Messung tieffrequenter Absorptionsgrößen im Hallraum

Elektrotechnik Master Projekt

Reinhard Nell

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, 04.02.19



Hallraum der TU Graz am Institut für Bauphysik

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	4
2	Einleitung	5
21	Prinzipaufbau von freischwingenden Plattenabsorbern	5
2.2	Generelle Informationen zu den Messaufbauten	6
3	Grundlagen	7
2 1	Norman	7
3.1	Statistische Raumakustik im Zusammenhang mit der Nachhallzeit	7
3.2	1 Räumliche Diffusität	8
3.2	2 Zeitliche Diffusität	8
3.3	Wellentheoretische Raumakustik im Zusammenhang mit der Abklingzeit	9
Δ	Hallraum der TU Graz	10
•		10
4.1	Untere Grenztrequenz.	10
4.2	1 Visualisiorung der Eigenmeden	11 11
4.Z. 12	2 Messtechnische Ermittlung der Eigenmoden	11 1/1
4.2. 12	3 Mathematische Ermittlung der Eigenmoden	14
4.3	Eigenmodendichte und daraus resultierende Fallunterscheidungen	
5	Messung tieffrequenter Absorptionsgrößen	17
5.1	Methode 1 / Erweiterte Messung in Anlehnung an ISO 354	17
5.2	Methode 2 / einzelner Sondermesspunkt (Ecke-Ecke) - Auswertung nach ISO 354	17
5.3	Methode 3 / mehrere Sondermesspunkte – Auswertung von Einzelfrequenzen	
5.4	Informationen zur Anlehnung an EN ISO 354	19
5.4	.1 Technische Begründung für Normabweichungen / Absorberplatzierung	20
5.4	2 Grundfläche des Prüfobjektes	20
5.5	Quellpositionen und Mikrofonpositionen	
5.5.	1 Quellpositionen	
5.5.	2 Mikrotonpositionsraster in Aniennung an ISO 354 mit Nomenklatur	
5.5. гг	A Desitionskoordington	
5.5.	A boorberpositionen	
5.6	1 Absorberposition nach ISO 354	20
5.6	2 Absorber position Standardplatzierung	20
5.7	Lautsprecher-Entzerrung.	
5.8	Messequipment	
5.9	Abklingzeitbestimmung	29
5.9	1 Abklingzeitbeeinflussung durch Frequenzbandfilterung	29
5.9	2 Sinusanregung	30

5.9.3 Auswertung	
5.10 Absorptionsbestimmung	

6.1 Nachhallzeit des leeren Raumes	33
6.1.1 Methode 1	36
6.1.2 Methode 2	38
6.1.3 Methode 3	38
6.2 Absorptionsgrößen	39
6.2.1 Leerer Hallraum	39
6.2.2 Absorber	40
6.3 Reaktives Verhalten von Absorbern	46

7.1 Verwertbarkeit von tieffrequenten Absorptiongrößen	50
7.2 Ausblick	50

Literaturverzeichnis

Fuchs 2010	Fuchs, H.V., (2010): "Schallabsorber und Schalldämpfer – 3. Auflage"							
GW 2009	Graber, G., Weselak W., (2009): "Skriptum Raumakustik Version 5.3", Kapitel 2 & 3							
Wes 2010	Weselak W., (2010): "Skriptum Akustische Messtechnik Version 4", Kapitel 4							
OZ 1986 Oelemann, J., Zha, X. (1986): "Rundfunktechnische Mitteilung – M								
	Nachhallzeiten bei geringer Eigenfrequenzdichte" Jahrgang 30, 1986, S. 257-268							
Späh 1995	Späh, M., (1995): "Diplomarbeit – Verbund-Platten-Resonatoren für tiefe Frequenzen in							
	kleinen Räumen"							
ZFS 1996	Zha, X., Fuchs, H.V., Späh, M. (1996): "Rundfunktechnische Mitteilung – Messung des							
	effektiven Absorptionsgrades in kleinen Räumen" Jahrgang 40, 1996, S. 77-83							

1 Motivation

In der Raumakustik werden Nachhallzeiten oft nur von 125Hz bis 4kHz ausgewertet und angegeben, da die Messung in diesem Frequenzbereich sehr einfach und effizient erfolgen kann und den wichtigsten Frequenzbereich der menschlichen Sprache abdeckt. Gelegentlich sind erweiterte Frequenzbereiche von 63Hz bis 8kHz vorzufinden, insbesondere bei aufwendiger Planung und Umsetzung von musikalisch genutzten Räumlichkeiten.

Der technische Fortschritt der Elektroakustik, vornehmlich im Bereich moderner elektrodynamischer Wandler und leistungsstarker Endstufen, hat die Wiedergabe von tiefen Bassfrequenzen längst Einzug halten lassen. Die lineare Wiedergabemöglichkeit von Lautsprechern mit einer unteren Grenzfrequenz von 30Hz, und teilweise noch etwas darunter, ist speziell für Studiobetreiber oder den ambitionierten High Fidelity Enthusiasten keine Seltenheit und wird in der Filmindustrie sogar vorgeschrieben.

Selbst hochwertigst ausgestattete Hörräumlichkeiten sind in Ihren Abmessungen oft gedrängt, weshalb bei tiefen Frequenzen eine zu geringe Modendichte auftritt. Damit entstehen hörpositionsabhängige raumakustische Schwächen im unteren Frequenzbereich durch Moden. Diese sind nur schwer in den Griff zu bekommen, weil sie bei Verwendung von porösen Absorbern große Schichtdicken erforderlich machen. Konventionelle Plattenabsorber und Helmholtzabsorber müssen aufgrund ihrer Schmalbandigkeit auf den Raum und dessen Eigenfrequenzen abgestimmt werden und haben überdies große Nachteile, wenn wie üblich, mehrere verschiedene Raummoden gleichzeitig gedämpft werden sollen.

In großen Räumen, wie Konzert- oder Kinosälen, mit genügender Anzahl an Eigenmoden auch im tieffrequenten Bereich und damit einem relativ positionsunabhängigen Schallfeld, kämpft man häufig mit den Problemen von übergebührlich langen Nachhallzeiten. Auch hier werden in der Regel Absorber benötigt die eine hohe und nicht selektive, dass heißt breitbandige Absorption im tieffrequenten Bereich von 2 bis 3 Oktaven aufweisen.

Frei schwingende Plattenabsorber haben hervorragende breitbandige Absorptionswerte im Tieftonbereich, weshalb sich im Sprachgebrauch die unspezifische Bezeichnung "Bassfalle" oder "Bassabsorber" etabliert hat. Ein breitbandiger Einsatz oberhalb des eigentlichen Wirkungsmechanismus über das komplette Audiospektrum ist relativ einfach durch eine frontale dünne Schicht aus porösem Absorber zu realisieren.

Sehr tiefe Frequenzen unter 63Hz wurden bisher kaum untersucht, beziehungsweise entsteht die Frage, wie hohe Absorptionsgrade auch bei den Tiefstfrequenzen zwischen 20-63Hz überhaupt realisierbar sind.

2 Einleitung

Hohe Absorptionsgrade sind im tieffrequenten Bereich durch poröse Absorbermaterialien oftmals schwer mit praktischen Anforderungen zu vereinbaren. Die notwendige geringe Strömungsresistanz ist als Materialeigenschaft technisch zwar meist erreichbar, doch benötigen poröse Absorber zu große Schichtdicke um sie wirtschaftlich vertreten zu können. Je nach Anforderungsprofil an untere Grenzfrequenz und an den Absorptionsgrad sind Absorberdicken im Bereich von 20cm bis zu 200cm erforderlich.

Ziel der Arbeit ist, Plattenabsorber bestehend aus zumindest zwei Bauteilen (frei schwingende Platte + Trägermaterial) auf deren Absorptionsgrößen zu untersuchen. Im Focus der Messungen steht der Frequenzbereich von 20-1000Hz, wobei bei einem optionalen Breitbandabsorberaufbau die Absorption im höheren Frequenzbereich durch eine zusätzliche poröse Deckschicht erreicht werden kann.

2.1 Prinzipaufbau von freischwingenden Plattenabsorbern

Eine elastisch gelagerte Platte ohne Randeinspannung, mit einem durch das Trägermaterial definierten Wandabstand, ist durch eine Klebeverbindung mit einem porösen Absorber fest verbunden. Dieser dient, zusätzlich zur akustischen und mechanischen Dämpfung von Schallenergie, als Befestigungsbasis für die frei schwingende Platte.



1. Abbildung: Prinzipaufbau Plattenabsorber

Lx – Absorberlänge	Px – Plattenlänge
Ly – Absorberbreite	Py – Plattenbreite
Lz – Absorberdicke	Pz – Plattendicke

Wahlweise besteht der Verbund aus einer oder mehreren zusätzlichen Schichten aus Platten und porösen Absorbern sowie einer optionalen Kassettierung.

Physikalische Bauteile	Mechanische Wirkung	Akustische Wirkung
Frei schwingende Platte - Metallplatte - Holzplatte	Masse (für die dominante Masse/Feder Resonanz) Modale Plattenschwingung (mit geringer innerer Dämpfung)	Akustisches Laufzeitglied (Wegdifferenz von frontal einfallendem Schall und um die Platte herum gebeugten Schall)
Trägermaterial / Absorber - Kunstfasermatte - Kunstharzschaum - Mineralfasermatte	Feder + Reibwiderstand (Skelettschwingungsverluste) (für die dominante Masse/Feder Resonanz, sowie für die modalen Plattenschwingungen)	 Akustische Luftfeder welche das mechanische Resonanzsystem beeinflusst Poröser Absorber sowohl für seitlichen Schalleinfall, als auch für Schallwellen die durch Plattenschwingung an der Rückseite abgestrahlt werden
Klebeverbindung (rein physikalische Verbindung der beiden Hauptbauteile)	Elastische Lagerung der frei schwingenden Platte	Beeinflussung der Plattenresonanzen

1. Tabelle: Definition von physikalischen Bauteilen und deren Wirkungsweise

2.2 Generelle Informationen zu den Messaufbauten

Abgesehen von verschiedenen Plattengrößen, Plattenmassen und Anordnungen sollen als mechanische Feder des Plattenschwingers aufgrund vorliegender Bauvorschriften und der erforderlichen Sicherheit im Brandfall nur Materialien der Brandschutzklasse B1 oder höher untersucht werden. Dafür eignen sich folgende Materialien, die gleichzeitig auch als Träger dienen:

- Kunstharzschaum (Brandschutzklasse B1)
- Kunstfasermatte (Brandschutzklasse B1)
- Mineralwolle (Brandschutzklasse A1)

Mineralwolle wird aufgrund lungengängiger Kleinstfaserpartikel und deren gesundheitsgefährdender Wirkung für übliche Anwendungen in geschlossenen Räumen nicht in Betracht gezogen. Sämtliche Untersuchungen werden auf Kunstfasermatten als Trägermaterial beschränkt.

Als schwingende Platten sind verzinkte Stahlbleche in verschiedenen Dicken und damit Massen vorgesehen. Holzplatten sind bei gleicher geforderter Masse durch ihre geringere Dichte dicker und deshalb aus ökonomischen Gesichtspunkten etwas weniger interessant für den praktischen Einsatz, zeichnen sich jedoch durch andere Materialeigenschaften, die Plattenresonanzen betreffend, aus. Daher kann für spezielle Anforderungen an frequenzabhängigem Absorptionsvermögen die Wahl einer Holzplatte vorteilhaft sein.

3 Grundlagen

3.1 Normen

Als Grundlage und Ausgangsbasis für getätigte Messungen dienen die Normen:

- EN ISO 354 (Akustik Messung der Schallabsorption in Hallräumen)
- EN ISO 3382-1 / 3382-2 (Akustik Messung von Parametern der Raumakustik)
- EN IEC 61260 (Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven)

Die Bestimmung von Absorptionswerten geschieht über die ausgewertete Differenz von Nachhallzeiten zwischen leerem Hallraum und dem Hallraum mit eingebrachten Proben. Prinzipiell ist für diese Differenz nur der relative Unterschied der Nachhallzeit der beiden Messungen von Bedeutung. Die Auswertung erfolgt üblicherweise in Oktav-, beziehungsweise Teiloktavbändern. Sehr häufig anzutreffen und sinnvoll ist die Analyse der Nachhallzeit in 1/3 Oktavbändern, den sogenannten Terzbändern. Über die gewonnene Verringerung der Nachhallzeit mit eingebrachten Absorbern und dem Wissen über dessen Fläche kann auf den Absorptionsgrad geschlossen werden.

Für die Messung der Nachhallzeiten in Hallräumen sehen die Normenwerke eine ganze Reihe an Vorschriften vor. Für Messungen streng nach Norm ist die Ermittlung bis zu einer unteren Grenzfrequenz von etwa 100Hz in Hallräumen üblicher Größe von circa 200m³ sinnvoll. Diese Grenze kann in Anlehnung an die ISO 354 durch Mittelung über mehrere Quell- und Mikrofonpositionen nach unten hin ausgedehnt werden. Es wird dabei eine andere Platzierung der Absorber als in der ISO 354 verwendet, da tiefe Raummoden selektiv auftreten und die Position des jeweiligen Absorbers für die jeweilige Mode von großer Bedeutung ist. Zwei eigenständige und von der Norm ISO 354 abgekoppelte Messverfahren werden von [OZ 1986] vorgeschlagen und für diese Projektarbeit in ähnlicher Weise aufgegriffen. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Messausführung folgt in Kapitel 5.2 sowie Kapitel 5.3.

3.2 Statistische Raumakustik im Zusammenhang mit der Nachhallzeit

Zur akustischen Beschreibung eines Raumes mit der statistischen Raumakustik setzt man in der Regel auf die wichtigste Kenngröße, die frequenzabhängige Nachhallzeit T. Die Berechnung von Absorptionsgraden ist daher auf einen einzelnen, leicht zu erfassenden Wert gestützt. Die Nachhallzeit gibt an, in welchem Zeitintervall ein gewisser Schalldruck auf seinen tausendsten Teil abgefallen ist. Dies entspricht einem Abfall von 60dB für den Schalldruckpegel. Ein Einzahlwert der Nachhallzeit wird meistens zwischen 500Hz bis 2kHz angegeben, ist jedoch von geringer technischer und praktischer Aussagekraft und wird deshalb sinnvollerweise frequenzabhängig in Oktavbändern oder Terzbändern dargestellt.

Bei einem diffusen Schallfeld wird davon ausgegangen, dass die Schallenergiedichte konstant ist und die Schalleinfallsrichtung stochastisch gleichverteilt aus allen Richtungen erfolgt. Gefordert wird sowohl eine örtliche Diffusität, als auch eine zeitliche Diffusität. Mit anderen Worten ausgedrückt, spielt es keine Rolle an welchem Punkt im Raum die Nachhallzeit aufgenommen wird. Das Schallfeld

ist bei höheren Frequenzen durch eine so große Anzahl an Raummoden geprägt, dass diese nicht selektiv auftreten, sondern sich stark überlagern und deshalb mit Kenngrößen der Statistik beschrieben werden kann.

Die Absorptionsbestimmung nach ISO 354 erfolgt ausschließlich unter Zuhilfenahme der statistischen Raumakustik. Der gemessene Schallabsorptionsgrad nach Norm ist daher ein Wert, welcher für diffusen Schalleinfall (und nicht für ausschließlich frontalen Schalleinfall) gültig ist.

3.2.1 Räumliche Diffusität

Um insbesondere die geforderte große räumliche Diffusität zu möglichst tiefen Frequenzen hin zu erweitern werden Hallräume üblicherweise mit Diffusoren ausgestattet. Diese sind im Hallraum der Technischen Universität Graz als große Deckensegel ausgeführt und auf dem Foto auf Seite 1 abgebildet. Möglich sind auch mechanisch bewegte Teile, in der Regel als rotierende Diffusoren ausgeführt.

Anmerkung zur Messung nach ISO 354: Für die Mikrofonpositionen wird ein Mindestabstand von 1m zur Wand, sowie 2m zur Quelle gefordert. Die erste Forderung trägt dem Umstand Rechnung, dass an und damit in der Nähe von Raumbegrenzungsflächen die Raumeigenfrequenzen besonders ausgeprägt sind und man deren Einfluss vermeiden möchte. Die zweite Forderung zielt auf einen Abstand ab, der deutlich größer als der Hallradius der Quelle ist, um das Verhältnis von Diffusschall zu Direktschall zu maximieren.

3.2.2 Zeitliche Diffusität

Um die zeitliche Diffusität sicher zu stellen, darf die Auswertung der Nachhallzeit den Direktschall und die frühen Reflexionen nicht heranziehen. In der Praxis wird diese Forderung relativ einfach und effizient gelöst. Der Algorithmus zum Bestimmen der Nachhallzeit wertet nicht den Schalldruckpegelabfall von 0dB beginnend aus, sondern erst ab einem gewissen Threshold. Bewährt hat sich für die Auswertung der Nachhallzeit mit der EDC ein Startpunkt von -5dB.



2. Abbildung: Reflektogramm (symbolische Energy Time Curve): Direktschall - erste Reflexionen - diffuser Nachhall

3.3 Wellentheoretische Raumakustik im Zusammenhang mit der Abklingzeit

Der Verlauf vom diffusen zum modalen Schallfeld erfolgt fließend. Bei den üblichen Abmessungen von Hallräumen mit Volumina von circa 200m³ bilden sich vor allem unter 100Hz nur noch eine geringe Anzahl an Moden aus. Unterschieden werden drei verschiedene Modentypen:

- axiale Moden

- tangentiale Moden
- oblique/schräge Moden

Die Berechnung der Eigenmoden eines quaderförmigen Raumes erfolgt durch:

$$f_{nx, ny, nz} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Bei der Dimensionierung eines Hallraumes sollte großer Wert auf das Verhältnis der Abmessungen gelegt werden. Durch geschickte Auslegung soll das Zusammenfallen von zwei oder gar mehreren verschiedenen Moden auf eine Frequenz vermieden werden. Generell ist eine gleichmäßige Verteilung der Eigenmoden auf der Frequenzachse wünschenswert.

Das leichte Schrägstellen von Wänden oder Einbringen von Diffusoren hat bei sehr tiefen Frequenzen einen geringen Einfluss auf die Eigenfrequenzen. Für die Messung nach [ZFS 1996] ist ein rechtwinkeliger Raum sogar wünschenswert, da hier die analytische Bestimmung der Eigenmoden sehr einfach und mit hoher Genauigkeit durchzuführen ist.

4 Hallraum der TU Graz

Die Konstruktion des Hallraumes selbst besteht aus solidem Stahlbeton und ist an der raumzugewandten Seite in Richtung der Prüfhalle als Raum in Raum Konstruktion ausgeführt, damit ein großer Störabstand auch im täglichen Betriebsablauf gewährleistet werden kann. Die Rauminnenwände sind lackiert, um auch bei sehr hohen Frequenzen über 4kHz reflektierend zu wirken. Für eine verbesserte räumliche Diffusität sind Reflektoren von der Decke abgehängt. Des Weiteren sind 3 Tieftonabsorberelemente, als schwingende Plattenresonatoren ausgeführt, an fest definierten Positionen installiert. Für alle Versuchsaufbauten und Messungen in dieser Projektarbeit wurden diese Tieftonabsorber entfernt.

Nach ISO 354 muss ein Hallraum ein Volumen von mindestens 150m³ besitzen, bei Neubauten sollte ein Mindestvolumen von 200m³ erreicht werden. Mit 244,8m³ liegt der vorhandene Hallraum mit seinen Spezifikationen in der Norm und erweist sich auch mit seinen Abmessungen und damit Eigenmoden als äußerst vorteilhaft für die folgenden Untersuchungen.

Der Hallraum der TU Graz hat folgende Daten, welche für die weitere Arbeit von großer Bedeutung sind:

Abmessungen	Breite Länge x = 5,99m y = 8,34m		Höhe z = 4,9m		
Verhältnis	0,718:	0,588			
Raumoberfläche	240,3m ²				
Raumvolumen	244,8m ³				

2. Tabelle: Geometrische Daten des Hallraumes

4.1 Untere Grenzfrequenz

Die untere Grenzfrequenz ist definiert als solche, für die die örtliche Diffusität des Schallfeldes (Kapitel 3.2.1) noch näherungsweise genügt. Im Idealfall lassen sich mit einem einzelnen Messpunkt statistische Raumakustikgrößen ermitteln. Für darunter liegende Frequenzen gilt die wellentheoretische Akustik, also jener Bereich in dem man aufgrund geringer Eigenmodendichte diese messtechnisch trennen kann. Der Verlauf zwischen den beiden Bereichen ist fließend.

Die empirisch ermittelte Formel für die untere Grenzfrequenz in einem halligen Raum lautet:

$$f_{g,Hallraum} = 1000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

Wenn die Nachhallzeit frequenzabhängig ist, muss die Formel iterativ verwendet werden. Im Hallraum der TU Graz liegt die untere Grenzfrequenz bei etwa 250Hz.

4.2 Eigenmoden des Hallraumes

Eine exakte analytische Berechnung von Raummoden ist insbesondere bei quaderförmigen Räumen einfach. Als Qualitätskriterium verwendet man üblicherweise die Eigenfrequenzen je Terzband.

4.2.1 Visualisierung der Eigenmoden

Dargestellt ist der Betrag des quadrierten Schalldrucks an drei verschiedenen Seitenwänden, während die anderen 3 Wände transparent dargestellt sind. Dunkle Bereiche entsprechen hohem Schalldruck.





Axiale Moden – Tangentiale Moden – Oblique Moden sind farbig dargestellt. Die Darstellung ist für das Verständnis hilfreich und lässt für nachfolgende Kapitel leicht erkennen, warum gewisse Mikrofonsonderpositionen sinnvoll sind und gewählt werden. Durch geschickte Platzierung lassen sich im Frequenzbereich nahe aneinander liegende Moden separieren und getrennt bewerten.

Mode 2 2 0 = 70,5Hz

Mode 2 1 1 = 70,2Hz

Mode 0 0 2 = 70Hz

4.2.2 Messtechnische Ermittlung der Eigenmoden

In der folgenden Grafik werden die messtechnisch ermittelten Eigenmoden des leeren Hallraumes bis 100Hz dargestellt:



Raumeigenmoden

In einem quaderförmigen Raum ist nicht nur die exakte mathematische Ermittlung der Eigenfrequenzen einfach, sondern auch die messtechnische Ermittlung unkompliziert durchzuführen. Dies ist deshalb der Fall, da alle Eigenmoden eines ihrer Druckmaxima in jeder Raumecke aufweisen. Ideal anregen lassen sich diese Moden mit einer Quelle in einer anderen Raumecke. Gewählt wurde dazu eine diagonal gegenüber liegende Position von Quelle und Mikrofon (Q1 – S7) aus Tabelle 4. Der dargestellte Frequenzgang darf als Übertragungsfunktion des Raumes gewertet werden, da sowohl Sender, als auch Empfänger linear entzerrt sind.

Die aufgenommene Impulsantwort wird dazu mit 256k Samples der Diskreten Fourier Transformation mit dem FFT Algorithmus unterzogen und ohne Glättung dargestellt, da auch sehr nahe aneinander liegende Moden möglichst gut getrennt zu erkennen sein sollen. Die Messung ist nicht kalibriert und der Pegel deshalb relativ dargestellt. Die im anschließenden Kapitel 4.2.3 errechneten Eigenmoden stimmen bis 60Hz exakt, bis 100Hz sehr gut mit den Messungen überein. Minimale Abweichungen über 60Hz lassen sich durch die im Raum angebrachten Diffusoren erklären. Nachdem die Raumabmessungen fest gegeben sind ist die einzige Einflussgröße die von der Temperatur abhängige Schallgeschwindigkeit c.

Angemerkt sei, dass die Raummoden deshalb so stark ausgeprägt sind, weil sie im Hallraum ohne Absorberproben unbedämpft sind.

4.2.3 Mathematische Ermittlung der Eigenmoden

Die Berechnung erfolgt mit den Grundlagen aus Kapitel 3.3.

Raummoden bis 100Hz (x=5,99m, y=8,34m, z=4,90m)							
Nr.	Art	n _x	n _y	n	f,	Terzband & Modenanzahl	
1	axial	0	1	0	20,6	20Hz = 1 Mode	
2	axial	1	0	0	28,6	21 FUE - 2 Meder	
3	axial	0	0	1	35,0	31,5HZ = 2 Widden	
4	tangential	1	1	0	35,3		
5	tangential	0	1	1	40,6	40Hz = 3 Moden	
6	axial	0	2	0	41,1		
7	tangential	1	0	1	45,2		
8	oblique	1	1	1	49,7	50Hz = 4 Modon	
9	tangential	1	2	0	50,1	30112 - 4 Widden	
10	tangential	0	2	1	54,0		
11	axial	2	0	0	57,3		
12	tangential	2	1	0	60,8		
13	oblique	1	2	1	61,1		
14	axial	0	3	0	61,7		
15	tangential	2	0	1	67,1	63Hz = 9 Moden	
16	tangential	1	3	0	68,0		
17	axial	0	0	2	70,0		
18	oblique	2	1	1	70,2		
19	tangential	2	2	0	70,5		
20	tangential	0	3	1	70,9		
21	tangential	0	1	2	73,0		
22	tangential	1	0	2	75,6		
23	oblique	1	3	1	76,5		
24	oblique	1	1	2	78,4		
25	oblique	2	2	1	78,7		
26	tangential	0	2	2	81,2	80Hz = 13 Moden	
27	tangential	0	4	0	82,3		
28	tangential	2	3	0	84,2		
29	axial	3	0	0	85,9		
30	oblique	1	2	2	86,1		
31	tangential	1	4	0	87,1		
32	tangential	3	1	0	88,3		
33	tangential	0	4	1	89,4		
34	tangential	2	0	2	90,4		
35	oblique	2	3	1	91,2		
36	oblique	2	1	2	92,7		
37	tangential	3	0	1	92,8	100Hz = >20 Moden	
38	tangential	0	3	2	93,3	(nur teilweise gelistet)	
39	oblique	1	4	1	93,9	(
40	oblique	3	1	1	95,0		
41	tangential	3	2	0	95,0		
42	oblique	1	3	2	95,2		
43	oblique	2	2	2	97,6		

3. Tabelle: Raummoden bis 100Hz (berechnet), Modentyp, Modenanzahl je Terzband

In der Tabelle sind sämtliche Eigenfrequenzen bis 100Hz des Hallraumes der TU Graz als Modentyp mit Ordnungszahlen dargestellt. Weiters erfolgt eine Einteilung in Modenanzahl je Terzband.

4.3 Eigenmodendichte und daraus resultierende Fallunterscheidungen

Die untere Grenzfrequenz eines Hallraumes aus Kapitel 4.1 kann man als indirektes Maß für eine genügend große Eigenmodendichte auffassen, da die Anzahl der Raummoden überproportional mit der Frequenz ansteigt.

Anstatt dieser stark von der jeweiligen frequenzabhängigen Nachhallzeit abhängigen empirischen Formel, welche bei sehr guten Hallräumen mit großer Nachhallzeit eine über Gebühr hohe Grenzfrequenz fg, Hallraum liefert, wird ein quantitatives Maß analog zu [Späh 1995] eingeführt.

Die Unterteilung erfolgt in:

- mehr als 20 Eigenmoden je Terzband
- 5 bis 20 Eigenmoden je Terzband
- weniger als 5 Eigenmoden je Terzband

Bei sehr tiefen Frequenzen bestimmen einige wenige stehende Wellen (Raummoden) das Schallfeld. Im Hallraum der TU Graz sind das die Frequenzen unter und bis inklusive dem 50Hz Terzband.

Die stochastische Akustik, bei der an allen möglichen Positionskoordinaten im Raum gleichmäßige Schallverteilung und damit Nachhallzeit als Voraussetzung benötigt wird, beginnt frühestens ab einer Frequenz welche mehr als 20 Eigenmoden je Terzband aufweist. Dies ist im vorliegenden Fall ab 100Hz gewährleistet.

Zwischen den beiden Extremfällen geschieht ein fließender Übergang, der gesondert betrachtet wird und für die gegebenen Raumdimensionen im Frequenzbereich von 50-100Hz stattfindet.

5 Messung tieffrequenter Absorptionsgrößen

In diesem Kapitel werden drei verschiedene Methoden präsentiert, die in Anlehnung an die Norm ISO 354, sowie für geringe Eigenfrequenzdichte in Anlehnung an [ZFS 1996] und [Späh 1995] erfolgen. Die verschiedenen Methoden sind für unterschiedliche Frequenzbereiche gedacht, haben jedoch einen Überlappungsbereich an dem die Konsistenz der verschiedenen Verfahren abzulesen ist.

Diskutiert werden weiters die Auswirkungen und Einflüsse der Absorberpositionierung im Raum. Physikalisch bedingt ergeben sich dadurch beträchtliche Unterschiede in der Wirksamkeit und damit auch im messbaren Absorptionsgrad.

5.1 Methode 1 / Erweiterte Messung in Anlehnung an ISO 354

Um die Bestimmung der Nachhallzeit durchführen zu können, benötigt man eine gewisse Mindestanzahl an Eigenmoden. Hierbei ist die räumliche Diffusität der limitierende Faktor, da im Bereich geringer Eigenmodendichte einzelne selektive Raummoden die Schalldruckverteilung festlegen.

Ein Lösungsansatz, der die Ortsabhängigkeit der einzelnen Messpunkte verringert, ist eine Messdurchführung mit vergrößertem Stichprobenraum. Dies geschieht bereits in der ISO 354 durch die Einführung von mehreren Messpositionen um auch im leicht modalen Schallfeld zuverlässige Messergebnisse zu erlangen.

Konkret sind das für alle in dieser Arbeit durchgeführten Messungen 3 Quellpositionen und 12 Mikrofonpositionen, dass heißt 36 Übertragungspfade. Durch die hohe Anzahl an Messungen mit verschiedenen Quell- und Mikrofonpositionen und anschließende Mittelwertbildung lässt sich eine höhere Vertrauenswürdigkeit der gewonnenen Daten bei tiefen Frequenzen erreichen.

- + Erweiterung in Anlehnung an ISO 354
- + normtaugliche Messungen und damit Vergleichbarkeit
- + Mittelwertbildung mit mehreren Messpositionen (arithmetisches Mittel oder Median)
- * Auswertung der Nachhallzeit in Terz- oder Oktavbändern
- großer Aufwand durch große Anzahl von Messpositionen
- noch immer messpositionsabhängige Varianz bei sehr geringer Eigenmodendichte
- Auswertungsprobleme der Schröder-Rückwärtsintegration bei Sweepmessung und sehr geringer Eigenmodendichte

5.2 Methode 2 / einzelner Sondermesspunkt (Ecke-Ecke) - Auswertung nach ISO 354

Wie aus der Messung in Abbildung 3 ersichtlich, nehmen die Raumeigenfrequenzen zu tiefen Frequenzen hin stark ab. Von Vorteil ist bei Methode 2, dass mit der Mikrofonposition in der Raumecke alle Moden erfasst werden. Dieses Verfahren verwendet zur Bestimmung der Nachhallzeit bei Sweepmessung die Schröder-Rückwärtsintegration, die streng genommen nur für ein örtlich- und zeitlich gleichmäßiges Schallfeld gilt und bei sehr geringer Eigenmodendichte nur bedingt angewandt werden sollte.

Die technische Durchführung und Auswertung der Methode 2 ist analog zur Methode 1, jedoch wird nur eine Quellenposition und eine Mikrofonposition in diagonal gegenüberliegenden Ecken verwendet. Der größte Nachteil dieser Methode zeichnet sich bei Sweepmessung in Verbindung mit Auswertungsproblemen der Schröder-Rückwärtsintegration mit dem Lundeby Algorithmus ab, da hier keine weiteren Messungen zur Mittelwertbildung zur Verfügung stehen. Eine gewisse Abhilfe schaffen weitere Messpositionen in den anderen Raumecken.

- + einfach durchzuführende Einzelmessung mit geringem Aufwand
- + Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Methode 1
- * Auswertung der Nachhallzeit in Terz- oder Oktavbändern
- obere Grenzfrequenz bei etwa 1-2kHz (Positionierung von Mikrofon und Lautsprecherabmessung)
- keine Mittelung und falls doch über mehrere Eckpositionen mit vergrößertem Aufwand
- Auswertungsprobleme der Schröder-Rückwärtsintegration bei Sweepmessung und sehr geringer Eigenmodendichte

5.3 Methode 3 / mehrere Sondermesspunkte – Auswertung von Einzelfrequenzen

Die Methode 3 verwendet in Ihrer Grundform die exakt gleiche Impulsantwort, welche wie in der Methode 2 durch einen Sinussweep aufgenommen wird, sich jedoch grundlegend in der Auswertung unterscheidet. Durchgeführt wird entweder eine frequenzselektive Trennung der Eigenmoden durch steilflankige Filter oder es erfolgt eine direkte Separation im Frequenzbereich anhand einer DFT (Diskrete Fourier Transformation). Zusätzliche Messpositionen werden notwendig, wenn zwei Eigenfrequenzen dicht aneinander liegen. Durch geschickte Mikrofonpositionierung im Druckminimum einer stehenden Welle, können an gewissen Raumpositionen einzelne Raumeigenfrequenzen ausgeblendet, und so voneinander separiert werden.

Ausgewertet werden die einzelnen Frequenzen jeweils für sich. Die Ergebnisse unterliegen auch bei sehr tiefen Frequenzen keinen technischen Einschränkungen und werden nicht in Terz- oder Oktavbändern, sondern als Einzelfrequenzabsorption angegeben.

- + Einfach durchzuführende Messungen mit überschaubarem Aufwand
- + Analyse des Dämpfungsverhaltens von Absorbern bei verschiedenen Modentypen (axial/tang./obl.)
- + Analyse einzelner auch sehr nahe benachbarter Raumeigenfrequenzen

- * Auswertung der Abklingzeit an den Raumeigenfrequenzen
- obere Grenzfrequenz bis etwa 10 Eigenfrequenzen je Terzband (Trennbarkeit der Eigenmoden)
- Bestimmung der Absorption nur an Raumeigenfrequenzen (abhängig von der Hallraumgeometrie)

5.4 Informationen zur Anlehnung an EN ISO 354

Es sollen Messungen und Aufbauten insbesondere für die Messmethode 1 nahe an den Vorgaben der Norm sein. Diese ist technisch sinnvoll und führt zu vergleichbaren Werten. Modifikationen zur Messung von tiefen Frequenzen umfassen für Messmethode 1 ein deutlich vergrößertes Raster an örtlichen Stichproben.

Nach der Norm EN ISO 354 wird gefordert [Distanzen gelten als euklidischer Abstand (hier Wegstrecke im dreidimensionalen Raum)]:

- min. 2 Schallquellenpositionen (minimal 3m Abstand der Quellen zueinander)
- min. 3 Mikrofonpositionen (minimal 1,5m Abstand zueinander, 2m zur Quellposition, 1m zur Wand)
- Anzahl der Mikrofonpositionen x Schallquellenpositionen (Übertragungspfade) minimal 12

Für die Messmikrofonpositionen wird unter Methode 1 ein fixes Raster von 36 Punkten vordefiniert, wovon je Quellposition jeweils 12 Messpunkte möglichst stochastisch verteilt aus dem vorgegebenen Raster ausgewählt werden.

Die beiden Quellenpositionen Q2 und Q3 werden so gewählt, dass sie die Raummoden möglichst gleichmäßig anregen. Im Zuge der Datenakquisition wird auch Q1 an den 12 festgelegten Mikrofonpositionen laut Raster aufgenommen und ausgewertet. Die Quellposition Q1 wird für die Messung der Abklingzeiten der Raummoden nach [*Späh 1995*] und [*ZFS 1996*] benötigt und ist also für die Methoden 2 und 3 von essentieller Bedeutung.

Ausgehend von bereits dokumentierten Messergebnissen mit Plattenabsorbern der Abmessungen (Lx=1,5m, Ly=1m, d=10cm, t=2,5mm) [*Fuchs 2010*] soll in erster Instanz ein ähnlicher Aufbau überprüft werden, beziehungsweise die oben genannten Messverfahren verglichen werden, da eine Messung streng nach der Norm EN ISO 354 deutlich größere Raumvolumina als die zur Verfügung stehenden Messräume benötigen würde (für 20Hz in der Größe eines Konzertsaals) und eine unpraktisch große Fläche mit Absorbern belegt werden müsste.

Bei einer aus dem Praxiseinsatz bekannten Anordnung mit fixer Plattengröße und einer ausgewählten Dicke der Kunstfasermatten (Lx=2m, Ly=1m, Lz=d=10cm, Pz=t=2,5mm) soll der frequenzabhängige Absorptionsgrad aufgenommen werden.

Die Plattenabsorber sollen dabei mittig im Raum am Boden liegend gemessen werden. Die Prüfanordnung darf dabei nicht parallel zu den Kanten verlaufen. Der Wandabstand soll 1m, muss jedoch mindestens 0,75m betragen. Dies wird durch die große Prüfanordnung an den Außenseiten der zwei Ecken nicht vollständig eingehalten. Der Forderung nach nicht paralleler Ausrichtung wird eine höhere Bedeutung zugemessen.

Prinzipiell ist die Norm für resonanzbehaftete und damit reaktive Absorber nicht vorgesehen. Schmalbandige Resonanzen mit hoher Güte, wie sie sehr häufig mit Helmholtzresonatoren auftreten, sind dabei besonders problematisch. Auch freischwingende Plattenabsorber können an der dominanten Masse-Feder-Resonanz eine Güte aufweisen, welche in der Auswertung zu Schwierigkeiten führt. Fällt diese Resonanzfrequenz mit einer isolierten Raummode zusammen, versagt die übliche Auswertung, da die Abklingfunktion keineswegs linear im Schalldruckpegel abfällt (siehe Kapitel 6.3). Hier ist eine händische Auswertung anzuraten, beziehungsweise ist es informativer die gesamte (wellige) Abklingfunktion anzugeben als nur einen Wert für die Nachhallzeit.

5.4.1 Technische Begründung für Normabweichungen / Absorberplatzierung

Die mittige Platzierung einer Absorberausführung (siehe Kapitel 5.6.1) dient vor allem der absoluten Vergleichbarkeit mit Messungen nach Norm. Die Standardplatzierung (siehe Kapitel 5.6.2) wird gewählt, da sich bei den tiefsten axialen Moden der x- und y-Richtung in der Positionierung in Anlehnung an ISO 354 die Absorber maßgeblich im Druckminimum befinden. Die Differenz im Absorptionsgrad durch die neue Platzierung ist ein wichtiger Indikator für die Positionsabhängigkeit des Schallfeldes. Dies ist in Abbildung 22 gut abzulesen.

Für die Methode 2 und 3 sind weitere neue Messmikrofonpunkte erforderlich, die Sondermesspunkte S aus Tabelle 4. In der Ecke eines quaderförmigen Raumes haben alle Raummoden ihre Druckmaxima. Hier lässt sich bei den sehr tiefen dominanten Grundmoden eine Frequenztrennung durchführen und die Abklingkurve für jede Frequenz einzeln bestimmen. Liegen mehrere Frequenzen dicht beieinander, lassen sich durch geschickte Messpositionen im Raum einzelne Moden ausblenden, wenn man in deren Druckminimum misst. Dadurch können die verschiedenen Abklingkurven der Moden auch dann noch analysiert werden, wenn diese mit ihrer Frequenz dicht nebeneinander liegen. Ausgegraute Sondermesspunkte wurden in anfänglichen Messungen aufgenommen, jedoch aufgrund von Redundanz für weitere Messaufbauten verworfen. Die Anregung erfolgt immer und ausschließlich durch den Lautsprecher an der Position Q1.

5.4.2 Grundfläche des Prüfobjektes

Das Prüfobjekt muss (nach ISO 354) bei einem Raumvolumen von 200m³ eine Grundfläche von mindestens 10-12m² belegen. Bei Objekten mit geringem Absorptionsgrad muss eine größere Fläche belegt werden. Für abweichend größere Raumvolumina wird folgende Korrektur angewandt:

$$A_{Absorbergrundfläche}[m^2] = \left(\frac{V_{Messraum}[m^3]}{200 m^3}\right)^{\frac{2}{3}} * 10 \rightarrow [12 m^2]$$

Daraus ergibt sich die minimale Fläche des Prüfobjektes von 11,5-13,7m². In der gesamten Projektarbeit wird die überdeckte Grundfläche einheitlich als "Absorberoberfläche" für Berechnungen des Absorptionsgrades herangezogen. Die gewählte Absorbergrundfläche der zu prüfenden Plattenabsorber wird aufgrund der beschränkten Flächenskalierbarkeit mit ~17m² (8 Stück 204x104cm) gewählt.

5.5 Quellpositionen und Mikrofonpositionen

5.5.1 Quellpositionen

Dargestellt sind in Abbildung 4 die 3 verschiedenen Lautsprecherpositionen (Q1, Q2, Q3), wie sie in dieser Arbeit mit der Auswertung in Anlehnung an die ISO 354 (Methode 1) Verwendung finden. Um den Lautsprecher für die Position Q2 und Q3 auf Höhe zu bringen wird der Lautsprecher auf ein Stativ montiert.

Für die Sondermesspunkte (Methode 2 & 3) dient ausschließlich die Position Q1 mit Platzierung in der Ecke hinter der Eingangstüre zur Schallfeldanregung.

Aufgrund von mechanischen Gegebenheiten ist eine theoretisch perfekte Platzierung des Membranmittelpunktes exakt in der Ecke (Quellposition Q1) nicht möglich.

Die genauen Koordinaten des Membranmittelpunktes (Dustcap) lassen sich ebenfalls in Tabelle 4 nachschlagen. Die Koordinatenangaben aus der Abbildung 4 sowie aus Tabelle 4 beziehen sich auf den geometrischen Mittelpunkt des Lautsprechergehäuses. Die Position der Dustcap als Mittelpunkt der Membran und akustisches Zentrum kann über Subtraktion der Distanz von 180mm in y-Richtung (siehe Abb. 6) ermittelt werden.



4. Abbildung: Lautsprecherskizze und Quellpositionen (von links nach rechts Q3, Q2, Q1)

5.5.2 Mikrofonpositionsraster in Anlehnung an ISO 354



5. Abbildung: Messmikrofonraster in Anlehnung an ISO 354

In Abbildung 5 ist ein Raster von 36 Mikrofonmesspositionen mit geforderten Wandabständen in Anlehnung an ISO 354 dargestellt. Weiters wird ein Mindestabstand zwischen zwei Mikrofonpositionen gefordert, damit die Korrelation der Impulsantworten zwischen benachbarten Messpunkten nicht zu groß wird.

Für das Messverfahren nach Methode 1 werden 12 Messmikrofonpositionen P1 bis P12 verwendet, welche gewählt wurden, um:

- Mindestabstände zu den Lautsprecherpositionen zu gewährleisten
- eine möglichst pseudozufällige Verteilung zu erreichen um das Schallfeld bei tiefen Frequenzen adäquat und gleichmäßig zu erfassen
- unter Berücksichtigung der Absorberplatzierungen, das Platzieren der Stative zu erlauben



6. Abbildung: Nomenklatur Mikrofonpositionsraster

In Abbildung 6 ist die Nomenklatur des in der Arbeit einheitlich verwendeten Koordinatensystems, sowie der Messpositionen P, ersichtlich. Zur einfacheren Benennung der Einzelpunkte wird ein Nomenklatursystem eingeführt. Die Punkte P sind damit nach dem Setzen eines Rasters im Messraum einfach und schnell durch Ihre Nummerierung zuzuordnen.

Die ausgewählten Messpunkte P1 bis P12 sind in Tabelle 4 unter Angabe der Koordinaten im Detail aufgelistet.

5.5.3 Mikrofonpositionsraster Sondermesspunkte



7. Abbildung: Sondermesspositionen

Die in Abbildung 7 dargestellten Sondermesspunkte befinden sich wieder auf einem Raster, das gezielt so gelegt wurde um gewisse nahe aneinander liegende Moden separieren zu können. Dies geschieht, indem für zwei oder mehrere nahe beieinander liegende Eigenfrequenzen eine Mikrofonposition gewählt wird, die nur für eine der beteiligten Eigenmoden ein Druckmaximum aufweist. Alle anderen nahe liegenden Eigenmoden weisen an dieser gewählten Position Druckminima der sich ausbildenden stehenden Wellen auf.

Gewählt wurden 20 Messpunkte, die miteinander verglichen wurden. Nach diesem Vergleich wurden, durch Feststellung von Redundanzen, für alle folgenden Messdurchgänge nur 10 Sonderpositionen aufgenommen.

Die Sondermesspunkte S1 bis S20 sind in Tabelle 4 aufgelistet. Die ausgegrauten Messpunkte, sowohl in der Tabelle als auch in der oben dargestellten Zeichnung, sind jene die nur anfänglich zur Auswertung und Vergleichbarkeit herangezogen wurden. Angemerkt sei, dass die spiegelsymmetrischen Messpunkte ähnlich, jedoch nicht exakt gleich sind. Dies ist damit zu begründen, dass die Schallanregung asymmetrisch mit nur einer Quelle geschieht und die Absorber ebenfalls nicht symmetrisch im Raum verteilt sind.

5.5.4 Positionskoordinaten

Um eine konsequente Zuordnung der aufgenommenen Messpunkte sicher zu stellen wird folgende Nomenklatur eingeführt:

Lautsprecherpositionen P(x,y,z) in mm							
Nr.	Bezeichnung	Х	У	Z			
1	Q1	5790	8140	200			
2	Q2	4200	6400	1500			
3	Q3	2500	3200	2200			
Mikro	fonmesspunkte	e in Anlehnung	an ISO 354 P(x,y,z)			
1	P1 = (1,1,1)	1045	1170	1300			
2	P2 = (2,1,3)	2995	1170	3900			
3	P3 = (3,1,1)	4945	1170	1300			
4	P4 = (2,2,3)	2995	3170	3900			
5	P5 = (3,2,3)	4945	3170	3900			
6	P6 = (3,2,2)	4945	3170	2600			
7	P7 = (2,3,2)	2995	5170	2600			
8	P8 = (2,3,3)	2995	5170	3900			
9	P9 = (1,3,1)	1045	5170	1300			
10	P10 = (2,4,3)	2995	7170	3900			
11	P11 = (1,4,1)	1045	7170	1300			
12	P12 = (1,4,2)	1045	7170	2600			
Mikrofon	sondermesspu	nkte zur Raum	modenanalyse	P(x,y,z)			
	Nr.	х	У	Z			
1	S1	0	0	0			
2	S2	2995	0	0			
3	S3	5990	0	0			
4	S4	0	0	2450			
5	S5	2995	0	2450			
6	S6	5990	0	2450			
7	S7	0	0	4900			
8	S8	2995	0	4900			
9	S9	5990	0	4900			
10	S10	0	4170	0			
11	S11	2995	4170	0			
12	S12	5990	4170	0			
13	S13	0	4170	2450			
14	S14	2995	4170	2450			
15	S15	5990	4170	2450			
16	S16	0	4170	4900			
17	S17	2995	4170	4900			
18	S18	5990	4170	4900			
19	S19	0	2085	4900			
20	S20	2995	2085	2450			

4. Tabelle: Positionen der Quellen und Mikrofone

5.6 Absorberpositionen



5.6.1 Absorberposition nach ISO 354

8. Abbildung: ISO 354 Absorberplatzierung und Absorberabmessungen

5.6.2 Absorberposition Standardplatzierung



9. Abbildung: Standardplatzierung der Plattenabsorber

5.7 Lautsprecher-Entzerrung

Als Schallquelle wird, um für die notwendigen Wellenlängen einen omnidirektionalen Strahler zu realisieren, ein 15" Langhublautsprecher im geschlossenen Gehäuse (CB15) verwendet. Dies ermöglicht gegenüber einem Bassreflex Lautsprecher auch bei kompakten Abmessungen eine Entzerrung ohne akustischen Kurzschluss bei tiefen Frequenzen. Der Amplitudengang wird zwischen 20-1000Hz im Freifeld linear (+/- 1,5dB) entzerrt. Für Frequenzen bis etwa 250Hz kann die Richtcharakteristik als voll omnidirektional und bis 500Hz für ausreichend erfüllt angesehen werden. Auch darüber hinaus ist durch die große Modendichte und Diffusität des Schallfeldes die einsetzende Richtwirkung des Lautsprechers bis 1000Hz als zulänglich anzusehen, sofern dieser nicht direkt auf die Absorber ausgerichtet ist.





Wäre der Frequenzgang der Quelle mit einer großen Welligkeit beaufschlagt, so würden jene Frequenzen die mit größerem Pegel abgestrahlt werden, die Nachhallzeit des jeweiligen Oktav-, beziehungsweise Teiloktavbandes dominieren und die Auswertung verfälschen.

Der Lautsprecher ist, mit +/- 25mm linearem Hub, in der Lage auch bei sehr tiefen Frequenzen einen entsprechenden Pegel und damit hohen Störabstand für die Messung der Nachhallzeit zu erzeugen. Um den Frequenzgang zu linearisieren ist bei 20Hz ein DSP-Equalizer von +46dB notwendig. Die verwendete Endstufe ist in der Lage 800W rms burst Leistung (=1600W peak) an 80hm zu liefern. Der maximale Schalldruckpegel in 1m Entfernung beträgt damit 76dB rms (=79dB peak). Während den Messungen wird ein maximaler Pegel generiert der bei den Aussteuerungsspitzen 6dB unter der maximal möglichen Aussteuerung der Endstufe liegt um nichtlineare Effekte an Lautsprecher und Leistungselektronik gering zu halten.

Die Aussteuerungsreserve von 6dB wurde empirisch durch mehrere Messungen mit verschiedenen Pegeln ermittelt. Bei kleinerer sowohl als auch größerer Aussteuerung verschlechtert sich der Signalrauschabstand.

5.8 Messequipment

- PC Win 7: Software Arta

- Soundkarte: M-Audio Audiophile Firewire
- Mikrofonverstärker: Microphone Preamp MPA 102
- Messmikrofon: Haun MBC 550 1/2" Kapsel

- Lautsprecher: Lambda Labs CB-15 OEM (geschlossenes Gehäuse 15" Chassis inkl. Verstärker)

Verwendete Software: Cool Edit (Filter), ITA Toolbox (M1&M2 Auswertung Nachhallzeit Terzbänder), Arta (EDC für M3 nach Filterung händisch ausgewertet), Libre Office Calc

ARTA - Audio Measurement and Analysis Software

Arta ist ein sehr vielseitiges Softwarepaket für die Aufzeichnung von Impulsantworten mit verschiedenen Anregungssignalen und der daraus möglichen Darstellung von Frequenz- und Phasengängen. Prinzipiell kann damit jedes elektrische System innerhalb des Audiofrequenzbereiches analysiert werden. Ein klarer Schwerpunkt der Funktionen liegt allerdings im Bereich der Lautsprechermesstechnik, Sprachübertragung und Raumakustik.

Für die getätigten Messungen im Hallraum wurden, sofern nicht explizit anders angegeben, folgende Messeinstellungen verwendet:

Anregungssignal: logarithmischer Sinus Sweep von OHz bis fs/2 = 4kHz (Anregungsdauer 32,7 Sekunden, gesamte Signalaufzeichnungsdauer 65,4 Sekunden)

Dual Channel Measurement Mode: Messung mit Referenzkanal zur Erfassung der absoluten akustischen Phase

Sequence Length: 256k samples

Sample Rate: 8kHz (reduzierte Sample Rate um eine entsprechende Messdauer zu ermöglichen – diese ist notwendig um die große Nachhallzeit im leeren Hallraum messtechnisch ermitteln zu können)

PIR (periodic impulse response): 32,7 Sekunden resultierend aus obiger Sequence Length und Sample Rate

5.9 Abklingzeitbestimmung

Das Bestimmen der frequenzabhängigen Nachhallzeit ist essentieller Bestandteil der Absorptionsgradbestimmung. Bei großen Datenmengen wirken automatische Algorithmen unterstützend. Die Auswertung ist keine exakte Wissenschaft, sondern erfordert Sachverständnis und Intuition vor allem bei ungleichmäßig abfallendem Schalldruckpegel. Mittels aufgenommener Sinussweep-Antwort und der daraus kalkulierten Impulsantwort können sämtliche raumakustische Parameter durch Berechnung erzeugt werden. Die Nachhallzeit wird wie folgt generiert:

Bandfilterung: Es ist sinnvoll die Nachhallzeit frequenzselektiv auszuwerten. Üblich ist die Oktav- und Terzbanddarstellung. Hierzu wird die zu betrachtende Impulsantwort vor der weiteren Verarbeitung steilflankig bandpassgefiltert.

Schröder-Rückwärtsintegration: Auf die bandpassgefilterte Raumimpulsantwort wird die Schröder-Rückwärtsintegration angewandt. Die Umstellung dieser auf Pegelform ergibt eine besser lesbare Darstellung und wird EDC (Energy Decay Curve) oder ETC (Energy Time Curve) genannt.

Lundeby Algorithmus: Die jeweilige Abklingkurve kann dann in ihrem zeitlichen Pegelabfall entweder händisch oder mit dem Lundeby Algorithmus ausgewertet werden. Bei mehreren Messpunkten und vielen Frequenzbändern ist die Automatisierung hilfreich. Eine stetige Kontrolle der Ausgabewerte auf Plausibilität, sowie gelegentlich Überprüfung der Detailergebnisse ist anzuraten.

5.9.1 Abklingzeitbeeinflussung durch Frequenzbandfilterung

Die "wahre" und damit rein akustische Nachhallzeit wird durch die Bandpassfilterung verzerrt. Dies lässt sich sehr schön daran zeigen, wenn ein einzelner Dirac Impuls (respektive ein Kronecker Delta in der digitalen Domäne), welcher per Definition ein singuläres und unendlich kurzes Ereignis darstellt, ausgewertet wird.

Durch die Filterung wird der Impuls zeitlich verwaschen und es wird in den Einzelfrequenzbändern der Auswertung ein Abklingen des Filters sichtbar. Selbst nullphasige FIR Filter, wie in dieser Arbeit verwendet, zeigen dieses Verhalten in gewisser Ausprägung. Die Filterabklingdauer ist abhängig von der Bandbreite, der Mittenfrequenz und der Flankensteilheit (hier 10.Ordnung). Insbesondere bei sehr kurzen Nachhallzeiten in stark absorbierenden Studios oder gar reflexionsfreien Messräumen ist es von enormer Wichtigkeit hierauf ein Augenmerk zu legen. Bei den im Hallraum gemessenen Nachhallzeiten ist der Fehler gering und wird vernachlässigt.



11. Abbildung: Auswertung der rein signaltheoretischen T20 Nachhallzeit eines Kronecker Deltas

Ein großer Signalrauschabstand der ermittelten Impulsantwort ist wichtig. Speziell im leeren Hallraum als Referenz sind die Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen beträchtlich.

Die dadurch notwendige sehr große Sinussweep-Aufnahmedauer von 65,4 Sekunden der 32,7 Sekunden langen ermittelten Raumimpulsantwort muss daher mit einem großen Störabstand erfolgen, da sonst sämtliche Störungen durch die Schröder Rückwärtsintegration integriert werden. Trotz gutem Signalstörabstand, insbesondere bei langen Raumimpulsantworten, kann die Auswertegenauigkeit einer T₃₀ bereits oft zu gering sein. Bei kurzen Nachhallzeiten (z.B. durch starke Probenabsorption in gewissen Frequenzbereichen) kann die bandpassgefilterte Impulsantwort entweder händisch beschnitten werden, oder es wird eine automatische Schnittfunktion (Truncation) angewandt. Diese Messartefakte mit dem mathematischen Weg über die Auswertung der Raumimpulsantwort sind als klarer Nachteil gegenüber einer direkten Messung des abklingenden Nachhalls (abgeschaltetes Rauschen oder abgeschalteter Sinus) zu nennen.

Weitere Verbesserungen können diesbezüglich mit einer kürzeren Auswertedauer als einer T_{30} erreicht werden. Hier bietet sich eine T_{15} oder T_{20} an.

Für eine saubere Auswertung und vertrauenswürdige Ergebnisse, vor allem bei einem Einzelmesspunkt, sind die im Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 genannten Voraussetzungen zu beachten.

5.9.2 Sinusanregung

Für eine geringe Modendichte ist das Verfahren der Schröder-Rückwärtsintegration nicht vorgesehen.

Eine Erweiterung in Anlehnung an OZ 1986, also der Auswertung von diskreten Frequenzen, jedoch mit moderneren Verfahren, ist für die Methode 3 von Bedarf.

Ziel des Verfahrens ist die Abklingkurve von Einzelfrequenzen (Raummoden) darzustellen. Die maximal mögliche Separation der Moden durch Frequenz und Messpunktwahl gibt dabei den oberen Einsatzbereich dieses Verfahrens vor.

Die Anregung des Hallraumes mit Sinusfrequenzen, die den Eigenmoden entsprechen, ist aus technischer Sicht das Optimum für die Analyse tiefer und einzelner Frequenzen. Bei beispielsweise 15 Moden, welche dazu noch an verschiedenen Messpunkten aufgenommen werden müssen ist der zu tätigende Aufwand groß. Deshalb werden an den vorgesehenen Sondermesspunkten nur Raumimpulsmessungen (Sinus-Sweep) aufgenommen. Nachträglich könnte die Systemantwort mit einer stationären Sinusanregung z.B. durch Faltung berechnet werden. In der Arbeit werden jedoch Frequenzbandfilter eingesetzt um die Abklingkurve der jeweiligen Einzelfrequenz mit der Schröder-Rückwärtsintegration zu ermitteln.

5.9.3 Auswertung

Schwierig wird die Auswertung, wenn die Nachhallkurve im logarithmischen Maßstab nicht linear abfällt und damit die Nachhallzeitbestimmung nicht mehr eindeutig erfolgen kann. Hierfür gibt es mehrere Ursachen:

- verwinkelte oder zusammenhängende Räume
- akustisch oder mechanisch schwingungsfähige Systeme (reaktive Absorber Resonanzabsorber)
- zu geringe Modendichte und eng benachbarte Eigenfrequenzen (Schwebung)

Im für Messungen optimierten Hallraum ist der erste Punkt auszuklammern. Bei reaktiven Absorbern mit hoher Güte, also vor allem Helmholtzresonatoren und bei der typischerweise wenig gedämpften Masse-Feder-Resonanz von Plattenabsorbern, ist eine händische Auswertung anzuraten. Es ist sinnvoll die T₁₅, T₂₀ und T₃₀ gleichzeitig darzustellen, da diese tatsächlich verschieden sind. Deutlich aussagekräftiger, jedoch unübersichtlich, ist der komplette Verlauf der Abklingkurve jeder Einzelmessung pro betrachteter Frequenz beziehungsweise je Frequenzband.

Zu bemerken ist, dass eine kurze frühe Abklingzeit (EDT – Early Decay Time) psychoakustisch von großer Bedeutung ist, und der Planungsprozess von Absorbern mit entsprechendem Fachwissen durchgeführt werden sollte.

Die Nachhallzeiten, welche in Anlehnung an die ISO 354 ermittelt wurden, sind quantitativ verwertbar. Abklingvorgänge, welche bei geringer Modendichte ermittelt werden, sind vor allem ein qualitatives Maß um die Wirksamkeit der eingebrachten Absorberaufbauten zu vergleichen.

5.10 Absorptionsbestimmung

Die Schallabsorptionseigenschaft eines Materials hängt nicht nur von seinen akustischen Eigenschaften ab, sondern auch von seiner Anbringung und Positionierung im Raum. Eine Platzierung von vornehmlich druckwirksamen Absorbern in Raumecken oder Kanten erzielt aufgrund der höheren Modendichte insbesondere im tieffrequenten Bereich höhere Absorptionsgrade (der gesamte Absorber mit seiner mechanischen Ausdehnung liegt in den Druckbäuchen der Eigenmoden mit großer Wellenlänge). Eine detaillierte Dokumentation zur Angabe von Absorptionswerten ist deshalb unerlässlich.

Für alle Darstellungen in dieser Arbeit wurde, sofern nicht explizit anders erwähnt, die komplette belegte Grundfläche durch den Absorber für die Berechnungen herangezogen.

Randeffekte werden bei seitlich schalloffenen Aufbauten bewusst nicht korrigiert!

Folglich ergeben sich vor allem bei dicken Aufbauvarianten, welche seitlichen Schalleinfall erlauben, signifikante Unterschiede und surreal hohe Absorptionsgrade. Bezogen auf die belegte Wandoberfläche sind diese Messwerte jedoch für die Kalkulation von Absorptionsgraden erlaubt und sinnvoll.

Bei Darstellung des Absorptionsgrades bezogen auf die komplette wirksame Absorberoberfläche erhält man "normtaugliche" Werte, muss jedoch in der realen Kalkulation berücksichtigen, dass bei einer gewissen belegten Wandoberfläche die wirksame Absorberfläche größer sein kann als eben jene.

Die für diese Arbeit interne Definition der überdeckten Raumoberfläche (und nicht wirksamen Absorberoberfläche) wurde gewählt, um eine einfache Vergleichbarkeit bei sehr tiefen Frequenzen zu erhalten.

Bei Varianten mit Kassettierung sind obige Überlegungen ohnehin obsolet, da die wirksame Absorberoberfläche der überdeckten Grundfläche entspricht.

6 Messergebnisse

6.1 Nachhallzeit des leeren Raumes

Für die Ermittlung der positions- und frequenzabhängigen Nachhallzeit wird zuerst die Impulsantwort aus der aufgenommenen Sinussweep-Antwort ermittelt. Diese fällt im linearen Maßstab logarithmisch im Pegel ab und ist in folgender Darstellung, wie im Hallraum aufgenommen, breitbandig ohne Filterung dargestellt:



12. Abbildung: Breitbandige Impulsantwort im leeren Hallraum mit Position Q1 - S7

Ein deutlich verständlicheres Bild bietet das CSD (Cumulative Spectral Decay), also eine Transformation der Impulsantwort in den Frequenzbereich. Für die zeitliche Abtastung wird ein Apodisationsfilter (ein Filter, welches den "leakage-effect" bei der Fourier-Transformation gering hält) mit einer Anstiegsflanke von 0,2ms und einer Länge von 2048 Samples verwendet. Dieses wird schrittweise mit der Impulsantwort multipliziert und jeweils einer FFT zugeführt.

Das Ergebnis ist eine Darstellung des frequenzabhängigen Pegelabfalls (Abbildung 13). Vorsicht, auch wenn hier ein Pegel von 0 bis -60dB dargestellt wird, kann daraus keine direkte T_{xx} abgelesen werden. Die Abfallgeschwindigkeiten bieten jedoch eine grobe Orientierung über die zu erwartende Nachhallzeit. Das CSD hat für die Auswertung keine Bedeutung, ist jedoch als anschauliche Grafik für das Verständnis sehr hilfreich. Im tieffrequenten Bereich unter 10Hz treten nennenswerte Störungen auf. Die anregende Schallquelle liefert bei sehr tiefen Frequenzen kaum Schalldruckpegel, weshalb ein sehr schlechter Signalstörabstand gegeben ist und ungewollte Messartefakte entstehen. Eine entsprechend steile Hochpassfilterung bei 15Hz wird für Methode 3 benötigt. Für Methode 1 und 2 geschieht diese steilflankige Filterung automatisch durch die Terzbandfilter in der Auswertung.



13. Abbildung: Frequenzabhängiger Ausklingvorgang des Raumes für Q1 – S7 (CSD)



In folgender Grafik ist die ETC (siehe Kapitel 5.9) der aufgenommenen Impulsantwort dargestellt:

14. Abbildung: Energy Time Curve der breitbandigen Impulsantwort Q1 - S7: (Schröder Rückwärtsintegration logarithmisch dargestellt)

Der über die Zeit ungleichmäßige Pegelabfall ist ein Indiz dafür, dass die akustische Energie im Raum anfänglich schneller abfällt und allmählich langsamer ausklingt, und auf die unterschiedlichen Abklingzeiten bei verschiedenen Frequenzen zurückzuführen ist. In der nachfolgenden Grafik wird die EDC einer oktavbandgefilterten Impulsantwort für 63Hz dargestellt. Durch die steilflankige Filterung laut Norm wird das jeweilige gewünschte Frequenzband selektiert beziehungsweise werden Störungen aus dem Infrafrequenzbereich völlig eliminiert. Es kann der lineare Pegelabfall im logarithmischen Maßstab beobachtet werden.

Bei sehr geringen Pegeln stellt sich dann ein Übergang, bedingt durch den begrenzten Signalrauschabstand der Messgerätekette ein, in welchem der akustische Ausklingvorgang von Rauschen überdeckt wird. Der SNR ist dabei frequenzabhängig.

Für die automatische Bestimmung der Nachhallzeit wird mithilfe des Lundeby Algorithmus eine Interpolation des Pegelabfalls durchgeführt. Üblicherweise mit einem Startpunkt bei -5dB. Für eine T₃₀ also auf -35dB. Der SNR der Messungen ist ausreichend groß und mit entsprechendem Headroom für externe akustische Störungen, wie sie im Alltag der Prüfhalle auftreten. Jede einzelne Messung wurde auf einen SNR von mindestens 55dB im CSD überprüft und wurde gegebenenfalls bei zu starken externen Geräuschen wiederholt. Der reale verfügbare Störabstand für die Nachhallzeitauswertung ist aufgrund der Schröder-Rückwärtsintegration geringer.

Die in Abbildung 15 dargestellte Pegelabfallkurve ist oktavbandgefiltert. Für die Auswertung sämtlicher Messungen in dieser Arbeit wurden Terzbandfilter verwendet.



15. Abbildung: Energy Decay (Q1 - S7): 63Hz Oktavbandfilter mit Lundeby Algorithmus (blau)

6.1.1 Methode 1

Die erhaltenen Nachhallzeiten des leeren Raumes sind insbesondere im tieffrequenten Bereich stark von der Position der Quelle und des Empfängers abhängig. In den beiden nachfolgenden Tabellen wurden die Nachhallzeiten des leeren Hallraumes für Methode 1 dargestellt. Dabei wurden jeweils 12 Mikrofonmesspunkte aufgenommen.

	Q2 – P1	Q2 – P2	Q2 – P3	Q2 – P4	Q2 – P5	Q2 – P6	Q2 – P7	Q2 – P8	Q2 – P9	Q2 – P10	Q2 – P11	Q2 – P12
f [Hz]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]
20	42,0	38,8	42,6	40,1	38,0	40,3	42,1	39,2	40,0	42,1	46,2	40,6
25	37,9	39,2	39,1	40,2	32,2	33,1	43,3	40,3	35,8	43,5	38,3	37,3
31,5	29,9	24,1	30,4	21,2	30,6	31,1	24,8	18,6	30,3	20,8	28,8	30,0
40	23,4	26,1	24,8	36,8	32,5	34,4	45,0	37,0	24,3	26,3	23,4	24,8
50	22,9	43,7	24,9	44,0	31,7	44,4	41,7	45,9	22,3	43,9	23,2	25,7
63	24,7	21,1	21,8	23,4	22,5	22,6	22,9	22,9	20,4	22,1	20,3	22,6
80	23,1	23,2	23,4	22,4	21,3	23,5	23,5	21,1	23,2	23,6	23,3	24,3
100	25,6	28,9	27,5	29,7	25,3	27,0	28,7	30,0	27,8	29,2	27,6	28,4
125	23,2	24,5	23,6	26,1	23,0	23,5	24,0	25,9	23,6	24,3	23,7	24,1
160	21,4	22,3	23,4	21,1	22,9	21,3	20,0	20,1	21,3	23,4	21,1	23,7
200	17,6	18,4	17,7	17,6	16,7	17,4	17,4	17,7	16,7	17,0	17,9	17,3
250	14,9	15,9	14,9	14,7	16,0	14,7	16,7	15,8	15,4	14,6	15,1	14,7
315	14,6	14,6	14,5	14,0	14,5	14,6	14,6	14,0	14,1	14,0	14,1	14,0
400	13,0	12,5	13,2	12,7	13,0	13,4	13,2	12,8	12,9	13,1	13,1	12,9
500	11,5	11,8	11,4	11,8	11,3	11,2	11,5	11,2	11,3	11,3	11,3	11,7
630	10,8	10,9	10,6	10,7	10,8	10,7	10,8	10,8	10,7	10,8	10,5	10,7
800	9,7	9,7	9,7	10,0	9,9	10,0	9,8	9,7	9,8	9,8	10,0	9,5
1000	8,6	8,6	8,9	8,7	8,8	8,8	8,9	8,6	8,7	8,5	8,6	8,8
		г т	aballa, T2	Tora Noo	hhallaaita	a Mathad	1.12 Dec	ition on m		n		

5. Tabelle: T30 Terz-Nachhallzeiten Methode 1: 12 Positionen mit Quelle 2

Anschließend wurden diese 12 Messpunkte pro Quelle gemittelt, sodass 3 quellpositionsabhängige Nachhallzeiten ermittelt werden konnten. Diese werden in weiterer Folge zu einer gesamten Nachhallzeit gemittelt:

	Q1 Sum	Q2 Sum	Q3 Sum	Mittelwert Q1, Q2, Q3
f [Hz]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]
20	41,9	41,0	48,4	43,8
25	37,7	38,3	44,6	40,2
31,5	25,8	26,7	30,1	27,5
40	34,2	29,9	41,0	35,0
50	29,8	34,5	33,7	32,7
63	21,9	22,3	20,8	21,7
80	19,1	23,0	22,6	21,6
100	23,1	28,0	26,2	25,7
125	20,7	24,1	27,3	24,1
160	20,3	21,8	21,7	21,3
200	14,9	17,4	16,9	16,4
250	14,2	15,3	15,3	14,9
315	14,2	14,3	13,8	14,1
400	12,7	13,0	12,6	12,8
500	11,1	11,4	11,5	11,4
630	10,7	10,7	10,6	10,7
800	9,7	9,8	9,8	9,8
1000	8,8	8,7	8,7	8,7

6. Tabelle: T30 Terz-Nachhallzeiten Methode 1: jeweils 12 Messpunkte je Quellenposition gemittelt

In Tabelle 5 ist ersichtlich, dass für Frequenzen oberhalb der Schröder Frequenz von 250Hz, also einem Schallfeld mit ausreichender Diffusität an allen Punkten im Raum, die Nachhallzeit sehr ähnlich ist.

Insbesondere für die Messung tiefer Frequenzen ist es aber erforderlich, exakt dieselben Quell- und Empfängerpositionen sowohl für die Bestimmung der Nachhallzeit des leeren Raumes, als auch für die Bestimmung der Nachhallzeit mit eingebrachten Materialproben zu verwenden.

Die hohen Nachhallzeiten im 20Hz und 25Hz Terzband lassen auf die Stabilität und Starrheit der Stahlbetonausführung des Hallraumes schließen. Ein anschaulicher Wert ist die Wegstrecke, die der abgestrahlte Schall innerhalb seiner T₆₀ zurücklegt. Diese liegt bei fast 15km, wodurch bei den gegebenen Raumabmessungen etwa 2000 Reflexionen notwendig sind. Folglich ergibt sich ein Reflexionsfaktor sehr nahe an 1.

In Abbildung 16 wird der Mittelwert von Q1, Q2 und Q3 aus der Tabelle 6 als frequenzabhängige gemittelte Nachhallzeit gezeigt (Berechnet mit der ITA Toolbox und dargestellt mit Libre Office Calc):



16. Abbildung: Gemittelte Nachhallzeit des leeren Hallraums nach Methode 1 – T30, T20, T15

Grafisch dargestellt sind die Terz-Nachhallzeiten des leeren Hallraumes. Die T₃₀, T₂₀ und T₁₅ verlaufen relativ ähnlich. Für die Auswertung einer bestimmen Nachhallzeit T_{xx} mit Probe wird diese dann jeweils mit der entsprechenden Nachhallzeit aus dem leeren Hallraum in Beziehung gesetzt. Die Differenzen der T_{xx} zueinander erklären sich bei Frequenzen unterhalb der Schröder Frequenz durch die fehlende Bedingung von völliger örtlicher und zeitlicher Diffusität des Schallfeldes trotz Mittelung über 36 Einzelmesspunkte.

Die Nachhallzeit ist in der Praxis von der ausgewerteten Abklingdauer abhängig, wenn der Schalldruckpegel nicht gleichmäßig linear abfällt. Die folgenden Ursachen sind dafür verantwortlich:

- das Schallfeld ist räumlich oder zeitlich nicht völlig diffus
- zu geringer Signalstörabstand der Messung
- reaktives Verhalten der Absorber

Es ist wichtig zu verstehen, dass unterhalb der Schröder Frequenz die Nachhallzeit eines Raumes eine ortsabhängige Größe ist, die trotz bei schmalbandiger Terzfilterung keinen gleichmäßigen zeitlichen Pegelabfall hat. Die Ergebnisse dieser Messungen weisen daher immer eine gewisse Unsicherheit auf. Durch einen großen Stichprobenraum und entsprechende Mittelwertbildung wird die Varianz der Gesamtmessungen reduziert.

6.1.2 Methode 2

Methode 2 hingegen wird original nur mit einer Quellenposition und einer Empfängerposition (im dreidimensionalen Raum diagonal gegenüberliegend, d.h. Q1 - S7) vermessen. Für das tiefere Verständnis wurden jedoch einige Messungen mit 4 Mikrofonpositionen (S1, S3, S7, S9) ausgeführt:



17. Abbildung: Positionsabhängige Nachhallzeit T30 des leeren Hallraumes mit Methode 2

Es treten leichte Abweichungen auf. Sie sind für die Auswertung kein Problem, da nur die durch die Proben eingebrachte Differenz ermittelt wird. Mögliche, jedoch nicht näher untersuchte Ursachen sind:

- Interaktion Lautsprecher mit dem Schallfeld
- Raumunsymmetrie (verschiedene Wände, Eingangstür, Diffusoren)
- Schallfeldunsymmetrie durch Absorberplatzierungen (nicht für den leeren Hallraum)
- Ecke-Ecke Messpunkte durch Schallfeldunsymmetrie nicht gleichmäßig
- Beeinflussung durch dominante Nachbarmoden (im Bereich geringer Eigenmodendichte)

Um den letzten Punkt zu umgehen wird für die tiefsten Eigenfrequenzen die Methode 3 angewandt.

6.1.3 Methode 3

Für Methode 3 werden die ersten 7 Eigenmoden in Ihrer Nachhallzeit ausgewertet. Tabelle 7 wird in Kapitel 6.2.2 unter Methode 3 erklärt. Die grau hinterlegten Messpunkte werden zusätzlich als Diagramm dargestellt.





Die Mode 6 sticht durch Ihre höhere Nachhallzeit im Vergleich zu ihren Nachbarfrequenzen heraus. Ein möglicher Erklärungsansatz ist die Ausprägung eines lokalen Druckminimums dieser Mode im Bereich der Eingangstür (Kapitel 4.2.1). Diese stellt im Vergleich zu den starren Betonwänden eine Schwachstelle dar über welche Energie verloren geht. Im Fall der Mode 6 kann eben jene Energieaustragung durch die Türe mangels Anregung nicht stattfinden.

6.2 Absorptionsgrößen

6.2.1 Leerer Hallraum

Die äquivalente Absorptionsfläche der 244.8m² Raumoberfläche des leeren Hallraumes, kann mit dem Volumen des Hallraumes und der gemessenen Nachhallzeit errechnet werden und wird in Abbildung 19 gezeigt:





6.2.2 Absorber

Die verwendeten Absorber sind seitlich schalloffen und bestehen aus einer 100mm Fasermatte sowie einer darauf aufgebrachten 2x1m Stahlplatte mit 2,5mm Dicke. Die Unterschiede im wirksamen Absorptionsgrad, welche nur durch andere Platzierung hervorgerufen werden, sind beträchtlich. Es sei angemerkt, dass die ISO354 Platzierung für übliche Hallräume (ca. 200-300m³) und sehr tiefe Frequenzen zwar von geringer Aussage ist, für den späteren praktischen Anwendungsfall jedoch ein Vergleich zur gewählten Standardplatzierung für den Hallraum der TU Graz hergestellt werden sollte.

Methode 1:



20. Abbildung: ISO 354 Positionierung - Absorptionsgrade Methode 1

In obiger Abbildung wird der Absorptionsgrad mit ISO 354 Positionierung dargestellt. In nachfolgender Abbildung mit Standardplatzierung. Diese Platzierungen liefern verschiedene Schwankungen bezüglich der T_{xx} Auswertung.



21. Abbildung: Standardplatzierung - Absorptionsgrade Methode 1

Je nach Position im Raum verändert sich die lokale Wirksamkeit eines Absorbers beträchtlich. Die Absorber wurden ausschließlich am Boden aufgebaut, da die vielen wechselnden Aufbauten keine fixe Montage und damit keinen stehenden Einsatz zugelassen haben.

In Abbildung 22 wird der Unterschied von gleich aufgebauten Absorbern an zwei Positionen verglichen. Einmal die von der ISO 354 geforderte Anbringung unter Kapitel 5.6.1 und die in dieser Arbeit entworfene Anordnung unter Kapitel 5.6.2 um möglichst viele Raummoden gleichzeitg zu dämpfen.



22. Abbildung: ISO354 Positionierung vs. Standardplatzierung (T15)

Methode 2:



23. Abbildung: ISO 354 Positionierung - Absorptionsgrade Methode 2 (Q1-S1/S3/S7/S9 gemittelt)



24. Abbildung: Standardplatzierung - Absorptionsgrade Methode 2 (Q1-S1/S3/S7/S9 gemittelt)

Für Methode 2 weichen die Messwerte aufgrund der geringen Mittelwertbildung punktuell stärker ab als bei Methode 1.

Für die nachfolgende Grafik sind jeweils verschiedene Eckpositionen mit Methode 2 einzeln ausgewertet.



25. Abbildung: ISO 354 Positionierung – Vergleich verschiedener Eckmesspositionen mit Methode 2 (T20)

Die Unsymmetrien sind vor allem auf die Beeinflussung der unsymmetrisch eingebrachten Absorberproben zurückzuführen. Eine Mittelwertbildung über mehrere Eckpositionen ist daher anzuraten.

Vergleich Methode 1 & 2:

Die Methoden 1 & 2 liefern gewisse Abweichungen, die aus dem ortsabhängigen Schallfeld resultieren. Wie in den Tabellen 5 und 6 ersichtlich, wird die Nachhallzeit im Hallraum erst über 250Hz unabhängig von Quell- und Empfängerposition.

Mittelt man die 4 gemessenen Eckmesspositionen aus Abbildung 25, so erhält man die rote Kurve wie in Abbildung 26 dargestellt. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Auswertung mit Methode 1 als blaue Vergleichskurve eingefügt.



26. Abbildung: ISO 354 Positionierung - Vergleich Messmethode 1 & 2 (T20)

Prinzipiell lassen sich relativ ähnliche Ergebnisse erzielen. Die Unterschiede begründen sich in Messabweichungen durch das Auswerteverfahren mit dem Lundeby Algorithmus und leichte Unterschiede in den jeweils lokalen Schallfeldern an der Mikrofonposition. Die Abweichungen treten bei verschiedenen Absorberaufbauten an verschiedenen Frequenzen auf.

Methode 3:

Für die Auswertung des jeweiligen effektiven Absorptionsgrades α_e der Eigenmoden wird eine Frequenzfilterung vorgenommen. Das verwendete Filter hat eine Bandbreite von +/-5% der Mittenfrequenz und ist als Butterworthfilter 4ter Ordnung ausgeführt. Eine engere oder steilflankigere Filterung verfälscht die Auswertung durch Überlagerung der Messdaten mit dem des Filterverhaltens. Eine zusätzliche Seperation der oft eng benachbarten Eigenfrequenzen wird durch geschickte Messmikrofonplatzierung erreicht (siehe Kapitel 5.3).

Betrachtet werden die ersten 7 Eigenmoden. In nachfolgender Tabelle sind mehrere Übertragungsfunktionen ausgewertet, wobei die grau hinterlegten Übertragungspfade die beste Frequenztrennung erzielen. Die Auswertung erfolgt ausnahmslos manuell um eventuell noch leicht vorhandene Schwebungen zu erkennen und den Pegelabfall der EDC (Energy Decay Curve) korrekt zu bestimmen. Der Pegelabfall wird in der Regel wie bei einer T20 ausgewertet und extrapoliert. Sind keine Schwebungen vorhanden, ist der Pegelabfall im logarithmischen Maßstab linear und zwischen einer T15, T20 oder T30 nur marginale Unterschiede festzustellen. Eine große Rolle hingegen spielen die Nachbarfrequenzen in der Auswertung, weshalb bei schlechter Frequenztrennung teilweise starke Beeinflussungen des jeweiligen Einzelfrequenz-Absoptionsgrades auftreten können:

Mode	Frequenz [Hz]	Q1 – S1	Q1 – S4	Q1 – S5	Q1 – S7	Q1 – S8	Q1 – S13	Q1 – S16	Q1 – S19
1	20,6	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04			
2	28,6	0,10	0,10		0,10		0,10	0,10	
3	35	0,13			0,17	0,18		0,19	
4	35,3	0,13	0,18		0,17				
5	40,6	0,67			0,62	0,63			1,07
6	41,1	0,67	0,43	0,47	0,62	0,63	0,49		
7	45,2	0,85			0,79			0,93	0,87

Absorptionsgrad: 5 - 100mm + 2x1m / 2,5mm

8. Tabelle: Absorptionsgrad Einzelfrequenzen – Methode 3

Die exakte Positionierung des Mikrofons im Druckminimum ist wichtig, da bei einer starken benachbarten Mode eine hohe Unterdrückung eben dieser notwendig ist. Die 7te Mode sollte idealerweise an einem Punkt mit den Koordinaten (x=0mm, y= 2085mm, z=2450mm) aufgenommen werden. Da dieser Punkt nicht erfasst wurde bieten sich S16 oder S19 an, je nachdem ob die darüber oder darunter liegende Mode ausgeblendet werden soll.

Die Übertragungsstrecken Q1-S1 sowie Q1-S7 sind Ecke-Ecke Messungen die alle Moden des Raumes gleichzeitig abbilden. Die Modentrennung erfolgt ausschließlich durch das Frequenzfilter, nicht durch die mechanische Separation. Eng benachbarte Moden beeinflussen sich in der Auswertung dabei teils erheblich.

In der nachfolgenden Diagrammdarstellung wurden die grau hinterlegten Werte der Tabelle verwendet. Interessant ist dabei der enorm große Absorptionsgradunterschied zwischen 5ter und 6ter Mode, die mit 40,6Hz und 41,1Hz direkt aneinander liegen.

Die 6te Mode ist aufgrund des höheren Pegels im Frequenzgang dominant. Eine gute mechanische Separation der 5ten Mode ist deshalb notwendig, da bei so eng benachbarten Frequenzen eine Filtertrennung nicht angewandt werden kann (Achtung: Selbst bei steilflankigsten Filtern wäre eine leichte Temperaturdrift zwischen der Messung im leeren Hallraum und mit eingebrachten Proben ein Problem). Nur im Übertragungspfad Q1-S19 kann die 5te Mode gut isoliert, und damit der effektive Absorptionsgrad korrekt bestimmt werden.



27. Abbildung: Standardplatzierung - Absorptionsgrad - Methode 3

Zu erklären ist die große Differenz des effektiven Absorptionsgrades bei Mode 5 und 6 nicht durch die starke Frequenzselektivität der Absorberaufbauten, sondern durch deren Platzierung im Raum. Die gewählte Standardplatzierung befindet sich zu einem nennenswerten Teil im Druckminimum der 6ten Mode (vgl. Kapitel 4.2.1 und Abbildung 9).

Die Beeinflussung von benachbarten Moden hat für Methode 1 und 2 noch gravierendere Folgen, da die jeweils im Pegel am schwächsten abfallende Mode im jeweiligen Terzband, bzw. sogar im angrenzenden Terzband den Absorptionsgrad des gesamten Terzbandes dominiert.

Soll die allgemein frequenzabhängige Wirksamkeit eines Absorbers bestimmt werden (und nicht die konkrete Wirksamkeit auf gewisse Moden unter einer festgelegten Platzierung), so empfiehlt sich aus rein akustischer Sicht eindeutig eine Platzierung aller Absorber in den Ecken. Dadurch kann die Effektivität des Absorbers gleichmäßig auf alle Moden sichergestellt werden.

Für die erste oblique Mode (hier die 8te Mode) treten alle Druckmaxima in den Raumecken auf (siehe Kapitel 4.2.1). Eine Selektion durch geschickte Mikrofonpositionierung ist deshalb nicht möglich. Durch allgemein geschickte Auslegung eine Hallraumes kann sich ein Vorteil bei der Modentrennung ergeben. Eine weitere Methode mit der circa die ersten 15 Moden gut getrennt werden können ist eine Sinusanregung mit Einzelfrequenzen.

6.3 Reaktives Verhalten von Absorbern

Betrachtet werden ausschließlich passive Bauelemente deren einzige Energiezufuhr das Schallfeld ist. Sind diese Bauelemente jedoch schwingungsfähig, kann in eben jenen temporäre Energiespeicherfähigkeit beobachtet werden. Der Gütefaktor ist dabei die Größe, welche den Energieverlust eines resonanzfähigen Schwingkreises angibt. Große Güten und damit schmalbandige Resonanzen haben mit ihrer geringen Dämpfung eine große Ein- und Ausschwingdauer.

An die Raumakustik gekoppelte mechanische, elektrische (Messlautsprecher) oder akustische Resonatoren entnehmen dem Schallfeld an und um ihre Resonanzfrequenz sehr schnell Energie. Die aufgenommene akustische Energie wird unmittelbar in im Resonanzkreis zirkulierende Energie umgewandelt. Die Dämpfung des Resonators gibt an, wie effektiv zirkulierende Energie in thermische Energie umgewandelt wird und damit aus dem akustischen System abgeführt wird.

Bei geringer Dämpfung kann der Ausschwingvorgang des Resonanzsystems langsamer sein als der Abklingvorgang des Raumes. Die wechselseitige Kopplung von Schallfeld und Resonator bedingt auch eine Rückspeisung von Energie aus dem Resonanzsystem in den Raum. Dadurch entsteht eine komplexe Interaktion von reaktiven Absorbern mit dem Schallfeld.

Wenn die Resonanz eines Absorbers mit einer exponierten und singulären Raumeigenmode in ihrer Frequenz nahe aneinander liegen, resultiert die akustische Abklingkurve in einer Schwebung.

Dargestellt wir nun ein vorgefundener Extremfall an besonders starker Interaktion zwischen Schallfeld und reaktivem Absorber. Dieses Verhalten tritt so eindeutig nur bei sehr tiefen Frequenzen auf, insbesondere bei Aufbauten, die eine sehr tiefe Eigenresonanz erlauben, jedoch keine starke Absorption aufweisen.

Verwendet wurde für alle folgenden Grafiken der Aufbau in Standardplatzierung mit 200mm Fasermatte, 2,5mm dicker 2x1m Stahlplatte, Kassettierung und einer Gaffateilabdichtung zur Kassettierung an den 1m Querseiten. Die aufgenommene Impulsantwort wurde mit einem Butterworthfilter 6ter Ordnung mit 16-26Hz Bandbreite für die weitere Auswertung vorgefiltert.



28. Abbildung: Starke Schwebung / Gefilterte Impulsantwort Q3 - P10

Die Position Q3 – P10 weist eine charakteristische Schwebung aus zwei sehr nahe aneinander liegenden Frequenzen mit 20,4Hz und 20,5Hz auf. Das ist die Masse-Feder Resonanzfrequenz des Absorbers und die tiefste Raumeigenmode. Nachdem diese an der ausgewählten Messposition zusätzlich auch sehr ähnlich im Pegel sind, bildet sich eine starke Schwebung aus:



29. Abbildung: DFT / Absorberresonanz und Raumeigenmode nahe aneinander liegend

Die nachfolgende, aus der Impulsantwort gewonnene, ETC verdeutlicht die starke Schwebung mit großem Pegeleinbruch:



30. Abbildung: ETC / Q3 – P10 gefiltert

In der Raumecke ergibt sich eine stärkere Gewichtung der tiefsten Eigenmode. Die Frequenz von 20,5Hz tritt vom Pegelverhältnis gegenüber 20,4Hz deutlich stärker in Erscheinung. Der Übertragungspfad Q1 – S7 resultiert deshalb nur in einer schwachen Schwebung im Zeitverlauf der folgenden ETC. Die Abklingzeit und die damit verbundene Absorption kann aber trotzdem kaum sinnvoll als Einzelwert angegeben werden, da in diesem Spezialfall verschiedene T_{xx} nennenswert voneinander abweichen.





7 Conclusio

Um Physik überhaupt analytisch berechenbar zu machen wird oft ein vereinfachtes Modellabbild der Wirklichkeit benötigt. Die technisch sehr einfache Betrachtungsweise über die statistische Raumakustik des eigentlich sehr komplizierten Schallfeldes eines Raumes ist geschickt um den Absorptionsgrad über die Nachhallzeit zu errechnen.

Anders ist der Sachverhalt bei tieferen Frequenzen, bei welchen die getroffenen Voraussetzungen für die notwendigen Vereinfachungen für statistische Annahmen nicht mehr gelten und die Feststellung des Absorptionsgrades mit größerem Aufwand verbunden ist. Tiefe Detailkenntnis ist für das Verständnis von freischwingenden Plattenabsorbern und deren Wirkungsweise essentiell.

Vorhersagen über die Wirksamkeit in realen Räumen lassen sich vor allem mit empirischer Erfahrung sehr gut abschätzen, entziehen sich jedoch aufgrund ihrer Komplexität exakter Berechenbarkeit.

7.1 Verwertbarkeit von tieffrequenten Absorptiongrößen

Die Effizienz eines tieffrequent wirksamen Absorbers kann im Modalbereich durch die wellentheoretische Raumakustik beschrieben werden. Allgemein gültige Vorhersagen für die Absorption sind kaum möglich, sondern eben stark von der Absorberplatzierung im konkreten Schallfeld des Einsatzortes abhängig.

Die ermittelten Absorptionsgrößen bei tiefen Frequenzen gelten streng genommen nur im jeweiligen Messraum und vor allem für die angewandte Messposition.

7.2 Ausblick

Weitere wichtige Versuche für die Weiterführung dieser Arbeit sind:

- => Untersuchung gleicher Absorber in verschiedenen Hallräumen
- => Verschiedene Absorberpositionen im gleichen Hallraum
- => Verschiedene Absorberausrichtungen im gleichen Hallraum an ähnlicher Position
- => Vergleich Absorption frei stehend und an Rückwand montiert
- => Untersuchung in halligen Räumen mit bereits großer Modendichte bei 20-30Hz
- => Untersuchung des reaktiven Verhaltens von Absorbern
- => Vergleichbarkeit von Hallraum-Absorptionsgraden mit realen Räumen unterschiedlicher Nutzung
- => Wirksamkeit im Kundtschen Rohr (Schalleinfall frontal und seitlich streifend; Querschnitt 2x1m)
- => Methode 3 für Effektive Absorptionsgrade α_e mit Einzelsinusanregung
- => Messungen an der Schwingplatte mit Schwingungsaufnehmern und/oder Laser-Doppler-Vibrometer