

Laborprotokoll Raumakustik LU - Gruppe 4

# Labortag 1 - Messung der Nachhallzeit

Andreas Johann Hörner  
Benjamin Stahl

---

Institute for signal processing and speech communication  
Graz University of Technology



Laborbetreuung: DI Dr. techn. Franz Graf

Tonstudio TU Graz, 27.04.2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Messung der Nachhallzeit</b>	<b>3</b>
1.1	Messung im Aufnahmerraum AR . . . . .	3
1.1.1	Messung mittels Methode des abgeschalteten Rauschens . . . . .	5
1.1.2	Impulsmessung . . . . .	8
1.2	Messung im Hörsaal i2 . . . . .	9
1.2.1	Impulsmessung . . . . .	9

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Experimenteller Messaufbau im Aufnahmerraum (links: Grundriss; rechts: Seitenriss) . . . . .	4
1.2	Messkette Methode des abgeschalteten Rauschens . . . . .	5
1.3	Grundrauschpegel im Aufnahmerraum AR (blau: Grundrauschpegel, rot: gemittelter Grundrauschpegel) . . . . .	6
1.4	Nachhallzeit nach Berechnung mit abgeschaltetem Rauschen (Aufnahmerraum AR) . . . . .	7
1.5	Messkette Nachhallzeitmessung mittels Impulschallquelle . . . . .	8
1.6	Nachhallzeit nach Berechnung mit Impulsschallquelle (Aufnahmerraum AR) . . . . .	9
1.7	Experimenteller Messaufbau im i2 (links: Grundriss; rechts: Seitenriss) . . . . .	11

# Kapitel 1

## Messung der Nachhallzeit

Ein wichtiges Kriterium für die statischen akustischen Verhältnisse eines Raumes ist die Nachhallzeit. Da das Ohr nicht den gesamten Lautstärkebereich von 140dB wahrnehmen kann, sondern bei einer Pegeldifferenz von 60dB unmittelbar nach dem Ende eines Nutzsignals völlige Ruhe empfindet, wird in der Regel die Nachhallzeit  $T_{60}$  berechnet.<sup>1</sup> Ist das für diese Messung erforderliche SNR durch diverse Gründe nicht erreichbar, ist auch eine Messung von  $T_{20}$  oder  $T_{30}$  und eine Interpolation dieser Nachhallzeit auf die gesamte Dauer möglich. Die Messung der Nachhallzeit kann unter anderem mit folgenden Methoden gemessen werden:

- Methode des abgeschalteten Rauschens  
Hierzu wird der Raum mit einem Rauschsignal angeregt, bis ein diffuses Schallfeld entsteht. Nach dem Abschalten der Rauschquelle wird der Pegelabfall in den gewünschten Oktav- oder Terzbändern gemessen.
- Messung mittels Impulsschallquelle  
Der Raum wird mittels einer Impulsschallquelle (platzender Ballon, Pistole, etc.) angeregt. Der Pegelabfall unmittelbar nach Auftreten des Impulses wird gemessen.

Grundsätzlich ist eine Nachhallzeitmessung im Frequenzbereich von 100Hz-4kHz<sup>2</sup> in besetztem Zustand sinnvoller, da es sich in diesem Fall um die Messung des *Raumes im Verwendungszustand* handelt. Eine Messung des Raumes in unbesetztem Zustand kann jedoch sinnvoll sein, um mit verschiedenen Absorptionsgraden den besetzten Zustand zu simulieren.

### 1.1 Messung im Aufnahmerraum AR

Der Aufnahmerraum ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

---

<sup>1</sup>Raumakustik Vorlesungsskript, v.5.4

<sup>2</sup>Im Wesentlichen befinden sich Sprache und Musik in diesem Bereich. Weiters ist eine Messung von Frequenzen, deren Wellenlänge größer als die Raumdimensionen ist, nicht sinnvoll.

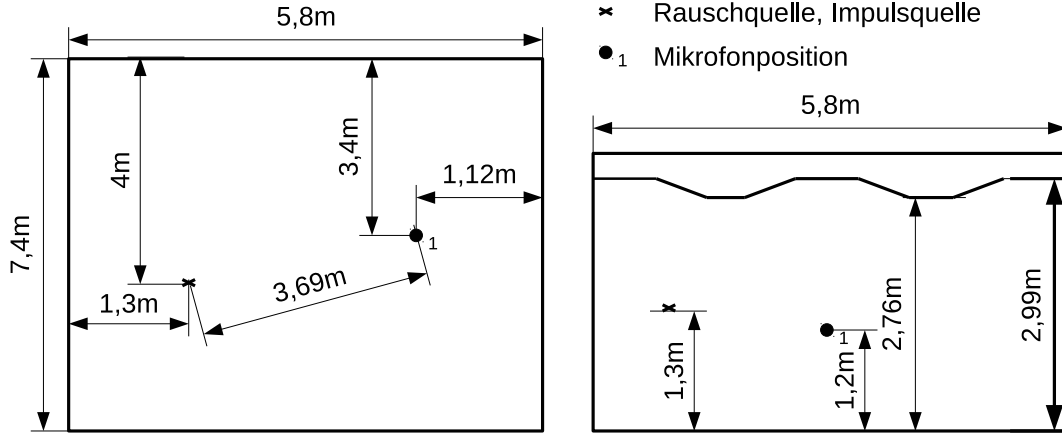


Abbildung 1.1: Experimenteller Messaufbau im Aufnahmerraum (links: Grundriss; rechts: Seitenriss)

### Grundlegende Berechnungen

Die Berechnung der Mindestdistanz  $d_{min}$  zwischen Schallquelle und Empfänger wird mit folgender Formel durchgeführt.

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad (1.1)$$

Der Aufnahmerraum ist in Abbildung 1.1 ersichtlich. Das Raumvolumen ergibt sich bei gegebenen Maßen zu

$$V_{AR} = B \cdot T \cdot H = 5.8 \, m \cdot 7.4 \, m \cdot 2.88 \, m = 124 \, m^3 \quad (1.2)$$

Eine durchschnittliche Nachhallzeit wurde mittels Klatschtest geschätzt und als Mittelwert  $T = 0.3 \, s$  angenommen. Die erforderliche Mindestdistanz zwischen Rauschquelle und Mikrofon beträgt somit

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{124 \, m^3}{343 \, \frac{m}{s} \cdot 0.3 \, s}} = 2.2 \, m \quad (1.3)$$

Diese Distanz wurde bei der Wahl der Quell- und Mikrofonposition berücksichtigt, der Messaufbau in Abbildung 1.1 genügt dieser Bedingung.

#### *Hinweis:*

Die Decke des Aufnahmerraums ist in zwei unterschiedlichen Höhen abgesetzt. Zur Berechnung des Raumvolumens wurde eine mittlere Deckenhöhe mit  $H = \frac{H_{min} + H_{max}}{2}$  approximiert. Im Raum befindliche Objekte (Tische, Flügel, etc.) wurden nicht berücksichtigt. Das berechnete Raumvolumen ist daher etwas größer als das tatsächliche, wodurch das berechnete  $d_{min}$  ebenfalls einen etwas höheren Wert aufweist.

### 1.1.1 Messung mittels Methode des abgeschalteten Rauschens

#### Experimenteller Aufbau

Die Messkette zur Messung der Nachhallzeit mit abgeschaltetem Rauschen ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Der Pegelmesser als zentrale Einheit ist zur Konfiguration sowie zur graphischen Darstellung der Messergebnisse mittels serieller Schnittstelle mit einem Notebook verbunden. Der im Pegelmesser integrierte Signalgenerator liefert ein Signal an einen idealerweise omnidirektionalen Lautsprecher. Das Signal des angeregten Raumes wird mit einem Messmikrofon detektiert und an den Pegelmesser zurückgeliefert, welcher die Analyse der Nachhallzeiten vornimmt. Das Mikrofon wurde mit dem

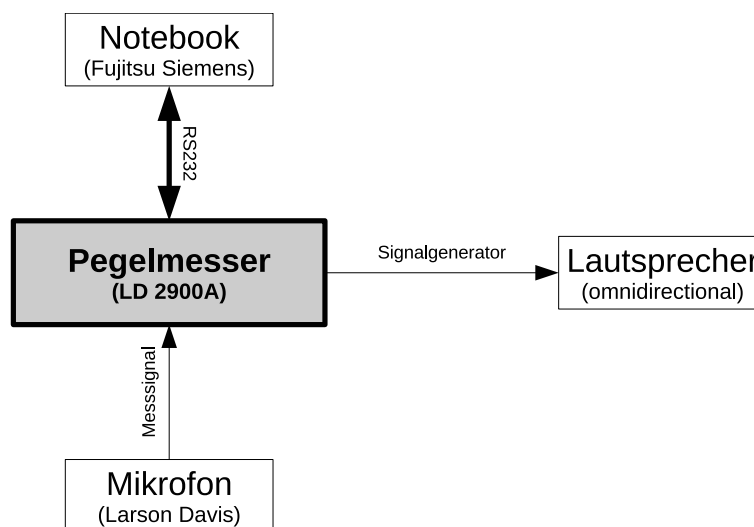


Abbildung 1.2: Messkette Methode des abgeschalteten Rauschens

Kalibrator kalibriert. Dazu wurde das Mikrofon mit dem Kalibrator verbunden und in der Software die calibrate-Funktion aktiviert. Um den Bereich des notwendigen Schalldruckpegels zu ermitteln, wurde der Grundrauschpegel im Raum mit einem vorgefertigten Setup ermittelt. Der Grundrauschpegel ist in Abbildung 1.3 ersichtlich und beträgt im Mittel 47dB. Für die Berechnung der Nachhallzeit  $T_{60}$  ist daher ein Signalpegel von  $L_{Grundrauschen} + L_{60dB} + L_{headroom} = 47dB + 60dB + 5dB = 112dB$  notwendig. Die Messung wurde mit einem vorgefertigten Setup mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

- mode: pink wide
- state: off at run after delay
- Mittelung von 3 Messungen

#### Verwendetes Equipment

- Messmikrofon: Larson Davis PRM900B3562
- Verstärker: Norsonic Nor280

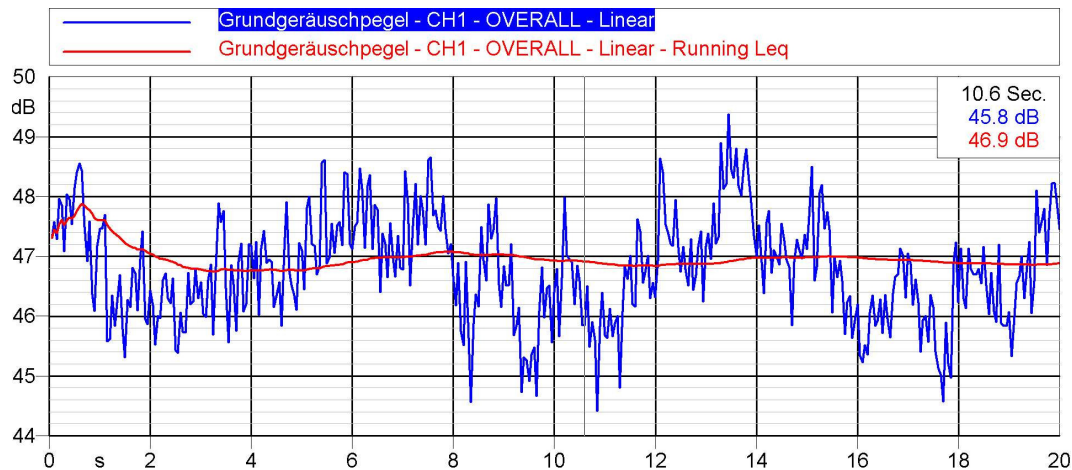


Abbildung 1.3: Grundrauschpegel im Aufnahmerraum AR (blau: Grundrauschpegel, rot: gemittelter Grundrauschpegel)

- SerNr: 280 4052
- TU Graz InventarNr: 0103547
- Pegelmesser: LD 2900A
  - SerNr: 551
- Omnidirektionaler Lautsprecher mit 12 Chassis
  - TU Graz InventarNr: 0138945

des Weiteren:

- Distanzmesser: Bosch DLE70
  - SerNr: 009634346
  - TU Graz InventarNr: 0103547
- Fujitso Siemens Notebook
- Kalibrator: Brüel & Kjær 94dB@1kHz

**Messbedingungen** Der Raum wurde in unbesetztem Zustand vermessen. Der Fußboden besteht aus filzähnlichem Material, die Wände sind für die Messung mit schwarzen Vorhängen abgedeckt. Die Lüftungsanlage ist für die Dauer der Messung deaktiviert, die Türe zum Regieplatz 2 (RP2) vollständig geschlossen. Da das geeichte Spezialkabel zur Verbindung von Messmikrofon und Pegelmesser durch die Türe zum Regieplatz 1 (RP1) geführt wird, ist diese Türe nur angelehnt.

Die Messung wurde bei einer Temperatur von  $22,6^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $56,1\text{ rel}\%$  durchgeführt.

## Messergebnisse

Die gemessenen Ergebnisse können folgendermaßen dargestellt werden:

1. *Process* → *Architectural Acoustics* → *Reverberation Time*
2. Analyse des Messergebnisses in Terzen
3. Überprüfung der Steigungen
4. *Average and Store*
5. 1-4 mit *calculate new shot* für jede der drei Messungen durchführen
6. Erzeugen des Graphs mittels *Insert* → *GraphTemplate*

Die berechneten Nachhallzeiten sind in Abbildung 1.4 dargestellt. Ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen ist erkennbar. Dies entspricht einem natürlichen Klang. Ab einer Frequenz von 500Hz ist die Nachhallzeit des Aufnahmerraums im Messpunkt annähernd konstant. Generell ist die Nachhallzeit im Raum gering. Dadurch ist er für den gedachten Zweck der Aufnahme ideal. Eine Musikwiedergabe im eigentlichen Sinn wäre jedoch als sehr trocken zu bezeichnen.

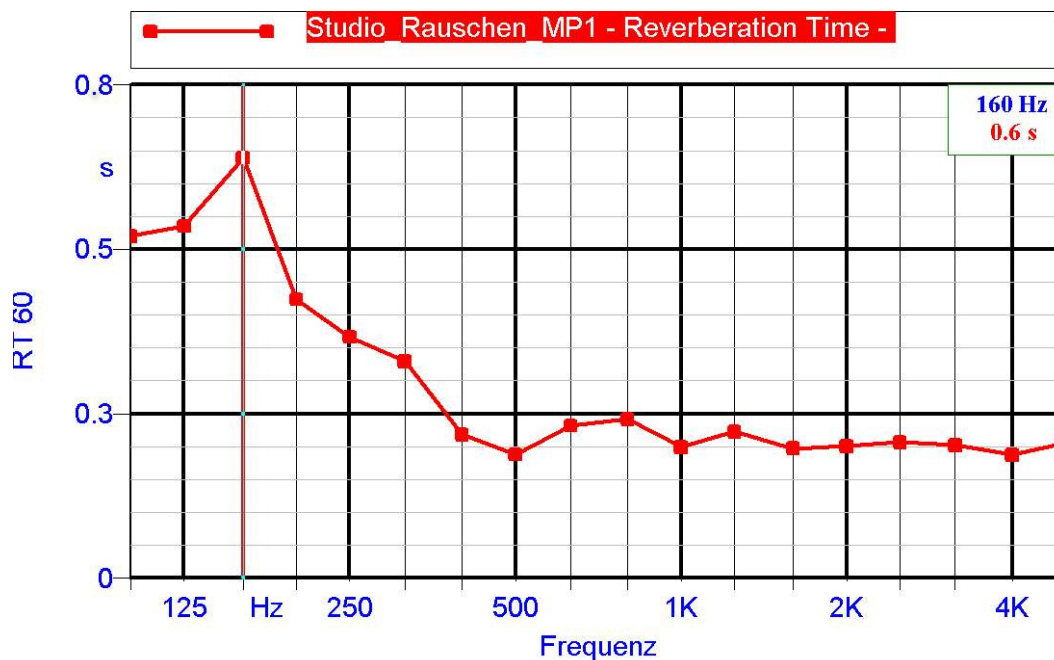


Abbildung 1.4: Nachhallzeit nach Berechnung mit abgeschaltetem Rauschen (Aufnahmerraum AR)



### 1.1.2 Impulsmessung

#### Einführung

#### Experimenteller Aufbau

Die Messkette zur Messung der Nachhallzeit mittels Impulsschallquelle ist in Abbildung 1.5 dargestellt. Im Wesentlichen entspricht der Aufbau jenem der Methode mittels abgeschaltetem Rauschen. Anstatt der Rauschquelle ist während der Messung eine Person im Raum anwesend, welche mittels Revolver als Impulsgeber dient.<sup>3</sup> Der Impuls sowie die daraus resultierende Raumantwort werden durch ein Messmikrofon erfasst und durch den Pegelmesser analysiert. Die Messung wird automatisch durch Anwendung eines *Pegeltriggers* gestartet.

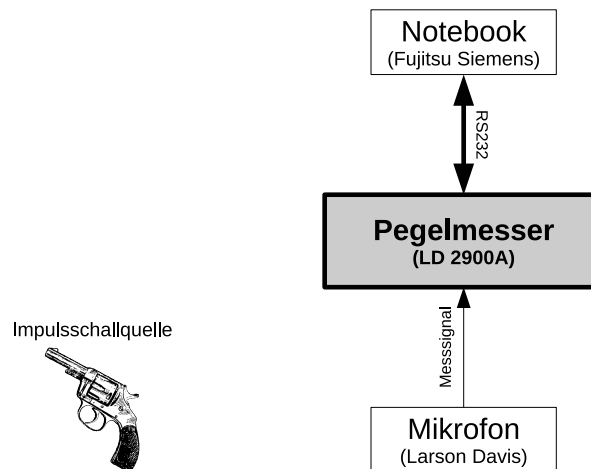


Abbildung 1.5: Messkette Nachhallzeitmessung mittels Impulsschallquelle

#### Verwendetes Equipment

- Messmikrofon: Larson Davis PRM900B3562
- Pegelmesser: LD 2900A
  - SerNr: 551
- Gasdruckpistole ATAК Arms Ltd ZORAKI.R1
  - SerNr: 10.14

**Messbedingungen** Die Messbedingungen entsprechen im Wesentlichen jenen der Messmethode mit abgeschaltetem Rauschen. Abweichend von diesen war bei dieser Messung eine Person als Impulsgeber im Raum anwesend.

<sup>3</sup>Es ist darauf zu achten, dass alle sich in unmittelbarer Hörnähe zur Impulsschallquelle befindenden Personen mit Gehörschutz ausgestattet sind.

## Messergebnisse

Die Analyse und Generierung des Graphen geschieht durch die selbe Methode wie in Kapitel 1.1.1 - Messergebnisse - beschrieben. Die erhaltenen Messergebnisse sind in Abbildung 1.6 ersichtlich. Die erhaltenen Nachhallzeiten für tiefe Frequenzen sind etwas tiefer als bei der Messung mittels abgeschaltetem Rauschen, ab 250Hz sind die Werte annähernd konstant und entsprechen im Wesentlichen jenen der Messung mit abgeschaltetem Rauschen.

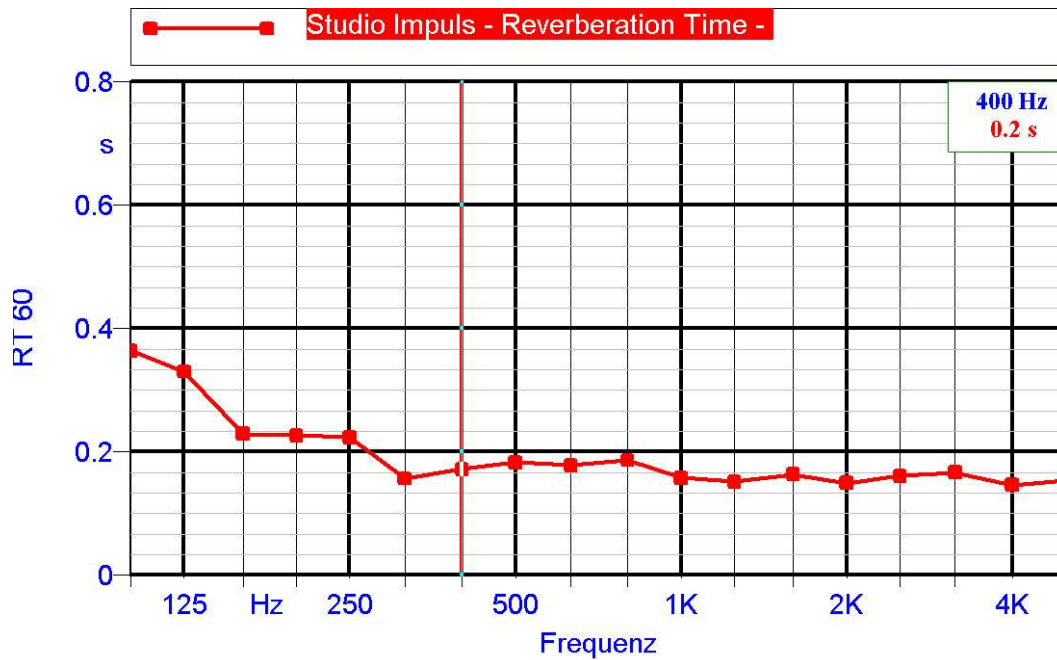


Abbildung 1.6: Nachhallzeit nach Berechnung mit Impulsschallquelle (Aufnahmeraum AR)

## 1.2 Messung im Hörsaal i2

### 1.2.1 Impulsmessung

Die theoretischen Grundlagen entsprechen jenen in Kapitel 1.1.2. Der Hörsaal ist in Abbildung 1.7 dargestellt.

### Grundlegende Berechnungen

Die Berechnung der Mindestdistanz  $d_{min}$  erfolgt mit Formel 1.1. Eine ungefähre Nachhallzeit wurde mittels Klatschen geschätzt und als durchschnittlich  $T = 1.2s$  angenommen. Das Raumvolumen ergibt sich nach folgender Berechnung.

$$V_{i2} = \left[ 7.4m \cdot 4.1m + 1.5m \cdot 2.8m + (16m - 7.4m - 1.5m) \cdot \frac{2.8m + 4.1m}{2} \right] \cdot 10.2m \quad (1.4)$$

$$V_{i2} = 602 \text{ m}^3 \quad (1.5)$$

Eine minimale Distanz  $d_{min}$  zwischen Impulsschallquelle und Mikrofon ergibt sich durch Berechnung mit folgender Formel.

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{602 \text{ m}^3}{343 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1.2 \text{ s}}} = 2.42 \text{ m} \quad (1.6)$$

**Hinweis:**

*Volumenseinbußen durch Einbauten wie Tische oder Bestuhlung sowie das Volumen des im Raum eingebauten Regieraums wurden für die Volumensberechnung nicht berücksichtigt. Die berechnete Mindestdistanz ist daher geringfügig größer als das Optimum.*

## Experimenteller Aufbau

Zur Messung der Nachhallzeit in diesem Hörsaal wurde ein mobiler Pegelmesser verwendet. Da zur Messung mittels Impulsschallquelle weniger Equipment benötigt wird, wurde für die Nachhallzeitmessung diese Methode gewählt. Als Impulsquelle wird ein Revolver verwendet. Die beiden Messpunkte sowie -positionen sind in Abbildung 1.7 ersichtlich. Ein Messmikrofon erfasst den abgegebenen Impuls sowie die Raumantwort und ist mit dem mobilen Pegelmesser verbunden. Es werden 3 Messdurchgänge aufgezeichnet und vom Pegelmesser automatisch gemittelt.

## Verwendetes Equipment

- Pegelmesser (handheld): NTi XL2
  - TU Graz InventarNr: 0104784
- Messmikrofon: NTi M4260
  - SerNr: 1460
- Gasdruckpistole ATAК Arms Ltd ZORAKI.R1
  - SerNr: 10.14

**Messbedingungen** Der Hörsaal wird in unbesetztem Zustand vermessen. Zum Zeitpunkt der Messung sind im Raum zwei Personen anwesend. Der Hörsaal ist mit filzähnlichem Bodenbelag sowie akustischen Lochplatten an den Wänden ausgestattet. Die Türen sind während des Messvorgangs geschlossen. Die Messung wurde bei einer Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $43,3\text{rel}\%$  durchgeführt.

## Messergebnisse

Die Messergebnisse werden vom mobilen Pegelmesser als Textdateien aufgezeichnet und wurden später am Computer graphisch ausgewertet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 1.8 ersichtlich.

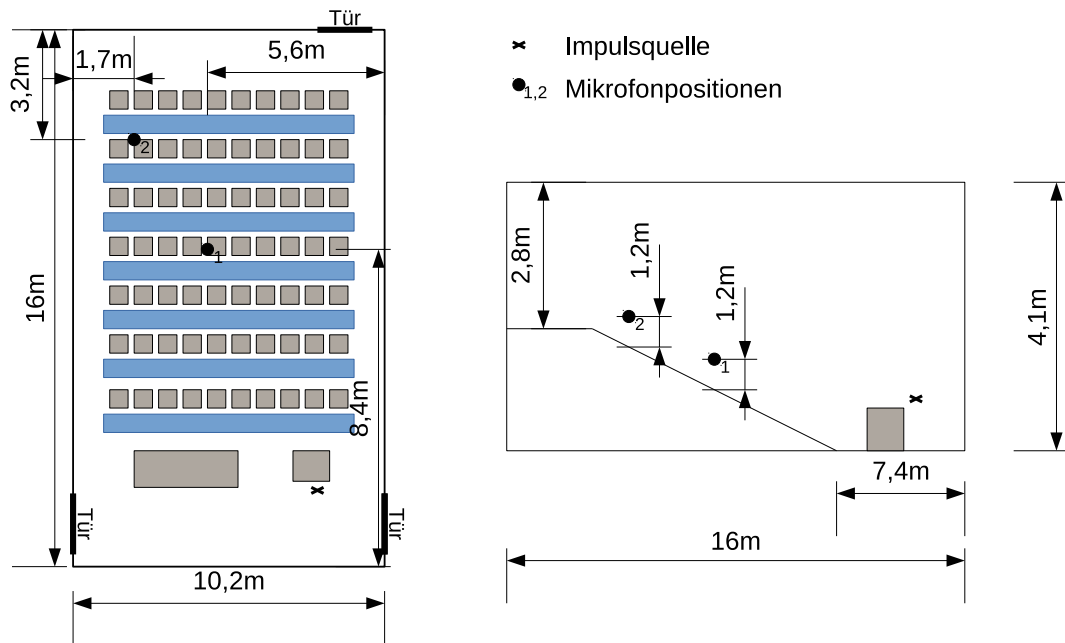
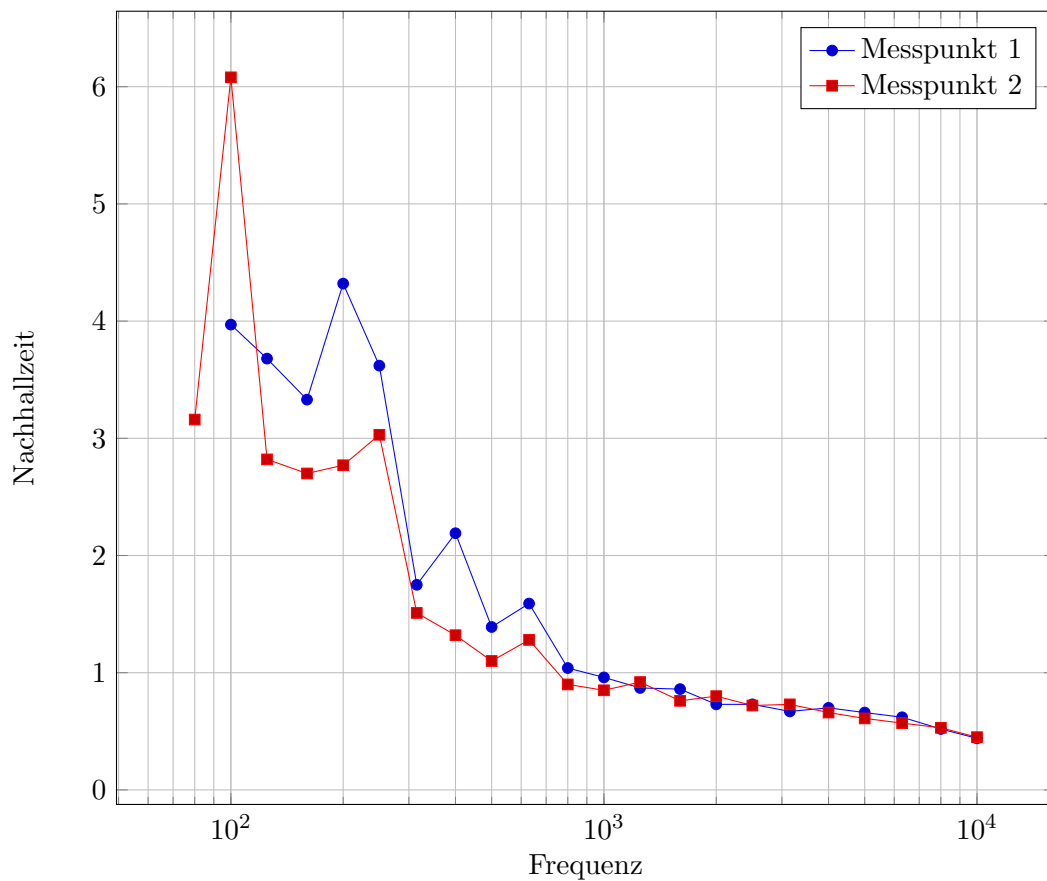


Abbildung 1.7: Experimenteller Messaufbau im i2 (links: Grundriss; rechts: Seitenriss)

 Abbildung 1.8 :  $RT_{60}$  Hörsaal i2


Ab einer Frequenz von etwa 1000Hz kann festgestellt werden, dass die Nachhallzeiten für beide Messpunkte annähernd gleich sind. Die großen Fluktuationen im unteren Frequenzbereich sind auf die großen Wellenlängen zurückzuführen. Ein Abfall der Nachhallzeiten zu höheren Frequenzen ergibt ein natürliches Klangbild.