

Belegarbeit Project Acoustics I

Sommersemester 2018

Autoren:

Jan Fischer

Anja Hofmann

Emanuele Merlo

Maximilian Schönwald

Modellmesstechnik am Modell der
Philharmonie Dresden

Betreuer:

Prof. Jörn Hübelt

Seminargruppe:

MG16wC-B

Mittweida, 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Formelverzeichnis	III
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Impulsantwortbestimmung über Kreuzkorrelation	2
2.2 objektive Bewertungsmaße	4
2.3 Nachhallzeit	5
2.3.1 Definition	5
2.3.2 Schröder-Rückwärtsintegration	6
2.4 Modellmesstechnik	7
3 Versuchsaufbau	8
4 Matlab-Skript	11
4.1 Einstellung der Variablen	11
4.2 Starten der Sessions und Zuweisung der Kanäle	12
4.3 Bestimmung der Impulsantwort mittels Kreuzkorrelation und Mittelung	12
4.4 Bestimmung akustischer Parameter	14
5 Ergebnisse	16
6 Ausblick	18
6.1 Dämpfung	18
6.2 Absorption	18
6.3 Filter	18
6.4 Trigger	19
7 Fazit	20
8 Anhang	21
8.1 vollständiges Matlab-Skript	21
Literaturverzeichnis	V
Abbildungsnachweis	VI
Selbstständigkeitserklärung	VII

Abbildungsverzeichnis

Abb.1	Signale und deren Autokorrelationsfunktion	2
Abb.2	Darstellung mehrerer Schallübertragungswege im Kreuzkorrelogramm	3
Abb.3	Beispiel einer Raumimpulsantwort	4
Abb.4	Bestimmung der Nachhallzeit und der Anfangsnachhallzeit EDT	5
Abb.5	Anzeige nach Eingabe des Befehls <code>device=daq.getDevices</code>	9
Abb.6	Ergebnis der FFT des generierten Rauschens in Matlab	9
Abb.7	systematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Loopback-Verbindung	10
Abb.8	Akku für das Messmikrofon mit Filter	10
Abb.9	Ergebnis der Kreuzkorrelation a) ohne Filter b) mit Filter	10
Abb.10	Early Decay Curve, Pfeil kennzeichnet -5dB Abfall	15
Abb.11	Messaufbau im Modell	16
Abb.12	Ergebnis der Kreuzkorrelation in Matlab	16
Abb.13	Raumimpulsantwort des Modells der Dresdner Philharmonie (M. 1:1)	17
Abb.14	Early Decay Curve des Modells der Dresdner Philharmonie	17

Formelverzeichnis

(1)	Formel für die Kreuzkorrelation	2
(2)	Zusammenhang zwischen Kreuzkorrelation und Leistungsspektrum	2
(3)	Zusammenhang zwischen Leistungsspektrum und Kreuzkorrelation	2
(4)	Proportionalität zwischen Impulsantwort und Kreuzkorrelation	3
(5)	Formel für die Faltung vom Eingangssignal mit der Impulsantwort	3
(6)	Zusammenhang zwischen Kreuzkorrelation und Impulsantwort	3
(7)	Formel für das Deutlichkeitsmaß	4
(8)	Formel für das Klarheitsmaß	4
(9)	Formel für die Nachhallzeit nach Sabine	5
(10)	Formel für die äquivalente Absorptionsfläche	6
(11)	Formel für die Nachhallzeit nach Eyring	6
(12)	Formel für die Early Decay Curve nach Schröder	6

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

α_i	Absorptionsgrad einer Teilfläche eines Raumes
$\bar{\alpha}$	mittlerer Absorptionsgrad eines Raumes
τ	Zeitvariable
ω	Kreisfrequenz
$\Psi_{xy}(\tau)$	Kreuzkorrelationsfunktion
fs	Abtastrate
$g(t)$	Raumimpulsantwort
k	Sicherheitsfaktor
m	Energiedämpfungs-konstante
t	Zeitvariable
$x_a(t)$	Ausgangssignal
$x_e(t)$	Eingangssignal
A	äquivalente Absorptionsfläche
A_L	äquivalente Absorptionsfläche zur Schalldämpfung in Luft
$C50$	Deutlichkeitsmaß
$C80$	Klarheitsmaß
DAQ	Data Acquisition
EDC	Early Decay Curve
EDT	Early Decay Time
FFT	Fast Fourier Transformation
FT	Fouriertransformation
$G(\omega)$	Systemübertragungsfunktion
M.	Maßstab
N_{avg}	Anzahl der Mittelungen
NI	National Instruments
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
S	Skalierungsfaktor
S_0	konstantes Leistungsspektrum
S_{ges}	Gesamtfläche eines Raumes
S_i	Teilfläche eines Raumes
$\underline{S}_{xy}(\omega)$	Kreuzleistungsspektrum
T	Nachhallzeit
$T20$	Nachhallzeit über 20dB Abfall ermittelt
$T30$	Nachhallzeit über 30dB Abfall ermittelt
T_w	Fensterlänge
V	Raumvolumen
$\underline{X}_a(\omega)$	Fouriertransformierte vom Ausgangssignal
$\underline{X}_e(\omega)$	Fouriertransformierte vom Eingangssignal

1 Einleitung

Akustische Großprojekte wie z.B. die Neuerbauung oder akustische Ertüchtigung eines Konzertsaals bedürfen einer ausführlichen Planung. Während zur Herausarbeitung einer günstigen „Primärstruktur“ oft moderne Computersimulationen zu Hilfe genommen werden, dienen raumakustische Modelle und die dazugehörigen Messverfahren bereits seit den 1950er Jahren der Planung und Anpassung der „Sekundärstruktur“. Der große Vorteil eines solchen Modells besteht darin, dass physikalische Effekte wie die Beugung direkt mit berücksichtigt werden, was digital nicht möglich ist. [Fasold, 1998] S.174

Der Hochschule Mittweida steht das raumakustische Holzmodell (Maßstab 1:20) der neuen Philharmonie in Dresden zur Verfügung, welches im Rahmen des Moduls Project Acoustics als Anreiz dient, über mehrere Semester hinweg eine funktionierende Modellmesstechnik zu entwickeln.

Dabei ist es aufgrund der Herunterskalierung des Raumes notwendig spezielle Hochfrequenzmesstechnik zur Anwendung zu bringen. Während in Vorgängerprojekten bereits durch das Anschaffen eines 1/8“ Messmikrofons und den Entwurf sowie die Fertigstellung eines Miniatur-Dodekaeders für einen vollständig einsatzfähigen Versuchsaufbau gesorgt wurde, war es die Aufgabe dieses Projekts, die Datenakquise mittels der numerischen Mathematik-Software Matlab voranzutreiben und zum Schluss erste Messwerte zum Vergleich mit einem entsprechenden digitalen Modell zu erzielen. Mit einem abgeschlossenen Skript soll außerdem die Impulsantwort mittels Kreuzkorrelation aus beliebigen Messdaten bestimmt werden können.

Dieser Projektbericht dokumentiert die Ergebnisse der Arbeit der zugehörigen Projektgruppe bestehend aus J. Fischer, M. Schönwald, E. Merlo und A. Hofmann während des Sommersemesters 2018. Es werden zusätzlich der Versuchsaufbau detailliert beschrieben und zu Beginn wichtige theoretische Grundlagen behandelt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Impulsantwortbestimmung über Kreuzkorrelation

Die Korrelationsfunktion ist eine mathematische Operation, die den Zusammenhang bzw. die Ähnlichkeit zwischen zwei Funktionen untersucht. Dazu werden die zu untersuchenden Funktionen miteinander multipliziert, anschließend eine der Funktionen nach links verschoben und zum Schluss über die gesamte Zeit integriert.

Man spricht von einer Autokorrelation, wenn es sich bei beiden untersuchten Funktionen um die gleiche Funktion handelt. Bei der Kreuzkorrelation dagegen werden zwei verschiedene Funktionen miteinander korreliert.

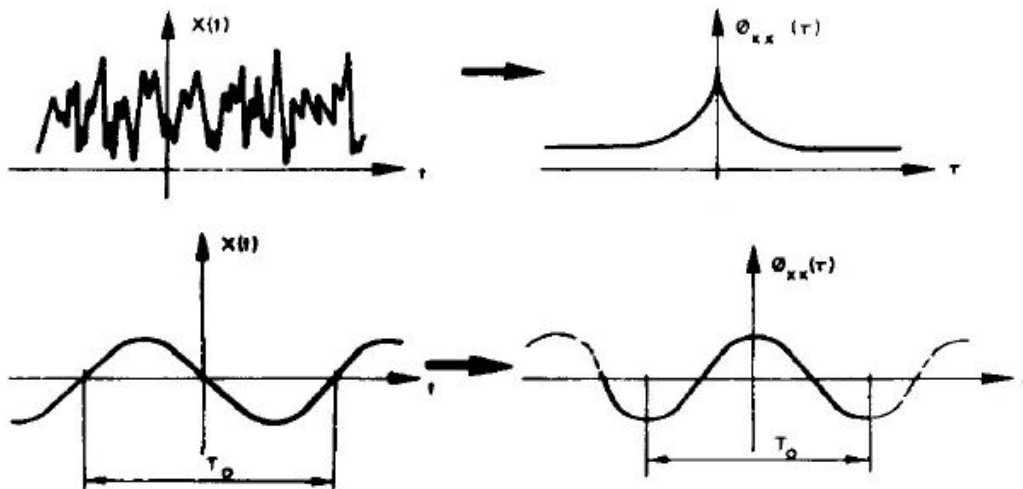


Abb.1 Signale und deren Autokorrelationsfunktionen

Obenstehende Darstellung zeigt beispielhaft zwei Ausgangssignale links und die dazugehörigen Autokorrelationsfunktionen rechts. Beim Rauschen wird deutlich sichtbar, dass die Autokorrelationsfunktion bei einer Verschiebung um $\tau = 0$ maximal ist, da sich an dieser Stelle verschobene und nicht verschobene Funktion komplett decken. Je breiter das Rauschen, desto steiler der Anstieg des Peaks in der Mitte.

Das zweite Beispiel veranschaulicht, dass die Autokorrelation keine Angabe zur Phase beinhaltet. Alle harmonischen Funktionen werden auf eine Cosinus-Funktion mit gleicher Periodendauer wie die Ausgangsfunktion zurückgeführt. Dadurch ist die Operation der Korrelation nicht eineindeutig umkehrbar.

Die Gleichung für die in diesem Projekt wichtige Kreuzkorrelation lautet:

$$\Psi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t + \tau) dt \quad (1)$$

Die Funktion ist über die Fourier-Transformation mit dem Leistungsspektrum $\underline{S}(\omega)$ verknüpft. Es gilt:

$$\Psi_{xy}(\tau) = \text{FT}^{-1} \underline{S}_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \underline{S}_{xy}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

$$\text{und } \underline{S}_{xy}(\omega) = \text{FT } \Psi_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

Die Kreuzkorrelationsfunktion kann verwendet werden, um die Impulsantwort eines Raumes zu bestimmen.

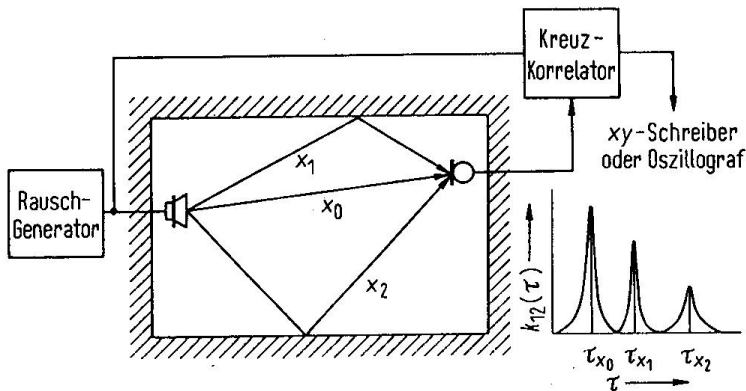


Abb.2 Darstellung mehrerer Schallübertragungswege im Kreuzkorrelogramm

Die obenstehende Abbildung veranschaulicht die Herangehensweise, um messtechnisch die Ermittlung der Impulsantwort mittels Kreuzkorrelation umzusetzen. Das Ausgangssignal $x_a(t)$ ist hierbei über die Faltung mit der Impulsantwort $g(t)$ und dem Eingangssignal $x_e(t)$ verknüpft. Die Impulsantwort $g(t)$ wiederum ist direkt proportional zur Kreuzkorrelierten beider Signale $\Psi_{ea}(\tau)$.

$$g(t) \sim \Psi_{ea}(\tau) \quad (4)$$

$$x_a(t) = \int x_e(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau = x_e(t) * g(t) \quad (5)$$

Im Bildbereich ergibt sich daraus:

$$\underline{X}_a(\omega) = \underline{X}_e(\omega) \cdot G(\omega) \quad | \cdot \underline{X}_e^*(\omega)$$

$$\underline{X}_a(\omega) \cdot \underline{X}_e^*(\omega) = \underline{X}_e(\omega) \cdot \underline{X}_e^*(\omega) \cdot G(\omega)$$

$$\underline{S}_{ea}(\omega) = \underline{S}_{ee}(\omega) \cdot G(\omega) \quad | \text{FT}^{-1}$$

$$\Psi_{ea}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \underline{S}_{ee}(\omega) \cdot G(\omega) \cdot e^{i\omega\tau} d\omega$$

Für den Fall, dass es sich bei $\underline{S}_{ee}(\omega)$ um einen konstanten Wert S_0 handelt, vereinfacht sich obenstehende Gleichung zu:

$$\Psi_{ea}(\tau) = S_0 \cdot g(t) \quad (6)$$

Eine solche konstante Leistungsdichte findet man zum Beispiel bei breitbandigem weißen Rauschen. Somit ist sie der Proportionalitätsfaktor zwischen der Impulsantwort $g(t)$ und der Kreuzkorrelierten $\Psi_{ea}(\tau)$.

Abgeleitet von diesem mathematischen Zusammenhang wurde im Projekt stets ein weißes Rauschen als raumanregendes Signal genutzt. Aus der gewonnenen Raumimpulsantwort können im Anschluss wichtige Parameter ermittelt werden.

2.2 objektive Bewertungsmaße

Aus der Raumimpulsantwort, die den zeitlichen Schalldruckpegelverlauf eines Hörerortes beschreibt, kann man akustische Eigenschaften ableiten. Zwei objektive Bewertungsmaße sind das Deutlichkeitsmaß und das Klarheitsmaß, welche durch das Verhältnis des Effektivwertes des Schallanteils der ersten 50ms bzw. 80ms zur Energie des Restes der Impulsantwort beschrieben werden.

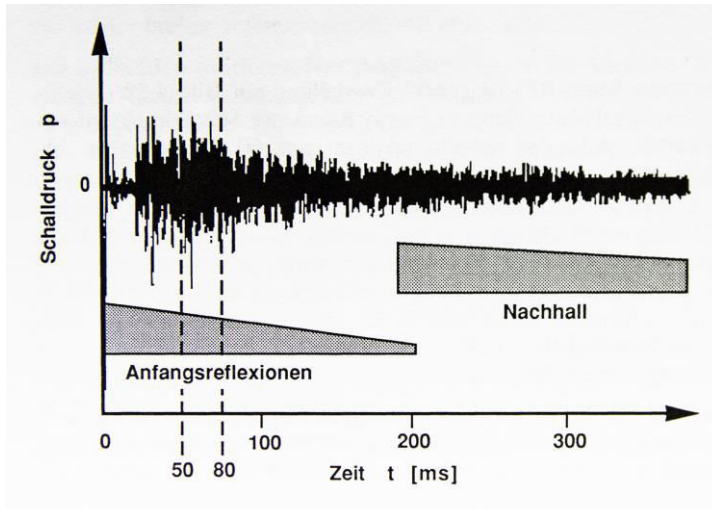


Abb.3 Beispiel einer Raumimpulsantwort

Damit in einem Raum für die Sprache eine *gute* Akustik gewährleistet wird, ist die Sprachverständlichkeit des Raumes zu untersuchen. Als Maß wird hierfür die Silbenverständlichkeit genutzt. Sie ist der richtig verstandene prozentuale Anteil von zusammenhanglosen Silben beim gut artikulierten Sprechen. [Fasold, 1998] S.150

Ein geeignetes Kriterium, um die Silbenverständlichkeit zu beurteilen, ist das Sprachklarkeitsmaß oder Deutlichkeitsmaß $C50$.

$$C50 = 10 \lg \left(\frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

Je größer dieses Maß ist, desto besser ist die Verständlichkeit. Mit einem $C50 > 0\text{dB}$ wird eine sehr gute Silbenverständlichkeit gewährleistet. [Fasold, 1998] S.150

In Räumen für Musik spielen die Erkennbarkeit der einzelnen aufeinanderfolgenden Töne (Zeitdurchsichtigkeit) und die Unterscheidbarkeit der Klänge von unterschiedlichen gleichzeitig gespielten Instrumenten (Registerdurchsichtigkeit) eine größere Rolle als die Silbenverständlichkeit. Ein objektives Bewertungsmaß hierfür ist das Musikklarkeitsmaß oder Klarheitsmaß $C80$.

$$C80 = 10 \lg \left(\frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ dB} \quad (8)$$

Bei klassischer Musik ist eine etwas höhere Durchsichtigkeit erwünscht als bei romantischer Musik. Optimale Werte für Orchestermusik jeder Art liegen zwischen -1dB und $+3\text{dB}$. [Fasold, 1998] S.150

2.3 Nachhallzeit

2.3.1 Definition

Der Nachhall ist eine sehr wichtige Charakteristik der Akustik eines Raumes. Während die Halligkeit und das Abklingen nach plötzlichem Unterbrechen der Schallanregung die Hörbarkeit des Raumeinflusses subjektiv beurteilen, ist die Nachhallzeit eine objektive Messgröße.

Die Nachhallzeit T (in s) ist als die Zeit definiert, in der der Schalldruck im eingeschwungenen Zustand des Raumes nach Abschalten der Schallquelle auf ein Tausendstel des Ausgangswertes bzw. der Schalldruckpegel um 60dB gesunken ist.

Sie ist eine statistische Angabe und beschreibt ein Merkmal des gesamten Raumes, jedoch bleiben die spezifischen Eigenschaften eines speziellen Hörplatzes unklar. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig. Sie wird dennoch zur einfachen, schnellen Beurteilung oder für Vergleichszwecke als Einzahlwert angegeben.

Da sich erst nach einem Abfall von -5dB ein repräsentativer Anstieg in der Abklingkurve ergibt und meist nicht 65dB oder mehr als Abstand zwischen Ausgangspegel und Hintergrundrauschen gegeben sind, wird meist die Zeitdifferenz zwischen den Pegelwerten -5 dB und -35 dB unter dem Anfangspegel ermittelt und anschließend verdoppelt. Um diesen Extrapoliervorgang zu kennzeichnen, wird die Nachhallzeit in diesem Fall als T_{30} angegeben. Folgende Abbildung verdeutlicht die eben erklärte Herangehensweise:

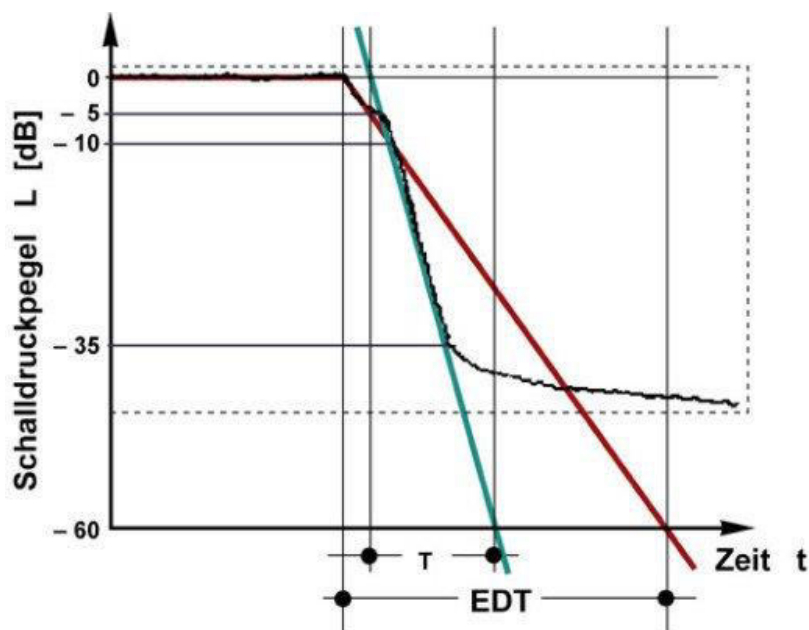


Abb.4 Bestimmung der Nachhallzeit und der Anfangsnachhallzeit EDT

Rechnerisch setzt sich die Nachhallzeit aus der Abhängigkeit vom Raumvolumen V (in m^3) und von der darin befindlichen Absorption, repräsentiert durch die äquivalente Absorptionsfläche A , zusammen. Nach Wallace C. Sabine gilt folgende empirische Näherungsformel:

$$T = 0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot \frac{V}{A} \quad (9)$$

Die äquivalente Absorptionsfläche A (in m^2) setzt sich zusammen aus der Summe aller Flächen S_i (in m^2) multipliziert mit ihrem jeweiligen Schallabsorptionsgrad α_i und der Schalldämpfung der Luft, veranschaulicht durch A_L (in m^2). Diese beinhaltet die Energiedämpfungskonstante m (in m^{-1}), welche besonders bei hohen Frequenzen und großen Distanzen zum Tragen kommt. [Fasold, 1998] S.68

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + A_L \quad \text{mit } A_L = 4Vm$$

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + 4Vm \quad (10)$$

Sabines Formel gilt für einfache Raumgeometrien und eine gleichmäßige Verteilung der Absorption im Raum. Sie liefert für Räume mit geringer mittlerer Absorption ($\bar{\alpha}$ bis ca. 0,3) eine ausreichende Genauigkeit. Steigt die Gesamtabsorption des Raumes, werden die Werte immer ungenauer.

Carl F. Eyring formulierte die Formel für die Nachhallzeit so, dass sie auch bei höherer oder gar vollständiger Absorption genaue Ergebnisse liefert. Für geringe Absorptionsgrade verwendet man der Einfachheit halber dennoch die Formel nach Sabine.

Eyring'sche Formel: [Fasold, 1998] S.140

$$T = 0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \frac{V}{-\ln(1-\bar{\alpha}) \cdot S_{ges}} \quad (11)$$

2.3.2 Schröder-Rückwärtsintegration

Mittels der sogenannten Schröder-Rückwärtsintegration kann aus einer gegebenen Impulsantwort $g(t)$ die Early Decay Curve (*EDC*) berechnet werden.

Dabei handelt es sich um den Energieverlauf direkt nach Abschalten einer Schallquelle, bevor der Schalldruckpegel weit genug abgefallen ist, um die Nachhallzeit über den Anstieg zu bestimmen. Aus der *EDC* kann aus einem 10dB-Abfall die Early Decay Time (*EDT* in s) extrapoliert werden (siehe Abb.4), welche das subjektive menschliche Hörempfinden besser abbildet als die normale Nachhallzeit, da der späte Nachhall meist durch nachfolgende akustische Signale bereits wieder verschluckt wird.

Schröders Formel führt eine Rückwärtsintegration über die quadrierte Impulsantwort des betrachteten Raumes aus und ist für jedes Terz- bzw. Oktavband einzeln anzuwenden.

[DIN3382, 2009] S.12

$$EDC(t) = \int_t^\infty g(\tau)^2 d\tau \quad (12)$$

2.4 Modellmesstechnik

Modelle helfen schon seit vielen Jahren Akustikern bei der Planung ihrer Projekte. Computersimulationen sind mittlerweile zum Standard geworden, doch für besondere Projekte wird auch ein richtiges analoges Modell gebaut und mit passender Messtechnik versehen.

Dabei wird die Tatsache genutzt, dass sich der Schall im Original- und Modellraum nach denselben physikalischen Gesetzen ausbreitet. Effekte wie Beugung, die mit Computermodellen nicht berücksichtigt werden können, treten hier äquivalent zum Originalraum auf und spiegeln sich somit in den Messergebnissen wider. Die Originalgeometrie ist dafür möglichst genau im Modell wiederzugeben und die Wellenlänge im Messsystem um den gleichen Faktor herunter zu skalieren wie die Raumgeometrie selbst. Maßstäbe zwischen 1:10 und 1:50 sind hierbei gebräuchlich. [Fasold, 1998] S.173

Speziell bedeutet dies, dass im Modell mit Frequenzen gearbeitet werden muss, die um den Skalierungsfaktor größer sind, als die Frequenzen, die mit normaler Messtechnik untersucht werden. Das stellt besonders hohe Ansprüche an die verwendete Technik.

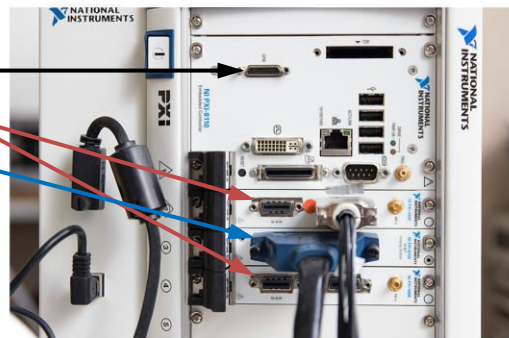
Des Weiteren muss bei der Wahl der Materialien auf das Reflexions- und Absorptionsverhalten bei hohen Frequenzen geachtet werden. Diese sollten dem Original möglichst nahe kommen, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Oft werden die Modelle aus Holz gefertigt. Hohe Reflexionsgrade können mit speziellen Lacken und hohe Absorptionsgrade mit speziellen Filzen umgesetzt werden.

In der Auswertung sind die Ergebnisse zeitlich zurückzuskalieren. Des Weiteren muss beachtet werden, dass bei höheren Frequenzen die Schalldämpfung durch Luftreibung ebenfalls höher ist. Dieser Effekt ist im Nachhinein rechnerisch zu beseitigen.

3 Versuchsaufbau

Das im Labor vorhandene Messsystem besteht aus:

- NI PXI 1042 Chassis mit
NI PMA 1115 Portable Monitor
- PXI-DAQ Karten
NI PXI 8110 Embedded Controller
2 NI PXI 4496 (2 x 8 analog input)
1 NI PXI 6733 (1 x 16 analog output)



- Messmikrofon „Brüel & Kjær“ Type 2670
mit Vorverstärker



- Battery „Brüel & Kjær“ Type 1708



- Ultraschalldodekaeder mit
„Sennheiser“ SYS17 Schallwandler



- Verstärker „Brüel & Kjær“
Type 2706



Um das System zu steuern wurde die Software Matlab ausgewählt, damit es möglich ist, nicht nur die Ein- und Ausgänge anzusprechen, sondern die gesammelten Daten auch sofort auszuwerten. Somit kann man am Ende jeder Messung beurteilen, ob die Messung erneut durchzuführen ist oder ob die Ergebnisse die Erwartungen erfüllen und plausibel sind.

Die Aufgabestellung bestand anschließend darin, mit der ITA-Toolbox zu arbeiten. Um das zu ermöglichen, wurde die Version von Matlab 2014b installiert, welche die erste ist, die mit der ITA-Toolbox arbeitet.

Diese Version von Matlab ist außerdem die letzte, die mit Windows XP kompatibel ist. Sie erfordert allerdings das Service Pack 3, weshalb das Betriebssystem des National Instruments Rechners auf dieses Service Pack aktualisiert wurde, da Windows XP Service Pack 2 vorinstalliert war.

Schließlich wurde, um die Ein- und Ausgänge anzusprechen, die Data Acquisition Toolbox NI-DAQmx 14.2 installiert und es war sofort möglich mit dem Befehl `device = daq.getDevices` die Eigenschaften der angeschlossenen Karten der NI-DAQ aufzurufen (siehe Abb.5).

Der erste Schritt bei der Bestimmung der Impulsantwort ist das Generieren von einem Impuls, einem linearen Sweep oder einem breitbandigen Rauschen.

```
>> device = daq.getDevices

device =

Data acquisition devices:

index Vendor Device ID      Description
-----
1      ni      Dev1      National Instruments PXI-4496
2      ni      Dev2      National Instruments PXI-6733
3      ni      Dev3      National Instruments PXI-4496

ans =

ni: National Instruments PXI-4496 (Device ID): 'Dev1'
Analog input subsystem supports:
-1.0 to +1.0 Volts, -10 to +10 Volts ranges
Rates from 100.0 to 204800.0 scans/sec
16 channels ('ai0' - 'ai15')
'Voltage', 'Accelerometer', 'Microphone', 'IEPE' measurement types

This module is in slot 2 of the PXI Chassis 1.

Properties, Methods, Events
```

Abb.5 Anzeige nach Eingabe des Befehls `device = daq.getDevices`

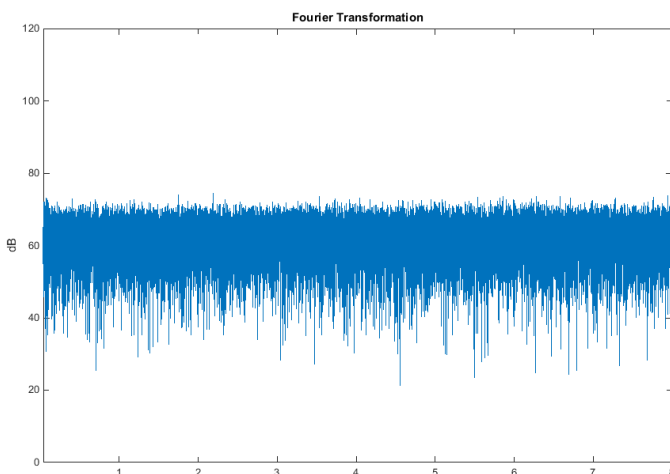


Abb.6 Ergebnis der FFT des generierten Rauschens in Matlab

Es wurde ein weißes Rauschen ausgewählt, welches mit dem Befehl `wgn(m,n,imp)` erzeugt wird.

Auf dem obenstehenden Bild ist die FFT des generierten Rauschens zu sehen. Das Signal weist einen linearen Verlauf und einen Frequenzbereich von 1Hz bis 80kHz auf, welcher von der eingestellten Abtastrate ($f_s = 160000$) bestimmt wird.

Bei den Messungen und besonders bei der Kreuzkorrelation zwischen dem von Matlab generiertem weißen Rauschen und dem aufgenommenen Rauschen wurde deutlich, dass die Vorgänge der Aufnahme und der Wiedergabe nicht gleichzeitig erfolgten. Deshalb wurde der Messaufbau mit einer Loopback-Verbindung optioniert.

Die Aufnahme von den unterschiedlichen Eingangskanälen erfolgt immer synchronisiert. Das garantiert bei der Bestimmung der Impulsantwort, dass das Eintreffen des Direktschalls auf das Mikrofon immer aufs Sample genau ermittelt werden kann. Diese Genauigkeit spielt später bei der Berechnung der Eigenschaften Deutlichkeitsmaß und Klarheitsmaß eine wichtige Rolle.

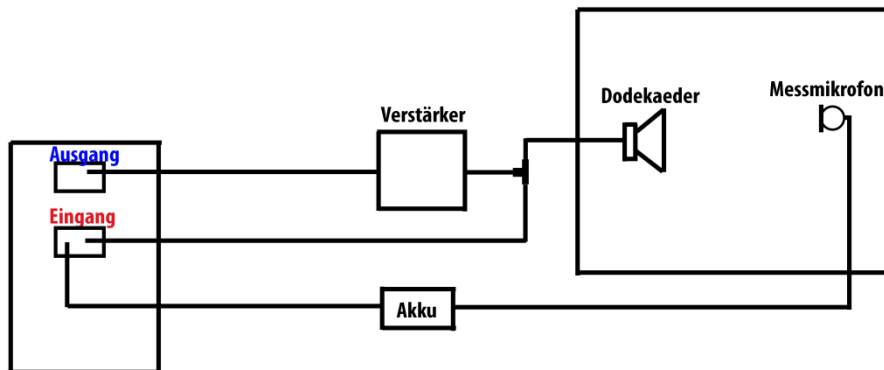


Abb.7 systematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Loopback-Verbindung

Bei der Bestimmung der Kreuzkorrelation wurde sofort deutlich, dass ein tieffrequentes Störsignal vorhanden war, welches eine Welligkeit im Diagramm und ein starkes Schwanken der Ergebnisse verursacht hat. Um dieses Problem zu lösen, wurde zuerst versucht, einen Hochpass zwischen den Akku und den Eingang zu schalten. Da aber kein passives Filter vorhanden war, wurde einfach das Filter, welches im Akku eingebaut ist, eingeschaltet. Das ermöglicht eine Messung ohne das tieffrequente Störsignal, beschränkt allerdings den Frequenzbereich auf 22,4 Hz bis 22,4 kHz.



Abb.8 Akku für das Messmikrofon mit Filter

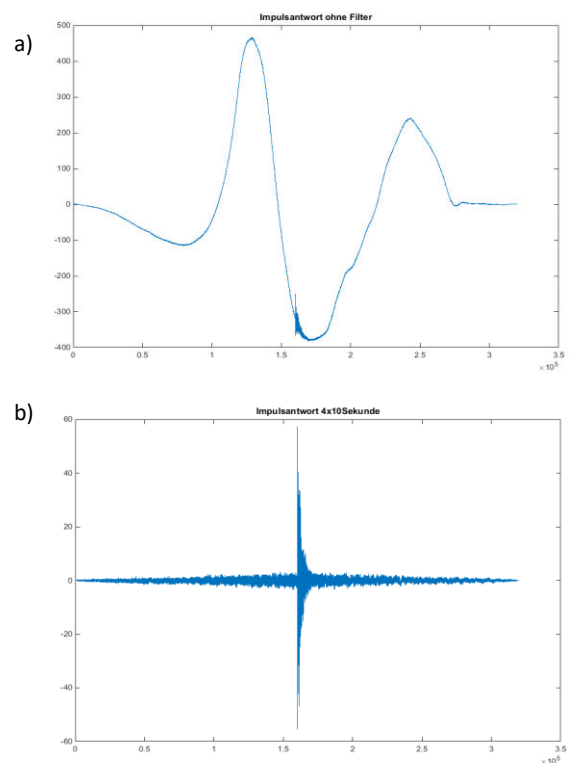


Abb.9 Ergebnis der Kreuzkorrelation
a) ohne Filter b) mit Filter

4 Matlab-Skript

Das Skript von Matlab, das für die Messungen benutzt wurde, besteht im Wesentlichen aus vier Teilen:

- Einstellung der Variablen
- Starten der Sessions und Zuweisung der Kanäle
- Bestimmung der Impulsantwort mittels Kreuzkorrelation und Mittelung
- Bestimmung akustischer Parameter

4.1 Einstellung der Variablen

Bevor die Messung durchgeführt wird, müssen die folgenden Parameter eingestellt werden. Die *Abtastrate* fs bestimmt in diesem Fall die obere Grenzfrequenz des generierten Rauschens, die die Hälfte der Abtastrate ist.

Es wurde außerdem ein *Skalierungsfaktor* S eingeführt. Bei einer Messung in einem echten Raum wäre hier $S = 1$ einzustellen.

$T_{geschaetzt}$ ist die geschätzte Nachhallzeit des Raumes in dem die Messung durchgeführt wird. Dieser Parameter wurde eingefügt, um sicher zu stellen, dass die Messung im eingeschwungenen Zustand des Raumes bzw. Modells erfolgt.

Die Variable k stellt einen *Sicherheitsfaktor* dar, der garantiert, dass die Aufnahme immer nach dem Wiedergabevorgang startet.

N_{avg} stellt die *Anzahl der Mittelungen* fest. Je höher diese Nummer ist, desto größer ist der Signal-to-Noise-Abstand.

```

fs = 160000;           %Abtastrate
Tw = 2;               %Fensterlaenge
N = Tw*fs;           %Anzahl der Abtastwerte
S = 20;              %Skalierungsfaktor
Tgeschaetzt = 2;     %Nachhalzeit im Originalbereich
Tstart = Tgeschaetzt/(S*2); %Startverzoeigerung fuer Einschwingvorgang
k = 1.2;             %Sicherheitsfaktor
Navg = 50;          %Anzahl der Mittelungen

```

Für die Berechnung von $C50$ und $C80$ muss aus der Impulsantwort nur der Teil nach dem Eintreffen des Direktschalls am Messmikrofon zugeschnitten werden. Deshalb sind hier der *Abstand* zwischen Messmikrofon und Schallquelle sowie die *Lufttemperatur* auszufüllen, damit die Verzögerungszeit berechnet werden kann.

```

abstand = 0.80;      %Abstand Schallquelle in m
lufttemperatur = 22; %Raumtemperatur in Grad Celsius
vschall = 20.08*sqrt(temperatur+273) %Schallgeschwindigkeit
verzoeigerung = (abstand/vschall)*fs %Verzoeigerung Direktschall

```


4.2 Starten der Sessions und Zuweisung der Kanäle

Mit dem Befehl `daq.createSession('ni')` wird eine Sitzung für ein *daq ni*-Gerät gestartet (Data Acquisition National Instruments). In diesem Skript ist die Session *s* für die Wiedergabe und *t* für die Aufnahme zuständig. `addAnalogOutputChannel` bzw. `addAnalogInputChannel` weist der jeweiligen Sitzung (*s/t*) eine bestimmte PXI Karte (*Dev1/Dev2*), einen Kanal (*0/2/4*) und eine Signalart (*Voltage*) zu.

```
s = daq.createSession('ni');
t = daq.createSession('ni');
addAnalogOutputChannel(s,'Dev2',0,'Voltage')
    %Analoger Ausgang an der Session 's' von der PXI Karte 'Dev2'
    %Ausgang '0' und 'Voltage' als Ausgabe eingestellt
addAnalogInputChannel(t,'Dev1',2,'Voltage')
addAnalogInputChannel(t,'Dev1',4,'Voltage')
```

Bei den letzten beiden Befehlen werden zwei Kanäle derselben Sitzung zugewiesen. Beim Starten der Aufnahme wird eine Matrix mit zwei Spalten generiert, in deren Zeilen jeweils die aufgenommenen Werte der zwei Eingangskanäle gespeichert werden.

```
t.Rate = fs;           %sample Rate der Aufnahme
s.Rate = fs;           %sample Rate der Wiedergabe
```

4.3 Bestimmung der Impulsantwort mittels Kreuzkorrelation und Mittelung

Hier wird mit einer *for*-Schleife die Mittelung der Kreuzkorrelation durchgeführt.

```
j = 1;
for j = j:Navg;           %Beginn Mittelungsschleife
outputSingleValue = 2;   %Amplitude des Ausgangssignals
    %leider bei Aenderung keine Auswirkung beim Signal erkennbar
```

Mit dem Befehl *wgn* (White Gaussian Noise) wird ein weißes Rauschen generiert. Das entspricht einer Matrix mit stochastischen Werten, die mit dem Befehl `queueOutputData` für die Wiedergabe bereitgestellt werden.

```
outputSignal = wgn((N*k)+(fs*Tstart),1,2);
    %Matrix mit stochastischen Werten generiert,(white gaussian noise)
queueOutputData(s,outputSignal);   %Werte fuer Wiedergabe bereitstellt
t.Channels;
```

`startBackground` startet im Hintergrund den Vorgang der in Klammern stehenden Sitzung. Mit diesem Befehl wird das Skript weiter laufen.

```
startBackground(s);           %Rauschen wird wiedergegeben
```

Der folgende Befehl bestimmt die Länge des Vorgangs der Aufnahme. Es wird für eine längere Zeit als die Fensterlänge aufgenommen, damit anschließend nur der Teil, in dem das System im eingeschwingenen Zustand ist, ausgeschnitten werden kann.

```
t.DurationInSeconds = Tw+Tstart;      %Dauer der einzelnen Aufnahmen
```

startForeground startet im Vordergrund den Vorgang der in Klammern stehenden Sitzung. Mit diesem Befehl wird das Skript warten, bis der Vorgang vollständig ausgeführt wurde.

```
[captured_data,time] = startForeground(t);
    %Aufnahme von beiden Kanaelen wird gestartet
```

In die Variable *aufnahme* werden aus der Matrix *captured_data* die Werte der ersten Spalte (das aufgenommene Rauschen) für die Zeit einer Fensterlänge gespeichert.

```
aufnahme = captured_data((Tstart*fs):(Tw+Tstart)*fs,1);
    %aus erster Spalte relevante Werte ausgeschnitten (Mikrofon)
```

In die Variable *rauschen* werden aus derselben Matrix die Werte der zweiten Spalte (das generierte Rauschen) für die Zeit einer Fensterlänge gespeichert.

```
rauschen = captured_data((Tstart*fs):(Tw+Tstart)*fs,2);
    %aus zweiter Spalte relevante Werte ausgeschnitten (output)
```

Bei der folgenden *if*-Schleife wird zuerst mit dem Befehl *xcorr* die Kreuzkorrelation zwischen dem generierten Rauschen und dem vom Messmikrofon aufgenommenen Signal berechnet, anschließend wird die bereits zuvor ermittelte Kreuzkorrelation dazu addiert und zum Schluss jeder Wert der Matrix *korrelation1* durch zwei geteilt. So ergibt sich eine Mittelung der Kreuzkorrelation.

```
if j>1
    korrelation1 = xcorr(aufnahme,rauschen);
    korrelation1 = korrelation1 + korrelation;
    korrelation1 = korrelation1./2;
else
    korrelation = xcorr(aufnahme,rauschen);
end
```

Mit dem Befehl *wait* läuft das Skript nicht weiter, so lange der in Klammern stehende Vorgang nicht vollständig ausgeführt wurde. Danach wird die Laufvariable um eins erhöht und die *for*-Schleife geschlossen.

```
wait(s);
j = j+1
end
```

Damit das Ergebnis der Kreuzkorrelation unabhängig von der Anzahl der Mittelungen der Schleife bleibt, wird am Ende jeder Wert der Matrix *korrelation1* durch die Anzahl der for-Schleifen-Vorgänge geteilt.

```
korrelation1 = korrelation1./N;
```

Zuerst wird die gesamte Kreuzkorrelation geplottet und anschließend aus ihr nur der Teil der Impulsantwort herausgeschnitten und als Funktion der Zeit ebenfalls geplottet. Zum Schluss wird die Impulsantwort ein weiteres Mal mit der zurückskalierten Zeitachse dargestellt.

```
figure (1), plot (korrelation1);
title ('Kreuzkorrelation');
```

```
Impulsantwort = korrelation1(N:(fs*4*Tstart)+N-1);
    %Ausschnitt aus gesamter Korrelation
```

```
time1 = time(1:(4*Tstart*fs));
```

```
figure (2), plot (time1,Impulsantwort);
title ('Impulsantwort');
xlabel ('Zeit in s');
ylabel ('Schalldruck in Pa');
```

```
figure(3), plot (time1.*S,Impulsantwort);
title ('Impulsantwort skaliert');
xlabel ('Zeit in s');
ylabel ('Schalldruck in Pa');
```

4.4 Bestimmung akustischer Parameter

Nach der Ermittlung der Impulsantwort wird die Bestimmung des Deutlichkeitsmaßes *C50* und Klarheitsmaßes *C80* aus eben dieser mathematisch umgesetzt.

Die Berechnung erfolgt im zurückskalierten Originalbereich und beide Parameter unterscheiden sich nur durch die Aufteilung der Impulsantwort nach 50ms bzw. 80ms.

Beispielhaft für beide Beurteilungsmaße folgt an dieser Stelle das Skript der Umsetzung der Berechnung des Deutlichkeitsmaßes *C50*:

$$C50 = 10 \lg \left(\frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

```
C50_ausschnitt = korrelation1(N+verzoeigerung:N+verzoeigerung+(0.05/S)*fs);
C50 = C50_ausschnitt.^2;
C50 = sum (C50);
C50_Rest = korrelation1 (N+verzoeigerung+(0.05/S)*fs:N+(Tgeschaetzt/S)*fs);
C50_Rest = C50_Rest.^2;
C50_Rest = sum (C50_Rest);
C50 = 10*log10(C50/C50_Rest)
```

Zum Schluss wird aus der Impulsantwort über die Schröder-Rückwärtsintegration die Early Decay Curve (*EDC*) ermittelt, aus welcher die Nachhallzeit zumindest annähernd per Hand abgelesen werden kann.

Um die *EDC* zu bestimmen, wird zuerst die Impulsantwort mit *flipud* gedreht. Anschließend wird sie quadriert, dann erfolgt über *cumsum* die stückweise Addition, was dem Integral in der originalen Formel entspricht, und am Ende wird die erhaltene Kurve erneut gedreht, um den richtigen Zeitverlauf zu erhalten.

$$EDC(t) = \int_t^{\infty} g(\tau)^2 d\tau \quad (12)$$

```
Impulsantwort_gedreht = flipud (Impulsantwort);
Impulsantwort_qua = Impulsantwort_gedreht.^2;
Erg_int = cumsum (Impulsantwort_qua);
Erg_int = flipud (Erg_int);
Plot (time1*20,10*log10(Erg_int))
xlabel ('Zeit [s]')
ylabel ('Schalldruck [dB]');
```

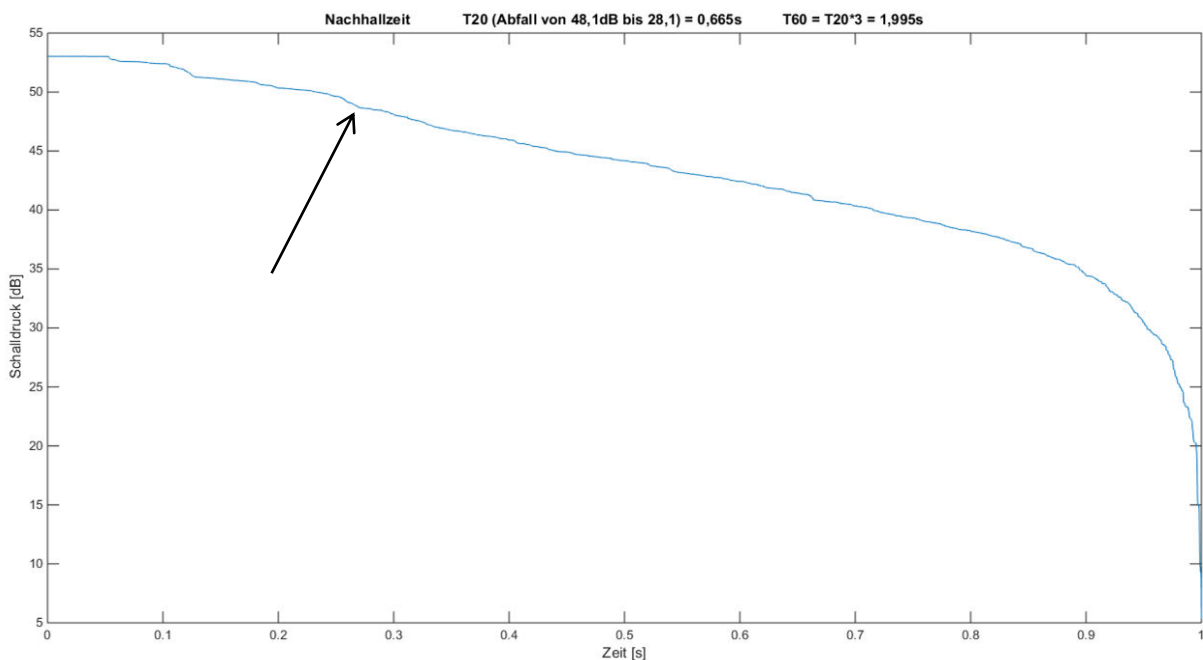


Abb.10 Early Decay Curve, Pfeil kennzeichnet -5dB Abfall

Statt der Early Decay Time (*EDT*) kann die normale Nachhallzeit näherungsweise bestimmt werden, indem die ersten 5dB Abfall vernachlässigt werden und anschließend von 20dB auf 60dB Pegeldifferenz extrapoliert wird, um so die *T20* als Wert für die Nachhallzeit zu erhalten.

5 Ergebnisse

Im Laufe des Semesters ist es gelungen, ein komplett funktionstüchtiges Matlab-Skript zu erstellen, welches eine weiterverwertbare Impulsantwort generiert. Durch Anpassung der vorangestellten Parameter ist es möglich, das Skript nicht nur für das vorhandene raumakustische Modell der Philharmonie in Dresden, sondern auch für jeden anderen beliebigen Raum, egal ob Modell oder Original, anzuwenden. Für den Fall einer Modellmessung wird die Impulsantwort einmal skaliert im Modellmaßstab (hier 1:20) und einmal unskaliert im Maßstab 1:1 ausgegeben.

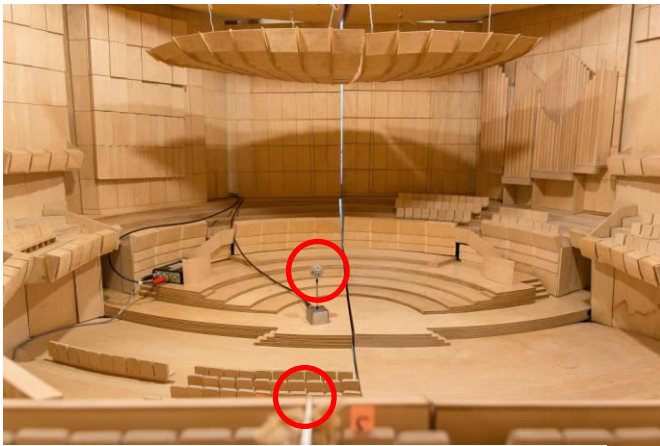


Abb.11 Messaufbau im Modell

Aus der Impulsantwort im Originalbereich werden anschließend $C50$, $C80$ und EDC bestimmt, wie im Punkt 4.4 beschrieben.

Nach der Fertigstellung des Skripts wurden einige Probemessungen im Modell durchgeführt. In Abbildung 11 ist zu erkennen, wo der Dodekaeder und das Messmikrofon positioniert wurden. Der Abstand von beiden Geräten zueinander betrug etwa 0,8m.

Das Modell wurde nicht verändert, lediglich die Aufhängung für das Deckensegel wurde wiederhergestellt, wodurch sich die Form der Impulsantwort verändert hat. Es kamen mehr frühe Reflexionen hinzu.

Zu Beginn waren die Messergebnisse durch starke Schwankungen und die Impulsantwort selbst durch eine starke tieffrequente Welligkeit geprägt, doch nach dem Einschalten des Bandpassfilters am Akku des Mikrofons stabilisierten sich die Impulsantwort sowie die anderen Ergebnisse.

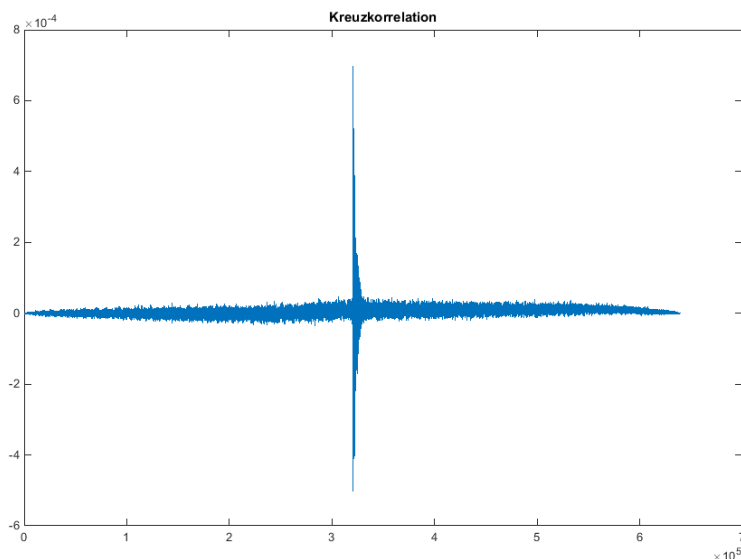


Abb.12 Ergebnis der Kreuzkorrelation in Matlab

Folgende Verläufe haben sich für die Kreuzkorrelation und die Impulsantwort als Ausschnitt aus der Kreuzkorrelation im Modell eingestellt:

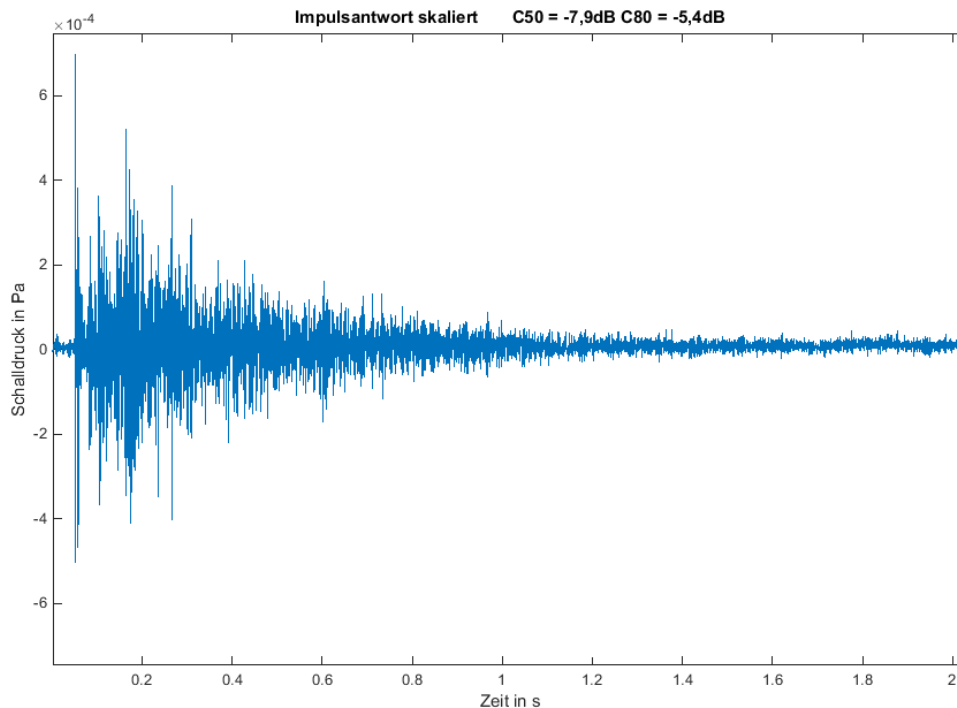


Abb.13 Raumimpulsantwort des Modells der Dresdner Philharmonie (M. 1:1)

Aus dieser Impulsantwort hat das programmierte Skript ein Deutlichkeitsmaß $C50$ von $-7,9\text{dB}$ und ein Klarheitsmaß $C80$ von $-5,4\text{dB}$ berechnet. Außerdem ergibt sich folgender Verlauf für die *EDC*:

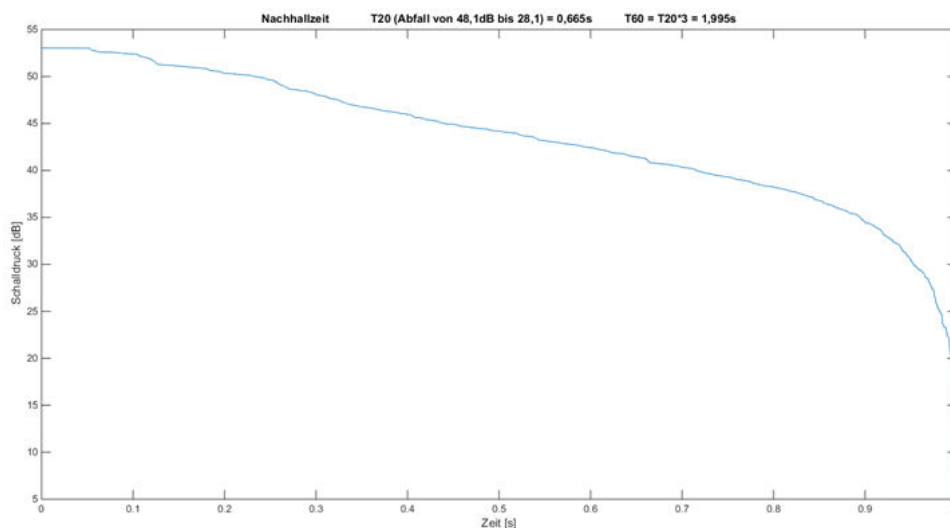


Abb.14 Early Decay Curve des Modells der Dresdner Philharmonie

Aus dem Verlauf dieser *EDC* kann ein 20dB-Abfall zwischen 48,1dB und 28,1dB Schalldruckpegel abgelesen werden. Während dieses Abfalls vergehen 0,665s. Somit beträgt die Nachhallzeit $T20 = 3 \cdot 0,665\text{s} = 1,995\text{s}$.

Die Zahlenwerte, die das Skript für das Modell ausgibt, sind leider zurzeit kaum vergleichbar mit Literaturwerten, anderen Modellen der Philharmonie oder gar dem Original in Dresden, da wichtige Komponenten wie die Absorption im Raum oder die Luftdämpfung noch nicht berücksichtigt wurden. Außerdem fehlt dem Messaufbau ein Filter, welches den vollen Frequenzbereich von 400Hz bis 80 kHz (20Hz bis 4kHz im Original) durchlässt.

6 Ausblick

6.1 Dämpfung

Die Luftdämpfung ist im Ultraschallbereich um einiges stärker als im hörbaren Bereich. Deswegen darf sie nicht vernachlässigt werden. Aus einer Veröffentlichung des Uniklinikums Düsseldorf geht hervor, dass in der Medizin von $1,2 \frac{\text{dB}}{\text{cm} \cdot \text{MHz}}$ als spezifische Dämpfung in Luft ausgegangen wird. [Uniklinikum Düsseldorf] S.10

Angenommen der Schall legt rund 1m Strecke auf seinem Weg von der Aussendung über eine Reflexion bis zum Mikrofon zurück. Bei einer Frequenz von 50kHz kommt man in diesem Fall auf eine Dämpfung von 6dB.

Nun ist in folgenden Semestern zu klären, wie sich die Dämpfung in dem Modell und den gegebenen Temperaturen verhält, um eine gute Vergleichbarkeit zu anderen Modellen und dem Original zu gewährleisten. Dazu bräuchte es erstens ein geeignetes Pistonphon, um das Mikrofon zu kalibrieren und zweitens einen geeigneten Messaufbau, der den gesamten zu untersuchenden Frequenzbereich verwendet.

6.2 Absorption

Im Modell sind bisher alle Wände als schallhart anzunehmen, da es komplett aus Holz gefertigt ist. Eine Vergleichbarkeit zum Original ist somit schwer zu realisieren. Eine Erweiterung des Modells mit absorbierenden Materialien wie z.B. Filzen wäre wichtig, um Messungen der Realität entsprechend anzupassen.

Des Weiteren müssen die bisherigen Öffnungen am Modell mit Absorbern ausgekleidet werden, um ungewollte Reflektionen zu unterbinden.

Für die genauen Eigenschaften des Materials muss ein geeigneter Messaufbau erstellt werden, um nachzuweisen, dass das gewählte Material die gleichen oder vergleichbare Eigenschaften wie die Materialien im Original besitzen. Die meisten Absorbermaterialien sind im hörbaren Bereich gut dokumentiert, im Ultraschallbereich jedoch nicht. Hierzu ist, wie in Punkt 6.1 erwähnt, ein geeignetes Pistonphon nötig.

Dabei muss auch abgewogen werden, ob sich der Aufwand für die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messergebnisse lohnt, oder ob dieser Prozess vernachlässigt werden kann, da er sich nicht entscheidend auf die Genauigkeit der Ergebnisse der Messungen auswirkt.

6.3 Filter

Um Gleichspannungen, Körperschall durch Bewegungen im Raum (tiefe Frequenzen) und ungewollte Frequenzen unter- und oberhalb des gewollten Frequenzbereichs 400Hz bis 80 kHz (im Originalbereich 20Hz bis 4kHz) herauszufiltern, muss ein geeignetes Filter noch zusätzlich mit in den Messaufbau integriert werden.

Die bisherige Lösung mit dem vorhandenen Bandfilter am Mikrofon-Akku von Brüel & Kjær ist ungeeignet, da die obere Grenzfrequenz viel zu niedrig ist (22,4kHz).

Ein LC-Bandpassfilter 3. Ordnung müsste dafür entworfen, gebaut und getestet werden.

6.4 Trigger

Um die Auswertung weiter zu automatisieren, muss ein Trigger programmiert werden, der eine Transientenerkennung ermöglicht. Damit kann der Startzeitpunkt, um die Impulsantwort und daraus unter anderem die Nachhallzeit zu berechnen, reproduzierbar gemacht werden. Bisher wird dieser über den gemessenen Abstand zwischen Sender und Empfänger bei jeder Messung neu im Skript berechnet

Der Ansatz für die Automatisierung wäre, die Änderung des Signals zu detektieren. In der Elektrotechnik würde man hierfür z.B. ein Hochpassfilter und einen Komparator benutzen. Die Möglichkeiten, diese Fragestellung mit Matlab zu lösen, gilt es darzustellen.

7 Fazit

Als Ergebnis des Projektes *Modellmesstechnik am Modell der Philharmonie Dresden* im Sommersemester 2018 kann festgehalten werden, dass nun ein komplett funktionstüchtiges Skript zur Bestimmung der Raumimpulsantwort eines beliebigen Raumes existiert. Dieses Skript kann sowohl auf Modellräume als auch normale Räume angewandt werden.

Es ist gelungen über Matlab nicht nur die Daten auszuwerten, sondern auch die gesamte Messtechnik über das Skript zu steuern, sodass keine Datensätze mehr von Software zu Software übertragen werden müssen.

Die Berechnung von Deutlichkeitsmaß und Klarheitsmaß als wichtige objektive Beurteilungspegel der Raumakustik konnte ebenfalls erfolgreich in Matlab umgesetzt werden.

Zuletzt kann auch die Early Decay Curve über die Schröder-Rückwärtsintegration gewonnen werden, jedoch muss derzeit diese Kurve noch per Hand ausgewertet werden, um einen Wert für die Nachhallzeit zu erhalten.

Insgesamt ist nun an der Hochschule Mittweida also ein funktionierender Modellmessaufbau einschließlich Miniatur-Dodekaeder und Messmikrofon sowie mit dem in diesem Projekt erstelltem Skript eine Steuer- und Auswertungssoftware vorhanden.

In einem nachfolgenden Projekt muss sich der vor allem der Problemstellung der Absorption und Luftdämpfung im Modell sowie dem Einfügen eines geeigneten Bandfilters in den Messaufbau angenommen werden.

8 Anhang

8.1 vollständiges Matlab-Skript

```

cxx;
fs = 160000;           %Abtastrate
Tw = 2;               %Fensterlaenge
N = Tw*fs;           %Anzahl der Abtastwerte
S = 20;              %Skalierungsfaktor
Tgeschaetzt = 2;     %Nachhalzeit im Originalbereich
Tstart = Tgeschaetzt/(S*2); %Startverzoeigerung fuer Einschwingvorgang
k = 1.2;             %Sicherheitsfaktor
Navg = 50;          %Anzahl der Mittelungen

abstand = 0.80;      %Abstand Schallquelle in m
lufttemperatur = 22; %Raumtemperatur in Grad Celsius
vschall = 20.08*sqrt(temperatur+273) %Schallgeschwindigkeit
verzoeigerung = (abstand/vschall)*fs %Verzoeigerung Direktschall

devices = daq.getDevices;
s = daq.createSession('ni');
t = daq.createSession('ni');
addAnalogOutputChannel(s,'Dev2',0,'Voltage')
    %Analoger Ausgang an der Session 's' von der PXI Karte 'Dev2'
    %Ausgang '0' und 'Voltage' als Ausgabe eingestellt
addAnalogInputChannel(t,'Dev1',2,'Voltage')
addAnalogInputChannel(t,'Dev1',4,'Voltage')
t.Rate = fs;         %sample Rate der Aufnahme
s.Rate = fs;         %sample Rate der Wiedergabe
j = 1;

for j = j:Navg;      %Beginn Mittelungsschleife

outputSingleValue = 2; %Amplitude des Ausgangssignals
    %leider bei Aenderung keine Auswirkung beim Signal erkennbar
outputSignal = wgn((N*k)+(fs*Tstart),1,2);
    %Matrix mit stochastischen Werten generiert,(white gaussian noise)
queueOutputData(s,outputSignal); %Werte fuer Wiedergabe bereitgestellt
t.Channels;

startBackground(s); %Rauschen wird wiedergegeben
t.DurationInSeconds = Tw+Tstart; %Dauer der einzelnen Aufnahmen
[captured_data,time] = startForeground(t);
    %Aufnahme von beiden Kanaelen wird gestartet

aufnahme = captured_data((Tstart*fs):(Tw+Tstart)*fs,1);
    %aus erster Spalte relevante Werte ausgeschnitten (Mikrofon)
rauschen = captured_data((Tstart*fs):(Tw+Tstart)*fs,2);
    %aus zweiter Spalte relevante Werte ausgeschnitten (output)

```

```

if j>1
    korrelation1 = xcorr(aufnahme,rauschen);
    korrelation1 = korrelation1 + korrelation;
    korrelation1 = korrelation1./2;
else
    korrelation = xcorr(aufnahme,rauschen);
end
wait(s);
j = j+1
end

korrelation1 = korrelation1./N;
figure (1), plot (korrelation1);
title ('Kreuzkorrelation');

Impulsantwort = korrelation1(N:(fs*4*Tstart)+N-1);
    %Ausschnitt aus gesamter Korrelation
time1 = time(1:(4*Tstart*fs));

figure (2), plot (time1,Impulsantwort);
title ('Impulsantwort');
xlabel ('Zeit in s');
ylabel ('Schalldruck in Pa ');

figure(3), plot (time1.*S,Impulsantwort);
title ('Impulsantwort skaliert');
xlabel ('Zeit in s');
ylabel ('Schalldruck in Pa ');

%Berechnung C50 und C80 im Originalbereich
C50_ausschnitt = korrelation1(N+verzoeigerung:N+verzoeigerung+(0.05/S)*fs);
C50 = C50_ausschnitt.^2;
C50 = sum (C50);
C50_Rest = korrelation1 (N+verzoeigerung+(0.05/S)*fs:N+(Tgeschaetzt/S)*fs);
C50_Rest = C50_Rest.^2;
C50_Rest = sum (C50_Rest);

C50 = 10*log10(C50/C50_Rest)

C80_ausschnitt = korrelation1(N+verzoeigerung:N+verzoeigerung+(0.08/S)*fs);
C80 = C80_ausschnitt.^2;
C80 = sum (C80);
C80_Rest = korrelation1 (N+verzoeigerung+(0.08/S)*fs:N+(Tgeschaetzt/S)*fs);
C80_Rest = C80_Rest.^2;
C80_Rest = sum (C80_Rest);

C80 = 10*log10(C80/C80_Rest);

```

%Nachhallzeit nach Schroeder-Rueckwaertsintegration

```
Impulsantwort_gedreht = flipud (Impulsantwort);  
Impulsantwort_qua = Impulsantwort_gedreht.^2;  
Erg_int = cumsum (Impulsantwort_qua);  
Erg_int = flipud (Erg_int);  
Plot (time1*20,10*log10(Erg_int))  
xlabel ('Zeit [s]')  
ylabel ('Schalldruck [dB]');
```

Literaturverzeichnis

- [1] Fasold, W. & Veres, E. (1998): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen, Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH.
- [2] Schulz, D. (o. A.): Statistische Signalanalyse II. Korrelationsfunktionen.
- [3] DIN EN ISO 3382-1 (2009): Akustik. Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 1: Aufführungsräume.
- [4] Uniklinikum Düsseldorf. Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie. Ultraschall – Eine Einführung. Eigenschaften, Herstellung, Anwendungen. URL: http://www.uniklinik-duesseldorf.de/fileadmin/Datenpool/einrichtungen/klinik_und_poliklinik_fuer_strahlentherapie_und_radioonkologie_id30/dateien/ultraschall_eine_einfuehrung.pdf [Stand: 22.08.2018].

Abbildungsnachweis

- Abb.1 aus [2] S. 4
- Abb.2 aus [2] S. 16
- Abb.3 aus [1] S. 135
- Abb.4 Baunetz Wissen. Akustik. Messung der Nachhallzeit und der Anfangsnachhallzeit EDT. URL: <https://www.baunetzwissen.de/akustik/fachwissen/grundlagen/messung-der-nachhallzeit-und-der-anfangsnachhallzeit-edt-147635> [Stand: 21.08.18].
- Abb.5 Foto von Monitoranzeige
- Abb.6 Ergebnis ausgegeben von Matlab
- Abb.7 selbst erstellt
- Abb.8 selbst aufgenommenes Foto
- Abb.9 Ergebnisse ausgegeben von Matlab
- Abb.10 Ergebnis ausgegeben von Matlab
- Abb.11 selbst aufgenommenes Foto
- Abb.12 Ergebnis ausgegeben von Matlab
- Abb.13 Ergebnis ausgegeben von Matlab
- Abb.14 Ergebnis ausgegeben von Matlab

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt haben.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

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

J. Fischer, A. Hofmann, E. Merlo, M. Schönwald

Mittweida, den 7. September 2018