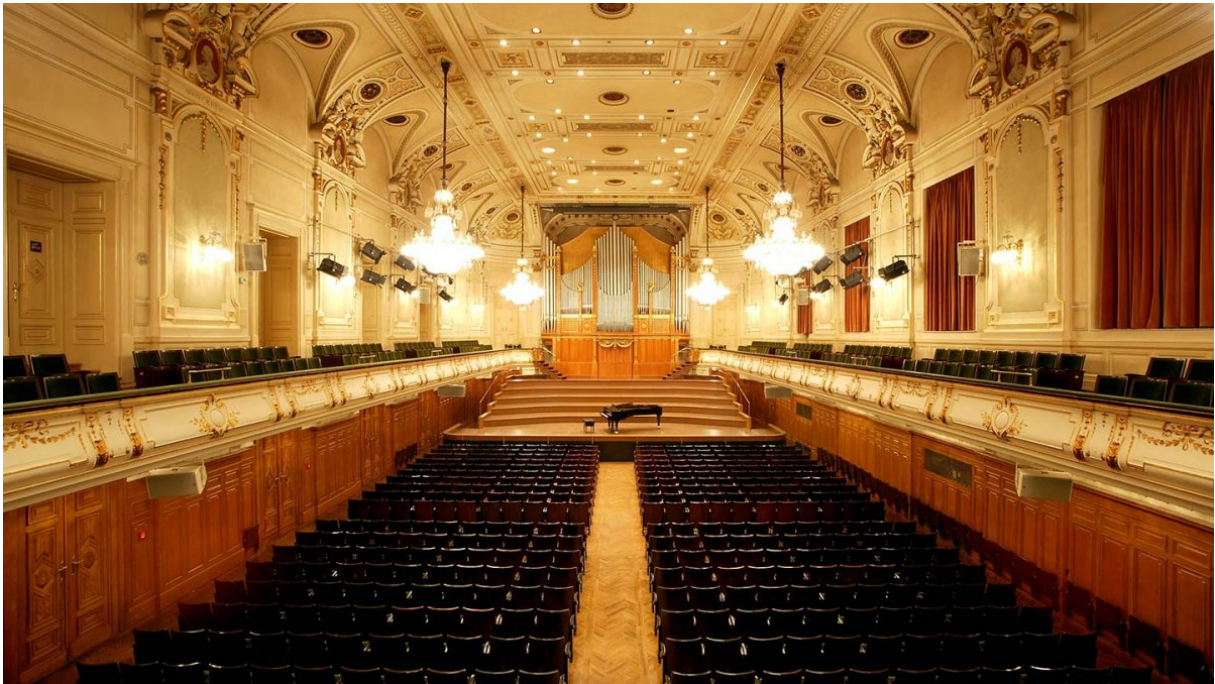


Abbildung 1.4: Stefaniensaal im Grazer Congress [2].

Die nachfolgende Tabelle 1.1 listet die Eigenschaften des Saals auf, welche gemessen bzw. berechnet wurden.

Tabelle 1.1: Raumeigenschaften des Stefaniensaals.

Eigenschaft	Wert
Raummaße (LBH):	38 m × 16 m × 11,5 m
Volumen:	6992 m ³
Temperatur:	24 °C
Luftfeuchtigkeit:	36,8 %
Grundgeräuschpegel:	25,6 dB(A)

2

Messungen + Ergebnisse

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit den Geräten (2.1) welche zur Messung verwendet wurden, dem Messaufbau (2.2), der Durchführung der Messungen (2.3), sowie den Ergebnissen der Messung (2.4).

2.1 Geräteverzeichnis

Folgende Messinstrumente wurden zur Durchführung der Übung verwendet:

- **NTi XL2** für die Grundgeräuschpegelmessung (L_{Aeq5})
- **Norsonic NOR 276 Dodekaeder** omnidirektionaler Lautsprecher
- **Norsonic NOR 280 PowerAmp** (eingestellt auf -15 dB & Eingang LINE)
- **Focusrite 2i2 3rd Gen** Audiointerface
- **NTI 2230** Messmikrofon (Diffusfeld)
- **Brüel & Kjaer Kalibrator**/Prüfschallquelle 4231 (94 dB bei 1 kHz)
- Lenovo T500 mit **ARTA Software** Messsoftware (inkl. Generator für Sweep und MLS)
- **Bosch DLE 70** zur Entfernungsmessung
- **Testo 610** Messgerät zur Raumtemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung

2.2 Messaufbau

Nach ÖNORM 3382 brauchen wir für die Messung in Konzert- und Aufführungsräumen mindestens 2 Quell- und 6 Mikropositionen mit zufällig (aber gleichmäßig) verteilten Standorten. Die Quellpositionen sollte man dort festlegen, wo auch im Saal bei aktiver Nutzung der Schall hauptsächlich seinen Ursprung hat. Die Messmikrofone werden gleichmäßig auf den Zuhörerplätzen aufgeteilt und auf Höhe des Kopfes in aufrechter Sitzposition (bei uns 1,3 m) eingestellt. Aufgrund der Schuhkartonform des Stefaniensaals und seiner damit einhergehenden Achsensymmetrie ist es für unsere Messung genügend, die Messpositionen in nur einer Raumhälfte zu verteilen. Für die Positionierung der Messmikrofone ist zu beachten, dass ihr Abstand zu den Raumbegrenzungsflächen groß genug ist (mind. 1 m oder $\lambda/4$), ihr Abstand zueinander groß genug ist (mind. 2 m oder $\lambda/2$), sowie der Abstand zur Quellposition d_{min} groß genug ist. Der Mindestabstand zur Quellposition kann folgendermaßen berechnet werden:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad \text{mit} \quad c = (331,5 + 0,6\vartheta/^\circ\text{C}) \text{ m/s} \quad \dots \quad \text{Schallgeschwindigkeit} \quad (2.1)$$

d_{min} beträgt somit für den Stefaniensaal 6,702 m. Die vorgegebene (Soll-)Nachhallzeit für einen Saal mit diesem Volumen (siehe Tabelle 1.1) liegt bei circa 1,8s (entnommen der Grafik auf Seite 48 des Raumakustik Laborübungsskriptum [1]). Die Quellpositionen Q1 wurde so gewählt, dass sie quasi den Schallursprung eines Orchesters darstellt und Quellposition Q2 stellt den Schallursprung eines/r Solisten/in z.B. am Klavier dar.

Tabelle 2.1: Quellpositionen Q1 und Q2 mit den jeweiligen Distanzen zur Seitenwand und Orgel.

Quellpositionen	Δb [m]	Δl [m]
Q1	8,00	4,36
Q2	5,87	7,44

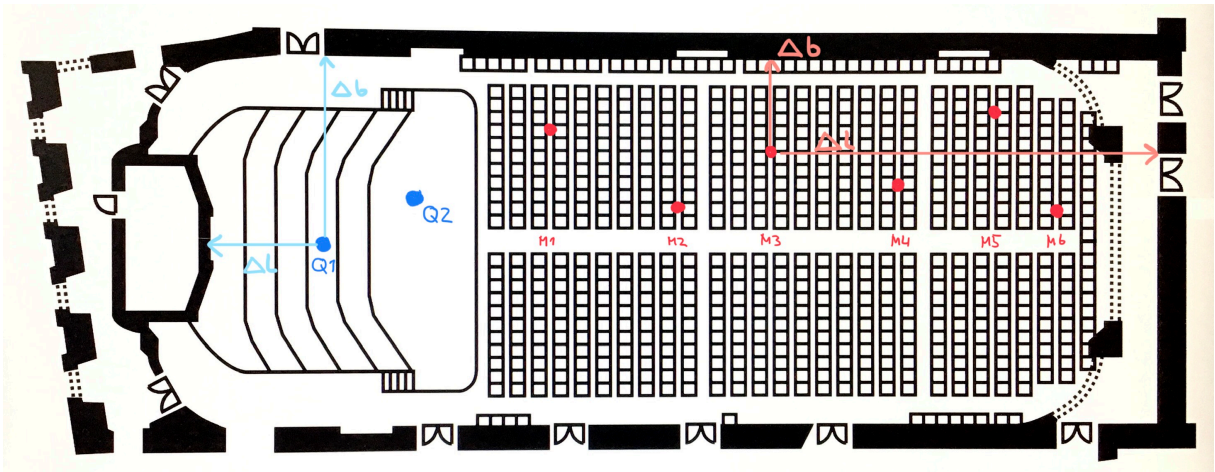


Abbildung 2.1: Grundriss mit Quell- und Mikrofonpositionen [3].

Tabelle 2.2: Mikrofonpositionen mit den jeweiligen Distanzen zur Seitenwand, Rückwand, Q1 und Q2.

Messpositionen	Δb [m]	Δl [m]	$\Delta Q1$ [m]	$\Delta Q2$ [m]
M1	2,67	24,28	10,67	7,11
M2	6,67	19,83	14,22	11,22
M3	2,58	15,57	18,61	15,38
M4	5,99	11,55	21,86	19,04
M5	3,28	7,18	26,59	23,53
M6	6,95	4,06	29,35	26,94

Anmerkung: Wie in Abb. 2.1 ersichtlich, wurden die Abstände für Δl für die Quellpositionen nach vorne zur Orgel gemessen, die Mikrofonpositionen wurden aber nach hinten zur Rückwand gemessen.

Für die MLS- und Sinussweep-Messungen wurde die Software ARTA verwendet. Diese bietet die Möglichkeit ein Anregungssignal zu generieren, die Raumimpulsantwort aufzuzeichnen, zu analysieren und die Daten als .csv-Datei auszuspielen, sowie die ermittelte Impulsantwort als .wav-Datei abzuspeichern. Der Laptop wurde an den Scarlet 2i2 angeschlossen, um das Anregungssignal an einen Verstärker auszugeben. Der Verstärker dient dazu, dass das Signal energiereich genug ist um über einen omnidirektionalen Lautsprecher einen Raum ausreichend anregen zu können. Das Messmikrofon wurde an den in Abbildung 2.1 eingezeichneten Messpositionen positioniert und hat die Raumimpulsantwort über den Scarlet 2i2 wieder an den Laptop und somit ARTA

weitergegeben. Abbildung 2.2 zeigt den Signalfluss der Messung. Dieser trifft sowohl für die MLS-Messungen, wie auch die Sinussweep-Messungen zu.

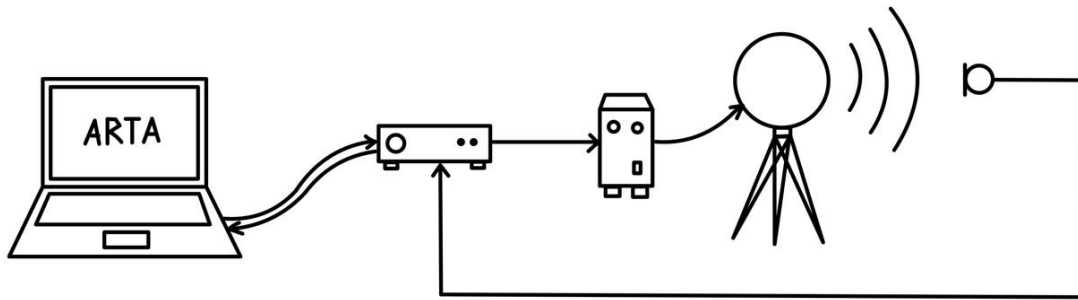


Abbildung 2.2: Signalflussdiagramm der MLS- und Sinussweep-Messung.

Vor der Messung müssen verschiedene Parameter ermittelt und eingestellt werden, wie z.B. der Grundgeräuschpegel (siehe Tabelle 1.1). Das Messmikrofon muss mittels Kalibrator kalibriert werden, der Pegel des Anregungssignals muss so eingestellt werden, dass zum einen der Lautsprecher nicht verzerrt als auch das Mikrofon an der zur Quelle nächstens Position nicht übersteuert (PreAmp-Einstellungen: -15 dB, EQ für mehr Schallenergie bei tiefen Frequenzen hinzugeschaltet).

2.3 Durchführung der Messungen

Im ersten Messdurchgang wurde die Raumimpulsantwort mittels MLS-Anregung ermittelt. Mit einer gewählten Ordnung von $m = 17$ und einer Samplingfrequenz von $f_s = 48$ kHz kommt man auf die MLS-Länge 2,7 s. Nach dem Einstellen in der Software und kalibrieren des Messmikrofons wurde die Impulsantwort an jeder Messposition (siehe Tabelle 2.2) gemessen. An Position M3 und M4 kam es zu Messfehlern (kaum Schallenergie bei $f = 63$ Hz) und die Messung wurde 2 bis 3 mal wiederholt. Die Quelle befand sich an Quellposition Q1.

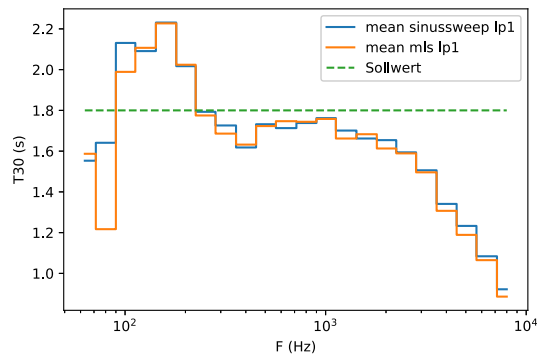
In einem zweiten Messdurchgang wurde die Impulsantwort mittels Sinussweep-Anregung ermittelt. Mit 256000 Samples, Average von 2 (Mittelung der Impulsantwort über zwei Sinussweepmessungen) und einer Samplingfrequenz von $f_s = 48$ kHz wurde eine Dauer von 5,4 s für den exponentiellen Sweep ermittelt. Nach dem Einstellen in der Software und dem Kalibrieren des Messmikrofons wurde die Impulsantwort an jeder Messposition (siehe Tabelle 2.2) gemessen. Die Quelle befand sich an Quellposition Q1.

Nach diesen beiden Durchgängen wurde die Quelle an Position Q2 umgestellt und sowohl die MLS-Messung, als auch die Sinussweep-Messung wurde für alle Messpositionen M1 – M6 wiederholt.

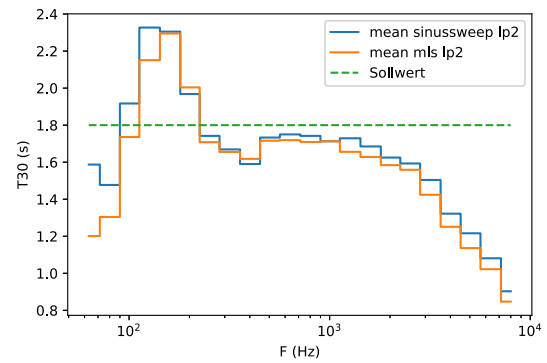
2.4 Ergebnisse

Die Werte der Messergebnisse für die einzelnen Messpunkte wurden gemittelt und werden im folgenden Abschnitt grafisch dargestellt. Die Plots (Abb. 2.3 bis 2.10) zeigen ein Histogramm mit den entsprechenden Kenngrößen aufgetragen über die Terzmittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz. Zum besseren Vergleich der Unterschiede zwischen dem MLS- und dem Sinussweep-Verfahren wurden die Ergebnisse einer Kenngröße von einer Quellposition aus für beide Messverfahren in einem Plot dargestellt. Desweiteren wurde noch ein Plot erstellt (Abb. 2.11), welcher T_{30} in Relation zur Soll-Nachhallzeit $T_{soll} = 1,8$ s zeigt. Diese wurde eingeordnet in den Toleranzbereich für eine optimale Nachhallzeit für Räume in welchen Musikaufführungen stattfinden.

Auf die Messergebnisse, den Zusammenhang mit den raumakustischen Kenngrößen und deren zugehörige Sollwerte wird im folgenden Kapitel 3 „Diskussion + Fazit“ genauer eingegangen.

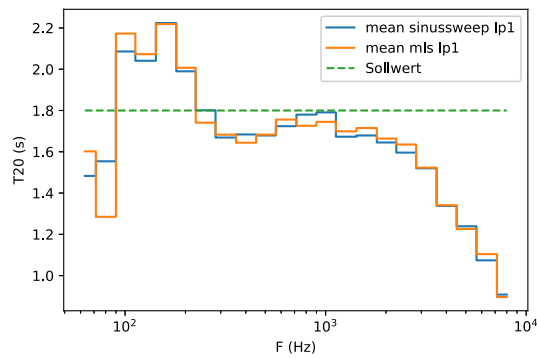


(a) T_{30} Messung mit Q1

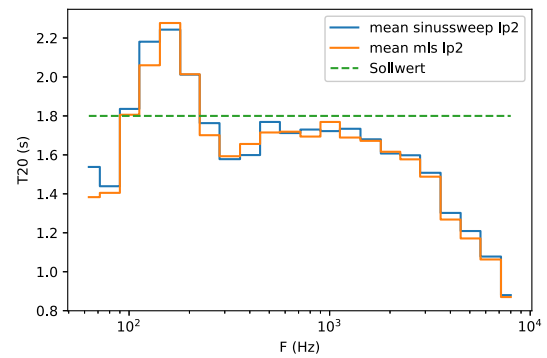


(b) T_{30} Messung mit Q2

Abbildung 2.3: Vergleich der T_{30} Messungen.

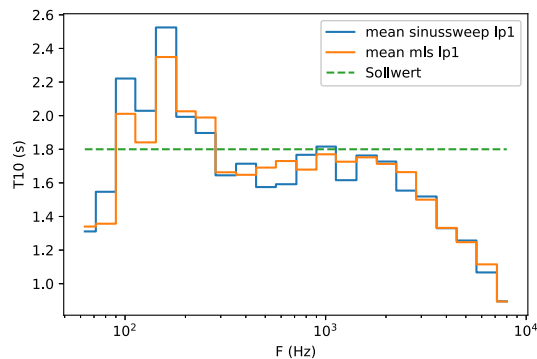


(a) T_{20} Messung mit Q1

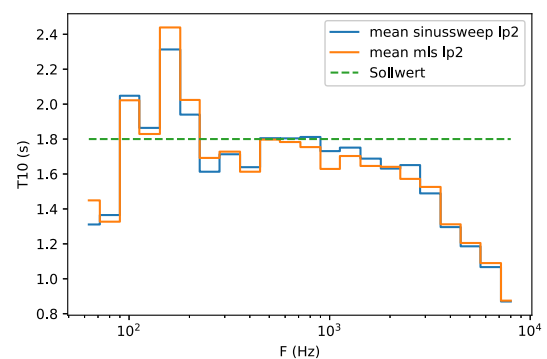


(b) T_{20} Messung mit Q2

Abbildung 2.4: Vergleich der T_{20} Messungen.

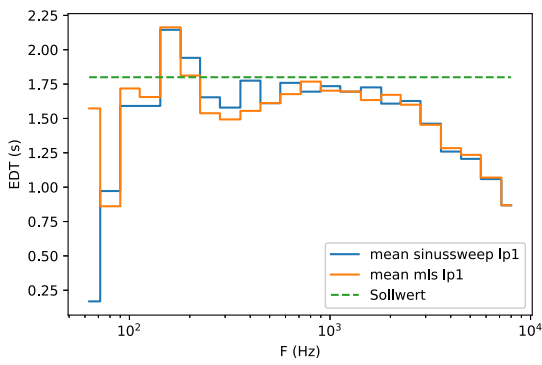


(a) T_{10} Messung mit Q1

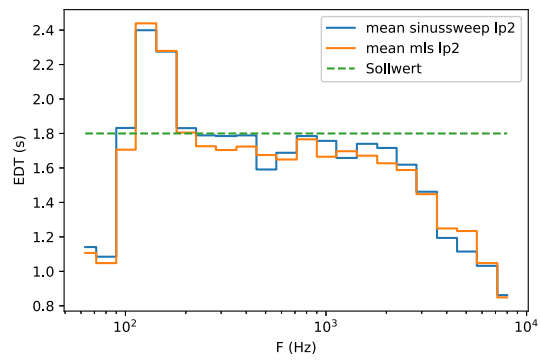


(b) T_{10} Messung mit Q2

Abbildung 2.5: Vergleich der T_{10} Messungen.

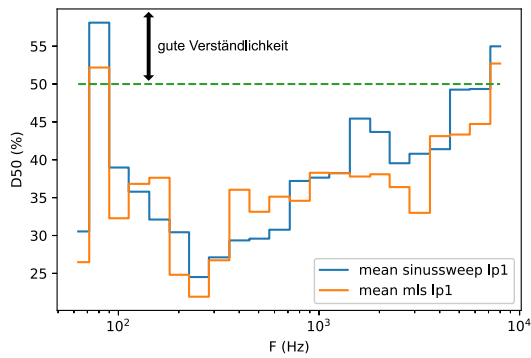
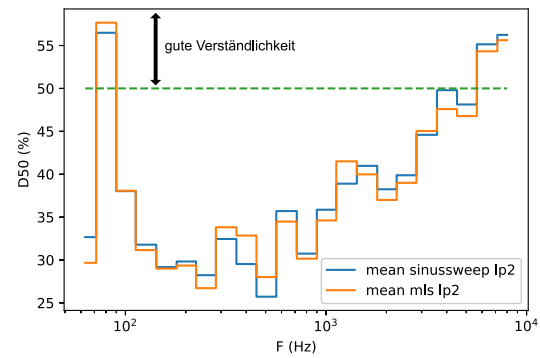
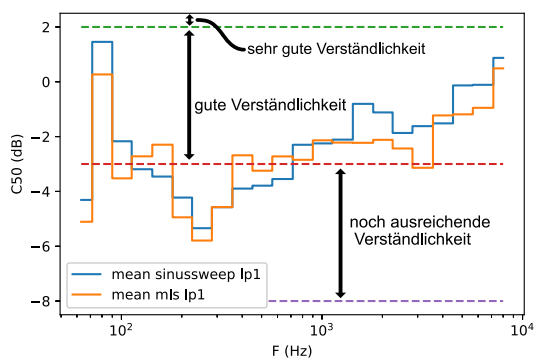
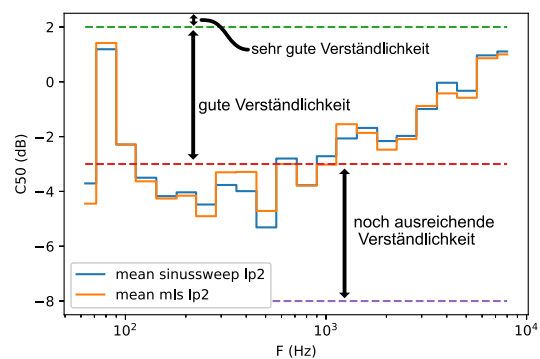


(a) EDT Messung mit Q1



(b) EDT Messung mit Q2

Abbildung 2.6: Vergleich der EDT Messungen.

(a) D_{50} Messung mit Q1(b) D_{50} Messung mit Q2Abbildung 2.7: Vergleich der D_{50} Messungen.(a) C_{50} Messung mit Q1(b) C_{50} Messung mit Q2Abbildung 2.8: Vergleich der C_{50} Messungen.

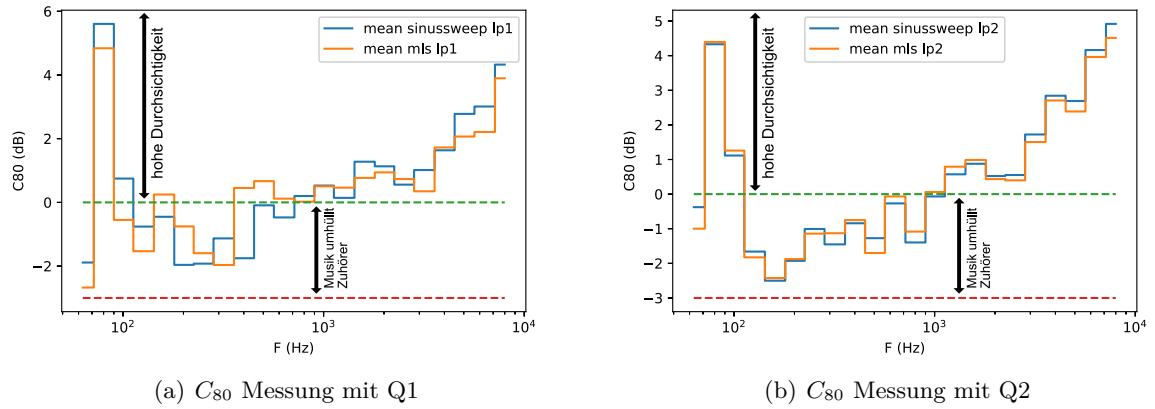


Abbildung 2.9: Vergleich der C_{80} Messungen.

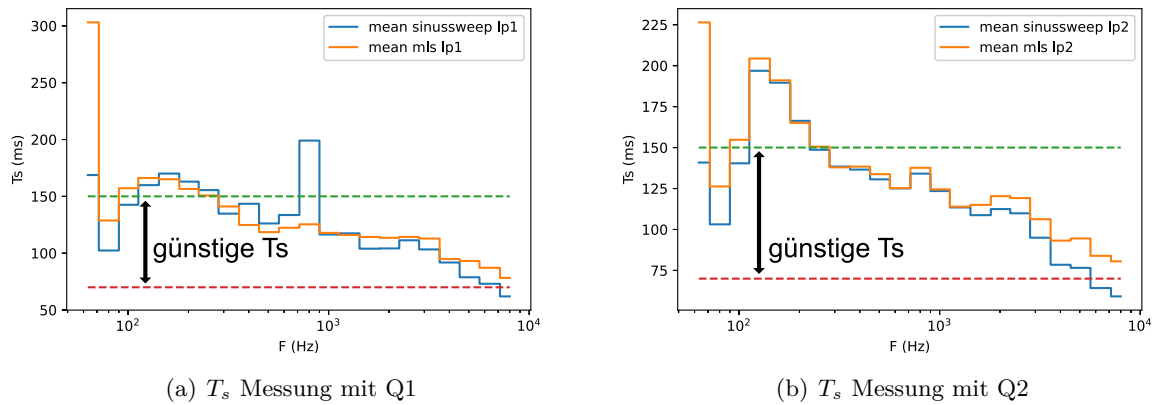


Abbildung 2.10: Vergleich der T_s Messungen.

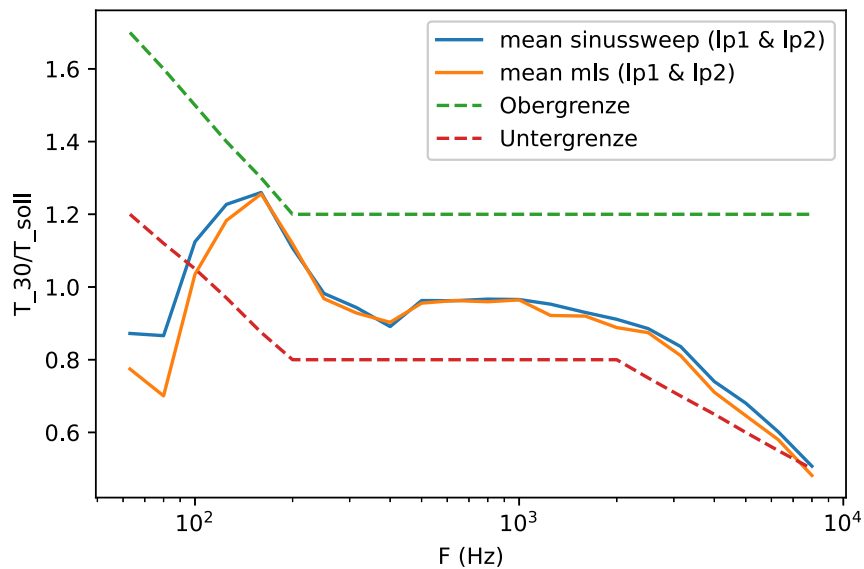


Abbildung 2.11: Einordnung der Nachhallzeiten in den Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit für Musikdarbietungen (Toleranzbereich entnommen der Abbildung 6.2 (b) aus [1]).

3

Diskussion + Fazit

Zu Beginn der Auswertung ein kurzer Überblick über die wichtigsten Gütemaße in der Raumakustik. Nähere Details und Formeln zu den jeweiligen Maßen können aus dem Laborübungsskriptum [1] entnommen werden.

Nachhallzeit (T)

Die Nachhallzeit T gibt über die Halligkeit eines Raumes Auskunft. Sie wird bei bestehenden Räumen gemessen, kann aber auch mittels Raumvolumen und äquivalenten Absorptionsflächen durch die Formel von Sabine oder Eyring berechnet werden. In der ÖNORM 8115 wird die optimale Nachhallzeit für den jeweiligen Verwendungszweck des Raumes abhängig vom Volumen festgelegt. In unserem Fall liegt die optimale Nachhallzeit bei $T = 1,8$ s.

$$T = 0,45 \cdot \log(V) + 0,07 \quad \text{für } 30 \text{ m}^3 - 10\,000 \text{ m}^3 \text{ bei Musikdarbietungen} \quad (3.1)$$

Anfangsnachhallzeit (EDT)

Die Anfangsnachhallzeit (engl.: early decay time) EDT bestimmt die Dauer, in welcher der Schalldruckpegel innerhalb der ersten 10 dB abfällt. Sie ist vor allem subjektiv sehr wichtig, da der erste Teil des Abklingvorganges deutlicher und prägnanter gehört wird als der Rest.

Bassverhältnis (BR)

Das Bassverhältnis (bass ratio) BR beschreibt den Anstieg der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen. Dies ist zumeist in Räumen für Musikaufführungen gewünscht, da das menschliche Gehör in diesem Frequenzbereich weniger empfindlich ist.

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} > 1 \quad 1,1 < BR_{soll} < 1,3 \quad (3.2)$$

Deutlichkeitsgrad nach Thiele (D_{50})

Der Deutlichkeitsgrad D_{50} beschreibt den einfallenden Energieanteil in den ersten 50 ms nach dem Direktschall im Verhältnis zur Gesamtenergie.

$D_{50} > 50\%$ erklärt sich als gute Verständlichkeit. Dieser Wert hat bei uns aber keine große Relevanz, da dieses Gütemaß vor allem für Räume mit Kommunikation als Verwendungszweck zum Einsatz kommt.

Deutlichkeitsmaß (C_{50})

Dieses Gütemaß ist im praktischen Zusammenhang von höherer Relevanz als D_{50} , jedoch auch häufiger für Sprachverständlichkeit als für Musik eingesetzt. Hier wird der einfallende Energieanteil innerhalb der ersten 50 ms im Verhältnis zum Energieanteil ab 50 ms gesetzt. Folgende Unterschiede werden getroffen:

	C_{50}	> 2 dB	sehr gute Verständlichkeit
2 dB	$> C_{50}$	> -3 dB	gute Verständlichkeit
-3 dB	$> C_{50}$	> -8 dB	ausreichende Verständlichkeit

Klarheitsmaß (C_{80})

Dieses Gütemaß ist dem C_{50} sehr ähnlich und unterscheidet sich im Wesentlichen nur durch die Integrationsgrenzen. Es wird nun die Schallenergie in den ersten 80 ms im Verhältnis zur restlichen Energie ab 80 ms gestellt. In der Musik ist dies ein wichtiges Maß für die Zeit- und Registerdurchsichtigkeit.

$$\begin{array}{rcl} C_{80} & > 0 \text{ dB} & \text{hohe Durchsichtigkeit} \\ 0 \text{ dB} > C_{80} & > -3 \text{ dB} & \text{Musik umhüllt Zuhörer} \end{array}$$

Schwerpunktzeit (T_s)

Die T_s wird sowohl für Sprache als auch für Musik verwendet. Sie ist ein Maß für die zeitliche Lage hoher Schalleistungen und trifft so eine Aussage über den Raumeindruck und die Bewertung seiner Durchsichtigkeit. Die Definition ergibt sich aus dem Flächenschwerpunktsatz und das Optimum für Musikdarbietungen liegt bei circa 100 ms – 150 ms.

3.1 Analyse unserer Ergebnisse

Bei allen **Nachhallzeitmessungen** fällt sofort der erhöhte Wert im 160 Hz - Terzband auf. Dieser bewegt sich je nach Messung zwischen 2,2 s und 2,4 s. Ansonsten liegt der Saal im Optimalbereich von $1,8 \text{ s} \pm 20\%$ Toleranz (0,36 s). Wenn man T_{30} , T_{20} und T_{10} vergleicht, fällt auf, dass die Verläufe immer „grober“ werden, umso kürzer gemessen wurde. T_{30} bietet hier den schönsten und genauesten Verlauf, T_{10} hingegen hat am meisten Unstetigkeiten.

Auch die **EDT** kann man mit den vorangegangenen Nachhallzeiten vergleichen. Der Unterschied zwischen T_{10} und EDT ist lediglich der veränderte Messbereich. Bei Ersterem wird der Schalldruckpegelabfall von -5 dB bis -15 dB gemessen, bei Letzerem von 0 dB bis -10 dB .

Die Messung zu **D_{50}** liefert in unserem Fall keine sonderlich guten Werte (größtenteils $< 50\%$). Da wir aber einen Raum für Musikaufführungen vorliegen haben, ist dieser Wert vernachlässigbar. Ebenso wird **C_{50}** betrachtet, da dies auch ein Maß für Sprachverständlichkeit ist und deswegen auch von der Norm abweichende Werte aufweist.

Von größter Relevanz ist nun wieder das **Klarheitsmaß C_{80}** . Abbildung 2.9 zeigt für tiefere Frequenzen bis 1 kHz schon passable Werte im optimalen Bereich von -2 dB bis 0 dB an. Ab 1 kHz steigen die Werte von anfangs 0 dB auf 5 dB an, was für Zuhörer eine vollständige, optimale Durchsichtigkeit der Musik bedeutet. Besonders interessant ist auch der Terzbandbereich von 80 Hz. Dort steigt der Wert auf 5 dB .

Die T_s liegt mit 100 - 150 ms auch im Optimum. In Abbildung 2.10 unterscheiden sich jedoch die Werte zwischen Q1 und Q2 im unteren Frequenzbereich bis 1 kHz. Abbildung 2.10(a) zeigt zudem im 800 Hz Terzband eine Erhöhung der Zeit auf 200 ms. Abbildung 2.10(b) hingegen zeigt eine etwas breitbandigere Anhebung ebenso auf 200 ms aber bei 125 - 160 Hz. Dies bedeutet einen späteren Schalleistungsschwerpunkt in den genannten Frequenzbereichen.

Berechnung des Bassverhältnisses (BR)

Durch Ablesen der Nachhallzeit von einem Plot, zB. Abbildung 2.3(a) in den Terzbändern 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz und 1 kHz, wird das Bassverhältnis nach Formel 3.2 berechnet.

$$BR_{saal} = \frac{2,1\text{s} + 1,8\text{s}}{1,7\text{s} + 1,75\text{s}} = 1,13 \quad (3.3)$$

Somit liegt der Saal auch mit diesem Maß im Optimalbereich.

Zusätzliche Messungen

Da nach den bisherigen Messungen noch etwas Zeit geblieben ist wurden noch zwei weitere Messungen auf dem Balkon durchgeführt. Die Messergebnisse werden im folgenden noch kurz geschildert.

Messung I wurde mit Q1 durchgeführt. Das Messmikrofon wurde in den Rang/Balkon mittig ($\Delta b = 8m$) auf Höhe der Hörerposition eingebracht. Zur Rückwand betrug der Abstand $\Delta l = 3,93m$. Diese Plätze gehören zu den hochpreisigen Sitzplätzen im Saal - dies spiegelt sich auch in der Akustik wider. Die Ergebnisse zeigen in allen Gütemaßen die besten Werte. Lediglich in den 100 - 125 - 160 Hz Bändern kommt es zu einer Erhöhung der Nachhallzeit, die aber vermutlich der mittigen Messposition geschuldet ist (Raumresonanzen).

Messung II wurde abermals mit Q1 durchgeführt, wobei nun das Messmikrofon relativ nahe zu der hinteren Ecke gestellt wurde ($\Delta l = 2,59m$; $\Delta b = 2,29m$). Da die Wände gepolstert sind, sinkt hier die Nachhallzeit vorallem für hohe Frequenzen auf 0,9s.

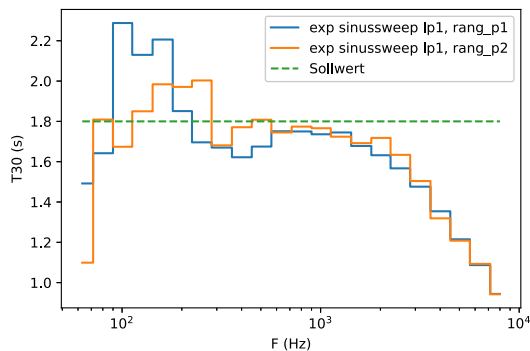


Abbildung 3.1: Zusätzliche T_{30} Messungen auf dem ersten Rang.

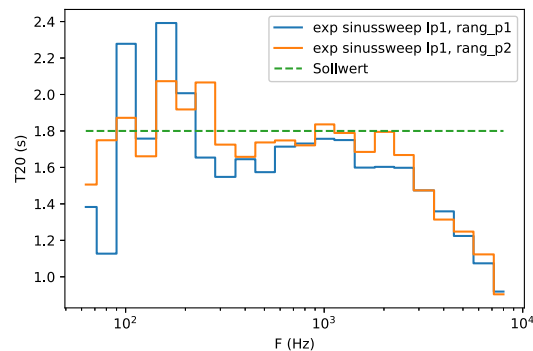


Abbildung 3.2: Zusätzliche T_{20} Messungen auf dem ersten Rang.

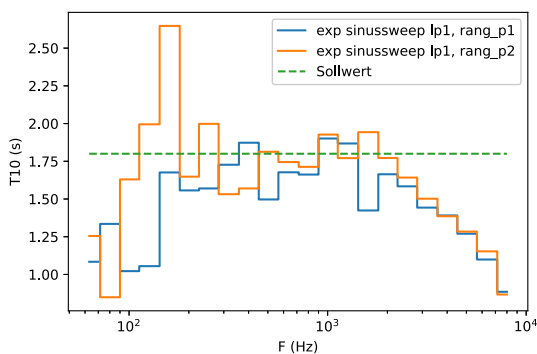


Abbildung 3.3: Zusätzliche T_{10} Messungen auf dem ersten Rang.

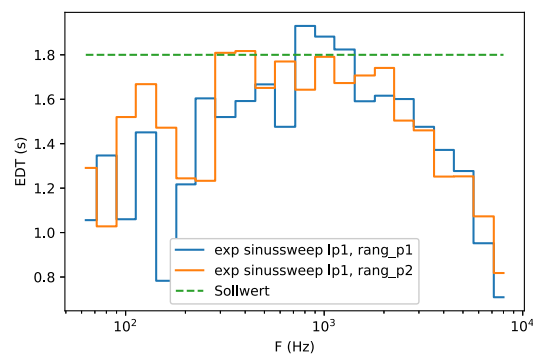


Abbildung 3.4: Zusätzliche EDT Messungen auf dem ersten Rang.

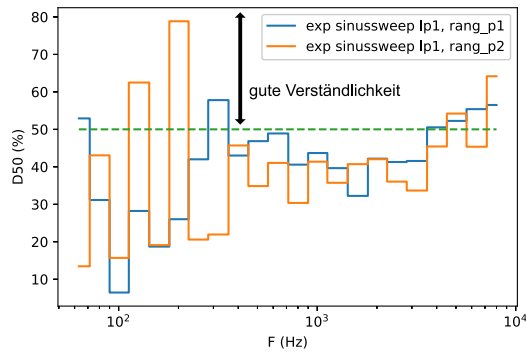


Abbildung 3.5: Zusätzliche D_{50} Messungen auf dem ersten Rang.

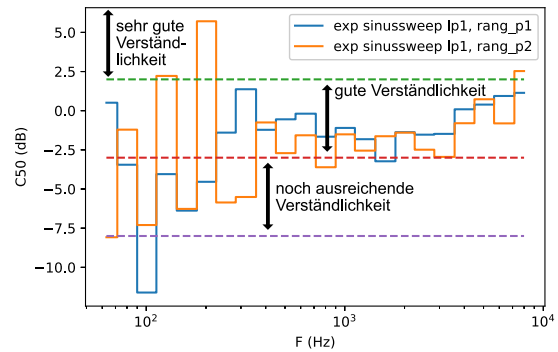


Abbildung 3.6: Zusätzliche C_{50} Messungen auf dem ersten Rang.

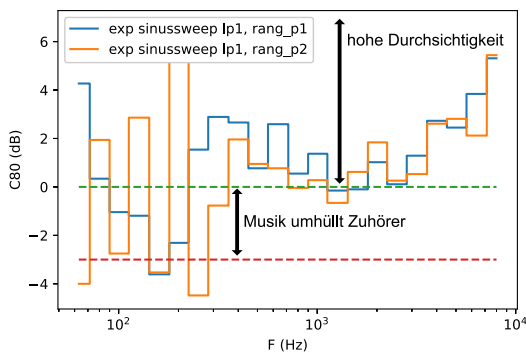


Abbildung 3.7: Zusätzliche C_{80} Messungen auf dem ersten Rang.

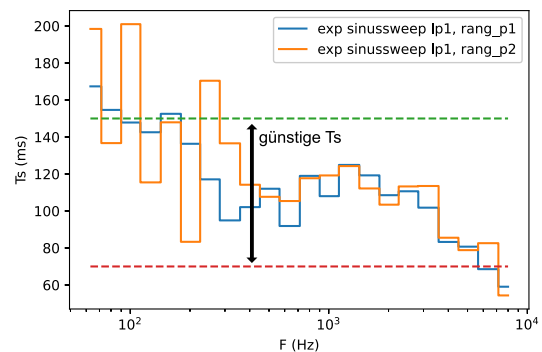


Abbildung 3.8: Zusätzliche T_s Messungen auf dem ersten Rang.

3.2 Fazit

Je nach Gütemaß ist fast immer eine Abweichung zwischen der Sweep- und der MLS Messung erkennbar. Zustände kommen diese durch die unterschiedlichen Methoden der Messung und Berechnung. Geringere Abweichungen gibt es bei den Nachhallzeiten, etwas größere bei den Gütemaßen für die Sprachverständlichkeit.

Die einzelnen Gesamtergebnisse lassen ohne Zweifel darauf schließen, dass dieser Saal bestens für orchestrale und kammermusikalische Musikdarbietungen geeignet ist. Er ist von der Bauweise und seinem akustischen Verhalten her dem Großen Saal des Musikvereines Wien recht ähnlich, welcher als einer der besten Konzertsäle überhaupt gilt.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Ablauf einer PIR-Messung mittels MLS.	4
1.2	Blockschaltbild zur direkten Entfaltung [1].	5
1.3	Blockschaltbild zur Spektraldivision [1].	5
1.4	Stefaniensaal im Grazer Congress [2].	6
2.1	Grundriss mit Quell- und Mikrofonpositionen [3].	8
2.2	Signalfussdiagramm der MLS- und Sinussweep-Messung.	9
2.3	Vergleich der T_{30} Messungen.	10
2.4	Vergleich der T_{20} Messungen.	10
2.5	Vergleich der T_{10} Messungen.	10
2.6	Vergleich der EDT Messungen.	11
2.7	Vergleich der D_{50} Messungen.	11
2.8	Vergleich der C_{50} Messungen.	11
2.9	Vergleich der C_{80} Messungen.	12
2.10	Vergleich der T_s Messungen.	12
2.11	Einordnung der Nachhallzeiten in den Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit für Musikdarbietungen (Toleranzbereich entnommen der Abbildung 6.2 (b) aus [1]).	12
3.1	Zusätzliche T_{30} Messungen auf dem ersten Rang.	15
3.2	Zusätzliche T_{20} Messungen auf dem ersten Rang.	15
3.3	Zusätzliche T_{10} Messungen auf dem ersten Rang.	15
3.4	Zusätzliche EDT Messungen auf dem ersten Rang.	15
3.5	Zusätzliche D_{50} Messungen auf dem ersten Rang.	16
3.6	Zusätzliche C_{50} Messungen auf dem ersten Rang.	16
3.7	Zusätzliche C_{80} Messungen auf dem ersten Rang.	16
3.8	Zusätzliche T_s Messungen auf dem ersten Rang.	16

Tabellenverzeichnis

1.1	Raumeigenschaften des Stefaniensaals.	6
2.1	Quellpositionen Q1 und Q2 mit den jeweiligen Distanzen zur Seitenwand und Orgel.	8
2.2	Mikrofonpositionen mit den jeweiligen Distanzen zur Seitenwand, Rückwand, Q1 und Q2.	8

Literaturverzeichnis

- [1] DI Eric Kurz, *Raumakustik, Labor*, 2020.
- [2] [Online]. Available: <https://mcg.at/app/uploads/2018/07/Congress-Graz-Stefaniensaal-Illemann-3-1200x675.jpg>
- [3] [Online]. Available: <https://mcg.at/app/uploads/2018/07/StefaniensaalSaalplan.pdf>