

BESCHALLUNGSTECHNIK

Eine Hausarbeit von

Niklas Partsch (2438125)
Sebastian Runn (2438676)
Maximilian Klein (2358166)

Studiengang: Medientechnik
Prüferin: Prof. Dr. Eva Wilk
Modul: Beschallungstechnik
Wintersemester 2021/22

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	5
2	Einleitung	6
3	Allgemeine Rauminformationen	7
3.1	Raumnutzung	7
3.2	Raumdaten und Dimensionen	7
3.3	Subjektive Raumwahrnehmung	9
4	Raumakustik Messung mit EASERA	10
4.1	Verwendetes Equipment	10
4.2	Vorkalkulation	11
4.3	Messpunkte und Durchführung	12
4.4	Ergebnisse und Auswertung Nachhallzeit	13
4.5	Ergebnisse und Auswertung Sprachverständlichkeit	17
4.6	Ergebnisse und Auswertung weitere Parameter	20
5	Beschallungsanlage	21
5.1	Einleitung	21
5.2	Entwurf einer Beschallungsanlage	22
6	Messung Q7-Lautsprecher	23
6.1	Aufbau und Durchführung des Versuchs	23
6.2	Vorbereitung der Messergebnisse	24
7	Messung der Beschallungsanlage	29
7.1	Einführung und Versuchsaufbau	29
7.2	Auswertung	29
8	EASE-Simulation	31
8.1	Einleitung	31
9	Raumsimulationen – Ein Überblick	32

9.1	Allgemeine Grundlagen	32
9.2	Simulationssoftware EASE	33
10	Durchführung der Simulation	34
10.1	Ziel der Simulation	34
10.2	Simulation der Primär- und Sekundärstruktur	34
10.3	Simulation der Beschallungsanlage	36
10.4	Simulation der Zuhörer	37
11	Raumoptimierung	38
11.1	Raumakustische Parameter	38
11.2	Beschallungsanlage	40
12	Visualisierung in Vision	42
13	Fazit der Simulation	43
14	Lärmschutz	44
14.1	Gehörbelastung	44
14.1.1	Einleitung und Versuchsaufbau	44
14.1.2	Auswertung	46
14.2	Lärmbelästigung durch Geräuschemission	46
14.2.1	Einleitung	46
14.2.2	Auswertung	47
14.2.3	Fazit des Lärmbelästigungsversuchs	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Raummaße	7
Abbildung 2: Reale Situation im Raum	9
Abbildung 3: Messaufbau Raumakustik	10
Abbildung 4: Messpunkte Raumakustik	12
Abbildung 5: EDT der Messungen	13
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Interpolation der Nachhallzeit über den Schröderplot	14
Abbildung 7: Bestimmung der Soll-Nachhallzeit nach Volumen und Nutzungsart.....	16
Abbildung 8: Frequenzabhängiger Toleranzbereich der Nachhallzeit	16
Abbildung 9: Messkurven C80.....	17
Abbildung 10: Berechnung und Bewertung C80	17
Abbildung 11: Berechnung und Bewertung C50	18
Abbildung 12: Messung C50	18
Abbildung 13: Berechnung und Bewertung AlCons	19
Abbildung 14: Vergleich und Bewertung verschiedener Sprachverständlichkeitsskalen	19
Abbildung 15: Messwerte STI + AlCons	19
Abbildung 16: Darstellung Echotime	20
Abbildung 17: Darstellung Center Time	20
Abbildung 18: Beschallungsanlage mit zwei d&b audiotechnik Q7 Lautsprechern und einem Q-Sub Subwoofer.	21
Abbildung 19: Kalkulationspegel für verschiedene Anforderungen von Beschallungsanlagen	22
Abbildung 20: Messaufbau Blockschaltbild	24
Abbildung 21: Überlagerung der Frequenzgänge aller Messungen. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die Impulsantwort wurde noch nicht gefenstert.	25
Abbildung 22: Überlagerung der Impulsantworten aller Messungen. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die Impulsantwort wurde noch nicht gefenstert. Die Schallreflexionen sind ab 20 ms deutlich zu erkennen und müssen entfernt werden... ..	25
Abbildung 23: Überlagerung der Impulsantworten aller Messungen. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die Impulsantwort wurde so gefenstert, dass die Schallreflexionen entfernt wurden. Verwendet wurde ein Blackman-Fenster.....	26
Abbildung 24: Überlagerung der Frequenzgänge, nachdem die Impulsantwort gefenstert wurde. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die spektrale Unschärfe ist deutlich bei tiefen Frequenzen zu erkennen.	26
Abbildung 25: Polardiagramm Schalldruckpegel (links). Polardiagramm Schalldruck (Mitte). Schalldruck-Isobar aus Q7 Datenblatt (rechts)	27
Abbildung 26: 3D-Modell der Primärstruktur des Raumes	34
Abbildung 27: Absorptionsdiagramm des benutzerdefinierten Materials "Backstein offenporig"	35
Abbildung 28: Nachhallzeit (Eyring) des simulierten Raumes.....	36
Abbildung 29: Lautsprecheranordnung, oben links: 3D-Ansicht von schräg oben;	37
Abbildung 30: "Audience Areas" (Sicht von oben)	37
Abbildung 31: Nachhallzeit von Raum mit Zuhörern	38
Abbildung 32: C80 auf beiden "Audience Areas" (links A1, rechts A2)	39
Abbildung 33: C50 auf beiden "Audience Areas" (links A1, rechts A2)	39
Abbildung 34: STI auf beiden "Audience Areas"	40
Abbildung 35: Alcons auf beiden "Audience Areas"	40
Abbildung 36: Direkt SPL in 3D-Modell	41
Abbildung 37: Optimierter Raum in Vision simuliert (in blau die neupositionierten Lautsprecher)	42
Abbildung 38: DIN 19505-5 (2007). Tabelle der Schalldosis in Prozent der zulässigen Wochen-Schallexposition von 1820 PA2s (entspricht 40 Stunden bei 85 dB) in Anhängigkeit von der Einwirkdauer und dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel.....	45

Erklärung

Die vorliegende Hausarbeit wurde von der Gruppe selbständig verfasst und keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel verwendet. Alle Quellen wurden mittels *Deutscher Zitierweise* mit Fußnoten im Fließtext gekennzeichnet. Darüber hinaus wurden weitere Quellen, wie z.B. Datenblätter, im angehängten Ordner **Quellen** abgelegt.

1 Vorwort

Die vorliegende Hausarbeit entstand im Rahmen des „Beschallungstechnik“ Wahlpflichtmoduls des Studiengangs Medientechnik der HAW-Hamburg. Die Prüfungsleistung beinhaltet eine objektorientierte elektroakustische Messung und Simulation. Dabei wird vor allem auf die Raumakustik und die Parameter der Beschallungsanlage, inklusive Lärmschutz, eingegangen.

Die Bearbeitung der Hausarbeit entstand in Zusammenarbeit der Referenten Maximilian Klein, Niklas Partsch und Sebastian Runn. Durch die individuelle Bearbeitung der vorbereitenden schriftlichen Überprüfung wurde sichergestellt, dass jedes Gruppenmitglied inhaltlich Einfluss auf das Projekt nehmen kann und mindestens das grundlegende Verständnis von Beschallungstechnik besitzt. Bei der Arbeit am Projekt für die Hausarbeit hatte jedes Mitglied einen ähnlich großen Arbeitsanteil. Die Messungen zum Großteil als Gruppe durchgeführt und die Ausarbeitung der verschiedenen Abschnitte gleichmäßig auf alle Gruppenmitglieder verteilt. Dabei wurde sich in der Einzelarbeit immer wieder gegenseitig unterstützt.

Durch die Vorlesungen bei Frau Prof. Dr. Eva Wilk waren wir gut auf die inhaltlichen Probleme vorbereitet und wurden ebenfalls über das gesamte Projekt betreut.

Vielen Dank!

2 Einleitung

Zu Semesterbeginn haben wir den Kurs Beschallungstechnik gewählt, um noch tiefer in die Tontechnik sowie Akustik einzusteigen und unser Wissen zu erweitern. Wir wollten unsere Kompetenz im Beschallungsbereich umfangreich erweitern, um Beschallungssituationen besser bewerten zu können. Außerdem war uns wichtig, die Elemente einer Beschallungsanlage technisch zu verstehen und ein Konzept für die Dimensionierung, sowie Platzierung, entwerfen zu können. Dabei spielt die Berücksichtigung der Umgebung eine erhebliche Rolle.

In der Vorlesung wurden die theoretischen Grundlagen aus den oben genannten Bereichen umfangreich behandelt. Um verstärkt das Gelernte praktisch umsetzen zu können und in dessen Folge wichtige Erkenntnisse für das Berufsleben mitzunehmen, wird am Ende dieses Semesters ein „großes“ Abschlussprojekt im Rahmen *dieser* Hausarbeit durchgeführt. Dabei ist die Wahl des Themas im Bereich der Beschallungstechnik flexibel. Für die elektroakustische Forschung wurde ein privater Raum gewählt, der nicht speziell für die Akustik und Beschallung entworfen wurde.

Das Ziel ist es den Raum messtechnisch zu erfassen und in der Simulation zu optimieren. Dabei wird auch die bereits installierte Beschallungsanlage untersucht, mit den Herstellerangaben verglichen und optimal im Raum auszurichtet. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Gewährleistung der Lärmschutzrichtlinien. Für das Publikum darf der Pegel nicht gehörschädigend sein. Auch die Lärmbelastung muss je nach Umgebung eingehalten werden.

Für alle diese Richtlinien gibt es das Deutsche Institut für Normen an den man sich orientieren sollte. Um ein optimales und normgerechtes Projekt durchzuführen, bieten die DIN-Normen aus den Bereichen der Raumakustik, Beschallungstechnik und Lärmschutz die Grundlage für dieser Arbeit.

In den beiden hinteren Ecken befinden sich ein Mattenhaufen für die bisherige Teilnutzung als Fitnessraum und ein Podest für den Discjockey, welche wir für die Forschung am Projekt nicht rausnehmen konnten. Außerdem ist aufgefallen, dass einige Wände nicht symmetrisch zur Gegenseite sind und somit etwas schräg verlaufen. Der Boden ist schief Richtung Eingang und die Seite am ausgeschnittenen Würfel verläuft ebenfalls etwas schräg zur gegenüberliegenden Fensterwand.

Raummaße:	Vorne	Hinten		
länge [m]	4,68	6,99	V_V1 [m³]	55,381
breite_min [m]	3,45	5,97	V_V2 [m³]	0,401
breite_max [m]	3,50		V_V3 [m³]	0,565
höhe_min [m]	3,43	3,30	V_V4 [m³]	0,004
höhe_max [m]	3,50	3,43	V_H1 [m³]	137,710
			V_H2 [m³]	2,712
Ecken:	Matten	Podest		
länge [m]	1,99	1,70	V_M [m³]	1,851
breite [m]	1,24	1,47	V_P [m³]	3,299
höhe [m]	0,75	1,32		
VOLUMEN	191,62	m³		

Die Oberflächen der dicken Seitenwände bestehen größtenteils aus übergestrichenem offenporigem Backstein. Die Decke besteht aus sehr rauen Betonplatten/Rauputz und der Boden ist mit vielen kleinen Fliesen bedeckt. Die Wände vom rausgeschnittenen Würfel sind mit dünnem schwarzem Stoff verkleidet und bedecken die dahinterliegende rauverputzte Oberfläche. Eine weitere besondere Wand ist das Garagentor, das Tor besteht aus dickem Kunststoff und kleinen Metallelementen. Man kann das Tor hochfahren für sommerliche Veranstaltungen oder die integrierte Tür aus gleichem Material verwenden. An der längsten Seite des Raumes sind vier gleichgroße Fenster installiert, jeweils circa 2 m² groß. Vor den Fenstern hängen dicke Woldecken.

Für die Nutzung des Raumes ist außerdem die zulässige Anzahl der Personen relevant. Ein Maß dafür ist die Volumenkenzahl, geht man von einem Kalkulationswert $k = 3$ aus, das heißt überall sind Menschen, passen bei einem Volumen von fast 200 m³ ($k = \text{Volumen} / \text{Plätze}$) circa 65 Menschen in den Raum.

3.3 Subjektive Raumwahrnehmung

Ein Vorteil des Raumes ist zum einen die Wahl eines privaten Gebäudes, in dem flexibel und intensiv gearbeitet werden kann. Außerdem bietet der Raum viel Verbesserungsbedarf, sodass es viele Parameter gibt, die man erforschen kann. Der Raum wird als trocken wahrgenommen. Die Schalldämmung nach draußen ist aus subjektiver Sicht verbesserungswürdig, vor allem im tiefen Frequenzbereich. Ob bei den Untersuchungen der erwartete Optimierungsbedarf vorliegt, wird im Folgenden ausführlich erläutert.



Abbildung 2: Reale Situation im Raum

4 Raumakustik Messung mit EASERA

Für die Messung der Raumakustik wird das Messtechnikset des Tonlabors, der Hochschule geliehen. Die Idee ist es, den Raum akustisch mit einem Signal anzuregen und dann die Nachhallzeit, Sprachverständlichkeit und weitere raumakustische Parameter mit Hilfe der Software EASERA zu bestimmen. Anschließend sollen die gemessenen Werte interpretiert, mit der jeweiligen Norm verglichen und eine mögliche Optimierung in der Simulation vorgenommen werden.

4.1 Verwendetes Equipment

Die Impulsantwort ist ein raumakustischer Parameter, der digital mit der Software EASERA gemessen werden kann. Auf dem Lenovo Laptop der Hochschule werden die Messergebnisse angezeigt und das Routing des RME Fireface UC (Interface) gesteuert. Im Interface wird das digitale System mit den analogen Geräten verbunden und das Signal gewandelt. Wandler und Computer sind mit einem USB-Kabel verbunden. Das Messmikrofon M2461 wird per XLR Kabel in den ersten Input-Kanal des Firefaces gesteckt. Der unidirektionale DO12 Messlautsprecher Dodekaeder wird über ein Speakon-Kabel mit dem zugehörigen DO12-AMP Mini Verstärker verbunden. Der erste Output-Kanal des Interfaces wird dann über ein Klinke- zu BNC-Adapterkabel am Verstärker angeschlossen.

(s. Abbildung 3)

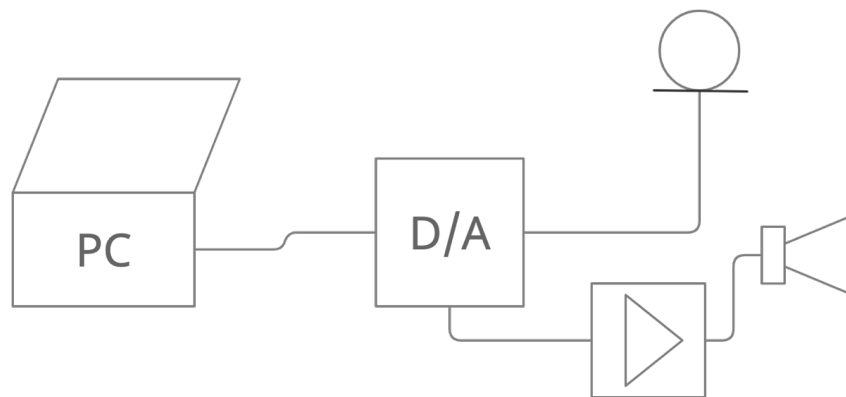


Abbildung 3: Messaufbau Raumakustik

Darüber hinaus wird für den Messaufbau noch eine Schuko-Mehrfachsteckdose und die jeweiligen Netzteile der Geräte für die Stromversorgung verwendet. Messmikrofon und Dodekaeder werden auf Stative gestellt. Für die genaue Einstellung und Kalibrierung der Geräte wird ein LEM 80 Laserentfernungsmesser und ein CM-C200 Mikrofonkalibrator genutzt.

4.2 Vorkalkulation

Bevor die Messpunkte festgelegt und mit der Messung begonnen werden kann, wird eine grobe Kalkulation für die Nachhallzeit und den damit verbunden Hallradius vorgenommen. Der Grund dafür ist, dass sich alle Messinstrumente im Optimalfall im diffusen Schallfeld befinden sollten und der Abstand zueinander und zu den Wänden größer als der Hallradius sein sollte.

Zunächst wird das Raumvolumen grob ausgerechnet. Wenn die leichten Schrägen nicht berücksichtigt werden, ergibt sich ein Volumen von 196,82 m³. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig und um einen Kalkulationswert zu erhalten, wird RT (Nachhallzeit) exemplarisch für 1000Hz berechnet (s. unten). Für die Berechnung der Nachhallzeit benötigt man das Volumen und die Absorptionsfläche. Die Absorptionsgrad der Oberflächen mit Hilfe einer Tabelle für 1000Hz angenähert. Daraus lässt sich die Nachhallzeit und der Kalkulations-Hallradius berechnen.

			m ²	α	m ²	α
1	Decke	Rauputz	57,97	0,29		
2	Seite Fenster	Backstein ^{75%}	29,81	0,11	9,94	0,72
		Fenster/Vorhang ^{25%}				
3	Seite Hinten	Backstein	20,12	0,11		
4	Seite Rechts	Backstein	23,56	0,11		
5	Seite Kühlung Hinten	Dünner Stoff vor Rauputz	8,58	0,30		
6	Seite Kühlung Rechts	Dünner Stoff vor Rauputz	16,19	0,30		
7	Seite Tor	Kunststoff Garagentor	12,01	0,10		
8	Boden	kleine Fliesen	57,97	0,02		

$$RT_{60} = 0,161 * \frac{V}{A} = 0,161 * \frac{V}{\alpha * S}$$

Bei 100Hz haben wir eine Nachhallzeit von RT60(1000Hz) = 0,76 s berechnet.

Für die Ermittlung des Hallradius werden das Volumen und die Nachhallzeit benötigt.

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} = 0,92 \text{ m}$$

Für unsere Messung haben wir die Abstände unter den Messinstrumenten sowie zur Wand, Decke und Boden sehr viel größer als den Hallradius gewählt, um möglichen Kalkulationsungenauigkeiten entgegenzuwirken. Dementsprechend haben wir einen Mindestabstand von 1,5 Metern festgesetzt.

4.3 Messpunkte und Durchführung

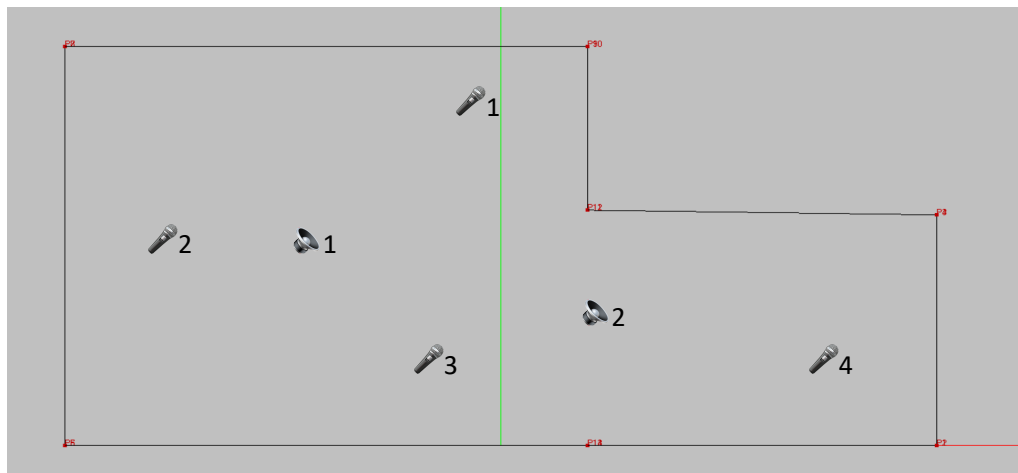


Abbildung 4: Messpunkte Raumakustik

Um die Messung möglichst präzise durchzuführen, werden verschiedene Kombinationen von Messpositionen festgelegt. (s. Abbildung 4). 2 Senderpositionen und 4 Mikrofonpositionen sind dafür die Grundlage. Jede Sender-Mikrofon-Kombination wird dreifach gemessen, also drei Abklingvorgänge aufgenommen. Das Mikrofon wird auf eine Höhe von 1,40 m eingestellt und der Dodekaeder auf 1,70 m. Dabei muss beachtet werden, dass der Abstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher, sowie zu den Wänden größer ist als der Hallradius. Daher wird mit einem Mindestabstand von 1,5m vorkalkuliert, um eine Messung im diffusen Schallfeld sicherzustellen.

Als Testsignal wird ein Rosa Rauschen, ein Rauschen, dessen Amplitude mit steigender Frequenz abnimmt, verwendet. In der Akustik wird $1/f$ -Rauschen als ein Geräusch empfunden, bei dem ein durchschnittlicher Mensch alle Frequenzbereiche des hörbaren Schallspektrums als etwa gleich laut empfindet. Die Samplerate beträgt 48 kHz ($> 2 \times$ Abtastrate über hörbaren Bereich des Menschen (20 Hz-20 kHz), Standardwert für Audio). gewählt. Die Recording Time des Signals wird pro Messung auf 2,7 Sekunden eingestellt und das Rosa Rauschen mit -33 dB zum Digital-Output geführt. Der Messung kann entnommen werden, dass der Pegel ausreichend ist, um eine Aussage für die Nachhallzeit also den Pegelabfall um 60dB treffen zu können. An den verschiedenen Messpositionen werden Pegel zwischen 90 dB und 110 dB SPL gemessen.

Vor der Messung wurde in die Software für Raumakustikmessungen EASERA gestartet und auf „Measurement“ geklickt. Als ersten Schritt wird der Input, beziehungsweise das Mikrofon kalibriert. Der Galaxy Audio-CM-C200 Mikrofonkalibrator wird dafür auf das Messmikrofon NTi-M4261 gesetzt und auf 94dB eingestellt. In EASERA gibt es die Möglichkeit den

erwarteten Pegel anzugleichen, um exakte Messwerte zu erhalten. Anschließend wird der Output zum Verstärker kalibriert, indem man Input 1 mit dem Output 1 per Klinkenkabel verbindet. Der Eingang ist aber bereits kalibriert – die richtige Ausgangsspannung kann angepasst werden.

4.4 Ergebnisse und Auswertung Nachhallzeit

Aus der aufgenommenen Impulsantwort lassen sich in EASERA viele raumakustische Parameter berechnen und visualisieren. Im folgendem wird auf die wichtigsten Kenngrößen wie die Nachhallzeit und verschiedene Skalen der Verständlichkeit eingegangen.

Für die Bestimmung der Nachhallzeit wird der Schröderplot betrachtet. Da die vorgerechneten T10, T20 und T30 Werte bei vielen Messungen eine Abweichung zueinander aufweisen, wird die Nachhallzeit mit einer von Hand angelegten Schrödergerade manuell interpoliert. Dafür legt man eine Gerade über den linearen Teil der gemessenen Funktion und interpoliert diese zu einem Zeitpunkt, bei dem der Pegel auf 60 dB abgefallen ist. Wichtig ist, dass man sich nicht in der *Early Decay Time* (EDT) (s. Abbildung 5) befindet. Der Pegel fällt in der frühen Abklingzeit (bis -10 dB) oft stärker ab (mehr Energieverlust) als im weiteren Verlauf. Im Fall der Interpolation über die EDT liegt die Nachhallzeit teilweise etwas niedriger als sie in der Realität ist. (s. Abbildung 6)

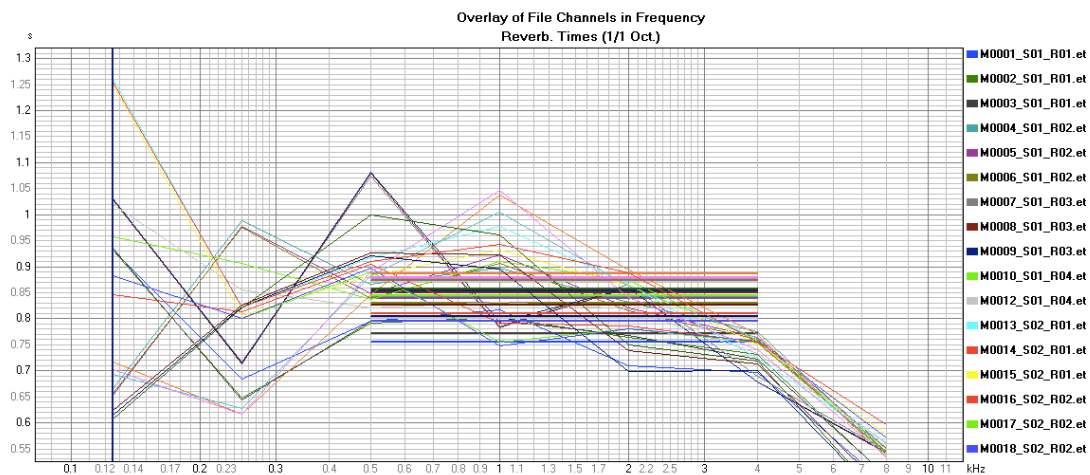


Abbildung 5: EDT der Messungen

Außerdem ist eine hohe Übereinstimmung zwischen der angelegten Geraden und der Schröderkurve notwendig, um eine Aussage über die Nachhallzeit treffen zu können. Die Korrelation beträgt bei unseren Messungen mindestens einen Wert von $r = 0,999$, meistens wird sogar die maximale Übereinstimmung $r \approx 1,000$ erreicht. (s. Abbildung 6)

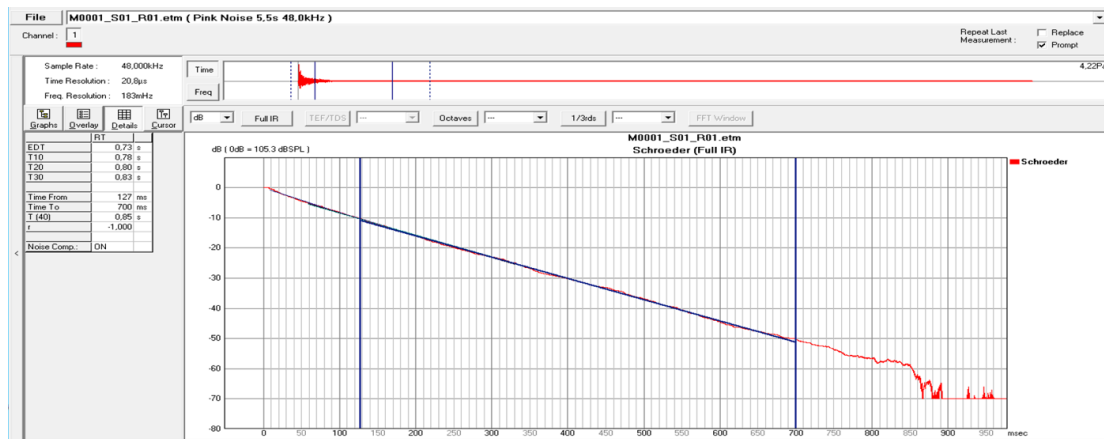


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Interpolation der Nachhallzeit über den Schröderplot

Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig und kann auch im Schröderplot in den einzelnen Oktavbändern grafisch dargestellt und interpoliert werden. Auch dabei ist auf die EDT und den Korrelationsfaktor zu achten.

Messung	Position	RT 60 [s]	RT (125Hz) [s]	RT (250Hz) [s]	RT (500Hz) [s]	RT (1kHz) [s]	RT (2kHz) [s]	RT (4kHz) [s]	RT (8kHz) [s]
1	1 1	0,85	0,84	0,79	0,85	0,86	0,81	0,73	0,57
2	1 1	0,87	0,80	0,91	0,90	0,87	0,86	0,77	0,58
3	1 1	0,89	0,81	0,89	0,88	0,88	0,84	0,76	0,61
4	1 2	0,85	0,87	0,88	0,88	0,89	0,84	0,77	0,61
5	1 2	0,86	0,83	0,88	0,88	0,89	0,84	0,78	0,62
6	1 2	0,85	0,89	0,84	0,95	0,87	0,82	0,80	0,64
7	1 3	0,86	0,84	0,85	0,85	0,91	0,89	0,79	0,58
8	1 3	0,86	0,85	0,86	0,85	0,90	0,87	0,81	0,60
9	1 3	0,86	0,84	0,86	0,85	0,88	0,87	0,81	0,62
10	1 4	0,86	1,15	0,81	0,83	0,90	0,89	0,81	0,62
11	1 4								
12	1 4	0,84	0,98	0,82	0,83	0,85	0,88	0,84	0,64
13	2 1	0,87	0,87	0,85	0,84	0,88	0,92	0,79	0,55
14	2 1	0,88	0,89	0,92	0,89	0,88	0,90	0,81	0,59
15	2 1	0,86	0,87	0,85	0,85	0,86	0,89	0,80	0,59
16	2 2	0,87	0,80	0,84	0,86	0,95	0,92	0,79	0,62
17	2 2	0,86	0,79	0,82	0,83	0,94	0,91	0,78	0,63
18	2 2	0,86	0,79	0,81	0,83	0,91	0,91	0,78	0,59
19	2 3	0,87	0,81	0,79	0,91	0,88	0,87	0,80	0,65
20	2 3	0,88	0,83	0,84	0,92	0,89	0,88	0,79	0,61
21	2 3	0,86	0,82	0,82	0,92	0,87	0,87	0,79	0,62
22	2 4	0,85	0,81	0,80	0,83	0,88	0,93	0,79	0,60
23	2 4	0,83	0,81	0,79	0,81	0,90	0,87	0,77	0,63
24	2 4	0,89	0,82	0,86	0,83	0,92	0,95	0,81	0,70

Bei der Messung fällt auf, dass bei der Messposition-Kombination 1 (M1-3) für das Oktavband um 250 Hz eine etwas schlechtere Korrelation mit der Geraden existiert. Gleiches gilt für die Messungen 4-6 im 125 Hz Oktavband. Die Messung Nummer elf ist aufgrund eines technischen Fehlers nicht vorhanden. Dies kann allerdings aufgrund der Vielzahl der Werte vernachlässigt werden. Außerdem liegt im selben und im folgenden Messblock (M10-15) eine etwas längere Nachhallzeit bei 125Hz im Vergleich zu den anderen Messwerten vor. Bei den Messungen 16-18 ist die Nachhallzeit leicht erhöht bei 1kHz/2kHz - auch im Oktavband 500 Hz. Solche Erhöhungen der Nachhallzeit können auf Eigenmoden des Raumes zurückzuführen sein.

	RT 60 [s]	RT [s] (125Hz)	RT [s] (250Hz)	RT [s] (500Hz)	RT [s] (1kHz)	RT [s] (2kHz)	RT [s] (4kHz)	RT [s] (8kHz)
Mittelwert	0,862	0,853	0,843	0,864	0,890	0,880	0,79	0,612
Standardabweichung	0,014	0,078	0,037	0,037	0,025	0,035	0,022	0,032

Wird der Mittelwert der Messungen gebildet, so ergibt sich eine Nachhallzeit $RT_{60} = 0,862$ s. Auch die frequenzabhängigen Nachhallzeiten befinden sich in etwa in diesem Bereich. Betrachtet man die beiden oberen Oktavbänder, so ist eine deutliche Verkürzung der Nachhallzeit zu erkennen. Die Reverberation Time bei 8 kHz ist circa 2,5 Sekunden kürzer als im Durchschnitt. Hohen Frequenzen werden also besser von den Wänden absorbiert als die restlichen Frequenzen.

$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} =$	r_H [m]	r_H [m] (125 Hz)	r_H [m] (250 Hz)	r_H [m] (500 Hz)	r_H [m] (1 kHz)	r_H [m] (2 kHz)	r_H [m] (4 kHz)	r_H [m] (8 kHz)
	0,850	0,855	0,860	0,849	0,837	0,841	0,888	1,009

Mit Hilfe des Volumens ($191,62 \text{ m}^3$) und den frequenzabhängigen Nachhallzeiten, lassen sich die ebenfalls frequenzabhängigen Hallradien bestimmen, also die Entfernung von der Schallquelle, in der das diffuse Schallfeld beginnt. Im gegebenen Raum ist der geringste Hallradius bei der längsten Nachhallzeit im Oktavband 1 kHz etwa 0,837 m lang. Wichtiger jedoch ist der längste berechnete Hallradius bei den hohen Frequenzen, in einer Entfernung von 1,009 m. Bei unserer Vorkalkulation haben wir dementsprechend die richtige Entscheidung getroffen, den Abstand der Messinstrumente zu vergrößern.

Als Nutzungsart wird für den Raum das Profil A1 „Musik“ gewählt. Betrachtet man die gemessene Nachhallzeit mit der genormten Nachhallzeit, fällt auf, dass die Soll-Nachhallzeit T_{soll} (s. Abbildung 7) beim gegebenen Raumvolumen ($191,62 \text{ m}^3$) und der festgelegten Nutzungsart mit $T_{\text{soll}} \approx 1,1 \text{ s}$ abweicht.

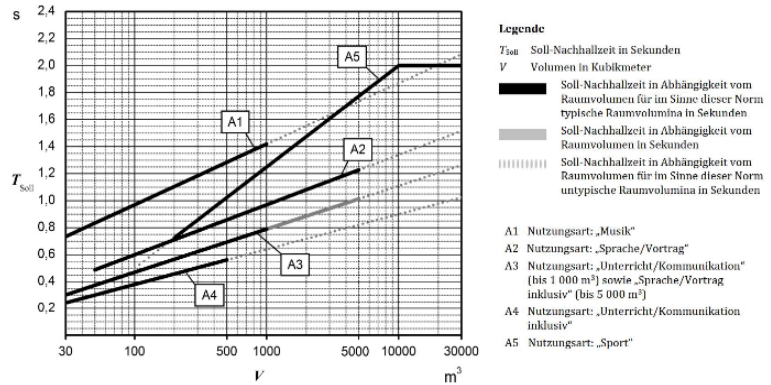


Abbildung 7: Bestimmung der Soll-Nachhallzeit nach Volumen und Nutzungsart

$T_{\text{ist}} = 0,862 \text{ s}$ ist deutlich kürzer als er sein soll und weicht somit von der Norm ab. Der Raum demnach etwas zu trocken.

Betrachtet man den Toleranzbereich (s. Abbildung 8) der Norm, darf die Nachhallzeit im mittleren Frequenzbereich maximal 20% unter dem Normwert liegen. Die untere Toleranzgrenze befindet sich im Bereich von 250 Hz bis 2 kHz bei 0,88 Sekunden. Für diesen Bereich befinden sich nur die Oktavbänder 1kHz und 2kHz knapp im Toleranzbereich. Ganz tiefe Frequenzen benötigen für die Nutzungsart Musik eine längere Nachhallzeit, sodass wir im 135 Hz

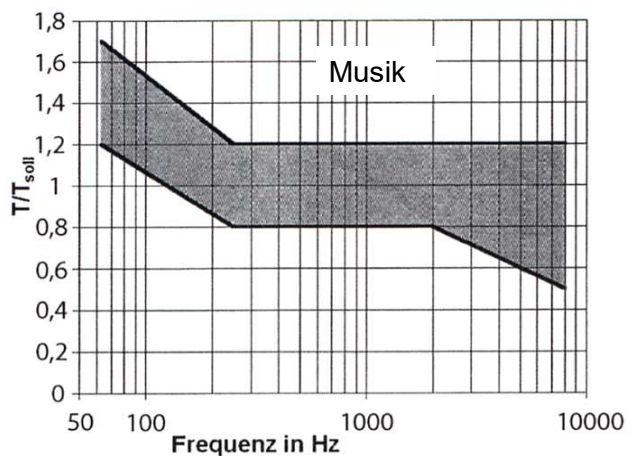


Abbildung 8: Frequenzabhängiger Toleranzbereich der Nachhallzeit

Oktavband mindestens die Soll-Nachhallzeit erreichen müssen. Der Toleranzbereich für hohe Frequenzen größer 2 kHz wird etwas breiter, sodass auch kürzere Nachhallzeiten im Toleranzbereich liegen und sich die Nachhallzeiten für 4 kHz und 8 kHz auch knapp über dem Toleranzbereich liegen. Insgesamt sollte eine Optimierung der Raumakustik für die zu kurze Nachhallzeit vorgenommen werden, um eine normgerechte Beschallung gewährleisten zu können.

Die genormten Nachhallzeit Soll-Werte beziehen sich in der Nutzungsart A1 „Musik“ auf klassische und romantische Musik, für die Wiedergabe von Pop-Musik werden wenig Aussagen getroffen, sodass sich an den Vorgaben der herkömmlichen Musik orientiert wird.

4.5 Ergebnisse und Auswertung Sprachverständlichkeit

Im Rahmen raumakustischen Bewertung gibt es verschiedene Parameter - die Sprachverständlichkeit und Durchsichtigkeit des Raumes. Im Folgenden wird auf das Klarheitsmaß C80 für Musik, sowie das Deutlichkeitsmaß C50, den Artikulationsverlust (AICons) und den Speech Transmission Index (STI) für Sprache eingegangen.

Da die Hauptnutzungsart des Raumes die Darbietung von Musik ist, ist das Klarheitsmaß ein wichtiger Parameter. C80 beschreibt die Durchsichtigkeit von Musik im Raum, das heißt die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne und die Unterscheidbarkeit

$$C_{80} = 10 \lg \left[\frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \text{ in dB}$$

C ₈₀	Bedeutung
≥ -1,6 dB	ausreichende musikalische Klarheit für klassische Musik (Mozart, Haydn)
≥ -4,6 dB	ausreichende musikalische Klarheit für romantische Musik (Brahms, Wagner)
-3 dB ≤ C ₈₀ ≤ +4 dB	annehmbare Kompromiss
≥ -5 dB	für sakrale Musik

Abbildung 9: Berechnung und Bewertung C80

gleichzeitig von verschiedenen Instrumenten erzeugter Klänge. Hierfür wird die Anfangsschallenergie (0...80 ms) ins Verhältnis zur Gesamtschallenergie gesetzt (s. Abbildung 9) berücksichtigt, allerdings nicht der Einfluss von Störschall. C80 wird über die verschiedenen frequenzabhängigen Werte gemittelt.

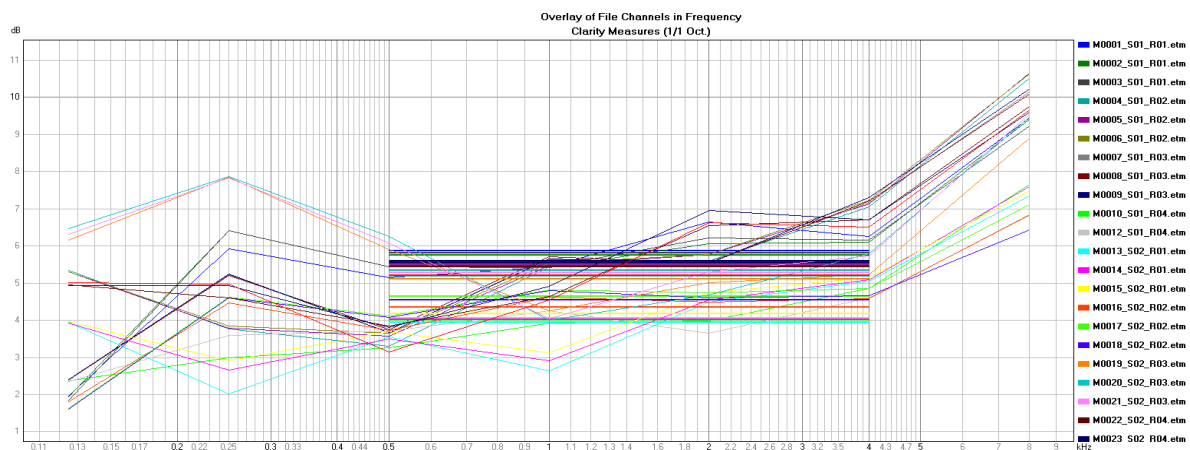


Abbildung 10: Messkurven von C80

Die C80 Messung des Raumes (s. Abbildung 10) liegt gemittelt zwischen 4...6 dB. Im Kontext von klassischer Musik liegen die Werte in einem optimalen Bereich, mit hoher musikalischer Durchsichtigkeit. Dabei fällt auf, dass es große Abweichungen in den tiefen Frequenzen gibt und die Durchsichtigkeit in den oberen Oktavbändern > 4 kHz steigt. Je nach Messposition gibt es Abweichungen zwischen den Graphen.

Um eine vollständige Raumakustik-Analyse durchzuführen, wird auch auf die Sprachhörbarkeit im Raum eingegangen. Das Deutlichkeitsmaß C50 (s. Abbildung 11) beschreibt das Verhältnis von Direkt- zu Diffusschall (0...50 ms). Je höher der Wert des Deutlichkeitsmaßes ist, desto besser ist auch die Sprachverständlichkeit.

$$C_{50} = 10 \lg \left[\frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right] \text{ in dB}$$

C ₅₀	Bedeutung
0 dB	Energie der ersten 50 ms (inklusive Originalschall) ist genauso groß wie die Energie aller späteren Reflexionen
> 2 dB	sehr gute Verständlichkeit
-3dB ... 2 dB	gute Verständlichkeit
> -8 dB	ausreichende Verständlichkeit

Abbildung 11: Berechnung und Bewertung C50

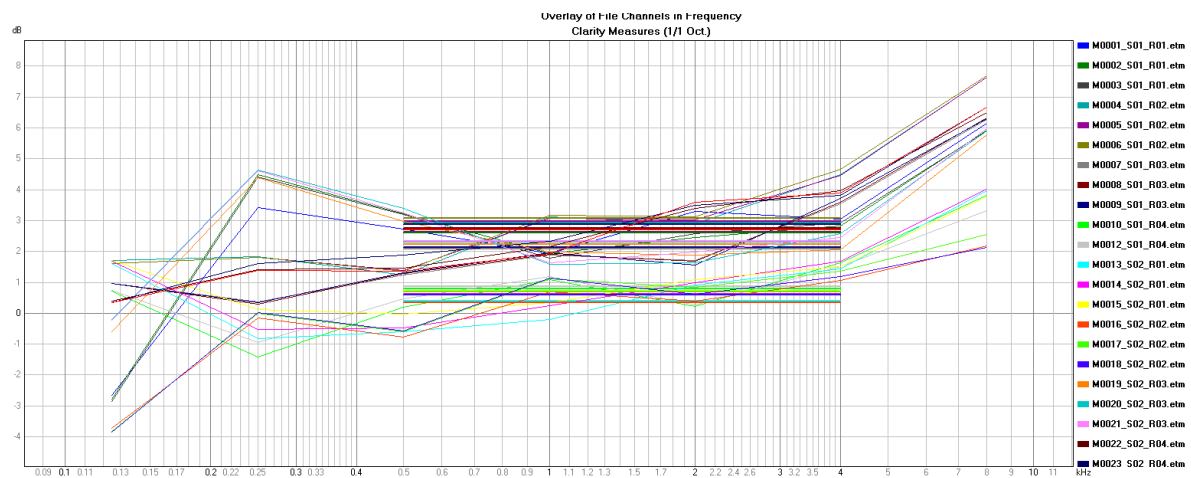


Abbildung 12: Messung C50

Die C50 Messung (s. Abbildung 12) zeigt Werte zwischen 0...3 dB, daher kann man auf eine gute bis sehr gute Sprachverständlichkeit schließen.

Weitere Verständlichkeitsskalen sind der Artikulationsverlust *AICons* (s. Abbildung 13) und der *Speech Transmission Index (STI)*, bei denen das vorhandene Nutzsignal zum Störschall ins Verhältnis gesetzt wird.

$$AI_{cons} \approx 0,625 \cdot (r_{QH} / r_H)^2 \cdot T \%$$

T: Nachhallzeit
 r_{QH} : Abstand zur Schallquelle
 r_H : Hallradius

AI_{cons}	Bedeutung
< 3%	ideale Verständlichkeit
3.. 8%	sehr gute Verständlichkeit
8..11%	gute Verständlichkeit
> 11%	befriedigende Verständlichkeit
> 20%	unbrauchbare Verständlichkeit

AI_{cons} wird für die 1 kHz- oder die 2 kHz-Oktave angegeben (frequenzabhängige Darstellungen sind nicht üblich)

Abbildung 13: Berechnung und Bewertung *AICons*

Für die Ermittlung von *AICons* wird die Nachhallzeit, der Abstand zur Schallquelle und der Hallradius benötigt. Die Skalen können ineinander umgerechnet werden (s. Abbildung 14) und bieten eine normgerechte Beurteilung der Sprachverständlichkeit.

$CIS = 1 + \log(STI)$ Allgemeine Verständlichkeitsskala		$AI_{cons} = 10^{\frac{1-STI}{0.45}}$ Farrell-Becker-Gleichung				
STI-Wert	CIS-Wert	AI_{cons} in %	Einstufung DIN EN 60268-16	Silbenverständ- lichkeit in %	Wortverständ- lichkeit in %	Satzverständ- lichkeit in %
0...0,3	0...0,48	100...36	schlecht	0...32	0...37	0...75
0,3...0,45	0,48...0,65	36...17	schwach	32...61	37...68	75...93
0,45...0,6	0,65...0,78	17...8	angemessen	61...85	68...88	93...98
0,6...0,75	0,78...0,87	8...3,6	gut	85...98	88...98	98...100
0,75...1	0,87...1	3,6...1	ausgezeichnet	98...100	98...100	100

Abbildung 14: Vergleich und Bewertung verschiedener Sprachverständlichkeitsskalen

Betrachtet man die mit EASERA berechneten STI- und *AICons*-Werte (s. Abbildung 15), kann die Sprachverständlichkeit des Raumes als nach Norm DIN EN 60668-16 ‚gut‘ eingestuft werden.

Der Artikulationsverlust befindet sich zwischen 4,3 und 5,9 % und ist mit einer geringen Standardabweichung von 0,5 % als Aussagekräftige Messung zu bewerten. Dasselbe gilt für den STI-Wert dieser liegt zwischen 0,62 und 0,68 (Einstufung: gut).

STI, MTF, MTI		
	STI	$AI_{Cons} [\%]$
M0024_S02_R04.etm	0,674	4,408
M0001_S01_R01.etm	0,673	4,452
M0002_S01_R01.etm	0,671	4,481
M0003_S01_R01.etm	0,671	4,504
M0004_S01_R02.etm	0,676	4,383
M0005_S01_R02.etm	0,676	4,376
M0006_S01_R02.etm	0,678	4,336
M0007_S01_R03.etm	0,657	4,856
M0008_S01_R03.etm	0,656	4,878
M0009_S01_R03.etm	0,657	4,848
M0010_S01_R04.etm	0,641	5,284
M0012_S01_R04.etm	0,634	5,487
M0013_S02_R01.etm	0,622	5,860
M0014_S02_R01.etm	0,631	5,583
M0015_S02_R01.etm	0,631	5,569
M0016_S02_R02.etm	0,632	5,548
M0017_S02_R02.etm	0,637	5,394
M0018_S02_R02.etm	0,632	5,536
M0019_S02_R03.etm	0,655	4,889
M0020_S02_R03.etm	0,665	4,650
M0021_S02_R03.etm	0,665	4,638
M0022_S02_R04.etm	0,678	4,334
M0023_S02_R04.etm	0,679	4,292
Average	0,656	4,895
Std. Dev.	0,019	0,505
Maximum	0,679	5,860
Minimum	0,622	4,292

Abbildung 15: Messwerte STI + *AICons*

4.6 Ergebnisse und Auswertung weitere Parameter

Als letzten Punkt der Raumakustik-Analyse wird auf zwei spezielle Messgrößen beispielhaft eingegangen.

Die Funktion *Echo Music* erlaubt dem Hörer den Umstand des Doppelhörens auch objektiv zu bewerten. Übersteigt der Verlauf der Kurve den Wert 1,8 (bei trainiertem Gehör 1,5), werden bei entsprechend kritischer Musik diese Reflexionen als störendes Echo wahrgenommen.

Da sich der Graph der Messung (s. Abbildung 16) nicht oberhalb der braunen, oder roten Grenze befindet, sind objektiv keine Echos wahrnehmbar.

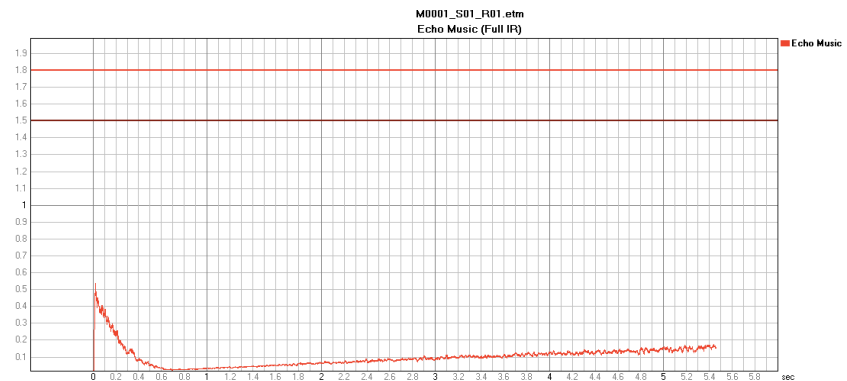


Abbildung 16: Darstellung Echotime

Die *Center Time* ist der Schwerpunkt der integrierten Energie. Dieser Zeitpunkt markiert die Zeit, zu der die bereits angekommene Energie der noch eintreffenden Energie entspricht. Es ist ein Indikator dafür, ob die Energie zeitlich breit verschmiert oder eher konzentriert ist. Für eine zufriedenstellende Sprachverständlichkeit sollte die Center Time kürzer als 130 ms sein. Für die Messung gilt dieser Richtwert. (s. Abbildung 17)

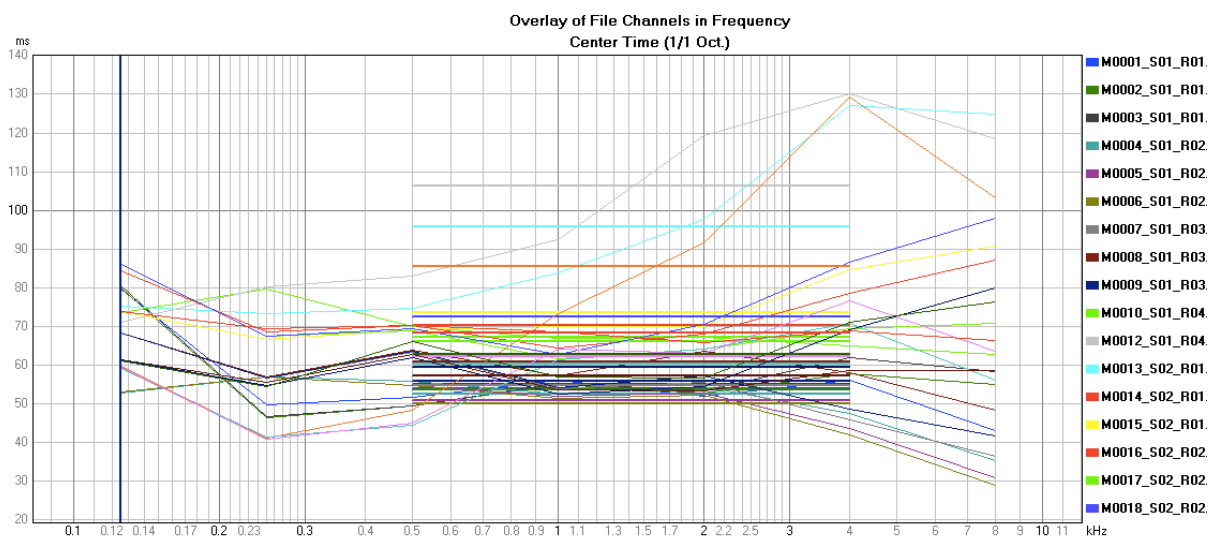


Abbildung 17: Darstellung Center Time

5 Beschallungsanlage

5.1 Einleitung

Als Ausgangspunkt soll angenommen werden, dass in unserem Raum eine Anlage mit zwei *d&b audiotechnik* Q7- Lautsprecher sowie einem Q-Sub Subwoofer installiert ist. Diese sollen intuitiv aufgestellt worden sein, wie es ein nicht-ausgebildeter Beschallungstechniker machen würde. (s. Abbildung 18).

Das heißt beide Q7-Lautsprecher stehen möglichst nah an beiden seitlichen Wänden sowie der Rückwand und strahlen in den Raum ab. Es ergeben sich Abstände zu den Wänden von ca. 1 Meter, der Abstand zur Rückwand beträgt ungefähr 1,7 Meter und die Lautsprecher befinden sich auf einer Höhe von 1,6 Meter. Der Q-Sub steht zwischen den Lautsprechern ungefähr mittig auf dem Boden. Diese Anordnung soll messtechnisch erfasst und später in der Simulation in EASE optimiert werden.

Zunächst wird eine theoretische Beschallungsanlage entworfen, wobei Größen wie der Kalkulationspegel oder das Bündelungsmaß sinnvoll angenommen werden sollen und die elektrische Leistung dadurch berechnet wird. Anhand dessen kann beurteilt werden, ob die eingebaute Anlage angemessen ist.

Um die Beschallungsanlage genauer zu erfassen, wird ein Q7-Lautsprecher ausgemessen. Diese Messung kann als Kontrolle des Datenblatts dienen. Geht man davon aus, dass die Angaben im Datenblatt korrekt sind, kann auch der Lautsprecher auf Verschleiß überprüft werden. Die Aufnahme der Abstrahlcharakteristik soll beispielhaft als Vergleichsgröße mit dem Isobar im Datenblatt dienen. Es kann daraus auch der horizontale Abstrahlwinkel abgeleitet werden.

Anhand von entfernungsabhängigen Schalldruckmessungen soll das diffuse Schallfeld in unserem Raum genauer untersucht werden. Dazu wird mit einem Lautsprecher ein Pegel von 104 dB in einer Entfernung von 1 Meter eingestellt. Anschließend werden Pegelmessungen in Entfernungen von 1 Meter-Schritten durchgeführt und der Pegelabfall beurteilt. Ein zweiter Versuch soll die erste Messung bestätigen, wobei hier die gesamte Anlage angeschlossen wird.

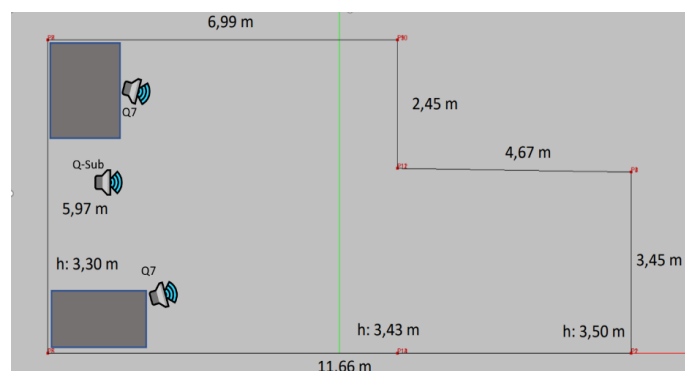


Abbildung 18: Beschallungsanlage mit zwei *d&b audiotechnik* Q7 Lautsprechern und einem Q-Sub Subwoofer.

5.2 Entwurf einer Beschallungsanlage

Um eine Beschallungsanlage für diesen Raum zu entwerfen, soll die für einen Kalkulationspegel benötigte elektrische Leistung berechnet werden. Dazu wird folgende Formel¹ verwendet:

$$L_r = L_K - C + 10 * \log_{10}(P_{el}) \text{dB} + 17 \text{ dB} - 10 * \log_{10}(A) \text{dB}$$

umgestellt nach P_{el} :

$$P_{el} = 10^{\frac{L_r - L_K + C + 10 * \log_{10}(A) \text{dB}}{10}}$$

mit: L_r : Schallpegel im Diffusen Schallfeld;

C : Bündelungsmaß;

A : äquivalente Absorptionsfläche

Annahme:

$C = 9$ (90x60 [°] Abstrahlwinkel berechnet mit Molloy-Equation);

$L_K = 104 \text{ dB}$ (Kennschallpegel Q7);

$L_r = 104 \text{ dB}$ (Kalkulationspegel für Musik bei 1-2 kHz) (s. Abbildung 19);

$A = 41,8 \text{ m}^2$

Kalkulationspegel in dB	Versorgungsbereich
86	Sprache in Bereichen mit geringem Störschallpegel (Konferenzräume, Büroräume, Foyers, Kirchen, Sportplätze, Freibäder)
92	Sprache und Unterhaltungsmusik in Bereichen mit angehobenem Störschallpegel (Kaufhäuser, Warteräume, Schalterhallen, Schwimmhallen, Verkehrsanalge, Großkundengebungen)
96	Sprache und Musik in Bereichen mit hohem Störschallpegel (Sporthallen, Großstadion, Freilichtbühnen)
104	Konzertübertragungen, Darbietungen elektronischer Musik, Theatereffekte (Theater, Opernhäuser, Konzertsäle, Mehrzwecksäle)

Die Werte gelten im Fernfeld bzw. im diffusen Schallfeld für den Frequenzbereich 1 kHz .. 2 kHz

(c) Prof. Dr. E. Wilk
HAW Hamburg

Abbildung 19: Kalkulationspegel für verschiedene Anforderungen von Beschallungsanlagen

Anhand der Formel lässt sich eine elektrische Leistung von 326 Watt berechnen. Diese ist notwendig, um im Raum einen Schalldruckpegel von 104 dB zu erzeugen. Verglichen mit der Belastbarkeit der Q7 aus dem Datenblatt befinden wir uns in einem sehr angemessenem Aussteuerungsbereich. Dort ist eine Belastbarkeit von 400 W (RMS) angegeben.

¹ Vgl. Vorlesung Beschallungstechnik Wintersemester 2021/22

6 Messung Q7-Lautsprecher

Im folgenden Abschnitt wird ein einzelner Q7-Lautsprecher durchgemessen. Ziel ist es, eine exemplarische Messung durchzuführen und mit den Angaben des Q7-Datenblatts zu vergleichen.

6.1 Aufbau und Durchführung des Versuchs

Zur Messung des Q7-Lautsprechers wird die horizontale Abstrahlcharakteristik aufgenommen. Das sich daraus ergebende Polardiagramm wird dann mit dem Schalldruck-Isobar des Datenblatts verglichen. Die Messung soll beispielhaft Werte im Datenblatt kontrollieren und den verwendeten Lautsprecher überprüfen. Um ein Polardiagramm für die Abstrahlcharakteristik zu erstellen, wird in einem Halbkreis um den Lautsprecher in 10°-Schritten der Frequenzgang aufgenommen. Anhand der frequenzabhängigen Pegelunterschiede wird dann das Diagramm erstellt.

Für die Messung wird erneut EASERA als Messsoftware verwendet, das M2461 Messmikrofon, den CM-C2000 Mikrofonkalibrator, das RME Fireface Interface, einen *d&b audiotechnik* Q7-Lautsprecher, den *d&b audiotechnik* D6 Verstärker, einen digitalen Drehtisch, sowie notwendige Kabel. Der Drehtisch wird mit der Q7 auf eine Konstruktion gestellt, sodass sich der Lautsprecher auf einer Höhe von 1,65 Metern befindet. Somit ist der Abstand zur Decke und dem Boden maximal und die Ankunft der ersten Reflexionen möglichst spät. Da wir uns nicht in einem schalltoten Raum befinden und somit bei der Messung auch reflektierter Schall aufgenommen wird, soll in EASERA der Reflexionsschall abgeschnitten werden, dazu später mehr. Das Mikrofon befindet sich in einem Abstand von 0,50 Metern innerhalb des Hallradius, wodurch viel Direktschall aufgenommen.

Frühere Reflexionen sind so deutlicher in der Impulsantwort zu erkennen. Das vom Mess-Laptop ausgehende Messsignal wird an das Interface geschickt. Dieses sendet das Signal weiter an den D6 Verstärker, welcher das Signal mit einer internen Verstärkung von 0dB an den Lautsprecher weitergibt. Der Drehtisch wird über Netzwerk mit dem Messlaptop verbunden und über EASERA gesteuert (s. Abbildung 20). Als erstes werden in EASERA das Mikrofon und der Ausgang des Fireface kalibriert. Als Messsignal verwenden wir Rosa Rauschen mit einer Dauer von 5 Sekunden.

Mit einer EASERA-Messfunktion führen wir in einem Halbkreis um den Lautsprecher in 10°-Schritten Messungen durch. Als Startpunkt der Messreihe wählen wir 270°. Zuerst wird die seitliche Abstrahlung des Lautsprechers und in 10°-Schritten um die Vorderseite des Lautsprechers bis 90° aufgenommen. Folglich erhalten wir 19 Messungen, die als Grundlage für das Polardiagramm dienen.

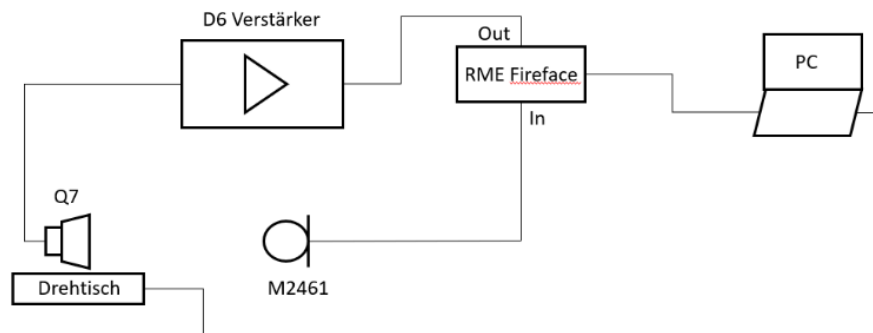


Abbildung 20: Messaufbau Blockschaltbild

6.2 Vorbereitung der Messergebnisse

EASERA ermöglicht es im Overlay mehrere Messungen übereinander zu legen. So können wir uns die Überlagerung aller Frequenzgänge innerhalb eines Graphen anzeigen lassen (s. Abbildung 21). Der Abfall des Schalldruckpegels für die seitlichen Abstrahlrichtungen ist deutlich zu erkennen. Auch die Impulsantwort kann überlagert betrachtet werden, wobei hier deutlich frühe Reflexionen zu sehen sind, die unerwünscht sind (s. Abbildung 22).

Bevor die Ergebnisse aus EASERA exportiert werden können, müssen die Impulsantworten aller Messungen angepasst werden. Lautsprecher-Messungen werden idealerweise im Freifeld durchgeführt beziehungsweise in einem schalltoten Raum, der die Freifeldbedingungen herstellt. Da in unserem Raum Schallreflexionen existieren, müssen diese aus dem Datensatz entfernt werden. Dazu wird bei jeder Messung ab dem Zeitpunkt, bei dem erste Reflexionen zu erkennen sind, alles Darauffolgende abgeschnitten, sodass nur der vordere Teil der Impulsantwort übrigbleibt.

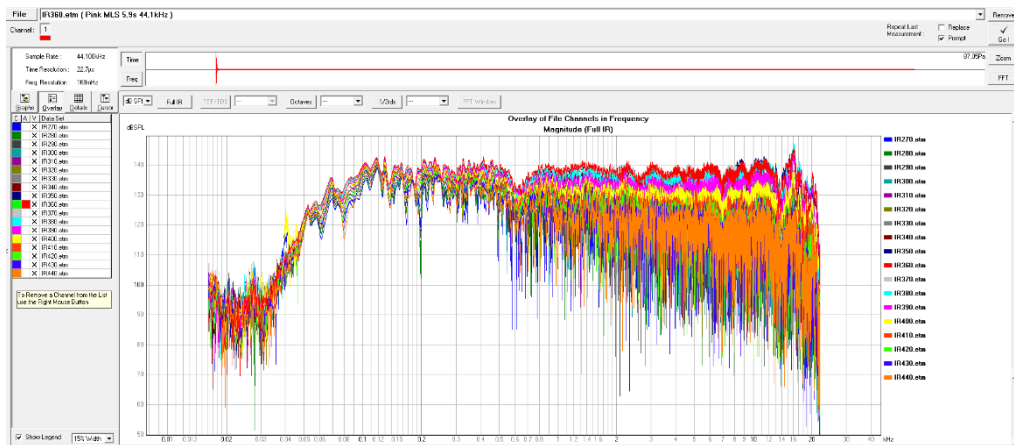


Abbildung 21: Überlagerung der Frequenzgänge aller Messungen. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die Impulsantwort wurde noch nicht gefenstert.



Abbildung 22: Überlagerung der Impulsantworten aller Messungen. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die Impulsantwort wurde noch nicht gefenstert. Die Schallreflexionen sind ab 20 ms deutlich zu erkennen und müssen entfernt werden.

Um den hinteren Datensatz der Impulsantwort abzuschneiden, muss in EASERA gefenstert werden.² Zuerst wird dafür die Impulsantwort mit der Funktion Move Arrival to Zero zeitlich zu Null verschoben. Anschließend können über die Marker Fenstergrenzen gesetzt werden, wobei die rechte Grenze des Fensters kurz vor den ersten Reflexionen liegen muss. Nach Anwendung eines Fensters, in unserem Fall Blackman, verschwinden die unerwünschten Reflexionen aus unserer Impulsantwort (s. Abbildung 23). Anhand dieser neuen Impulsantwort kann der Frequenzgang erstellt werden, wobei das Fenstern im Zeitbereich auch eine spektrale Unschärfe bedeutet.

² http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASERA12/EASERATutorial_EN.pdf

Im Frequenzbereich resultiert daraus eine geringere Auflösung (s. Abbildung 24). Gerade bei tiefen Frequenzen ist die Frequenzungenauigkeit zu sehen. Dies lässt sich allerdings nicht vermeiden, wenn wir die Schallreflexionen in der Impulsantwort entfernen wollen.

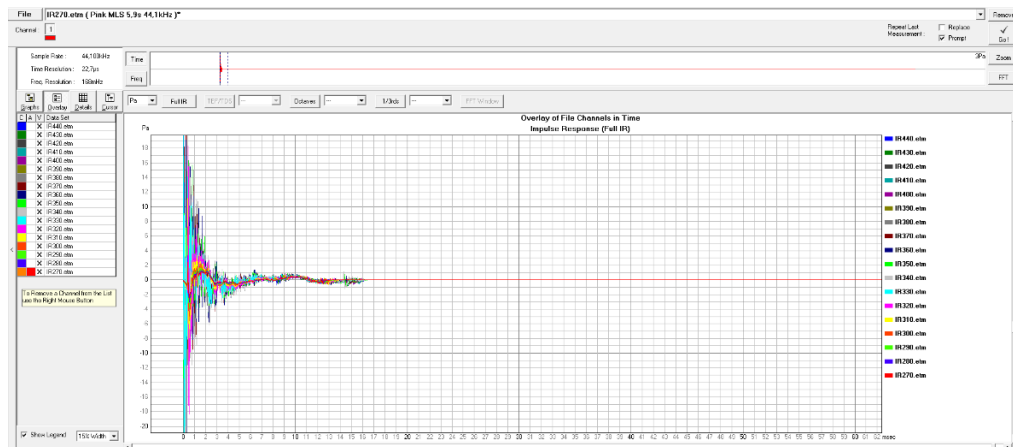


Abbildung 23: Überlagerung der Impulsantworten aller Messungen. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die Impulsantwort wurde so gefensterst, dass die Schallreflexionen entfernt wurden. Verwendet wurde ein Blackman-Fenster.



Abbildung 24: Überlagerung der Frequenzgänge, nachdem die Impulsantwort gefensterst wurde. Jede Messung wird mit einer anderen Farbe dargestellt. Die spektrale Unschärfe ist deutlich bei tiefen Frequenzen zu erkennen.

Die frequenzabhängigen Schalldruckpegel können jetzt für jedes Oktavband und jede Messung exportiert werden, um in Excel ein Polardiagramm zu erstellen.

Die Abstrahlcharakteristik der Q7 wird in Excel über ein Polardiagramm dargestellt. Dazu werden für alle Abstrahlrichtungen die Schalldruckpegel der Oktavbänder in einer Tabelle festgehalten (s. unten). Mit dieser Tabelle lässt sich das Polardiagramm erstellen.

Über eine zweite Tabelle können aus den jeweiligen Schalldruckpegeln die zugehörigen Schalldruckwerte berechnet und ebenfalls in einem Polardiagramm dargestellt werden (s. Abbildung 25). Zum Abgleich mit dem Isobar des Datenblatts wird jedoch nur das Polardiagramm mit den Schalldruckpegeln benötigt.

Um den Abstrahlwinkel zu ermitteln, muss bei 1000 Hz der Winkel herausgefunden werden, bei dem ein 6 dB Pegelabfall im Vergleich zu dem Pegel bei 0° vorliegt. In unserem Fall liegt ein Verlust von 6 dB bei einem Winkel von ungefähr 35° in beide Richtungen vor. Demnach ergibt sich ein horizontaler Abstrahlwinkel von 70°. Dieser Wert passt ungefähr zu den Angaben im Datenblatt, in dem der horizontale Abstrahlwinkel mit 75° angegeben wird.

Des Weiteren soll die Abstrahlcharakteristik mit dem horizontalen Schalldruck-Isobar der Q7 verglichen werden (s. Abbildung 25). Zu sehen sind in dem Isobar die -6 dB und -12 dB Pegelabfallgrenzen, aufgetragen über die Frequenz von 125 Hz bis 16 kHz.

1/1_Oktave	16	31,5	63	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz	Hz
0°	121,8	120,9	131,6	139	138,4	137	139	138,1	137,4	137,9	136,9	dB
10°	121,7	121	131,5	138,9	138,3	136,9	138,6	137,9	136,9	138	137,3	dB
20°	121,1	120,5	131,2	138,5	137,8	136,2	137,2	136,6	135,2	137,1	137,1	dB
30°	120,4	120,2	130,7	137,9	137	135,1	135	134,3	132,5	134,1	133,6	dB
40°	118,5	118,7	129,9	137,1	136,1	133,8	132,5	131,2	128,7	129,3	128,4	dB
50°	109,7	112,7	128,7	135,9	135,5	132,6	129,1	127,6	124,9	123,7	120,9	dB
60°	108,7	111,4	127,6	135,1	134,3	130,9	126,6	124,5	121,1	118,5	114,6	dB
70°	108,6	110,6	126,6	134,2	133	129,5	124,5	121,7	118,1	114,1	109	dB
80°	108,5	109,8	125,6	133,5	131,8	128,4	122,5	119,4	115,8	111,2	105,7	dB
90°	113,2	115,4	124,6	132,4	130,2	127	120	116,7	113	107,6	100,2	dB
270°	113,2	115,4	124,6	132,4	130,2	127	120	116,7	113	107,6	100,2	dB
280°	113,7	115,9	125,4	133,1	131,5	127,7	121,9	118,6	114,7	109,8	103,3	dB
290°	114,4	116,7	126,3	133,8	132,7	128,7	123,7	120,9	117,2	113,1	107,4	dB
300°	114,4	117	127,2	134,7	133,9	130	125,8	123,5	120,1	117,2	112,4	dB
310°	114,5	117,4	128,1	135,6	135,1	131,7	128,2	126,5	123,6	122,2	118,2	dB
320°	115,2	118,3	128,9	136,4	136,3	133,4	130,9	129,8	127,7	127,8	125,2	dB
330°	121,5	116,2	130,3	137,6	136,7	134,3	134,1	133,5	131,3	133	131	dB
340°	119,9	118,8	130,9	138,3	137,6	135,8	136,5	136	134,3	136,5	135,4	dB
350°	121,1	120,1	131,3	138,8	138,2	136,6	138,2	137,6	136,4	138,2	136,4	dB

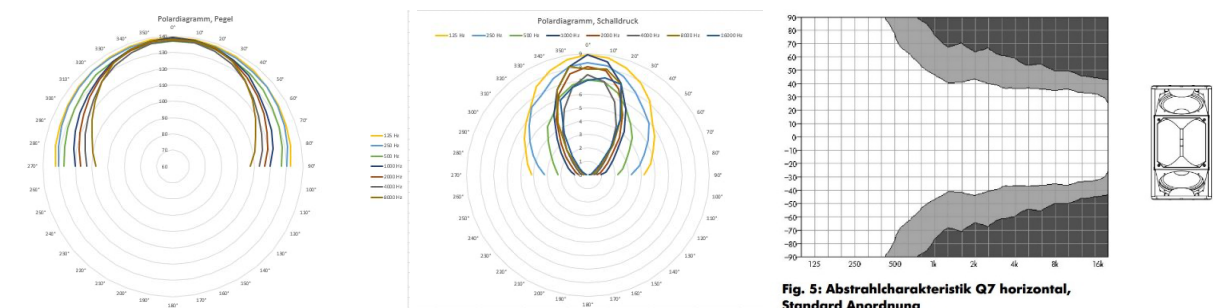


Abbildung 25: Polardiagramm Schalldruckpegel (links), Polardiagramm Schalldruck (Mitte), Schalldruck-Isobar aus Q7 Datenblatt (rechts)

Die entsprechenden Winkel können der Ordinate entnommen werden. Da das Isobar bei 125 Hz anfängt und auch der Lautsprecher mit einem Frequenzgang von 100 Hz – 17 kHz angegeben wird (100 Hz mit *CUT mode*), werden die Oktavbänder 16 Hz, 31,5 und 63 Hz vorerst vernachlässigt. Das erste Oktavband, das wir mit dem Isobar vergleichen, liegt bei 125°. Auf dem Isobar ist zwar nach 90° kein Pegelverlauf mehr angegeben, allerdings kann anhand des Kurvenverlaufs von -6 dB vermutet werden, dass die 6 dB-Grenze deutlich außerhalb der 90° liegen müsste. Bei unserer Messung ist der 6 dB-Abfall zwischen 80° und 90° zu beobachten, unser -6 dB-Abstrahlwinkel ist also etwas kleiner. Bei dem nächsten Oktavband 500 Hz sind -6 dB bei etwa 75° im Isobar abzulesen. In unserem Polardiagramm liegt dieser Pegelabfall allerdings schon bei 55° vor. Dieser Wert liegt deutlich unter dem des Isobars. Auch bei 1 kHz liegt unser -6dB Wert mit knapp 40° unter dem des Isobars mit fast 50°. Bei 1 kHz ist auch die -12 dB- Grenze im Isobar bei 80° abzulesen, während die -12 dB bei unserer Messung schon bei 60° liegen. Bei dem Oktavband von 2 kHz sind aus dem Isobar die -6 dB und -12 dB-Grenzen bei etwa 40° und 60° abzulesen, was ungefähr mit unseren Werten von knapp 40° und gut 50° übereinstimmt. Auch bei den folgenden Oktavbändern 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz stimmen die Winkel unserer Messung mit den Winkeln aus dem Isobar in etwa überein, allerdings erhalten wir weiterhin kleinere Winkel für die -6 dB und -12 dB-Grenzen.

Bei dem Vergleich der Messung mit den Werten des Isobars vom Datenblatt der Q7 ist zu erkennen, dass die gemessenen Winkel bei -6 dB und -12 dB bei jedem Oktavband unter den abgelesenen Winkeln aus dem Isobar liegen. Unsere gemessene Abstrahlcharakteristik ist also deutlich kleiner als die vom Hersteller angegebene Abstrahlcharakteristik im Schalldruck-Isobar. Es ist allerdings zu beachten, dass in unserem Versuch durch das Fenstern der Impulsantwort im Zeitbereich eine Unschärfe im Frequenzbereich entstanden ist. Da bei niedrigen Frequenzen größere Abweichungen der Abstrahlwinkel sind als bei höheren Frequenzen lässt sich vermuten, dass die geringere spektrale Auflösung ein Grund für dieses Verhalten sein kann. Ein weiterer Grund für die Abweichungen kann der allgemeine Gebrauch und damit verbundene Verschleiß des Q7-Lautsprechers sein.

7 Messung der Beschallungsanlage

Im folgenden Abschnitt werden Pegelmessungen mit der gesamten Anlage durchgeführt. Dabei soll besonders das diffuse Schallfeld bewertet werden.

7.1 Einführung und Versuchsaufbau

Anhand des Abfalls des Schalldruckpegels mit zunehmender Entfernung wird das diffuse Schallfeld in unserem Raum bewertet. In einem geschlossenen Raum entsteht idealerweise ein Schallfeld, welches aus zwei Bereichen besteht. Innerhalb des Hallradius existiert das Nahfeld, bei dem der Schalldruck exponentiell mit zunehmender Entfernung abnimmt. Außerhalb des Hallradius ist dies nicht mehr der Fall, da hier durch die Reflexionen an Wand, Decke, Bode, Möbel etc. ein diffuses Schallfeld entsteht. In diesem diffusen Schallfeld ist der Schalldruck überall gleich, egal an welcher Stelle man sich im Raum befindet oder wie weit man von der Schallquelle entfernt steht. Um herauszufinden, wie sich der Schall in dem diffusen Schallfeld in unserem Raum verhält, nehmen wir eine Messreihe mit einem Q7-Lautsprecher auf, bei der wir an unterschiedlichen Entfernungen zur Schallquelle den Schalldruckpegel messen. Dazu stellen wir in der Mitte des Raumes den Lautsprecher in einer Höhe von 1,6 Metern auf. Weißes Rauschen wird mit einem Schalldruckpegel von 104 dB in einem Meter Entfernung abgespielt. Eine Messung wird innerhalb des Hallradius bei einer Entfernung von 0,5 m durchgeführt und alle weiteren Messungen außerhalb des Hallradius in Schritten von 1m. Der Schalldruckpegel wird mit dem mobilen Messgerät NTi audio XL2 gemessen. Die Entfernung wird mit dem LASER-Entfernungsmessgerät überprüft.

7.2 Auswertung

Die Messergebnisse zeigen einen Abfall des Schalldruckpegels außerhalb des Hallradius. Innerhalb des Hallradius verhält sich der Schalldruckpegel erwartungsgemäß und wird mit Halbierung der Entfernung um 3 dB lauter. Außerhalb des Hallradius nimmt der Schalldruckpegel bei zunehmender Entfernung ab, obwohl das im diffusen Schallfeld nicht sein sollte. In der Nähe des Lautsprechers nimmt bei der Verdopplung der Entfernung von 1 auf 2 Meter sowie 2 auf 4 Meter der Pegel um 3-4 dB ab, ähnlich wie es im Freifeld der Fall ist. Bei einem größeren Abstand von dem Lautsprecher nimmt der Pegel nur um knapp 2 dB ab, wenn der Abstand von 4 auf 8 Meter verdoppelt wird. Dies entspricht immer noch nicht den Bedingungen im optimalen diffusen Schallfeld, ist allerdings deutlich besser als bei

geringerem Abstand. Es ist somit festzuhalten, dass in unserem Raum kein ideales diffuses Schallfeld entsteht. Dafür scheint es zu wenig Reflexionen zu geben, Schall kann außerdem durch Wände durchdringen oder an Oberflächen absorbiert werden. Überprüft wird diese Erkenntnis mit einem zweiten Versuch, bei dem die gesamte Anlage, d.h. beide Q7 und der Q-Sub angeschlossen und im Raum an ihre Ausgangsposition gestellt werden. Mit dieser Aufstellung wird dann Musik abgespielt, die dem späteren Nutzen der Garage entsprechen soll (Hip-Hop, Techno, Schlager). Auch hier werden Messungen an unterschiedlichen Positionen und Entfernungen zu der Anlage durchgeführt. Für jedes Lied wird der Schalldruckpegel an drei Positionen im Raum mit unterschiedlichem Abstand zur Anlage aufgenommen. Da innerhalb eines Liedes durch Dynamik unterschiedliche Pegel entstehen können werden pro Messmikrofon-Position drei Messungen an derselben Stelle im Lied durchgeführt und diese anschließend gemittelt. Die gemittelten Werte können dann bezogen auf den Abstand zur Anlage verglichen werden. Bei den Liedern aus dem Genre Techno und Schlager ist bei jeder Position ein sehr konstanter Schalldruckpegel zu sehen und die Pegel nehmen bei zunehmender Entfernung zur Anlage ab. Bei der Messposition, welche den Lautsprechern am nächsten ist, wird bei beiden Genres ein Pegel von ca. 104 dB registriert. Die Pegelmessung bei dem am weitesten von der Anlage entfernten Punkt ist der Schalldruckpegel um 3-4 dB leiser. Bei dem Lied aus dem Bereich Hip-Hop sind große Schwankungen innerhalb der jeweiligen Positionen zu vermerken, weshalb diese Messung nicht zur Beurteilung hinzugefügt wird.

8 EASE-Simulation

8.1 Einleitung

In Zeiten immer fortschreitender und immer leistungsfähiger Hard- und Software, ist die computerbasierte Simulation in vielen Bereichen der Wissenschaft ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Hierbei werden Modelle zur Veranschaulichung komplexer Zusammenhänge erstellt. Im Bereich der Raumakustik und Beschallungstechnik hat sich die Computersimulation zu einem entscheidenden Planungswerkzeug entwickelt. Dieser Teil der Arbeit, befasst sich mit der Raumsimulation des gegebenen Raums, und dem Einsatz einer Simulationssoftware.

Ziel ist es, die Raumakustik und Beschallungstechnik zu simulieren und mit den gemessenen raumakustischen Größen aus Kapitel zwei ins Verhältnis zu setzen. Dabei sollen die Grenzen des Simulationsverfahrens mit den Grenzen der akustischen Modellvorstellungen verglichen werden. Ausschlaggebend ist die Frage, welche Erkenntnisse aus der akustischen Simulation abgeleitet werden können, in Bezug zur Optimierung des Raums.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Grundlagen von raumakustischen Simulationen erläutert und Vorstellung der Simulationssoftware EASE. Daraufhin soll der gegebene Raum simuliert, die Ergebnisse mit zuvor gesetzten Anforderungen verglichen und anschließend bewertet werden. Die bestehende Beschallungsanlage ist ebenfalls Teil der Simulation. Den Simulationsdaten soll eine anschließende Optimierung der Akustik und Beschallungsanlage folgen. Die Bewertungskriterien richten sich nach den entsprechenden Normen und Bezugswerten der Tontechnik.

Das Gesamtziel dieses Kapitels ist eine Untersuchung, inwieweit die akustische Computersimulation eines bestehenden Raums, als Entscheidungshilfe zur realen akustischen Abschätzung und Optimierung beitragen kann.

9 Raumsimulationen – Ein Überblick

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die allgemeinen Grundlagen einer computerbasierten Simulation von raumakustischen Größen erläutert. Im Anschluss wird dann der Einsatz der für das Praxisprojekt genutzten Simulationssoftware EASE vorgestellt.

9.1 Allgemeine Grundlagen

Alle Parameter und ihre Wirkzusammenhänge der Raumakustik basieren auf mathematischen und physikalischen Modellen, für die eine geeignete Implementierung in Simulationsprogrammen gefunden werden muss. Die Raumakustik kann in mehrere Bereiche unterteilt werden - die wellentheoretische und geometrische Raumakustik.

Die wellentheoretische Raumakustik basiert auf der mathematischen Wellengleichung. Durch die hohe mathematische Komplexität und in Bezug auf Rechendauer kommt sie überwiegend bei einfachen Raumstrukturen zum Einsatz. Ein Anwendungsgebiet ist beispielsweise die Simulation von *Raummoden* im Tieftonbereich. Kommt es zu einer phasengleichen Überlagerung der primären und der reflektierenden Welle so nennt man dies eine stehende Welle oder auch Raummode. Dem Schallfeld muss Energie entzogen werden, und zwar dort, wo der Schalldruck für die Eigenresonanzen des Raumes maximal wird. Hinzu kommt die Anregung des Raumes durch gegebene Lautsprecher mit ihrer Abstrahlrichtung.

Durch die wellentheoretische Raumakustik ist es möglich, alle Ausbreitungsformen des Schalls zu beschreiben und somit auch zu simulieren. Komplexe Zusammenhänge wie Brechung, Beugung oder Eigenfrequenzen in unregelmäßigen Räumen, gehen allerdings mit erhöhtem mathematischem Aufwand einher. Durch die mittlerweile immer leistungsfähigeren Computer ist das allerdings gut realisierbar.

Die geometrische Raumakustik basiert auf den Reflexionsgesetzen der Optik. Schallwellen werden durch „Schallstrahlen“ beschrieben. In der Raumakustik kommen jedoch nicht nur geometrische Reflexionen vor. Das Verhalten der verschiedenen Wellenlängen des Schalls auf Hindernisse, Begrenzungsflächen und deren Oberflächenbeschaffenheit zu beschreiben stellt ein Problem dar. In Computersimulationen werden Reflexionen mit dem Prinzip der Strahlenverfolgung (*Ray Tracing*) und Spiegelquellen simuliert. In der einfachsten Form geht von der Schallquelle ein kurzer Impuls aus, der auf eine naheliegende Wandfläche als Spiegel trifft. Den Reflexionsgesetzen geht hervor, dass der Eintrittswinkel gleich dem Austrittswinkel ist. Bei gekrümmten Wänden gelten die Reflexionsgesetze von Hohlspiegeln. Die Komplexität des Raumes sorgt auch hier für längere Rechenzeiten der Simulation.

9.2 Simulationssoftware EASE

Für den Versuch wird die, von der Berliner Firma Ahnert Feistel Media Group (AFMG), Simulationssoftware EASE 4.4 gewählt. Die Software wurde auf den in Abschnitt 9.1 beschriebenen Gesetzen der geometrischen Raumakustik programmiert. Auch die Methode von Ray Tracing und der Spiegelschallquellen sind Basis der Software.

In EASE (EASE 4.4) befasst sich die Primärstruktur mit der grundlegenden Raumgeometrie. Die Dimensionen des Raumes werden durch numerische und graphische Eingaben festgelegt. Die einzelnen Eckpunkte des Raummodells werden im Anschluss zu Ebenen zusammengeführt, so dass der Boden, Wände, Objekte und die Decke als einzelne Flächen zu betrachten sind. Die Sekundärstruktur befasst sich mit den Materialien der einzelnen Oberflächen des Raumes. Die Absorptionsgrade können für jede Fläche entweder aus einer vorgegebenen Datenbank importiert, oder frequenzabhängig in einer Tabelle selbst erstellt werden.

Das Simulationsprogramm EASE ist hinsichtlich der Beschallungstechnik ein sehr weit verbreitetes Werkzeug. Viele Lautsprecher-Hersteller haben ihre Daten aus modernen Impulsantwortmessungen implementieren lassen. Darunter befinden sich Punktstrahler, zusammengesetzte Punktstrahler als Cluster, Line Arrays und gemischten Lautsprecheranordnungen. Die raumakustische Simulation mit und ohne Beschallungsanlagen ist als eine modellhafte Approximation (Annäherung) anzusehen und unterliegt auch einer Vielzahl von Einschränkungen. EASE geht beispielsweise immer von akustischen Quellen mit sphärischer Wellenfront und entfernungsunabhängiger Richtcharakteristik aus.³ Dabei wird jeder erstellte Cluster als eine Punktschallquelle betrachtet und ist nur im Fernfeld aussagekräftig.

In Abschnitt 14 wird zum Thema Lärmschutz eine entsprechende Empfehlung ausgesprochen. Da die Simulation leider nur die Pegel im Inneren des Raumes beschreiben kann, können durch EASE also keine den Lärmschutz betreffenden Aussagen zum Pegel außerhalb getroffen werden.

³ <https://www.afmg.eu/en/ease-4-tutorial>

10 Durchführung der Simulation

Im folgenden Abschnitt wird der gegebene Raum simuliert und mit den realen Messdaten aus Kapitel 2 verglichen.

10.1 Ziel der Simulation

Ziel der Simulation ist es, die Messdaten aus Abschnitt 4 und somit die reale Bezugswerte annähernd zu erreichen. Die Simulation kann eine Messung nicht ersetzen und dient nur der vorherigen Planung.

Die bestehende Beschallungsanlage soll ebenfalls überprüft werden. Dabei soll der Abstrahlwinkel und die Pegelverteilung im Raum kontrolliert und ggf. optimiert werden.

10.2 Simulation der Primär- und Sekundärstruktur

Zunächst wird die thematisierte Primärstruktur aufgebaut. Voraussetzung dafür ist eine genaue Vermessung des Raumes. Jeder Fehler sorgt für eine Abweichung, die eine Verfälschung der Simulation zur Folge hat.

Die Primärstruktur (Raumdimension) wird in EASE über Koordinaten im metrischen System eingetragen. Die einzelnen Punkte (Vertex) werden dann mit dem Insert Face – Werkzeug zu Ebenen verbunden. Das Resultat ist ein 3D-Modell, dass den Raum in einer vereinfachten Form darstellt.

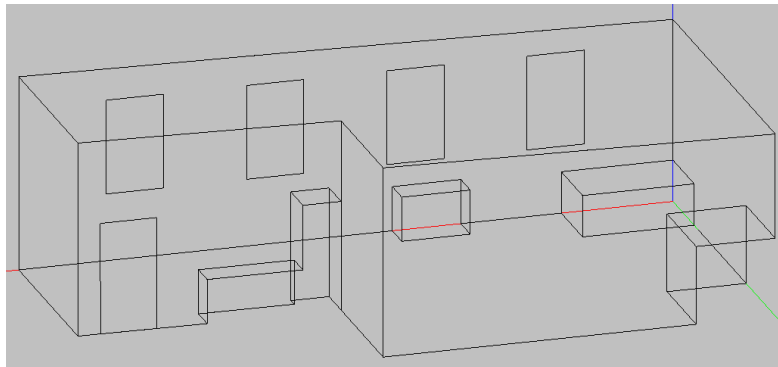


Abbildung 26: 3D-Modell der Primärstruktur des Raumes

Wie in Abbildung 26 zu erkennen ist, sind alle Objekte, die in den Raum hineinragen auch gleichzeitig der äußere Rand des Raumes. EASE bezieht sich immer nur auf die Flächen, die im Raum liegen. Wird z.B. eine Wandseite durch eine Box bedeckt, so wird die Wand nicht von Simulation einbezogen, sondern die Seitenwände der Box. Da EASE auf der geometrischen Raumakustik basiert, werden nur Oberflächen beachtet.

Die Flächen, die auf einer anderen Oberfläche liegen, können vereinfachend als eine *Two Fold* - Ebene konfiguriert werden. Die Ebene wird dann als zweiseitig betrachtet. Sowohl die Vorhänge an den Fenstern als auch die Tür sind *Two Fold* – Flächen.

Da nun die Primärstruktur des Raumes eingepflegt ist, folgt nun die Sekundärstruktur. Der Raum ist nämlich noch ohne Materialien mit den entsprechenden Absorptionsgraden. Damit die Simulation annähernd mit der Messung übereinstimmen, ist es wichtig die Materialien so genau wie möglich abzubilden. EASE 4.4 verfügt über mehrere Datenbanken verschiedener Materialien. Für den gegebenen Raum sind diese Datenbanken allerdings nicht ausreichend, da z.B. keine Vorlagen für dünnen Stoff oder auch die plastikbeschichtete Garagentür vorhanden sind. Deshalb müssen für einige Oberflächen eigene Materialien erstellt werden. Absorptionsgrade für weitaus mehr Materialien gibt es in der Literatur und im Internet, allerdings nur eingeschränkt. Der Absorptionsgrad ist frequenzabhängig. In EASE müssen die Koeffizienten (Absorptionsgrade) für mehr Frequenzen angegeben werden, als in den Tabellen im Internet vorliegen. In EASE reichen die Frequenzen von 100 Hz bis 10 kHz in sehr kleinen Zwischenschritten. In Tabellen aus dem Internet werden die Koeffizienten nur bei 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz angegeben. Um diese Werte trotzdem verwenden zu können müssen die Zwischenschritte mittels Approximation mathematisch ermittelt werden. In Excel erfolgt diese Annäherung durch eine Mittelung der gegebenen Werte, die im Anschluss in EASE übertragen werden können. Diese Methode zieht auch Fehler nach sich, da es sich eher um eine statische Annäherung als um tatsächliche Werte handelt.

Anhand eines Beispiels soll diese Vorgehensweise verdeutlicht werden. Das Material der Seitenwände ist leider nicht in den Vorlagen vorhanden. Es handelt es sich dabei um einen offenenporigen Backstein, der mit weißer Farbe angemalt wurde. Vergleichbar finden sich dazu die Materialwerte von unverputztem Backstein im Internet⁴. Die aufzufüllenden, fehlenden Werte werden gemittelt und anschließend in die Koeffizienten-Tabelle in EASE eingetragen. Daraus ergibt sich ein Diagramm, in dem der Absorptionsgrad den Frequenzen gegenübergestellt wird.



Abbildung 27: Absorptionsdiagramm des benutzerdefinierten Materials "Backstein offenporig"

⁴ <https://www.bilder-plus.de/absorptionsgrad.php> (14.02.2021, 21:11 Uhr)

Dieses Material wird lokal für das Simulationsprojekt gespeichert und kann im Anschluss den Seitenwänden zugeordnet werden.

Für die restlichen Oberflächen wird dieser Arbeitsschritt wiederholt, bis schließlich allen ein entsprechendes Material zugeordnet wurde.

Um die Primär- und Sekundärstruktur auf Richtigkeit zu überprüfen, kann die Nachhallzeit des Raumes simuliert werden. Dabei wird eine gewisse Korrelation vorausgesetzt, damit der simulierte Wert, nicht zu sehr von den gemessenen Werten abweicht. In diesem Kapitel werden alle Ergebnisse mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 5% toleriert. Die gemessenen Nachhallzeiten sind nämlich nicht ausschließlich frequenz- sondern auch ortsabhängig.

Über die Programmansicht *Room Data* kann ein Diagramm mit den frequenzabhängigen Nachhallzeiten generiert werden.

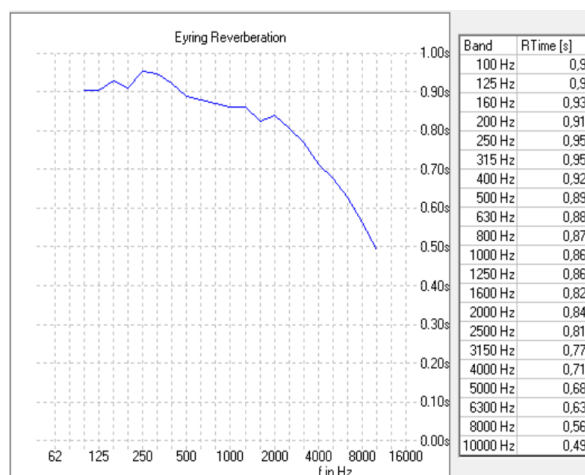


Abbildung 28: Nachhallzeit (Eyring) des simulierten Raumes

Durch die graphische Darstellung wird ersichtlich, dass die realen Messdaten auch in der Simulation erreicht werden. Geringe Abweichungen wie z.B. bei 100 Hz, sind allerdings mit einem Fehler von 5 % tolerierbar. Die Simulation ist somit „kalibriert“ und mit den Messdaten abgeglichen.

10.3 Simulation der Beschallungsanlage

Der gegebene Raum hat eine Beschallungsanlage, die im folgenden Abschnitt ebenfalls simuliert werden soll. Die Anlage, die in Kapitel 5 ausführlich beschrieben wurde, ist auch in der von EASE implementierten Mediathek aufgeführt. Die Lautsprecher werden als Objekte in den Raum auf die gemessene Position gesetzt. Mit dem *Aiming -Tool* kann der Raum aus Sicht der Lautsprecher betrachtet werden. Dabei werden von der Software auch die Richtungskeulen in Form von farbigen Linien kenntlich gemacht. Die rote Linie steht für die Hauptkeule. Diese Anzeige ist anhand der Charakteristik der Lautsprecherdatenbank für jedes Frequenzband unterschiedlich. In der folgenden Grafik sind die Perspektiven der einzelnen Lautsprecher und das Abstrahlverhalten bei 1 kHz dargestellt. Die tiefen Frequenzen des Subwoofers sind nicht ortbar - eine Abstrahlcharakteristik gibt es deshalb nicht.

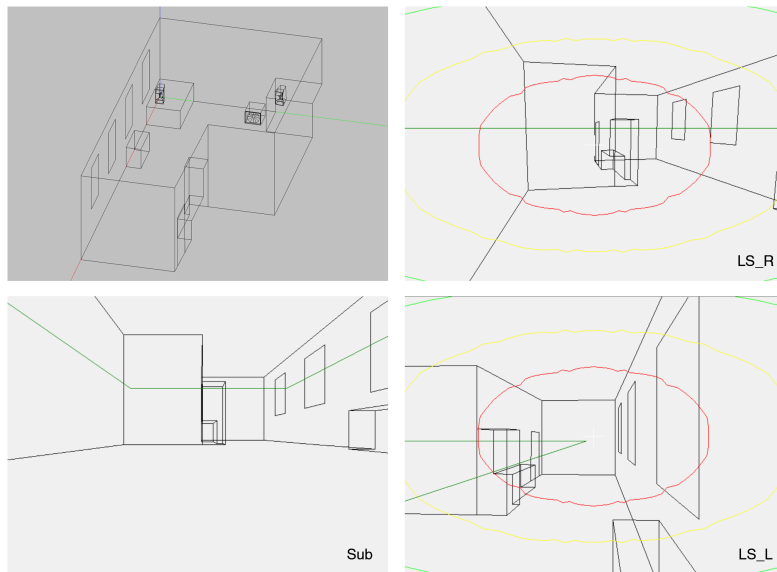


Abbildung 29: Lautsprecheranordnung, oben links: 3D-Ansicht von schräg oben; oben rechts, unten links, unten rechts: Sicht aus den einzelnen Lautsprechern

Für die Simulation wird jeder Lautsprecher mit der vom Hersteller beschriebenen maximalen Leistung betrieben. Die Werte sind ebenfalls in der Datenbank enthalten und werden mit dem Befehl *All to max* zugewiesen.

10.4 Simulation der Zuhörer

Um in EASE Messungen ortsabhängig durchführen zu können, kann eine Bezugsebene erstellt werden. Diese Ebene wird auch Audience Area genannt und soll die Position der Zuhörer simulieren. In der Simulation können mehrere dieser Bereiche erstellt werden, um Orte des Raumes miteinander zu vergleichen. Für den gegebene Raum werden zwei Bereiche erstellt – der vordere Zuschauerraum (A1) und der Eingangsbereich (A2). Da die Raumnutzung eher für ein stehendes Publikum ausgelegt ist, wird die Höhe der Audience Area auf den Durchschnittswert 1,70 m gesetzt. In Abbildung 30 sind die beiden Bereiche dargestellt.

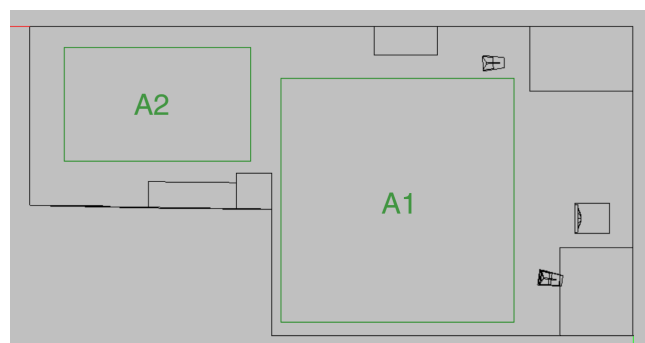


Abbildung 30: "Audience Areas" (Sicht von oben)

11 Raumoptimierung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Simulation und ergänzt die Daten der vorherigen realen Messung. Darauf folgen Optimierungsvorschläge zur Raumakustik und der Beschallungsanlage.

11.1 Raumakustische Parameter

Die Nachhallzeit in Abschnitt 10.2 simulierte Nachhallzeit beschreibt einen Zuhörerfreien Raum. Der Raum soll allerdings als Club ausgelegt werden, d.h. optimiert für Musikdarstellungen mit Zuhörern im Raum. Da Menschen mit Kleidung und gewissem Raumvolumen auch Schall absorbieren, wird auch die Nachhallzeit beeinflusst. Um Aussagen zur Optimierung treffen zu können, muss der Raum auch mit Zuschauern simuliert werden. Deshalb wird die Simulation noch einmal wiederholt.

Die Simulation mit stehenden Zuschauern liefert ein anderes Ergebnis. Der Raum erreicht nun Nachhallzeiten von 0,45 s bei 250 Hz und 0,29 s

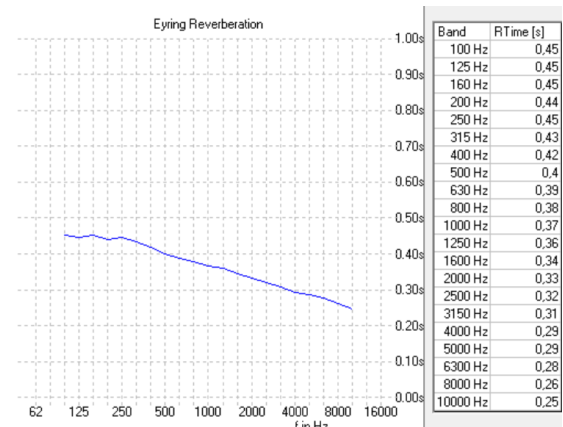


Abbildung 31: Nachhallzeit von Raum mit Zuhörern

bei 4 kHz. Der Raum ist also sehr trocken, sobald sich Zuhörer im Raum befinden. Das Ergebnis war zu erwarten, da der Raum in der Messung in leerem Raum die Anforderungen für einen Club bereits erreicht.

Die Optimierung sollte also so geplant sein, dass ein empfohlener Wert von 0,6 s⁵ erreicht wird, wenn der Raum voll ist. Deshalb sollte die Absorption durch die Stoffdecken an den Wänden und die Holzkisten in den Ecken des Raumes verringert werden. Auch im Hinblick auf den Brandschutz, ist diese Überlegung wichtig.

Da der Raum für Musikdarbietungen genutzt werden soll, ist das Klarheitsmaß C80 wichtig. In der Simulation kann C80 ortabhängig simuliert und visualisiert werden.

Die *Audience Areas* dienen dabei als Messfläche. Für die Simulation wird auch hier wieder der Raum mit Zuschauern gewählt. Auf der folgenden Abbildung wird das Klarheitsmaß auf beiden Bereichen (A1 und A2) abgebildet. Die Einfärbung der Kacheln gibt entsprechend der Legende den Pegel der Klarheit in Dezibel an.

⁵ <http://eliacoustic.com/acoustic-treatment-for-music-club/>

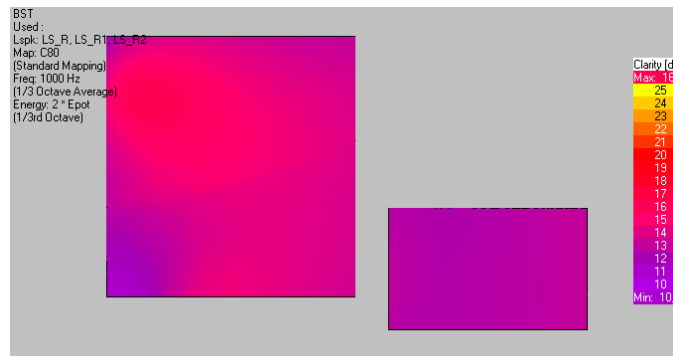


Abbildung 32: C80 auf beiden "Audience Areas" (links A1, rechts A2)

Die Simulation zeigt, dass auf beiden *Audience Areas* ein gleichmäßiges Klarheitsmaß von maximal 12.1 dB vorhanden ist. Der Pegel ist für einen Richtwert von ca. 4 dB deutlich zu hoch. Durch zu hohen Pegel der Klarheit, wird der Raumeindruck herabgesetzt⁶. Die Ortung von Instrumenten und Stimme fällt den Zuhörer somit schwerer.

Um dieses Problem zu lösen, gibt es zwei Möglichkeiten. Zu einem kann die Klarheit durch Absorber auf der gegenüberliegenden Seite (z.B. am Garagentor) verringert werden. Allerdings beeinflusst diese Lösung auch die Nachhallzeit.

Die zweite Lösung, um die Klarheit zu verringern, wäre eine Abstandsvergrößerung von Zuhörerraum und Beschallungsanlage. Ausführliche Optimierungen der Beschallungsanlage werden in Abschnitt 11.2 unternommen.

Auch das Deutlichkeitsmaß C50 darf trotz einer reinen musikalischen Raumnutzung nicht ignoriert werden. Das Ergebnis der Simulation ist auf der folgenden Abbildung zu sehen.

Das Ergebnis zeigt, dass der Raum in der Nähe der Lautsprecher einen deutlich zu hohen Pegel aufweist.

Eine gute Deutlichkeit ist demnach vorhanden. Der Richtwert von 4 dB, der in Clubs gewährleistet sein sollte, wird zwar überschritten liegt aber noch im Bereich des Hinnehmbaren.

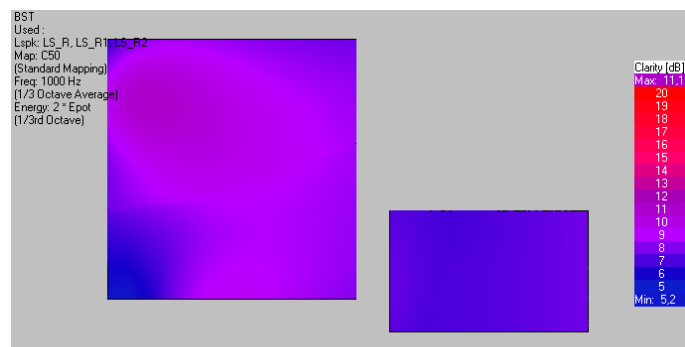


Abbildung 33: C50 auf beiden "Audience Areas" (links A1, rechts A2)

⁶ <https://www.asona-austria.at/startseite/akustik-lexikon/klarheitsma%C3%9F/>

Sollte der Raum wie für C80 entsprechend optimiert, also der Abstand der Lautsprecher vergrößert werden, werden auch die Peak-Bereiche von 11 dB minimiert. Die Optimierung der Beschallungsanlage erfolgt in Abschnitt 11.2 noch genauer.

Für die Verständlichkeit der Raumakustik, kann neben C50 und C80, auch Alcons und der STI-Wert simuliert werden.

Qualitativ lassen sich diese Werte anhand einer Wertung der untenstehenden Tabelle einordnen. Je höher der Alcons Prozentwert ist, desto höher ist der Artikulationsverlust für Konsonanten. Gleiches gilt in EASE 4.4 auch für den STI-Wert.

Alcons	0 % – 3 %	3 % – 7 %	7 % – 15 %	15 % – 33 %	33 % –100 %
	ausgezeichnet	gut	genügend	schlecht	unverständlich
STI	1 – 0.75	0.75 – 0.6	0.6 – 0.45	0.45 – 0.3	0.3 - 0

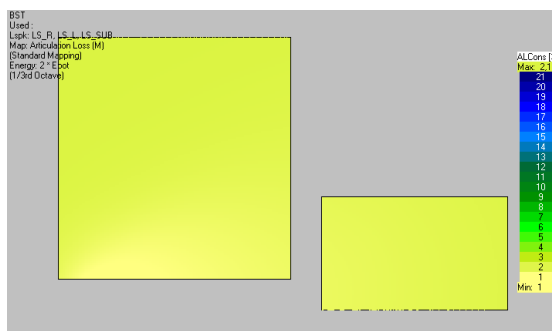


Abbildung 35: Alcons auf beiden "Audience Areas"
(links A1, rechts A2)

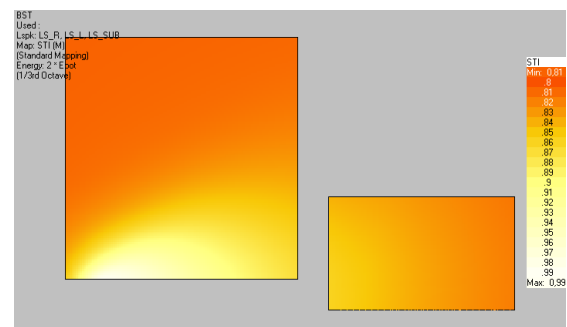


Abbildung 34: STI auf beiden "Audience Areas"
(links A1, rechts A2)

Die Simulation zeigt, dass der Raum ausgezeichnete Alcons - und STI-Werte liefert. Der Bereich in der Alcons-Simulation mit einem Wert von 1 % und der helle Bereich in der Abbildung der STI-Simulation mit einer Sättigung von 0,99, ist auf den sehr geringen Abstand zur linken Lautsprecherbox zurückzuführen. Der Direktschall ist dort folglich sehr hoch.

11.2 Beschallungsanlage

Viele, der in Abschnitt 11.1 simulierten raumakustischen Parameter, werden von der Beschallungsanlage beeinflusst. Sie dienen als Grundlage für die Optimierung.

Zunächst soll aber der allgemeine direkte Schallleistungspegel (Direkt-SPL) des Raumes simuliert werden. In Abbildung 36 ist das 3D-Modell mit den *Audience Areas* zu sehen, auf denen der Direkt-SPL simuliert wird. Dabei ist der Direkt-SPL in der Nähe des linken Lautsprechers (*LS_L*) mit 114 dB auf der A1 maximal. Der rechte Lautsprecher *LS_R* hingegen

liegt durch seine Höhe von 170 cm auf der gleichen Höhe wie A1. Deshalb wird der Pegel in der Simulation nicht so hoch angezeigt, wie auf der linken Seite.

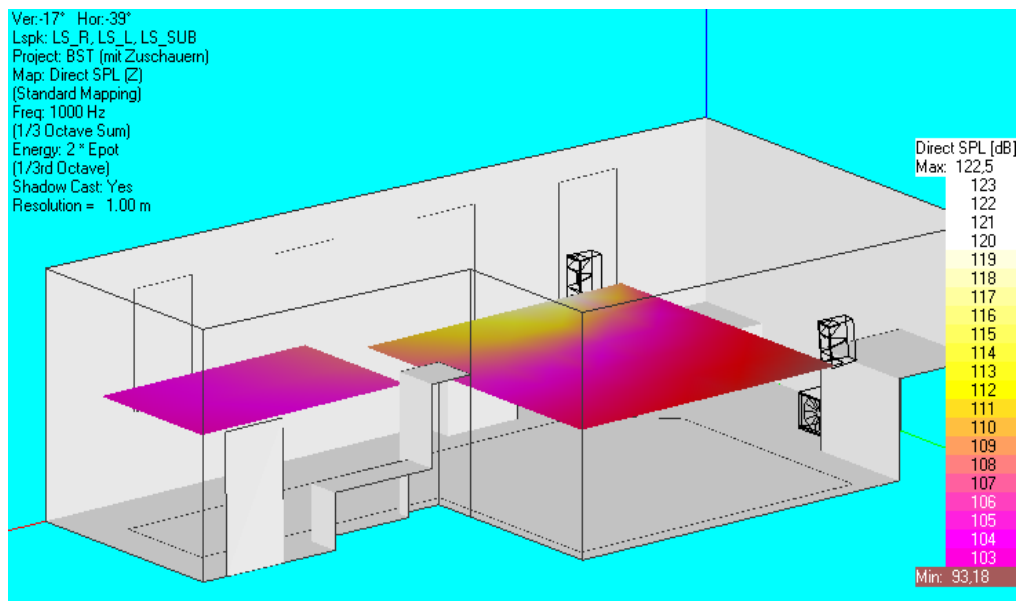


Abbildung 36: Direkt SPL in 3D-Modell

Die Optimierung der Beschallungsanlage besteht also aus einer Neupositionierung der Lautsprecher. Um die *Audience Area* gleichmäßig zu beschallen, sollten die Lautsprecher höher angebracht und symmetrisch zueinander positioniert werden.

Die Pegel auf A1 und A2 werden für den angestrebten Pegel von 104 dB erreicht. Allerdings werden die Lautsprecher in der Simulation mit maximaler Leistung betrieben. Im Sinne des Lärmschutzes sollte also auch die Entfernung zum Zuhörerraum vergrößert werden. Alle Optimierungen werden am Ende dieses Abschnitts auch visuell dargestellt.

Durch eine Vergrößerung von *LS_R* und *LS_L* zu A1 werden auch einige raumakustische Parameter optimiert und beeinflusst. Das Klarheits- und Deutlichkeitsmaß wird auf A1 und A2 verringert, was eine räumlicheres Soundbild zur Folge hat. Die Zuhörer werden vom Schall mehr umhüllt. Die ausgezeichnete Verständlichkeit, die durch die Simulation von Alcons und STI visualisiert wurde, wird dabei auch beeinflusst. Durch eine Verschiebung der Lautsprecher von ca. 1 m, liegen Alcons und STI allerdings immer noch im guten Bereich (siehe Tabelle auf Seite 40).

Der Subwoofer der Beschallungsanlage hat eine optimale Position, da er weit genug von den Ecken und der Wand entfernt aufgestellt ist. Raummoden im tieffrequenten Bereich können sich nicht so leicht bilden.

Für die Optimierung wird neben der Neuordnung der Lautsprecher, auch eine Neuordnung der Bühne empfohlen.

Im bestehenden Raum liegt der Bezugspunkt (Bühne) auf der großen Kiste in der linken Ecke. Bei Musikstücken wird das Stereobild deshalb verschoben wahrgenommen. Um dem entgegenzuwirken, sollte die Bühne mittig an der hinteren Wand aufgestellt werden. Für den hinteren Zuhörer Raum (A2) wird so auch die Sicht auf die Bühne verbessert.

12 Visualisierung in Vision

Zum Abschluss soll der optimierte Raum visualisiert werden. In EASE lässt sich über das integrierte Programm *Vision* eine optisch realistische Simulation anfertigen. Da alle Oberflächen der bisherigen Simulation nur mit ihren Absorptionsgraden konfiguriert worden sind, fehlen noch Texturen. Diese Texturen können in EASE über *Add New Material* selbst erstellt werden. Dazu werden die entsprechenden Materialien als Bitmap-Bild in EASE hochgeladen und den Flächen zugewiesen. Für die Umsetzung wurden *alle* Texturen selbst erstellt und im Raum eingefügt.

Damit der Raum mit Schatten und Licht berechnet werden kann, müssen noch Lampen eingefügt werden. Da die Simulation in *Vision* nur der Visualisierung dient, werden standardmäßige Lichtquellen und nicht die realen Leuchtstoffröhren eingefügt. In EASE werden Lampen wie Lautsprecher als Objekte im Raum verteilt.

Als Berechnungsverfahren wird *Ray Tracing* genutzt. Die Reflexionen und Schatten werden bei diesem Verfahren besonders realistisch dargestellt. Der fertig optimierte Raum wird in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 37: Optimierter Raum in Vision simuliert (in blau die neupositionierten Lautsprecher)

13 Fazit der Simulation

Dieses Kapitel hat sich mit der Durchführung, den Möglichkeiten aber auch Grenzen einer raumakustischen Simulation befasst. Für die Planung von Raumoptimierungen ist eine Simulation ein sehr effektives und flexibles Werkzeug.

So liefern beispielsweise schnelle Rechenzeiten schnelle Ergebnisse. Werden Raumparameter wie Absorptionsflächen oder die Position einer Beschallungsanlage verändert, so kann dieser Einfluss auf die Akustik nahezu in Echtzeit betrachtet werden.

Ziel dieses Versuches war es, die Akustik des realen Raumes in der Raumsimulation annähernd abzubilden und anschließen zu optimieren.

Die Simulation zeigt, dass der Raum in seiner bestehenden Form schon eine gute akustische Voraussetzung bietet. Zusätzliche Optimierungen lassen sich durch eine neue Positionierung der Lautsprecher und Bühne, oder eine Entfernung von Vorhängen umsetzen. Letztes ist auch in Bezug auf den Brandschutz wichtig.

Alle umgesetzten Optimierungen, sollten im Anschluss mit einer realen Messung überprüft werden, um Fehlereinflüsse der Simulation, wie z.B. abweichende Absorptionsgrade zu minimieren.

14 Lärmschutz

In diesem Abschnitt wird die Gehörgefährdung des Publikums durch längerfristige Aussetzung von hohen Schallpegeln und die Lärmbelästigung der Anwohner genauer untersucht. Die Gehörgefährdung des Publikums wird mit Hilfe der DIN 15905-5 beurteilt. Es wird probeweise der durchschnittliche A-bewertete Schalldruckpegel eines Lieds sowie der Peak-Wert des Schalldrucks gemessen. Eine Tabelle aus der DIN-Norm liefert den maximalen erlaubten Schalldruckpegel für unterschiedlich lange Zeiträume der Schallaussetzung hochgerechnet aus der maximalen wöchentlichen Schallexpositionsdosis.

Die gemessenen Werte werden als durchschnittlicher Schalldruckpegel festgelegt und so mit den Werten aus der Tabelle verglichen. Dadurch kann die Lärmbeeinträchtigung ausgewertet werden und eventuelle Maßnahmen vorgenommen werden. Außerdem soll die Lärmbelästigung außerhalb der Garage untersucht werden. Da die Garage sich auf einem Grundstück mit angrenzenden Wohnflächen befindet und Veranstaltungen auch nachts stattfinden, gilt es die vorgeschriebenen Richtlinien zur Lärmbelästigung zu beachten. Die erlaubten Grenzwerte des Schalldruckpegels werden der technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit entnommen. Eine Schallpegelmessung außerhalb der Garage soll den Schalldruck messen, der die Wände der Garage durchdringt, wenn innerhalb der Garage die Beschallungsanlage mit einem Arbeitspegel von 104 dB verwendet wird. Eine weitere Messung soll außerdem die Schalldämmung des Garagentors erfassen.

14.1 Gehörbelastung

Im folgenden Abschnitt wird die Gehörgefährdung der Besucher untersucht.

14.1.1 Einleitung und Versuchsaufbau

Um das menschliche Gehör bei lauter Musik vor Schäden zu schützen, ist eine Begrenzung des Schalldruckpegels notwendig. Die DIN-15905-5 aus dem Jahr 2007 liefert eine Tabelle, welche eine obere Grenze des A-bewerteten Schalldrucks empfiehlt, je nachdem wie lange der Mensch dem Schall ausgesetzt ist (s. Abbildung 38). Dabei wird anhand einer Wochen-Schallexposition von 1820 Pa2s (entspricht 40 Stunden bei 85 dB) die prozentuale Schalldosis abhängig von der Einwirkdauer ermittelt. Hört man beispielsweise vier Stunden lang Musik bei 95 dB Schallpegel, so hat man die wöchentliche Schalldosis nach dieser Zeitdauer erreicht. Ziel ist es also den A-bewerteten Schalldruckpegel über den Zeitraum der

Veranstaltung unter dieser Wochen-Schalldosis zu halten. Auszugehen ist dabei von einer Zeitspanne von bis zu acht Stunden.

L_{Aeq} in dB	Einwirkdauer in Stunden						ISO 1999:1990
	0,5 h	1,0 h	2,0 h	4,0 h	8,0 h	40,0 h	$E_{A, 8 h}$ in Pa ² s
80	0,4 %	0,8 %	1,6 %	3,2 %	6,3 %	31,6 %	1,15 E+03
81	0,5 %	1,0 %	2,0 %	4,0 %	8,0 %	39,8 %	1,45 E+03
82	0,6 %	1,3 %	2,5 %	5,0 %	10,0 %	50,0 %	1,82 E+03
83	0,8 %	1,6 %	3,1 %	6,3 %	12,6 %	62,9 %	2,29 E+03
84	1,0 %	2,0 %	4,0 %	7,9 %	15,9 %	79,4 %	2,89 E+03
85	1,3 %	2,5 %	5,0 %	10,0 %	20,0 %	100,0 %	3,64 E+03
86	1,6 %	3,1 %	6,3 %	12,6 %	25,2 %	125,8 %	4,58 E+03
87	2,0 %	4,0 %	7,9 %	15,8 %	31,6 %	158,2 %	5,76 E+03
88	2,5 %	5,0 %	10,0 %	19,9 %	39,9 %	199,5 %	7,26 E+03
89	3,1 %	6,3 %	12,5 %	25,1 %	50,2 %	250,8 %	9,13 E+03
90	3,9 %	7,9 %	15,8 %	31,6 %	63,2 %	315,9 %	1,15 E+04
91	5,0 %	10,0 %	19,9 %	39,8 %	79,7 %	398,4 %	1,45 E+04
92	6,3 %	12,5 %	25,0 %	50,0 %	100,0 %	500,0 %	1,82 E+04
93	7,9 %	15,7 %	31,5 %	62,9 %	125,8 %	629,1 %	2,29 E+04
94	9,9 %	19,8 %	39,7 %	79,4 %	158,8 %	794,0 %	2,89 E+04
95	12,5 %	25,0 %	50,0 %	100,0 %	200,0 %	1000,0 %	3,64 E+04
96	15,7 %	31,5 %	62,9 %	125,8 %	251,6 %	1258,2 %	4,58 E+04
97	19,8 %	39,6 %	79,1 %	158,2 %	316,5 %	1582,4 %	5,76 E+04
98	24,9 %	49,9 %	99,7 %	199,5 %	398,9 %	1994,5 %	7,26 E+04
99	31,4 %	62,7 %	125,4 %	250,8 %	501,6 %	2508,2 %	9,13 E+04

Abbildung 38: DIN 19505-5 (2007). Tabelle der Schalldosis in Prozent der zulässigen Wochen-Schallexposition von 1820 PA²s (entspricht 40 Stunden bei 85 dB) in Abhängigkeit von der Einwirkdauer und dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel

Eine Messung des Schalldruckpegels wird am maßgeblichen Immissionsort, also dem Ort, an dem der höchste Wert des Schalldruckpegels erwartet wird, durchgeführt. Laut DIN wird während der Veranstaltung in Zeitintervallen von einer halben Stunde der durchschnittliche Schalldruckpegel aufgenommen. Bei diesem Versuch wird beispielhaft der durchschnittliche Schalldruckpegel, sowie der Peak-Schalldruckpegel bestimmt. Dazu wird ein Lied abgespielt, welches dem Nutzen der Garage entspricht. Dies soll ermöglichen vor einer Veranstaltung die erwartete Schalldosis beurteilen zu können und die Lautstärke der Beschallungsanlage anzupassen. Das Messmikrofon befindet sich 1 m vor dem Lautsprecher in einer Höhe von 1,7 Metern, sodass es ungefähr auf Ohrhöhe steht. Das Lied, mit dem die Pegel-Werte ermittelt werden, ist „Mask Off“ von Future aus dem Genre Hip-Hop. Die Lautstärke der Anlage wird so eingestellt, wie es bei den Messungen in Abschnitt XX gemacht wurde. Die Messung wird über die Live-Analyse in EASERA per Video aufgezeichnet. Der durchschnittliche Schalldruckpegel ergibt sich aus den gemittelten Pegel-Werten, die alle 5 Sekunden dem Video entnommen werden. Der Peak-Wert des Schalldruckpegels wird direkt in EASERA angezeigt.

14.1.2 Auswertung

Die Messung ergibt einen durchschnittlichen Schalldruckpegel von 93,5 dBA und einen Peak-Schalldruckpegel von 100,8 dBA. Verglichen mit der Tabelle aus Abbildung 38 ist dementsprechend eine Schallaussetzung von knapp 8 Stunden möglich. Dort wird die Schalldosis einer Woche mit 92 dBA nach 8 Stunden erreicht. Der Peak-Schalldruckpegel liegt mit etwa 100 dB weit unter der oberen Grenze von 128 dB. Voraussetzung für diese Schallexposition ist allerdings, dass die Person 8 Stunden in einer Entfernung von 1 m vor einem der Lautsprecher steht. Dies ist sehr unwahrscheinlich. Auch die Berücksichtigung von Pausen im Außenbereich lässt schlussfolgern, dass die Beschallungsanlage auf diesem Level betrieben werden kann, ohne eine Gefährdung für das Gehör der Besucher darzustellen. Da allerdings bei dieser Schallexposition die wöchentliche Dosis nach 8 Stunden aufgebraucht ist, ist es zu raten, die Beschallungsanlage ein paar Dezibel leiser zu machen. So können die Besucher auch den Rest der Woche noch Musik hören.

14.2 Lärmbelästigung durch Geräuschemission

Der folgende Abschnitt soll die Lärmbelästigung der Beschallungsanlage außerhalb der Garage beurteilen.

14.2.1 Einleitung

Da die Garage sich auf einem Grundstück innerhalb eines Dorfgebietes (TA-Lärm Klasse d) befindet, darf der Schalldruckpegel tagsüber nicht über 60 dB und nachts nicht über 45 dB liegen. Um die tatsächliche Schallimmission festzustellen, werden Schalldruckpegelmessungen außerhalb der Garage durchgeführt. Die Beschallungsanlage wird erneut auf 104 dB wie in Abschnitt 7.1 eingestellt. Eine Messung wird draußen hinter der Fensterwand in einem Abstand von zehn Metern durchgeführt, da dies der nächste Punkt zu den Nachbarn ist. Eine weitere Messung ermittelt den Schalldruckpegel hinter dem Tor der Einfahrt. Da das Tor deutlich dünner ist und aus Kunststoff besteht, sind hier höhere Pegel zu erwarten. Gemessen werden die Schalldruckpegel erneut mit dem mobilen Messgerät NTi audio XL2.

14.2.2 Auswertung

Hinter der Mauerwand mit den Fenstern ergibt sich in einem Abstand von zehn Metern ein gemessener Schalldruckpegel von 60 dB. Dieser Wert liegt nur wenige dB über dem Störschall, der größtenteils von der Straße ausgeht. Auch bezogen auf die TA Lärm liegt dieser Wert an der Grenze des Immissionsrichtwerts bei Tag. Bis 22:00 Uhr kann die Beschallungsanlage auf diesem Level betrieben werden. Allerdings liegt ab 22:00 der Immissionsrichtwert bei 45 dB. Das würde bedeuten, dass die Anlage sehr viel leiser gestellt werden müsste, oder schalldämmende Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Die zweite Messung ermittelt, wie viel Schall von dem Garagentor transmittiert wird und welcher Schalldruckpegel somit hinter dem Tor entsteht. Dazu wird im Raum ein Q7-Lautsprecher aufgebaut und mit einem Pegel von 104 dB in einem Meter Entfernung betrieben. Der Schalldruck wird jetzt kurz hinter dem Tor einmal mit offener Tür und einmal mit geschlossener Tür gemessen. Außerdem soll der Schalldruckpegel hinter dem Tor mit geschlossener Tür in einem Abstand von zehn Metern gemessen werden, um die Schallimmission in dieser Richtung aufzunehmen.

Während die Messung direkt hinter dem Tor mit offener Tür einen Schalldruckpegel von 91,5 dB ergibt, werden mit geschlossener Tür nur noch 73,5 dB erfasst. Es gehen somit durch das Tor 18 dB Schalldruckpegel verloren. In einer Entfernung von zehn Metern hinter dem Tor liegt der Schalldruckpegel erneut mit 62 dB nur knapp über dem Störschall der Straße und der Immissionsrichtlinie für den Tag. Das Tor dämmt den Schall somit ähnlich schlecht wie die Wand mit den Fenstern.

14.2.3 Fazit des Lärmbelästigungsversuchs

Die um die Garage gemessenen Schalldruckpegel sind für den Betrieb der Anlage bei Nacht noch deutlich zu laut. Es muss also entweder die Beschallungsanlage ab 22:00 um 10-15 dB leiser gestellt werden, oder es müssen schalldämmende Maßnahmen ergriffen werden. Da die Akustik im Raum allerdings nicht weiter verändert werden soll, sind die schalldämmenden Maßnahmen an der Außenwand vorzunehmen. Hier können beispielsweise Schallabsorber angebracht werden. Das Tor lässt sich nicht weiter Schalldämmen, da dieses über Schienen auf und zu fahren können muss. Das einfachste zur Lärmreduzierung wäre es also die Beschallungsanlage leiser zu stellen.

15 Fazit

Das Gebiet der Beschallungstechnik besitzt ein großes Themenspektrum. Das Projekt hat diese Vielseitigkeit erfahrbar gemacht. Neben der messtechnischen Erfassung des Raumes und Betrachtung der Beschallungsanlage, wurden auch die Themengebiete der Raumsimulation und des Lärmschutzes bearbeitet. Die praktische Anwendung hat den Stoff der Vorlesung praktisch erweitert. Mathematische Gesetzmäßigkeiten wurden angewendet und somit auch die eigene Wahrnehmung des Raumes erweitert.

Erfahrungen wurden auch im Bereich von Messaufbauten gesammelt. So wurden anfangs beispielsweise messtechnischen Fehler gemacht, die aber schnell gefunden und behoben worden sind.

Das Projekt hat zudem gezeigt, zu wie viel mehr die Software EASERA und EASE fähig sind. Viele, der in den Programmen implementierten Funktionen, wurden im Rahmen des Projekts nicht genutzt. Für die Zukunft würden sich Räume wie Musikstudio- oder Aufnahmerräume anbieten, um das Wissen der jetzigen Arbeit wieder anzuwenden und auch erweitern zu können.