

Schallausbreitung im Hallraum

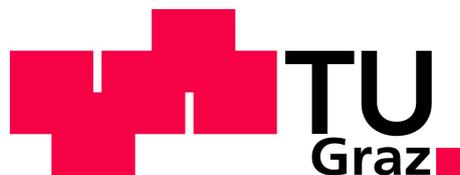
Sound Propagation in a Reverberation Chamber

Bachelorarbeit von Martina Kreuzbichler

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der
Technischen Universität Graz

Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Kubin

Betreuerin: Dipl.-Ing. Jamilla Balint



Graz, im Juni 2016

Kurzfassung

Hallräume werden in üblicher Praxis mit Diffusoren ausgestattet. Anhang A der ÖNORM EN ISO 354 besagt, dass die Diffusität eines Raumes mit der Anzahl an Diffusoren steigt. Als optimale Anzahl von Diffusoren wird die angesehen, bei welcher der gemessene Mittelwert des Schallabsorptionsgrades im Frequenzbereich von 500 Hz bis 5000 Hz sich einem Maximum nähert und danach mit zunehmender Anzahl von Diffusoren konstant bleibt. Obwohl diese Vorgehensweise sehr gebräuchlich ist, gibt es verschiedenste Ansätze die Diffusität des Schallfeldes zu überprüfen und bis jetzt ist es noch immer unklar, wie diffus ein Schallfeld sein kann. Bei Nachhallzeitmessungen und anschließenden Berechnungen des Absorptionsgrades eines Prüfobjekts treten Werte von $\alpha > 1$ im ganzen Frequenzbereich auf.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von Plattendiffusoren auf die Energieverteilung in einem Hallraum. Der Raum wird mit einem omnidirektionalen Lautsprecher angeregt, die Impulsantworten an 70 Position um den Diffusor werden gemessen und die Schallverteilung wird analysiert. Die Messungen zeigen, wie sich der Schall nach Anregung ausbreitet. Animierte Sequenzen von den ersten Millisekunden bis zu 8 Sekunden zeigen den Weg der Schallwellen im Raum. Die Animationen werden mit dem Matlab Visualisierungs Tool generiert.

Abstract

It is common practice to equip reverberation chambers with diffusors. Annex A of ISO 354 states that the sound field in the chamber becomes more diffuse with an increasing amount of diffusors. The ideal amount of diffusors is reached, when the measured mean sound absorption coefficient in the frequency range from 500 Hz to 5000 Hz approaches a maximum value and remains constant with an increasing number of diffusors. Although this procedure is very common, a lot of different approaches for investigating the diffusivity of the sound field exist and up to this point it is still not known how diffuse a sound field can get. When measuring the reverberation time and calculating the absorption coefficient of a sample in a reverberation chamber, values of $\alpha > 1$ in the entire frequency range appear.

This bachelor thesis evaluates the influence of the panel diffusors regarding the energy distribution in a reverberation chamber. The chamber is excited by an omnidirectional speaker, the impulse responses around the diffuser at 70 points are measured and the sound propagation is analyzed. The measurements show how the sound waves propagate after the excitation. Animated sequences from the first milliseconds up to 8 seconds illustrate the path of the sound waves in the room. The animations are generated with the Matlab Visualization Tool.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung	2
2. Theorie zum Hallraum	3
2.1. Schallenergiegrößen	3
2.2. Energieberechnung in der Signalverarbeitung	5
2.3. Diffuses Schallfeld	6
2.4. Nachhallzeit	8
2.5. Hallradius	10
2.6. Messungen im Hallraum	10
2.7. Hallraum der TU Graz	11
2.8. Diffusorplatten	12
3. Messung	13
3.1. Anregungssignal	13
3.2. Messaufbau	14
3.2.1. Diffusor	15
3.2.2. Messraster	17
3.2.3. Wahl des MLS Typs	19
3.2.4. Vergleich von Impulsantworten	22
4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)	28
4.1. Bedienung und Beschreibung der einzelnen Tools	28
4.1.1. Das Starttool	28
4.1.2. Vorbereitungen	29
4.1.3. Exceltabelle	29
4.1.4. EZV-Berechnung	29
4.1.5. EZV-Darstellung	33
4.2. Energiezeitverteilung im Hallraum	34
5. Interpretation und Ausblick	41
5.1. Interpretation der Ergebnisse	41
5.1.1. Schallausbreitung in den ersten Millisekunden	41
5.1.2. Überprüfung der Nachhallzeit	45
5.1.3. Darstellung der Raummoden	46
5.1.4. Einfluss des Diffusors	46
5.2. Ausblick	48
Anhang	48
Anhang A. Konferenzbeitrag DAGA 2016	48

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Auf der Suche nach einem geeigneten Projekt für meine Bachelorarbeit entwickelten meine Betreuerin Jamilla Balint und ich gemeinsam die Idee, die Schallausbreitung im Hallraum zu untersuchen. Im Laufe meines Bachelorstudiums durfte ich die verschiedensten Bereiche der Akustik kennenlernen und stellte fest, dass mich dieses Fachgebiet sehr interessiert.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll die Impulsantwort im Hallraum des Instituts für Hochbau und Bauphysik gemessen werden und danach mit dem Matlab Visualierungs Tool, welches im Rahmen einer Projektarbeit von Gerd Weber entwickelt wurde, die Energiezeitverteilung im Hallraum dargestellt werden. Dieses Tool wurde bereits 2005 entworfen und daher muss zuvor auch dessen Verwendbarkeit untersucht werden.

Im Speziellen geht es darum die Schallausbreitung bzw. Energieverteilung um einen Diffusor, welcher in der Mitte des Hallraumes platziert wird, zu erklären, darzustellen und zu analysieren.

In den ersten Kapiteln wird die für Messungen im Hallraum benötigte Theorie erklärt und das Messsetup genauer erläutert.

Danach werden die Messungen durchgeführt und die Messergebnisse in das Matlab Visualisierungs Tool (MVT) eingelesen und mittels diesem bearbeitet und dargestellt. Den Abschluss bildet eine Interpretation der Ergebnisse sowie ein Ausblick.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen eines Konferenzbeitrages auf der 42. Jahrestagung für Akustik in Aachen präsentiert. Der Konferenzbeitrag sowie weitere Analysen sind im Anhang A zu finden.

2. Theorie zum Hallraum

2.1. Schallenergiegrößen

Die Schallenergiedichte E setzt sich zusammen aus potentieller und kinetischer Energiedichte^{1 2}. Die potentielle Energiedichte E_{pot} beschreibt die in einem kleinen Teil (Volumen) des Mediums gespeicherte Energie, welche sich auf Grund von Verdichtung und Verdünnung von Teilen des Mediums ergibt.

$$E_{pot}(t) = \frac{p^2(t)}{2\rho c^2} \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.1)$$

Die kinetische Energiedichte E_{kin} repräsentiert die Bewegung der Teilchen in einem kleinen Teil (Volumen) des Mediums.

$$E_{kin}(t) = \frac{1}{2}\rho v^2(t) \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.2)$$

$p =$ Schalldruck, $\rho =$ Dichte der Luft, $c =$ Schallgeschwindigkeit,
 $v =$ Schallschnelle

Wenn man diese beiden Größen addiert, erhält man die Schallenergiedichte E ; nach Integration über das Volumen die Schallenergie W .

$$E(t) = E_{pot}(t) + E_{kin}(t) = \frac{p^2(t)}{2\rho c^2} + \frac{1}{2}\rho v^2(t) \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.3)$$

$$W(t) = \int_V E(t) dV = \int_V \frac{p^2(t)}{2\rho c^2} dV + \int_V \frac{1}{2}\rho v^2(t) dV \quad [J = Ws] \quad (2.4)$$

Die Schallintensität I ist das Produkt von Schalldruck p und Schallschnelle v und wird auch als Schalleistungsdichte bezeichnet.

$$I(t) = p(t)v(t) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.5)$$

Sie beschreibt die Größe und Richtung des Schallflusses pro Fläche.

Integriert man die Schallintensität über ein Flächenelement erhält man die Schalleistung P .

¹[5, S.44ff]

²[4, S.50ff]

2. Theorie zum Hallraum

$$P = \int_A I(t) dA [W] \quad (2.6)$$

Aus den Einheiten der Schallenergie W und der Schalleistung P ist zu erkennen, dass die beiden über die Beziehung

$$W = P \cdot t \quad (2.7)$$

zusammenhängen. Also entspricht bei einer Signallänge von 1 Sekunde die Leistung eines Signals der Energie desselben.

Nehmen wir nun an, es wird mit einer Kugelschallquelle angeregt: In größerer Entfernung verhalten sich die ausgesandten Kugelwellen immer mehr wie ebene Wellen, weil die Krümmung der Wellenfronten nachlässt³. Daher gilt:

$$v = \frac{p}{\rho c^2} \quad (2.8)$$

Dies bedeutet, dass Druck und Schnelle gleichphasig sind. Daher kann man nun für die Intensität folgende Gleichung verwenden⁴:

$$I(t) = \frac{p^2(t)}{\rho c} \quad (2.9)$$

Will man einen zeitlichen Mittelwert von N abgetasteten Augenblickswerten erhalten, verwendet man den Effektivwert des Schalldrucks:

$$\bar{I} = \frac{p_{eff}^2}{\rho c} = \frac{1}{\rho c} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p[n]^2 \quad (2.10)$$

Wird dann noch ein Zusammenhang zwischen der Intensität I (Schalleistungsdichte) und der Schallenergiedichte E hergestellt, so ist dieser durch

$$E = \frac{\bar{I}}{c} = \frac{p_{eff}^2}{\rho c^2} \quad (2.11)$$

gegeben.

In einem Hallraum trifft man die Annahme, dass der Schalleinfall aus allen Richtungen gleich ist. Daher kann man davon ausgehen, dass die Schallschnelle und somit auch die

³[5, S.76]

⁴[5, S.48]

Schallintensität im zeitlichen ($t \rightarrow \infty$) und örtlichen Mittel gleich Null ist; im Wesentlichen speichert der Raum also nur potentielle Energie⁵.

2.2. Energieberechnung in der Signalverarbeitung

Nach [1, S. 3] spricht man in der Signalverarbeitung von einem Energiesignal im Zeitdiskreten, wenn die Energie des Signals, welcher dem Quadrat der Norm des Signals entspricht, endlich ist:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 = \|x\|^2 < \infty \quad (2.12)$$

Verwendet man ein endliches Signal (mit N abgetasteten Pins) lässt sich die Breitbandenergie wie folgt berechnen:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \|x\|^2 \quad (2.13)$$

Danach wird das Parseval-Theorem für zeitdiskrete Signale herangezogen:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (2.14)$$

Dieses besagt, dass die Summe aller Amplituden des Energiedichtespektrums $\frac{|X(k)|^2}{N}$ der Breitbandenergie entspricht.

Werden nur reelle Signale betrachtet, sind die negativen Frequenzen redundant und nur die positiven Frequenzen werden verwendet. Um die negativen Frequenzen in der Energie zu berücksichtigen, muss diese Größe mit 2 multipliziert werden⁶:

$$\frac{2}{N} |X(k)|^2 \quad (2.15)$$

Die Summe darüber entspricht nicht genau der Breitbandenergie, da der Gleichanteil (Frequenz 0 Hz) und der Anteil bei der halben Samplingfrequenz nicht doppelt vorkommen. Um dies zu verbessern, werden alle Samples, außer der Gleichanteil, mit 2 multipliziert.

⁵[5, S.234]

⁶vgl. [8, S.53-55]

2. Theorie zum Hallraum

Um die Energie in Frequenzbändern berechnen zu können, ist es ideal im Frequenzspektrum für jede Frequenz einen Abtastwert zu haben. Dies erreicht man, indem in Matlab die Fs-Punkt DFT berechnet wird:

$$X(k) = fft(x(n), Fs) \quad (2.16)$$

Dadurch ergeben sich um Fs/N mehr Abtastpunkte als vorher. Damit die resultierende Energie in den Frequenzbändern stimmt, wird das Berechnungsergebnis durch Fs/N dividiert. Dadurch ist die Einheit J/Hz:

$$\frac{2}{N} |X(k)|^2 \frac{1}{\frac{Fs}{N}} \quad (2.17)$$

Die Energie als auch das Energiedichtespektrum haben einen dB Wert der mittels $10 \cdot \log$ berechnet wird.

2.3. Diffuses Schallfeld

In einem Hallraum entsteht bei Anregung mit einem Signal ein möglichst diffuses Schallfeld.

Die Diffusität im Hallraum wird durch reflektierende Wände, welche im Idealfall nicht parallel zueinander, sondern schiefwinklig verlaufen sollten, und unregelmäßige Wandoberflächen erreicht. Je besser der Hallraum ist, desto ausgewogener ist die Schallverteilung. Das heißt, der Pegel ist in etwa ortsunabhängig, die Energiedichte (Schallenergie je Volumeneinheit) ist gleichmäßig verteilt, der Schalleinfall ist aus allen Richtungen ident und der Schalldruck an jedem Punkt im Raum gleich.

Es kann versucht werden ein diffuses Schallfeld mit breitbandigen Signalen herzustellen. Ein reiner Ton führt zwangsläufig in schwach gedämpften Räumen zu stehenden Wellen mit ausgeprägten Bäuchen und Knoten. Nur wenn viele stehende Wellen gleichzeitig angeregt werden, können sich diese zu einem nahezu ortsunabhängigen, diffusen Schallfeld zusammensetzen.

Wie bereits in Kapitel 2.1 am Ende erwähnt, ist die Schallschnelle und somit auch die Schallintensität im zeitlichen ($t \rightarrow \infty$) und örtlichen Mittel gleich Null. Daher speichert der Raum nur potentielle Energie und die Energiedichte E ist somit gegeben als⁷:

$$E(t) = \frac{p_{eff}^2(t)}{\rho c^2} \quad (2.18)$$

⁷[5, S.234]

2. Theorie zum Hallraum

Wenn der Schall in einem Raum oft reflektiert wird, ist der Schalldruckpegel praktisch an jeder Stelle des Raumes gleich. Ein Beispiel soll zeigen, wie oft ein Schallstrahl durchschnittlich in einem Raum reflektiert wird. Die mittlere freie Weglänge l_m , die angibt, welche Wegstrecke eine Schallwelle im Mittel zwischen zwei Reflexionen zurücklegt, ist nach [13, S. 201] in einem Würfelraum wie folgt definiert:

$$l_m = l \cdot \frac{2}{3} \quad (2.19)$$

In Rechteckräumen mit üblichen Abmessung wird l_m aus dem Raumvolumen V und der Oberfläche S folgendermaßen abgeschätzt:

$$l_m = 4 \cdot \frac{V}{S} \quad (2.20)$$

Daraus ergibt sich die mittlere Anzahl n_m der im Zeitintervall t zu erwartenden Reflexionen:

$$n_m = \frac{c \cdot t}{l_m} \quad (2.21)$$

In einem Würfelraum mit einer Länge von 5 m und einer mittleren freien Weglänge von 3,33 m wird der Schallstrahl in einer angenommenen Nachhallzeit von 5 Sekunden 515 Mal reflektiert.

$$n_m = \frac{343 \cdot 5}{3,33} = 515 \quad (2.22)$$

Das heißt, der Schallstrahl legt innerhalb von 5 s einen Weg von 1,7 km zurück.

Die Nachhallzeit, welche in Kapitel 2.4 hergeleitet wird, sollte den Wert ergeben, welcher mittels Gleichung 2.28 berechnet wird. Im Idealfall werden die Schallwellen immer wieder reflektiert, wenn der Absorptionsgrad sehr klein ist. Somit würde Gleichung 2.28 einen unendlich großen Wert liefern:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} 0,161 \frac{V}{S\alpha} = \infty \quad (2.23)$$

In etwa kann man sich das Schallgeschehen in einem Raum vorstellen wie das Füllen eines undichten Gefäßes mit Wasser (Abbildung 2.1). Wie die Wasserzuleitung beim Gefäß füllt der Schallsender nach dem Einschalten den Raum allmählich mit Schallenergie, bis ein gewisser Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der dann eingependelte Pegel (Flüssigkeits- oder eben Schallpegel) erklärt sich durch den Ausgleich zwischen Zufluss und dem Abfluss durch die Undichtigkeiten, die dem Energieentzug durch Absorption entsprechen. Schaltet man die Quelle nach Erreichen des stationären, eingeschwungenen

2. Theorie zum Hallraum

Zustandes wieder ab, so sinkt der Pegel und die Flüssigkeit bzw. die Schallenergie fließt ab⁸.

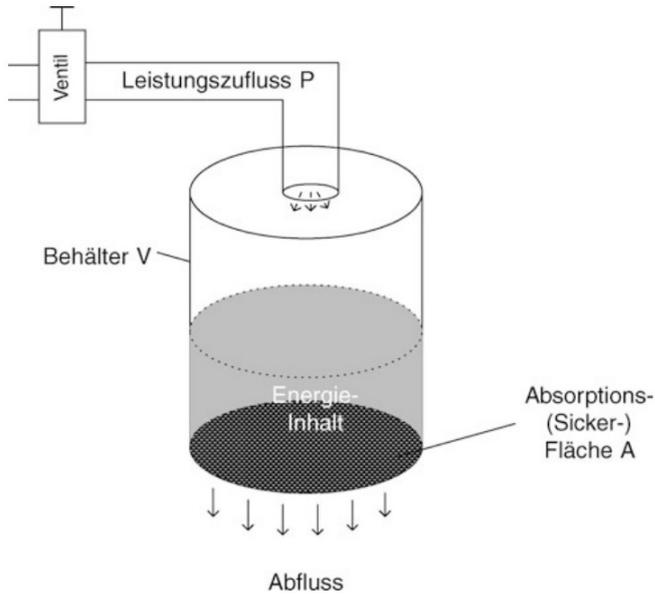


Abbildung 2.1: Vergleich des Energiegehaltes mit einem Flüssigkeitspegel nach [5, S.236]

Daraus ergeben sich 3 verschiedene Zustände:

- Anhall: Die Quelle wird eingeschaltet und der Raum mit Energie gefüllt.
- stationärer Zustand: Die Energie der Quelle gleicht die „Verluste“ des Raums aus. „Energiequelle“ - „Energieverbraucher“ = im Raum gespeicherte Energie
- Nachhall: Die Quelle wird ausgeschaltet, die Energie fällt exponentiell und der Schalldruckpegel linear. Die dafür benötigte Zeitspanne nennt sich Abklingzeit τ .

2.4. Nachhallzeit

Der Nachhall lässt sich mittels der Nachhallzeit T genauer beschreiben. Diese entspricht der Zeitspanne, innerhalb der die Energiedichte E auf den millionsten Teil bzw. der Schalldruck p auf den tausendsten Teil abklingt. Somit ist die Anfangsenergiedichte E_0 um 10^6 mal höher als am Ende.

$$T = \tau \ln \frac{E_0}{E(t)} = \tau \ln 10^6 = 13,8\tau \quad (2.24)$$

⁸[5, S.231ff]

2. Theorie zum Hallraum

Der Schalldruckpegel des abgeschalteten Anregungssignals nimmt in dieser Zeit um 60 dB ab. Oft sind 60 dB nicht messbar, daher wird ein geringerer Abfall gemessen und dieser dann auf die 60 dB extrapoliert. Die äquivalente Absorptionsfläche A entspricht der tatsächlichen Fläche S multipliziert mit dem Absorptionsgrad α . Dieser sollte im Hallraum hinreichend niedrig sein, um die Ausbildung eines geeigneten diffusen Schallfeldes sicherzustellen ($\alpha \leq 0,06$)⁹.

Sabine leitete die Nachhallzeit über die in Kapitel 2.3 erklärten Energiebilanzen her. Die Energie (Energiedichte \cdot Volumen), welche in einem Raum gespeichert ist, entspricht der Leistung P (Energie \cdot Zeit) minus der verlorenen Schallenergie im Raum:

$$VdE = Pdt - \frac{VE}{\tau}dt \quad (2.25)$$

Nach Division durch dt :

$$V\frac{dE}{dt} = P - \frac{VE}{\tau} \quad (2.26)$$

Die Leistung, welche von den absorbierenden Flächen geschluckt wird, ist wie folgt definiert:

$$P = \frac{1}{4}EcA = \frac{VE}{\tau} \quad (2.27)$$

Wenn man nun den Zusammenhang aus Gleichung 2.24 für die Abklingzeit τ einsetzt

$$T_{60} = 55,2\frac{V}{cA} \quad (2.28)$$

und c mit 343 m/s definiert, erhält man die Sabinesche Nachhallzeitformel:

$$T_{60} = 0,161\frac{V}{A} = 0,161\frac{V}{S\alpha} [s] \quad (2.29)$$

Wobei V das Volumen des Raumes und c die Schallgeschwindigkeit beschreibt¹⁰.

Grundsätzlich sollte man bei Messungen auch immer den Einfluss der Dissipation berücksichtigen, denn der Schalldruck einer Welle bzw. deren Energie wird während der Ausbreitung im Raum geschwächt, da auch die Luft ab einer Frequenz von 2 kHz absorbierend wirkt.

⁹[11, S.91]

¹⁰[3, S.63-69]

2.5. Hallradius

Der Hallradius entspricht der Entfernung, ab welcher die stationäre Energiedichte überwiegt und nicht mehr die direkte Energie der Schallquelle. Die direkte Energiedichte eines Kugelstrahlers mit der Leistung P lautet:

$$E_{dir} = \frac{P}{4\pi r^2 c} \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.30)$$

Die stationäre Energiedichte (absorbierende Leistung = Leistung der Quelle vgl. Gleichung 2.27) im Raum ist gegeben als:

$$E_{stat} = \frac{4P}{cA} \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.31)$$

Setzt man $E_{dir} = E_{stat}$ erhält man für den Hallradius folgende Gleichung:

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} [m] \quad (2.32)$$

Um bei Messungen in einem Hallraum sicherzustellen, dass sich das Mikrofon außerhalb des Hallradius befindet, wird in der ÖNORM EN ISO 354 [6] ein Mindestabstand von 2 m zwischen Schallquelle und Mikrofonposition vorgeschrieben. In der ÖNORM EN ISO 3741 [7] hingegen ist der Abstand mit unten angeführter Formel zu berechnen. Damit ist gewährleistet, dass sich das Messmikrofon im Hallfeldteil des Schallfeldes befindet¹¹:

$$d_{min} = 0,08 \sqrt{\frac{V}{T}} [m] \quad (2.33)$$

2.6. Messungen im Hallraum

In Hallräumen wird die abgestrahlte Schalleistung und von einer Schallquelle nach ÖNORM EN ISO 3741 [7] gemessen, sowie die Absorptionsgrade von Schallschluckstoffen nach ÖNORM EN ISO 354 [6] bestimmt.

Für diese Arbeit soll im Hallraum die Impulsantwort gemessen werden, welche danach mit dem Matlab Visualisierungs Tool (MVT) weiterverarbeitet wird. Die Impulsantwort ist die Antwort eines Systems, welches mit einem Impuls angeregt wird und charakterisiert somit die akustischen Eigenschaften eines realen Raumes. In Abbildung 2.2 ist ein Beispiel einer quadrierten Raumimpulsantwort zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass sich diese in Direktschall, frühe Reflexionen und Nachhall aufspalten lässt.

¹¹[2, S.18]

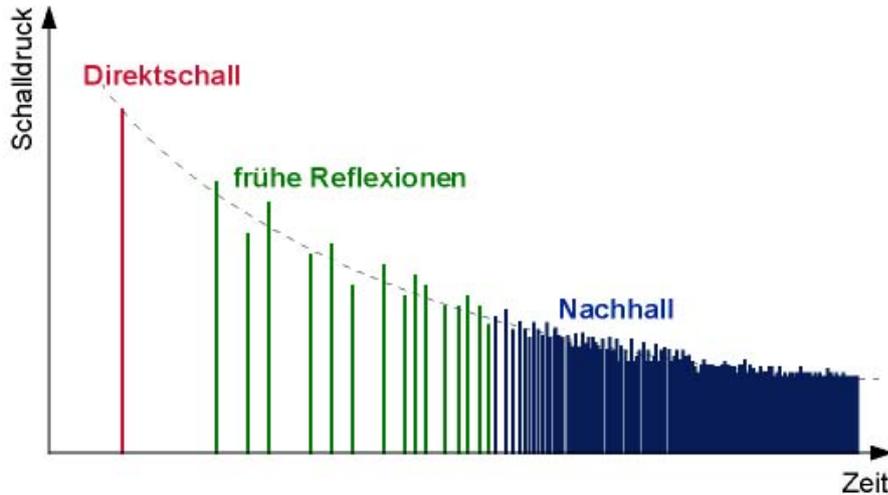


Abbildung 2.2: Beispiel einer quadrierten Raumimpulsantwort [12]

2.7. Hallraum der TU Graz

Der Raum ist 5,99 m breit, 8,34 m lang, 4,9 m hoch, hat eine Grundfläche von $49,96 \text{ m}^2$ und ein Volumen von $244,79 \text{ m}^3$. Somit ergibt sich für diesen Raum eine Schröder - Grenzfrequenz von

$$f_g = \frac{1000}{\sqrt[3]{V}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{244,79}} = 160 \text{ [Hz]} \quad (2.34)$$

Erst ab dieser Frequenz ist die Schalldruckverteilung im ganzen Raum gleichmäßig, da keine vereinzelt Moden auftreten.

In der ÖNORM EN ISO 3741 [7] wird als untere Grenzfrequenz jedoch folgende Formel angegeben:

$$f_g = \frac{2000}{\sqrt[3]{V}} = \frac{2000}{\sqrt[3]{244,79}} = 320 \text{ [Hz]} \quad (2.35)$$

Somit dürften in diesem Hallraum erst die Ergebnisse ab 320 Hz verwendet werden. Dieser Norm bezieht sich jedoch auf die Schalleistungsmessung.

Wie aus dem Grundriss in Abbildung 2.3 ersichtlich ist, verlaufen die Wände in diesem Hallraum parallel und nicht schiefwinklig, wodurch vor allem axiale Moden nicht vermieden werden können.

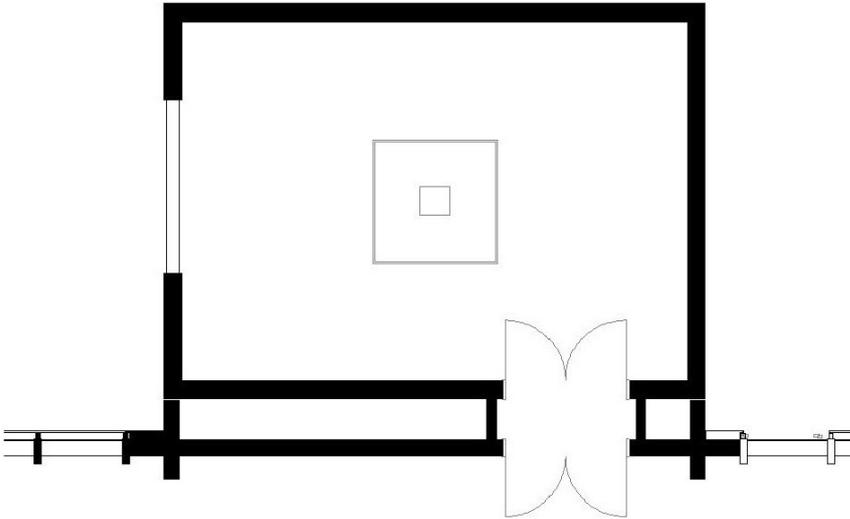


Abbildung 2.3: Grundriss des Hallraumes [TU GRAZ]

2.8. Diffusorplatten

Laut ÖNORM EN ISO 354 ANHANG A [6] kann eine angemessene Diffusität mit Hilfe von Diffusoren erreicht werden. Als schallstreuende Elemente sollten am besten gedämpfte Platten mit geringer Schallabsorption eingesetzt werden. Empfohlen werden Diffusoren verschiedener Größe zwischen $0,8 \text{ m}^2$ und 3 m^2 (einseitige Fläche). Weiters können die Platten leicht gekrümmt sein.

In dieser Arbeit wird nun auch vor allem die Schallausbreitung um eine einzelne Diffusorplatte betrachtet. Die Ecken der Längsseite der Spanplatte, welche $1,5 \text{ m}$ lang und 1 m breit ist, weisen nach der Biegung einen Abstand von $1,175 \text{ m}$ auf.

Die Diffusorplatte stellt für die Schallwellen mit hohen Frequenzen ein Hindernis dar. Diese werden von der Platte reflektiert. Für Frequenzen, deren Wellenlänge ungefähr so groß ist wie die Platte, tritt Abschattung auf. Somit müssen die Wellen einen längeren Weg zurücklegen, wenn sie sich um die Platte herumbewegen. Wenn das Hindernis größer als die Wellenlänge ist, tritt hinter der Platte ebenfalls ein Bereich der Abschattung auf. Bei tiefen Frequenzen sollte die Platte keinen Einfluss auf die Schallausbreitung haben (Beugung), da die Wellenlänge im Vergleich zur Platte groß ist.

Durch den Effekt der Abschattung sollte sich die Energiedichte um den Diffusor herum verändern. Im restlichen Raum stellt sich eine gleichmäßige Energiedichte ein. Die tatsächliche Energieverteilung im Raum soll mittels des Matlab Visualisierungstools dargestellt werden.

3. Messung

Im folgenden Kapitel werden die Messmethode und der Messaufbau erläutert.

3.1. Anregungssignal

Für die Messung der Impulsantwort wird in diesem Fall ein Maximum Length Sequence (MLS) Signal verwendet. Die Autokorrelationsfunktion der MLS entspricht einem idealen Impuls. Das MLS Signal ist eine periodische, binäre Zufallsfolge, welche nur Amplitudenwerte von 0 und 1 enthält und eine Länge von $2^m - 1$ hat. In diesem Fall entspricht m der Ordnung der MLS. Um die zeitliche Periodendauer T zu bekommen, muss man die Länge durch die Taktfrequenz dividieren.

Um die Impulsantwort zu erhalten, wird die Systemantwort gemessen und mit dem Erregersignal mittels der Kreuzkorrelation verknüpft. Das Ergebnis dieser Berechnung entspricht der Impulsantwort¹.

Vorteile der MLS²

- Unempfindlichkeit gegenüber Störgeräuschen und transienten Vorgängen, da diese nicht mit der MLS korrelieren
- Hoher Energiegehalt des Messsignals mit einem maximalen erreichbaren Crestfaktor von 1
- Höhere SNR durch mehrfache Abstrahlung und Mittelung

Nachteile der MLS³

- Empfindlichkeit gegenüber Verzerrungen, welche in der resultierenden Impulsantwort annähernd gleichverteilt sind
- Großteil des MLS - Signals befindet sich aufgrund der konstanten spektralen Leistungsdichte („weiß“) im Hochtonbereich: Bei einer abgestrahlten Leistung von 100 Watt im Bereich von 20 Hz bis 20 kHz befinden sich 50 Watt innerhalb von 20 Hz bis 10 kHz und ebenfalls 50 Watt zwischen 10 kHz und 20 kHz. Dies führt dazu, dass zwischen 20 Hz und 500 Hz schlussendlich nur ungefähr 3 Watt abgestrahlt werden. Dies ist für Lautsprecher eher ungewöhnlich und führt zu einer schnellen Überlastung im Hochtonbereich. Dies kann man jedoch mit einem Emphasis - Filter beheben, welcher z.B. mittels rosa Rauschen das MLS - Signal in den Höhen abdämpft. Diese Filterung wird später durch ein inverses Filter wiederum entzerrt.

¹[11, S.127-134]

²[9, S.9]

³[9, S.9]

3.2. Messaufbau

- Messraum: Hallraum der TU Graz, Labor für Bauphysik, Inffeldgasse 24
- Datum: 11.5.2015, 15:15 - 17:15 Uhr und 12.5.2015, 8:30 - 11:00 Uhr
- Temperatur: 19,8 °C
- Luftfeuchte: 11.5.2015, 48,2 % und 12.5.2015, 47,1 %
- $f_s = 48 \text{ kHz}$
- 16 bit

In die Mitte des Raumes wird ein Diffusor gestellt und gleichmäßig darum die Mikrofone verteilt (siehe Abb. 3.2 - 3.5). Als Quelle kommt ein Norsonic Dodekaeder Lautsprecher zum Einsatz, welcher eine ungerichtete Abstrahlung besitzt und mit einem Norsonic Verstärker betrieben wird. Pro Messung werden 2 Kanäle mit WinMLS 2004 aufgezeichnet und als Mikrofone 2 Stück AKG C480B mit Kugelkapseln verwendet. Die Übertragung der Signale erfolgt mit einem Fireface UCX zu einem Lenovo Thinkpad T61 mit Windows 7. Abbildung 3.1 zeigt die Skizze des Messaufbaus und Abbildung 3.6 den Messplan.

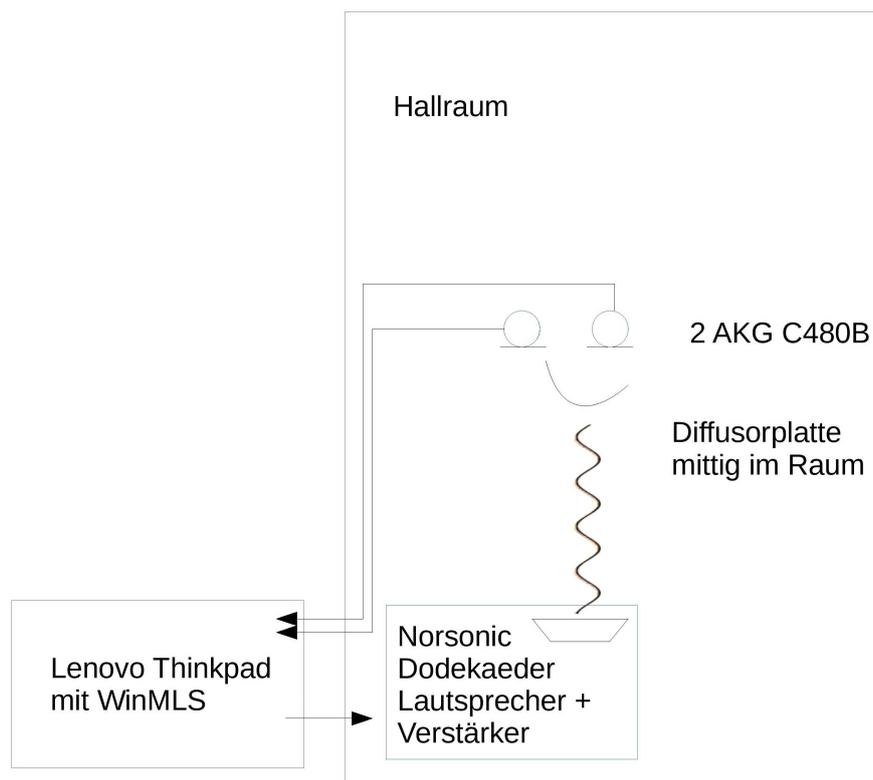


Abbildung 3.1: Skizze des Messaufbaus

3. Messung

Um zu gewährleisten, dass sich die Mikrofone im Hallfeldteil des Schallfeldes befinden, wird ein Mindestabstand nach Gleichung 2.33 berechnet. Für die durchschnittliche Nachhallzeit wird 5,75 s angenommen. Dieser Wert ist aus Messungen der Nachhallzeit des leeren Hallraumes im Raumakustik Labor bestimmt worden.

$$d_{min} = 0,08 \sqrt{\frac{244,79}{5,75}} = 0,52 [m] \quad (3.1)$$

3.2.1. Diffusor

Als Diffusor kommt eine 4 mm Spanplatte mit den Maßen 1,5 m x 1 m zum Einsatz. Nach der Biegung der Platte mit Zurrgurten, wurde diese mit Seilen an den Wänden des Hallraums befestigt (Abbildungen 3.2 und 3.3). Die untere Kante befindet sich auf 0,7 m. Durch die Höhe von 1 m, endet der Diffusor bei 1,7 m der Raumhöhe.

Durch die Platzierung des Diffusors im Raum ist die Auswertung einiger Messpositionen, welche zu nahe an der Platte sind, aufgrund von Reflexionen und der Abstrahlung der Platte fraglich (Abbildung 3.4).

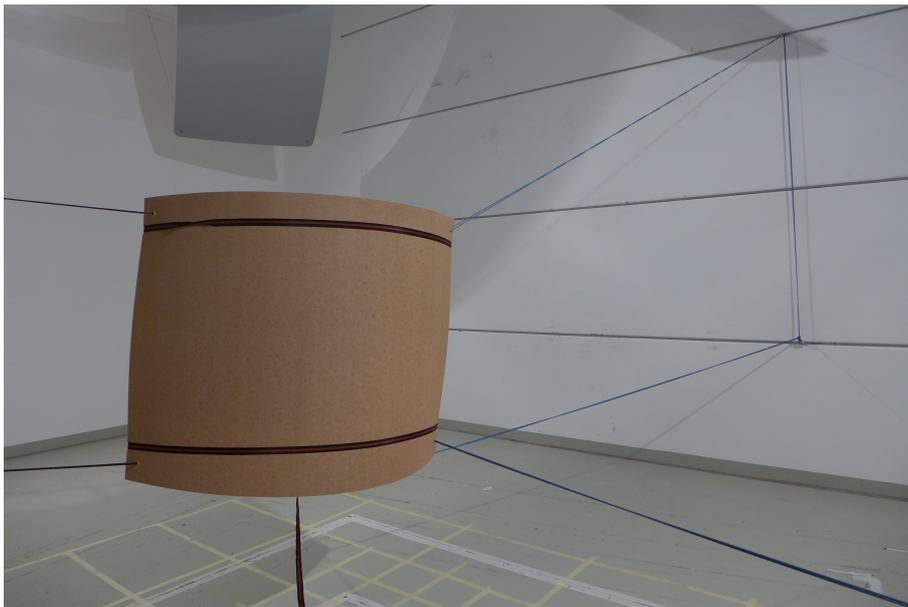


Abbildung 3.2: Befestigung des Diffusors im Hallraum

3. Messung

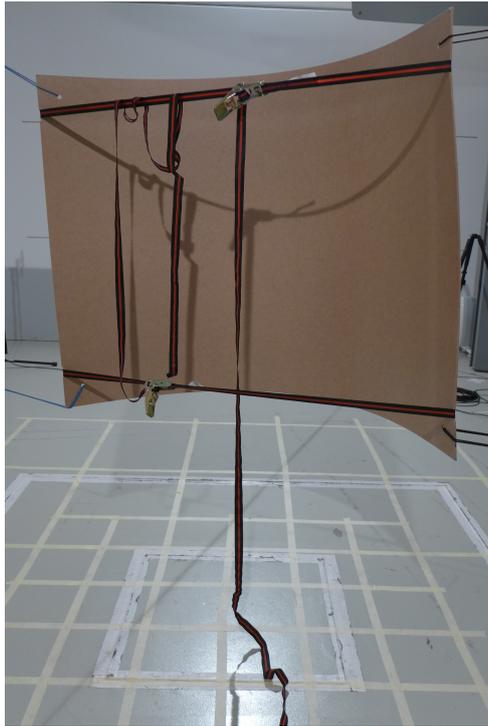


Abbildung 3.3: Biegung des Diffusors



Abbildung 3.4: Nähe des Mikrofons zur Platte bei einigen Messpositionen, hier MP 43

3. Messung

3.2.2. Messraster

Um eine gleichmäßige Verteilung der Mikrofonpositionen im Raum zu erreichen, wird ein Raster entwickelt, welches auf der Breitseite 6 Positionen mit einem Abstand zueinander von 0,5 m und zu den Raumbegrenzungen von 1,74 m bzw. 1,75 m besitzt. Nach [6] und [7] ist ein Abstand von mindestens 1 m vorgeschrieben um keine Einflüsse von den Wänden zu bekommen. Auf der Längsseite werden ebenfalls 6 Positionen mit einem Abstand zueinander von 0,75 m und zu den Raumbegrenzungen von 2,29 bzw. 2,3 m verwendet. Da vor allem die Schallausbreitung um den Diffusor messtechnisch genau zu erfassen ist, wird die Messpunktdichte um diesen herum erhöht. Somit haben die Messpunkte hier nur einen Abstand von 0,25 m. In Summe ergeben sich somit 70 Messpositionen, welche in einer Höhe von 1,3 m gemessen werden. Dies ist auch in Abbildung 3.6 zu sehen.

In Abbildung 3.5 ist der Hallraum mit dem am Boden geklebten Messraster, dem aufgehängten Diffusor, sowie der Lautsprecherplatzierung und zwei Mikrofonpositionen zu sehen.

Es wird nur eine Lautsprecherposition verwendet, da für die Darstellung der Energieverteilung mit dem MVT Tool nur eine Position berücksichtigt wird.



Abbildung 3.5: Messaufbau im Hallraum

3. Messung

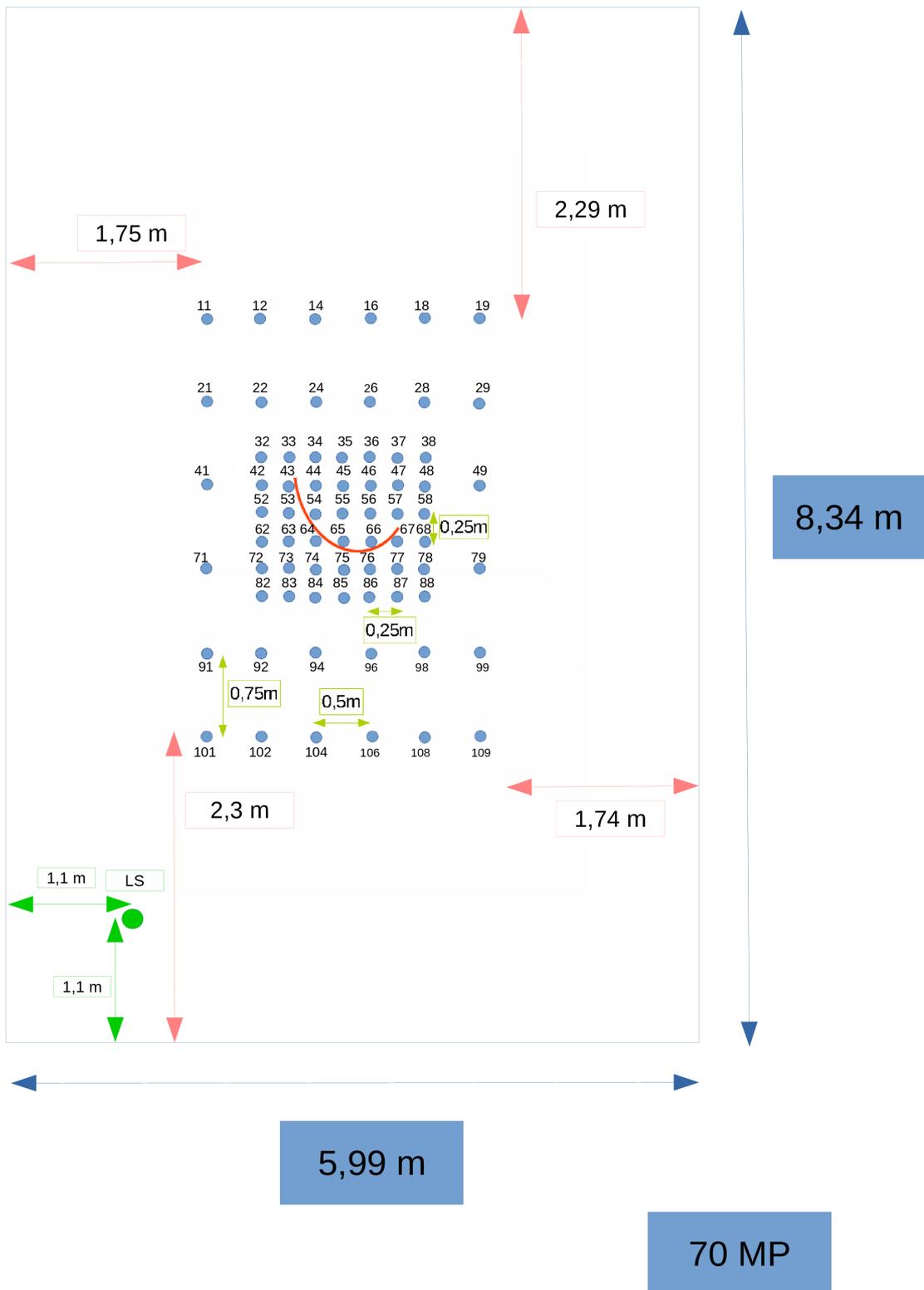


Abbildung 3.6: Messsetup

3.2.3. Wahl des MLS Typs

Vor den Messungen werden mehrere MLS Varianten ausprobiert, um das beste Messergebnis zu erzielen. Folgende Varianten stehen in der näheren Auswahl:

Variante	Dateiname	Ordnung	Zyklenzahl	Emphasis	Dodekaeder Verstärkung
1	test	19	2	nein	-5 dB
2	test1	20	2	nein	-5 dB
3	test2	19	4	nein	-5 dB
4	test3	20	2	pink	-10 dB

Die Entscheidung fällt schlussendlich auf die letzte Variante. Die Vorteile dieser Variante bestehen darin, dass durch den Emphasis - Filter (rosa) die Leistung im Hochtonbereich verringert und eine geringere Verstärkung des Signals gewählt werden kann. Weiters ergibt die höhere Ordnung eine gewisse Messsicherheit. Mit Ordnung 20 kommt man auf einer Zyklusdauer von beinahe 22 s. Bei Ordnung 19 wäre eine Zyklusdauer von nicht ganz 11 s aufgetreten. Da aber im Hallraum bei tiefen Frequenzen auch eine Nachhallzeit von bis zu 11 s vorkommen kann, ist dies etwas riskant.

In den Abbildungen 3.7 und 3.8 sind die Nachhallzeiten der unterschiedlichen MLS Varianten für die Messpunkte 101 und 106 zu sehen. Weiters werden am Ende des 2. Messtages diese Messpunkte nochmals vermessen, um sicherzustellen, dass die Werte übereinstimmen (Dateiname test10). Aus den Grafiken ist erkenntlich, dass die schwarze Kurve, welche die Ergebnisse der Variante 3 darstellt, am meisten von den anderen Kurven abweicht. Daher fällt die Ordnung 19 aus der Entscheidung. Aus diesem Grund (Ordnung 19) liefert auch die rosa Kurve, welche Variante 1 zeigt, bei tiefen Frequenzen etwas abweichende Ergebnisse. Alle anderen Kurven sind bereits ab 125 Hz beinahe ident.

Im Vergleich dazu stimmen die Kurven beim Messpunkt 106 ziemlich gut überein (siehe Abb. 3.8). Eine mögliche Erklärung wäre, dass beim Messpunkt 101 bei tiefen Frequenzen Raummoden auftreten und beim Messpunkt 106 nicht.

3. Messung

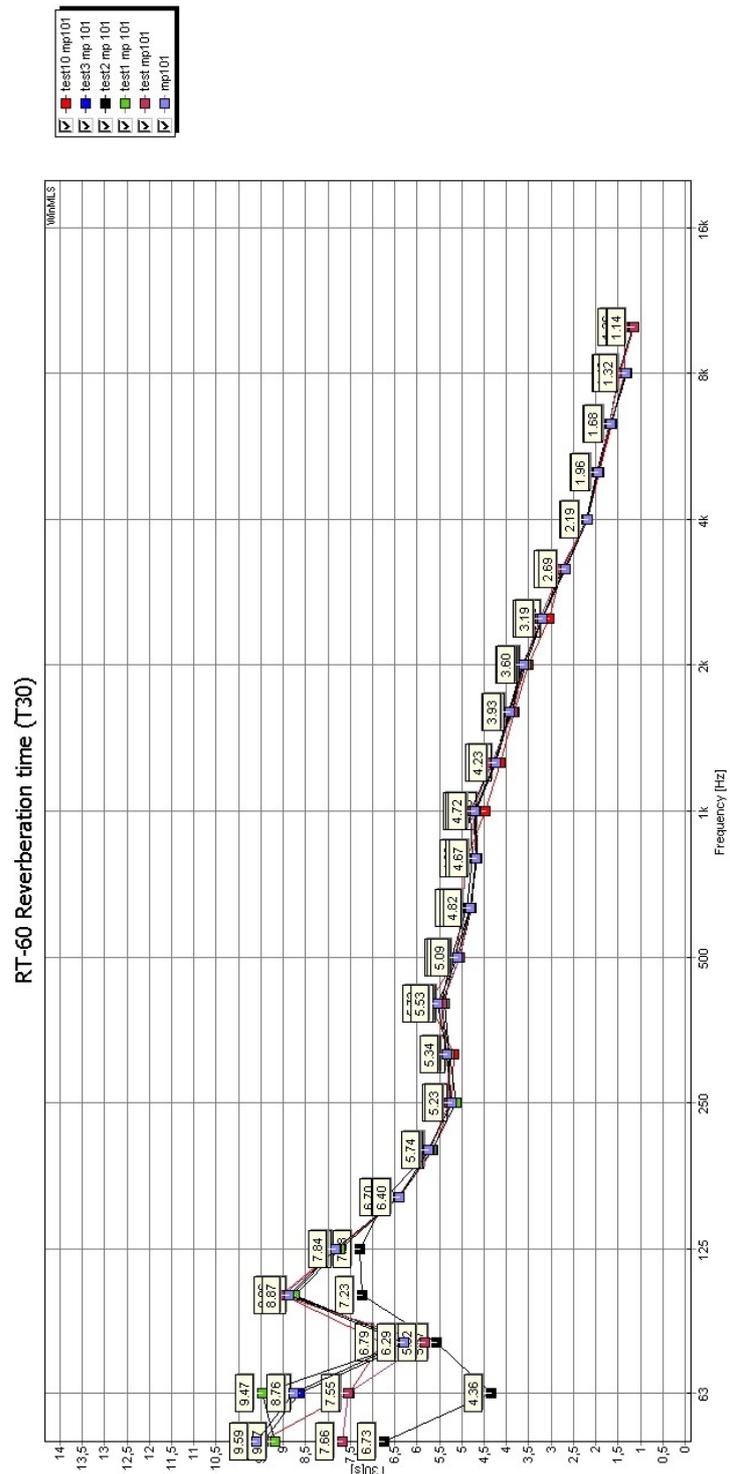


Abbildung 3.7: Nachhallzeiten in Terzbändern bei den verschiedenen MLS Varianten des Messpunktes 101

3. Messung

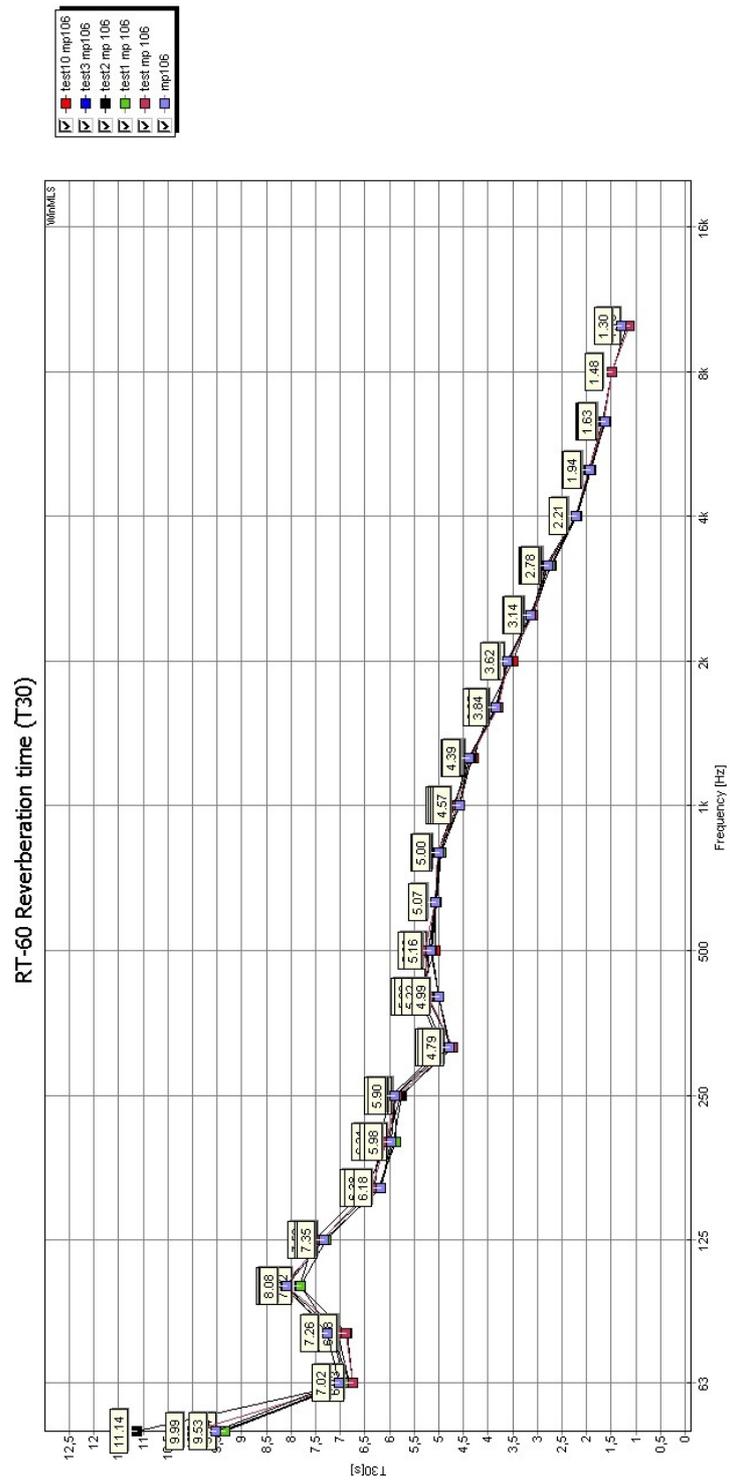


Abbildung 3.8: Nachhallzeiten in Terzbändern bei den verschiedenen MLS Varianten des Messpunktes 106

3.2.4. Vergleich von Impulsantworten

In den folgenden Grafiken werden einzelne quadrierte Impulsantworten miteinander verglichen.

In Abbildung 3.9 ist die quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 1 dargestellt. Dieser Messpunkt befindet sich am nächsten zum Lautsprecher. Dadurch hat der quadrierte Druck des Impulses einen hohen Wert von ungefähr 46900 Pa. Dies entspricht einem gemessenen Schalldruck von 216,5 Pa und somit einem Wert von 140,7 dB.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 20 \log \frac{216,5 \text{ Pa}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}} = 140,7 \text{ dB} \quad (3.2)$$

Der Impuls in den ersten Millisekunden ist gut erkennbar, danach entstehen die Reflexionen im Raum.

Im Messpunkt 14 (Abbildung 3.10), welcher sich am anderen Raumeinde in der letzten Messpunktreihe befindet, ist der Peak vom Direktschall nicht mehr wirklich zu erkennen. Es treten sehr viele Raumreflexionen und somit ein diffuses Schallfeld auf. Bei dieser Impulsantwort ist zusätzlich eine Laufzeit L_z zwischen Lautsprecher und Mikrofon von ungefähr 45 ms zu berücksichtigen.

Die Reflexionen beider Messpunkte haben einen Ausschlag von 2000 - 6000 Pa. Diese sind jedoch in Abbildung 3.10 besser zu erkennen als in Abbildung 3.9, da die Skalierung des Drucks auf der y-Achse eine andere ist.

Aus Abbildung 3.11 bis Abbildung 3.17 sind nun die Positionen der Messpunkte 53, 54, 65 und 75, sowie deren Impulsantworten zu entnehmen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Schall an den Messpunkten hinter dem Diffusor um etwa 30 ms später ankommt. Dies ist durch Beugung und Reflexion zu erklären. Bei den Messpunkten 65 und 54 tritt auch schon vor 30 ms Schall auf. Dies könnten die Schallwellen von tiefen Frequenzen sein, für welche die Diffusorplatte kein Hindernis darstellt und sich der Schall somit ohne Störung ausbreiten kann. Der Laufzeitunterschied beträgt bei allen Punkten ungefähr 10 ms.

3. Messung

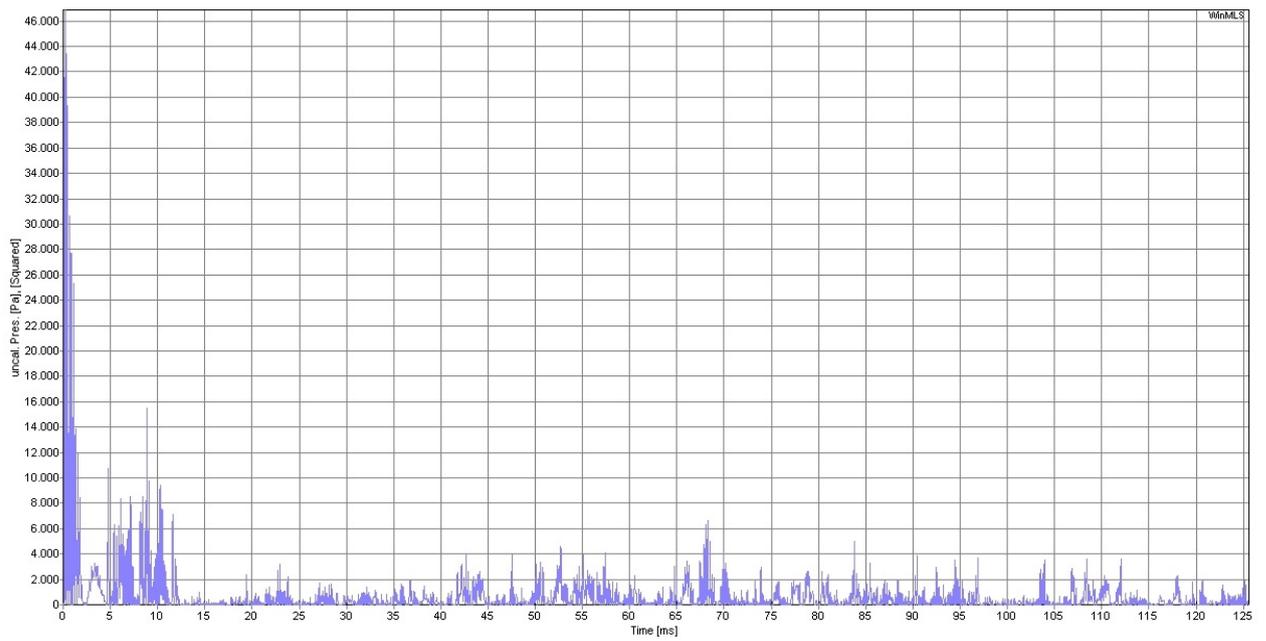


Abbildung 3.9: Quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 101

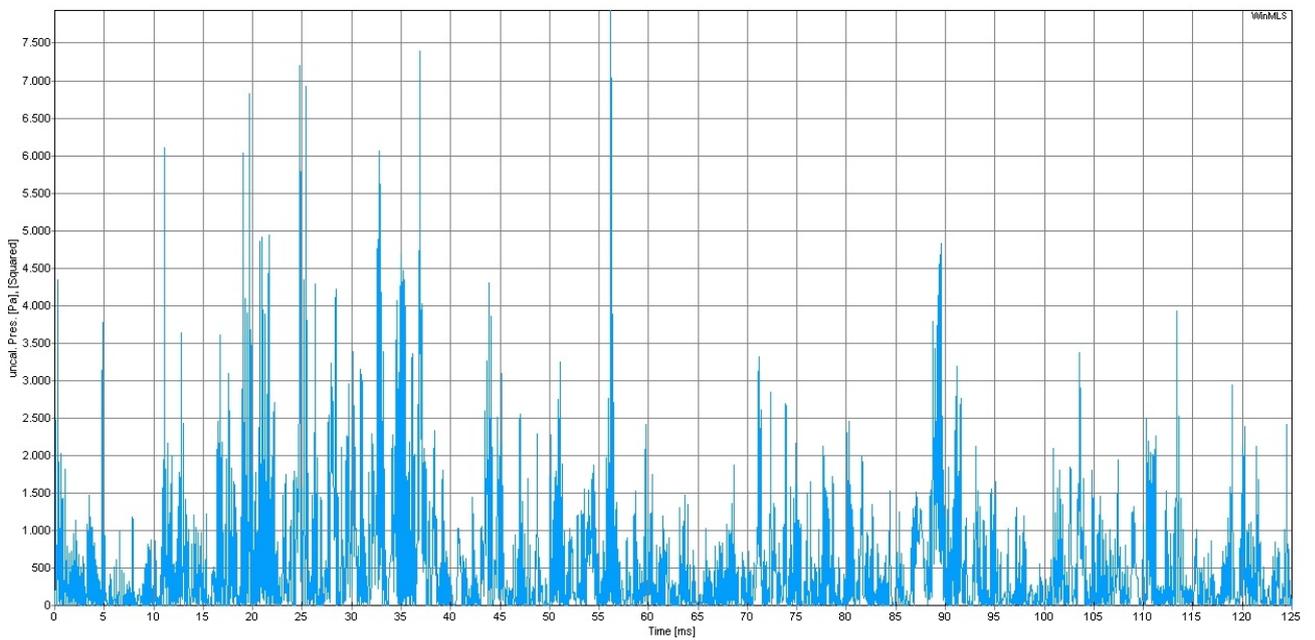


Abbildung 3.10: Quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 14

3. Messung

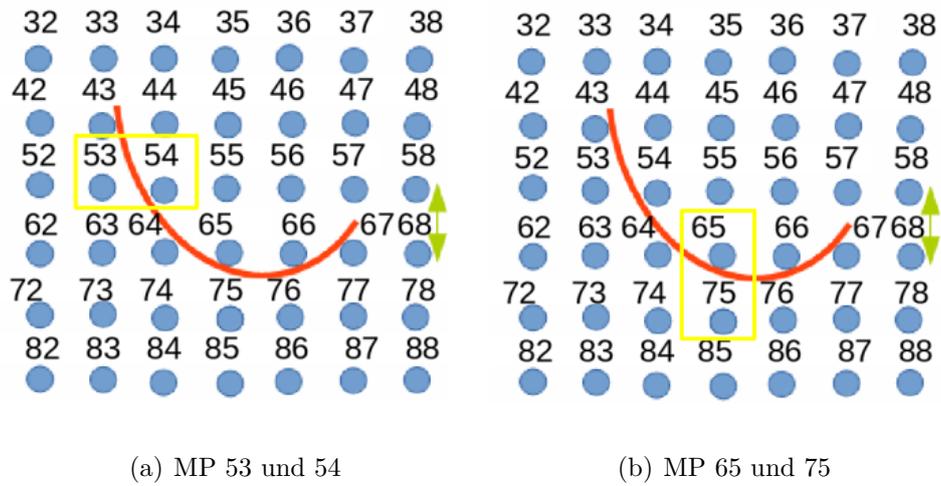


Abbildung 3.11: Lage der Messpunkte 53, 54, 65 und 75

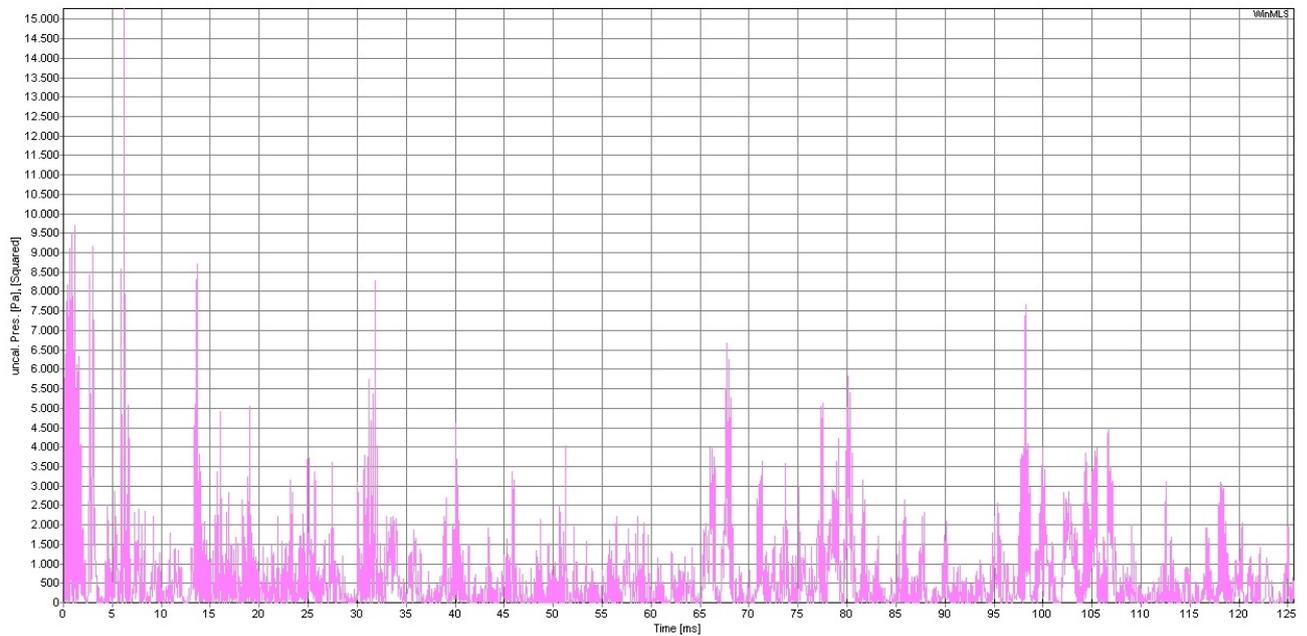


Abbildung 3.12: Quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 53

3. Messung

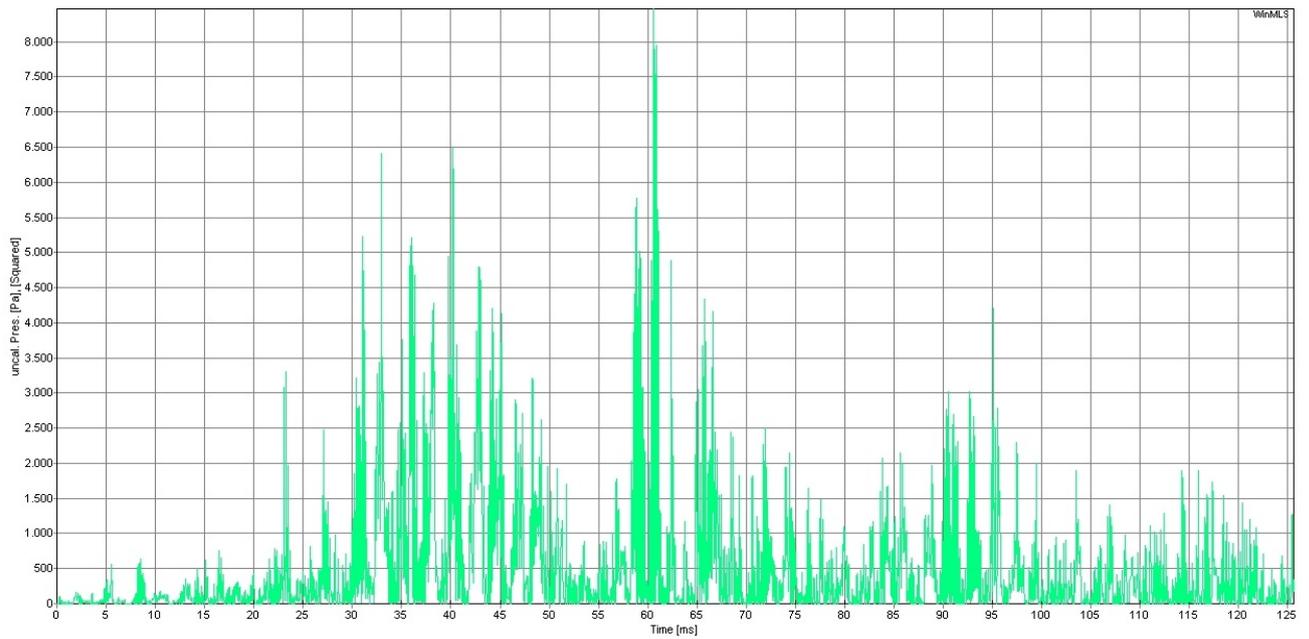


Abbildung 3.13: Quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 54

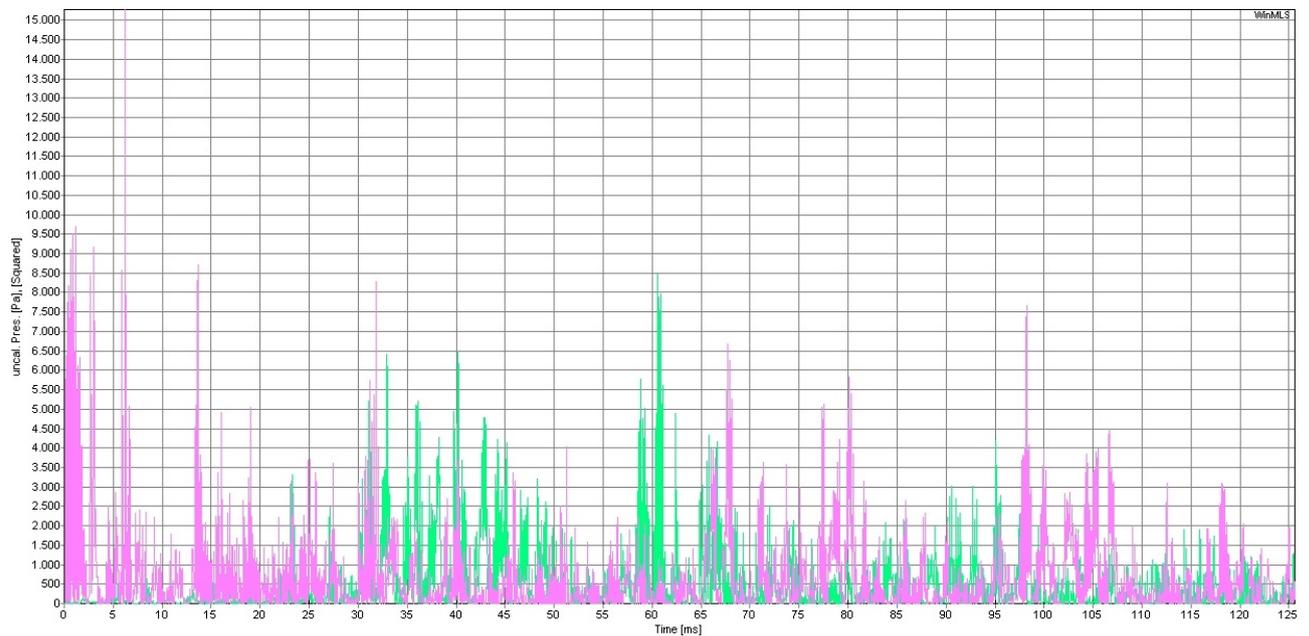


Abbildung 3.14: Vergleich der Impulsantwort der Messpunktes 53 (pink) und 54 (grün)

3. Messung

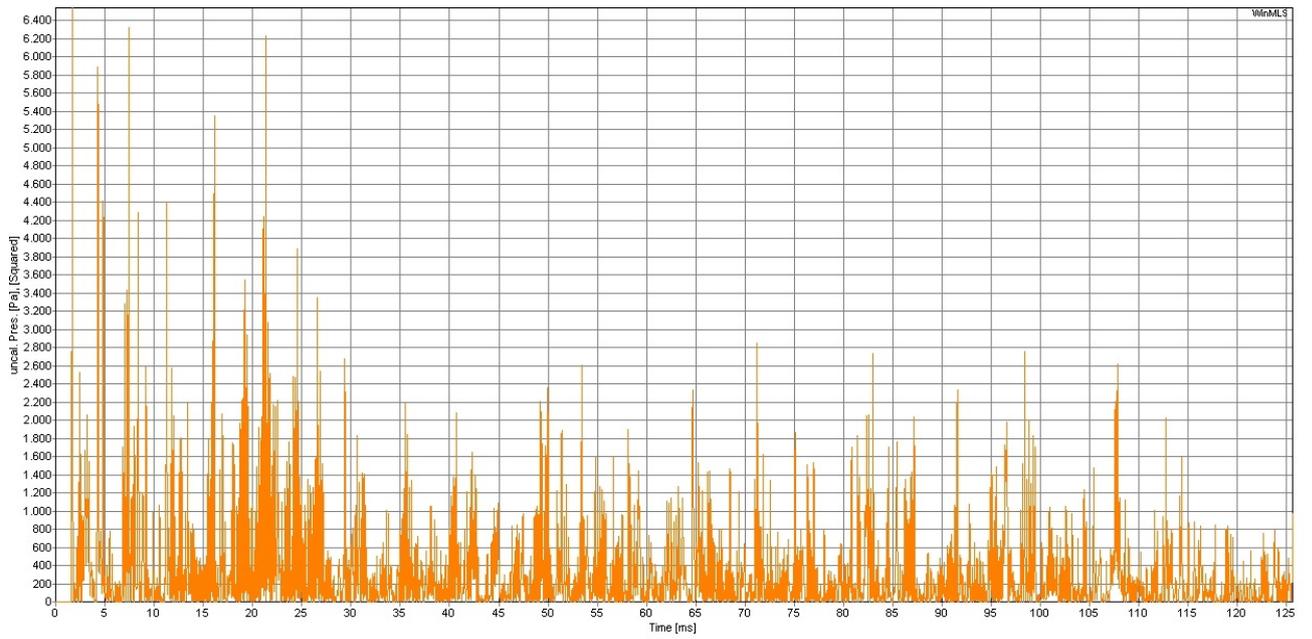


Abbildung 3.15: Quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 75

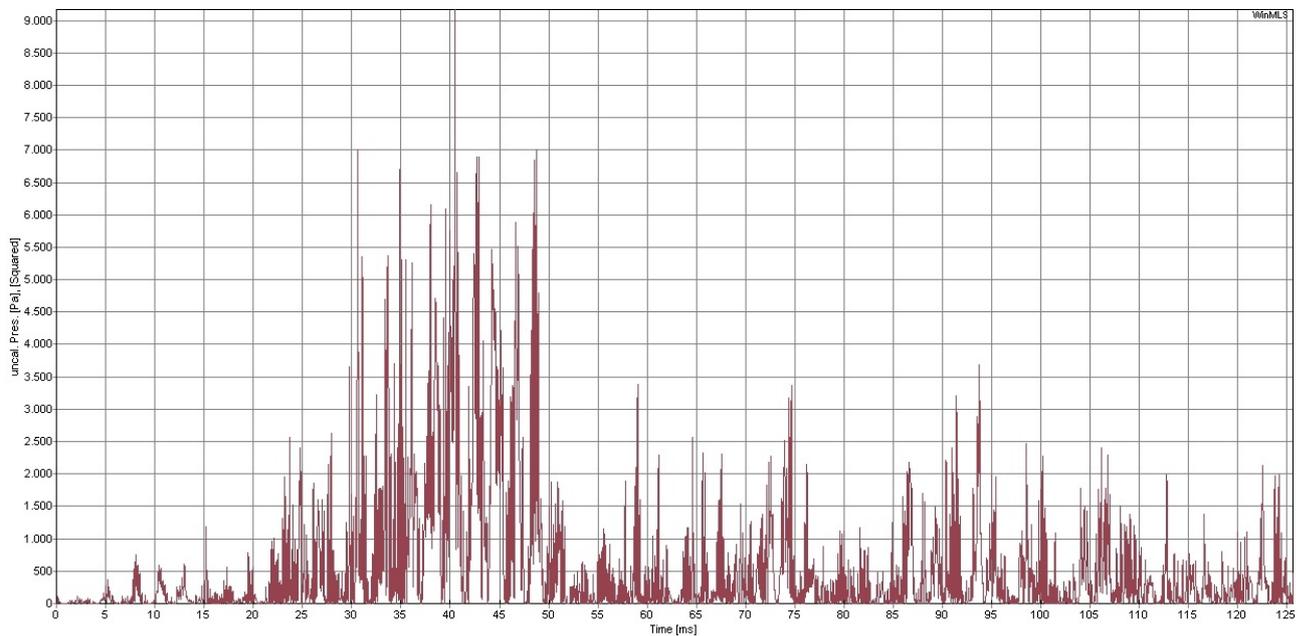


Abbildung 3.16: Quadrierte Impulsantwort des Messpunktes 65

3. Messung

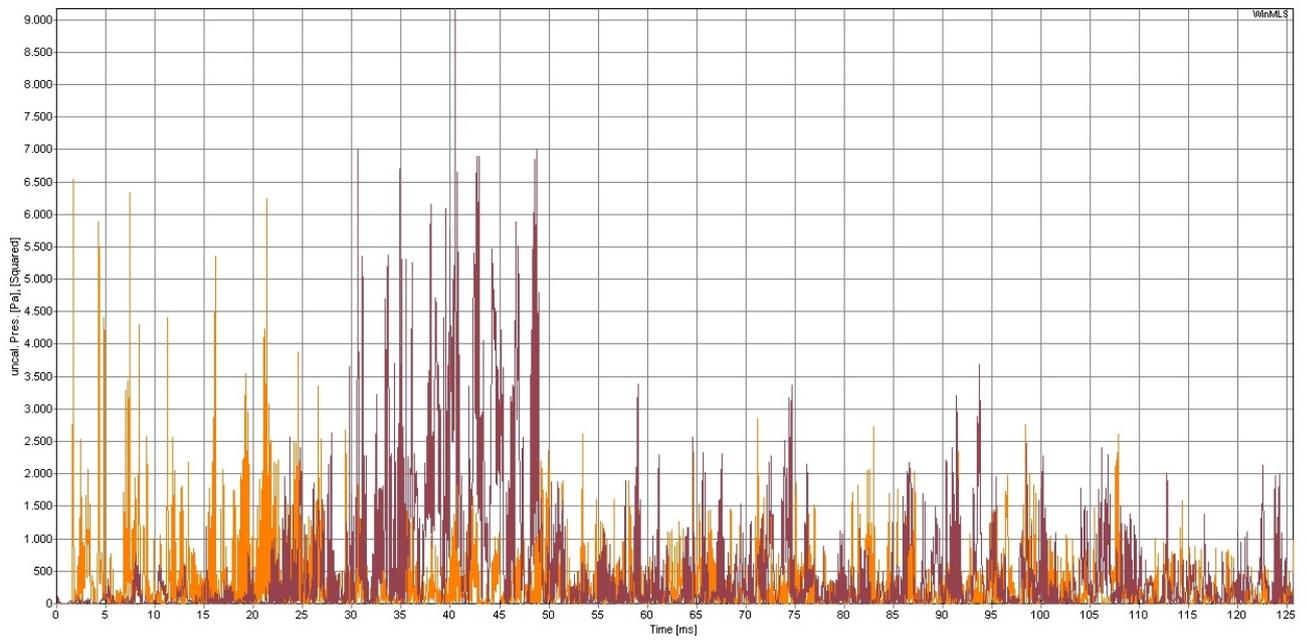


Abbildung 3.17: Vergleich der Impulsantwort der Messpunktes 65 (braun) und 75 (orange)

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

Das MVT wurde von Gerd Weber im Rahmen einer Projektarbeit 2005/2006 entwickelt [10].

4.1. Bedienung und Beschreibung der einzelnen Tools

In diesem Kapitel soll in einfachen Schritten die Bedienung und die Ergebnisdarstellung der Tools erläutert werden. Als Grundlage dient die Hilfedatei von Gerd Weber.

Grundsätzlich gilt: Wenn eine neue Energiezeitverteilung berechnet wird, ist es am besten zuvor den Befehl „clear all“ in die Kommandozeile zu tippen. Damit wird verhindert, dass von früheren Berechnungen noch globale Variablen gesetzt sind.

4.1.1. Das Starttool

Das MVT-Starttool wird durch die Eingabe von „start“ in das Matlab Command Window aufgerufen. MVT besteht grundsätzlich aus 3 Teilen. Vom Starttool kann man direkt auf diese zuzugreifen.

- EZV-Berechnung (Berechnung der Energiewerte aus den vorhandenen Impulsantworten)
- EZV-Darstellung (Darstellung der im EZV-Berechnungstool berechneten Energiewerte)
- Messparameter (Darstellung von Messparametern aus einer Exceltabelle) - Auf diese Funktion wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

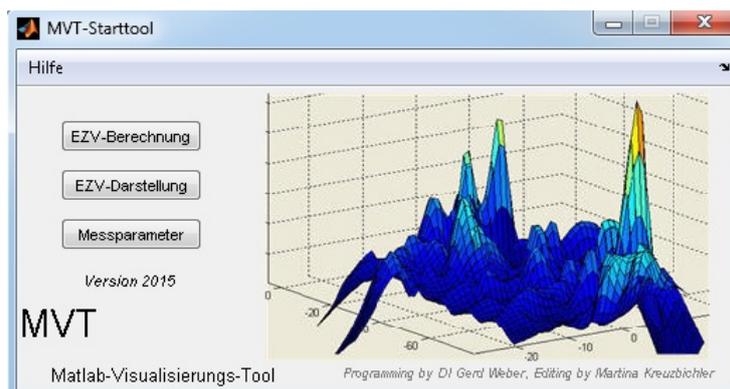


Abbildung 4.1: Starttool

Durch Klicken auf den Hilfebutton gelangt man zur Hilfedatei von Gerd Weber [10].

4.1.2. Vorbereitungen

Für die Darstellung mit dem Tool EZV-Darstellung benötigt man Impulsantworten im .wmb (WinMLS) oder .wav Format.

Achtung: Falls man die .wav - Dateien aus WinMLS exportiert ist zu beachten, dass WinMLS diese vor dem Export für ein 16 bit Signal normalisiert, um keine Qualität zu verlieren. Aus diesem Grund ist ein Vergleich dieser normalisierten Dateien nicht möglich. Weiters muss man berücksichtigen, dass der Aufruf der Matlabfunktion „audioread“ im default Modus implementiert ist. Hierbei wird das Signal als double Datentyp normalisiert auf +/- 1 ausgegeben.

Außerdem müssen die Messpunktkoordinaten und Quellpunktkoordinaten in eine Exceltabelle eingetragen werden. Nach dem Erstellen der Exceldatei und der erforderlichen Impulsantworten hat man die Möglichkeit mit Hilfe des Tools EZV-Berechnung die Energiewerte zu berechnen und anschließend mit dem Tool EZV-Darstellung darzustellen.

Für die Darstellung mit dem Tool Messparameter benötigt man ebenfalls eine vorgefertigte Exceltabelle. Diese Tabelle beinhaltet die zur Darstellung erforderlichen Messwertparameter, die Messpunktkoordinaten und die Quellpunkte. Nach dem Erstellen der Exceldatei, hat man die Möglichkeit mit Hilfe des Tools Messparameter die Werte darzustellen.

4.1.3. Exceltabelle

Die Formatierungshilfe und die Erklärungen dazu findet man sehr gut beschrieben in der Hilfedatei von Gerd Weber [10].

Zum Polygondatenblatt ist noch anzumerken, dass über jedes Teilrechteck, welches hier angegeben wird, bei der Darstellung der Energiewerte interpoliert wird. Will man eine Säule oder ein im Raum stehendes Objekt darstellen, so darf man für diese Fläche kein Rechteck angeben.

4.1.4. EZV-Berechnung

Dieses Tool besteht aus vier grundlegenden Teilen:

- Befehlsblock (links oben)
- Einstellungsblock (rechts oben)
- Darstellungsblock (links unten)
- Darstellungsbereich (rechts unten)

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

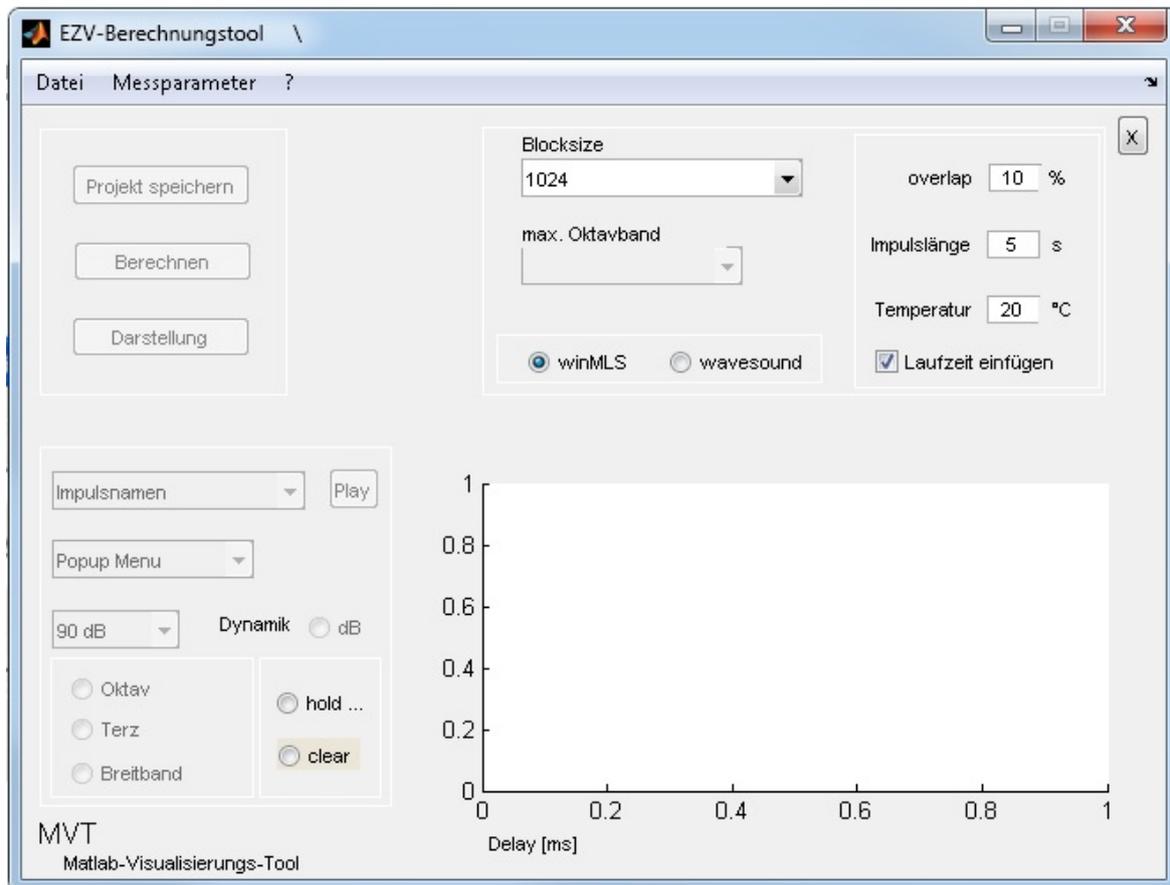


Abbildung 4.2: Berechnungstool

Unter **Datei** kann man entweder eine Exceltabelle oder ein bereits gespeichertes Projekt laden. Wichtig ist, dass bereits vor dem Laden der Exceldatei die gewünschte Temperatur im **Einstellungsblock** eingestellt wird, da ansonsten die falsche Laufzeit berechnet wird. Wenn eine Exceldatei gewählt wurde, ist danach die Berechnung möglich. Dafür gibt es im **Einstellungsblock** verschiedene Auswahlmöglichkeiten:

- Dateiformat: Es ist möglich, .wmb oder .wav Dateien einzulesen.
- Laufzeit: Man kann je nach Messmethode zu Beginn des Signales noch Nullen für den Laufzeitunterschied zwischen Lautsprecher und Mikrofonen einfügen. Dies ist davon abhängig, ob der Unterschied bereits bei der Messung berücksichtigt wurde. In winMLS besteht die Möglichkeit dies zu tun, jedoch müsste man für jede Mikrofonposition die Korrekturfunktion des Systems (Abstand Mikrofon Lautsprecher, Systemdelays,.....) neu bestimmen.
- Temperatur: Wird benötigt, um für den Laufzeitunterschied die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit zu bestimmen.
- Impulslänge: Anzahl der Sekunden, die von der Dateilänge eingelesen wird

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

- max. Oktavband: Eingabe des größten zu berechnenden Oktavbandes
- Blocksize und Overlap: Diese Werte bestimmen die Größe und den Zusammenhang zwischen den einzelnen Fenstern bei der Berechnung. Blocksize N bestimmt die Fenstergröße und Overlap wie weit sich die einzelnen Fenster überlappen. Je kleiner Blocksize und je größer Overlap gewählt werden, desto feiner wird die Zeitauflösung, aber desto größer wird die Berechnungszeit.

Nach Wahl der Einstellungen wählt man links im **Befehlsblock** den Befehl Berechnen aus und wählt die Dateien mit den Impulsantworten. Nach der Berechnung sind auch alle Felder des **Darstellungsblocks** aktiv. Hier kann man nun:

- eine geladene Impulsantwort auswählen,
- deren Energiewerte im Zeitbereich darstellen,
- zwischen den Darstellungsvarianten Breitband, Oktavband und Terzband wählen,
- die geladene Impulsantwort wiedergeben,
- mittels „hold“ die Verläufe verschiedener Messpunkte übereinander zeichnen und mittels „clear“ den Darstellungsbereich wieder löschen,
- zwischen einer linearen und einer logarithmischen Skalierung wählen (dB Knopf),
- die dargestellte Dynamik einstellen (30 - 160 dB). Durch Wahl eines dB Wertes wird die Dynamik möglicherweise eingeschränkt. Im Programm wird dafür der größte dB Wert bestimmt und daraus der kleinste festgelegt. Ist wie in Abbildung 4.3 der Wert 90 dB ausgewählt, wird der „Maximalwert - 90 dB“ als kleinster Wert festgelegt. In diesem Fall sind alle berechneten Werte größer dem Minimalwert. Wird wie in Abbildung 4.4 der Wert 30 dB ausgewählt, ist $\text{Min} = \text{Max} - 30 \text{ dB}$. Hier ist nun gut ersichtlich, dass alle Werte nach 2 Sekunden unter dem Minimalwert gelegen sind und diese Werte auf den Minimalwert gesetzt werden.

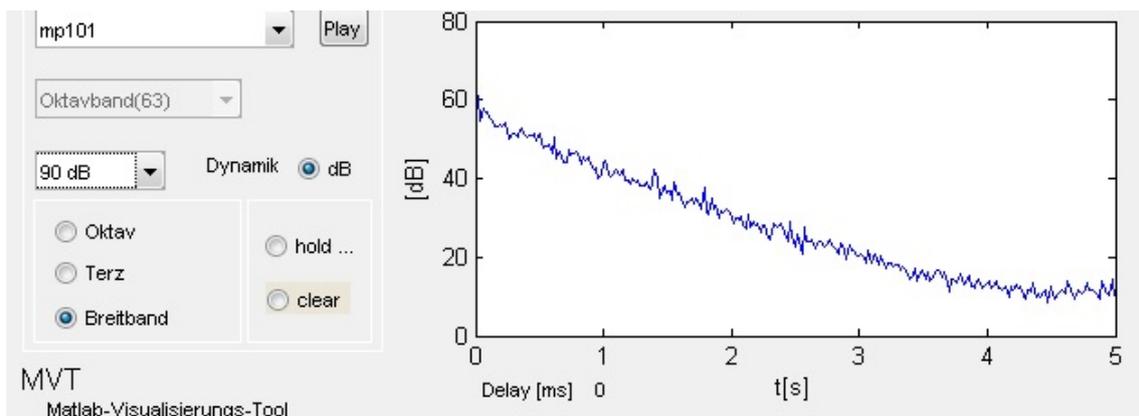


Abbildung 4.3: Skalierung 90 dB

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

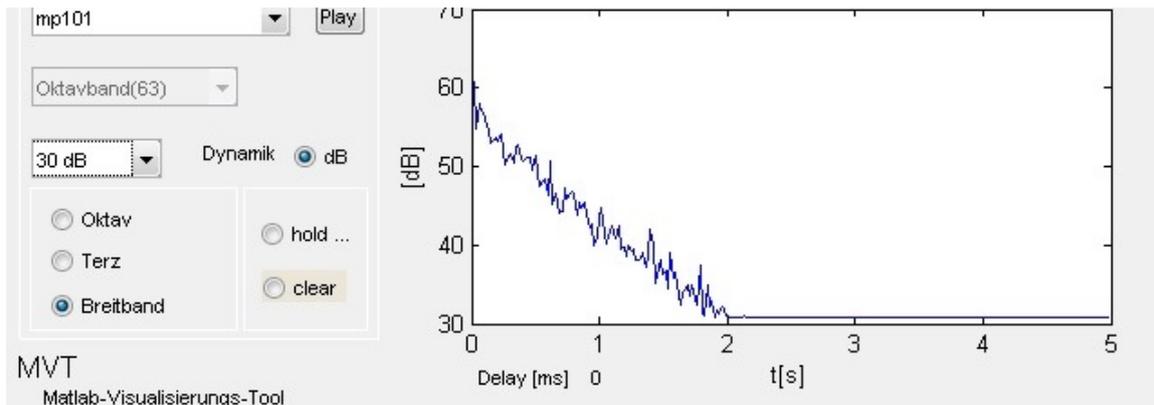


Abbildung 4.4: Skalierung 30 dB

Nun hat man auch die Wahl die Energie-Zeitverteilung jeder Mikrofonposition breitbandig oder im gewählten Oktav- bzw. Terzband darzustellen. Die Berechnungen dafür funktionieren wie folgt:

- Breitband: Nach Fensterung des Signals werden alle Signalwerte eines Fensters einzeln quadriert und danach alle summiert (= Energie). Am Ende werden die Summen der einzelnen Fenster in einem Vektor gespeichert und danach geplottet.
- Oktav- bzw. Terzband: Berechnung des Energiespektrums, wie in Kapitel 2.2 erklärt und anschließende Addition für die Bänder.

Wenn man nun die Berechnung erfolgreich durchgeführt hat, kann man die berechneten Ergebnisse speichern bzw. auch sofort räumlich darstellen.

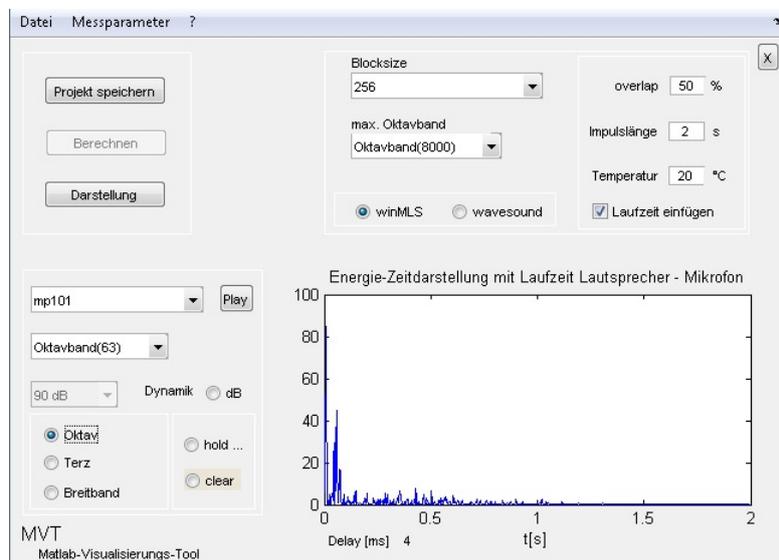


Abbildung 4.5: Berechnungstool

4.1.5. EZV-Darstellung

Eine gute Erklärung dazu findet man in der Hilfedatei von Gerd Weber [10].

Anbei eine Ergänzung für das Verständnis der verschiedenen Interpolationsmethoden: Im Tool kann zwischen „linear“, „nearest“, „cubic“ und „v4“ gewählt werden. Weiters wird hier die „natural“ Methode vorgestellt. Zur vereinfachten 3D Darstellung werden x und y Werte, sowie dazugehörige z Werte definiert (Abbildung 4.6).

x	y	z
-1	-2	1
0	-2	3
1	-2	2
-1	0	4
0	0	6
1	0	5
-1	2	7
0	2	9
-1	2	8

Die einzelnen Interpolationsmethoden sind in Abbildung 4.7 - 4.10 zu sehen und funktionieren wie folgt:

- Bei der „linear“ Interpolation wird ein lineares Polynom zwischen die bekannten Datenpunkte gesetzt. Es treten sichtbare Knicke auf. Sie ist $C(0)$ kontinuierlich.
- Bei der „nearest neighbor“ Interpolation werden die interpolierten Werte immer auf die bekannten Werte gesetzt. Sie ist diskontinuierlich.
- Bei der „cubic“ Interpolation wird ein Polynom dritter Ordnung zwischen die bekannten Datenpunkte gesetzt. Dadurch entstehen rundere Übergänge anstelle von Knicken. Sie ist $C(2)$ kontinuierlich.
- Die „natural“ Interpolation ist ein Kompromiss aus „cubic“ und „linear“. Sie ist $C(1)$ kontinuierlich.
- Die „v4“ Interpolation ist eine spezielle von Matlab entwickelte Interpolation, die auf der Methode der Greenschen Funktion basiert. Sie ist $C(2)$ kontinuierlich.

Was passiert, wenn Werte, die interpoliert werden sollen, außerhalb der gegebenen Werte liegen? Um dies zu zeigen, wird für x zwischen -2 und 2 und für y zwischen -4 und 4 interpoliert (Abbildung 4.11 und 4.12).

- Bei „linear“, „cubic“ und „natural“ wird für diesen Bereich nicht interpoliert, da die Punkte außerhalb der Hüllkurve der gegebenen Datenpunkte liegen. Daher wird hier trotzdem nur die Interpolation zwischen $x = -1$ bis 1 und $y = -2$ bis 2 dargestellt.

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

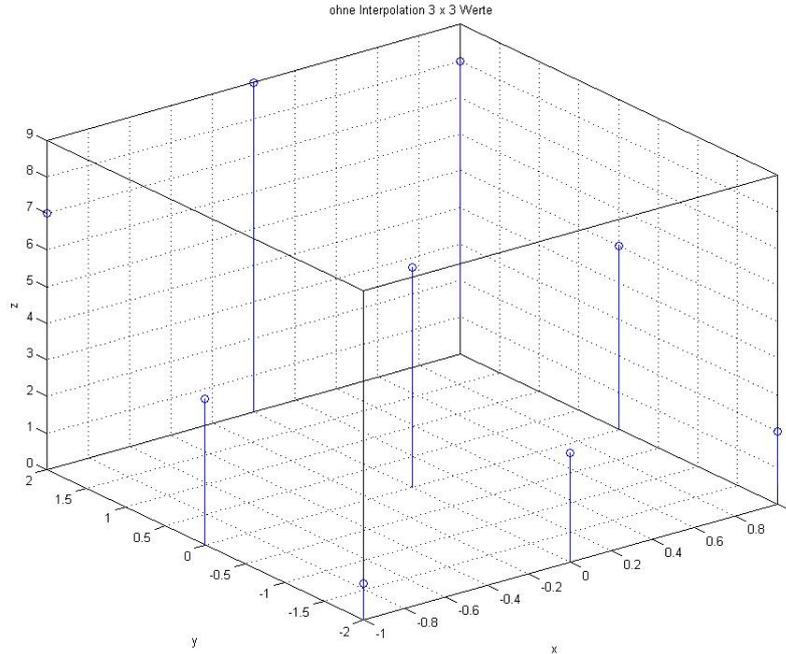


Abbildung 4.6: Ausgangssituation

- Bei „nearest“ werden diese Werte auf die gegebenen Datenpunkte gesetzt. Dies führt zu keinem schönen Ergebnis.
- Auch „v4“ liefert durch die verwendete Interpolation ein eher unbrauchbares Ergebnis.

4.2. Energiezeitverteilung im Hallraum

Im nächsten Schritt werden Animationen mit der Matlabversion R2013a und einer kubischen Interpolation erstellt. Diese können online unter www.spsc.tugraz.at/student_projects/soundpropagation (QR-Code unterhalb) angesehen werden. Sie zeigen die Schallenergieausbreitung als breitbandigen Verlauf, sowie auch für die Terzbänder 63, 125, 500, 1250, 2000 und 4000 Hz in der Grundrissansicht und einer 3D-Ansicht.



4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

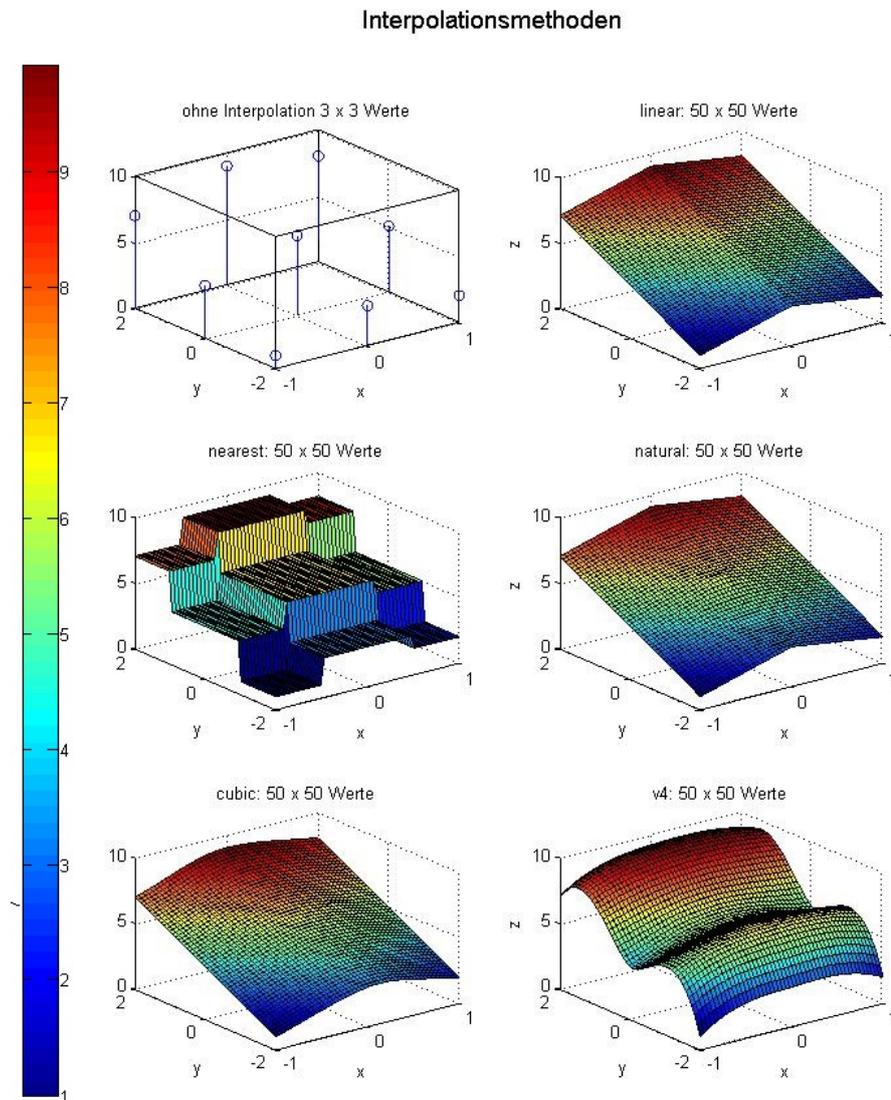


Abbildung 4.7: Darstellung der unterschiedlichen Interpolationsmethoden

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

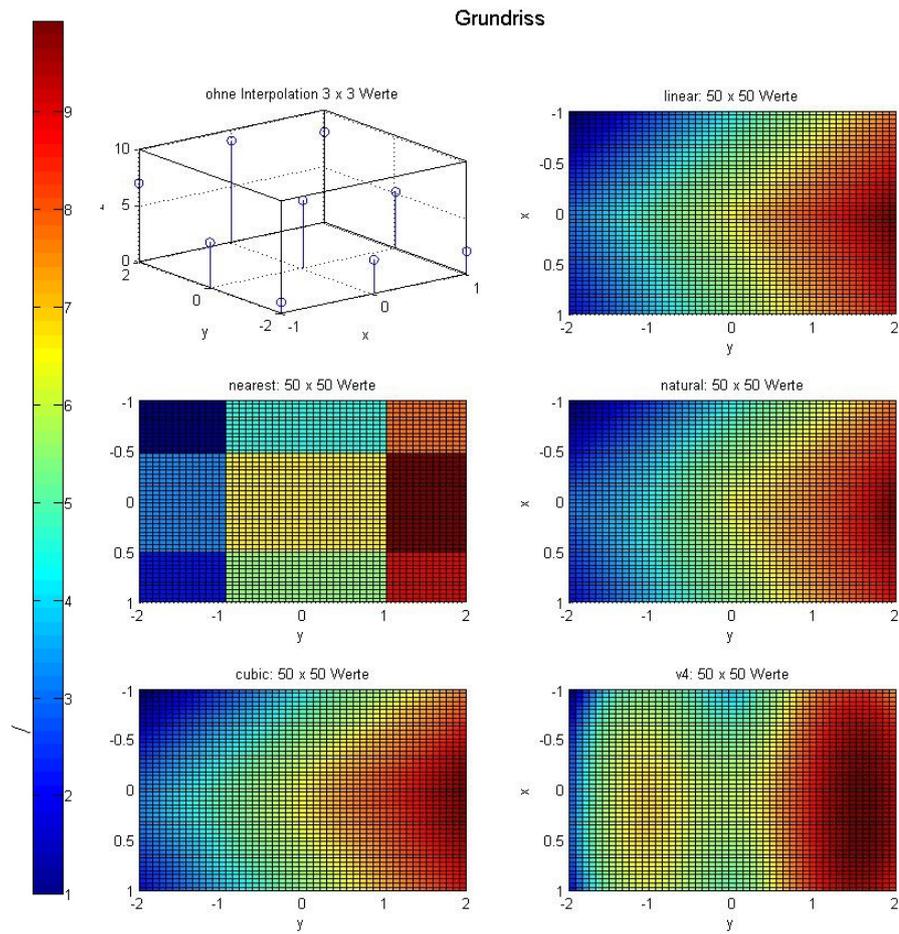


Abbildung 4.8: Darstellung im Grundriss

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

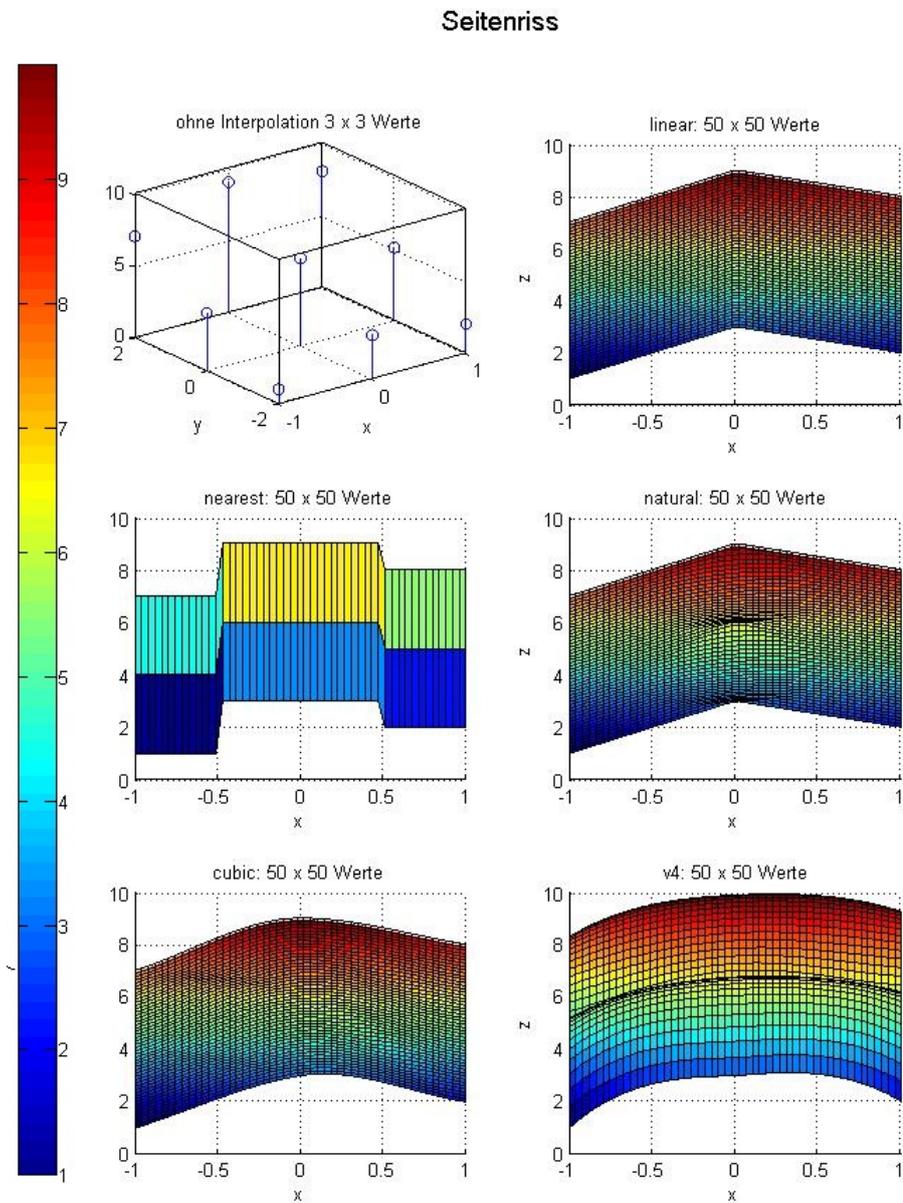


Abbildung 4.9: Darstellung als Seitenriss

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

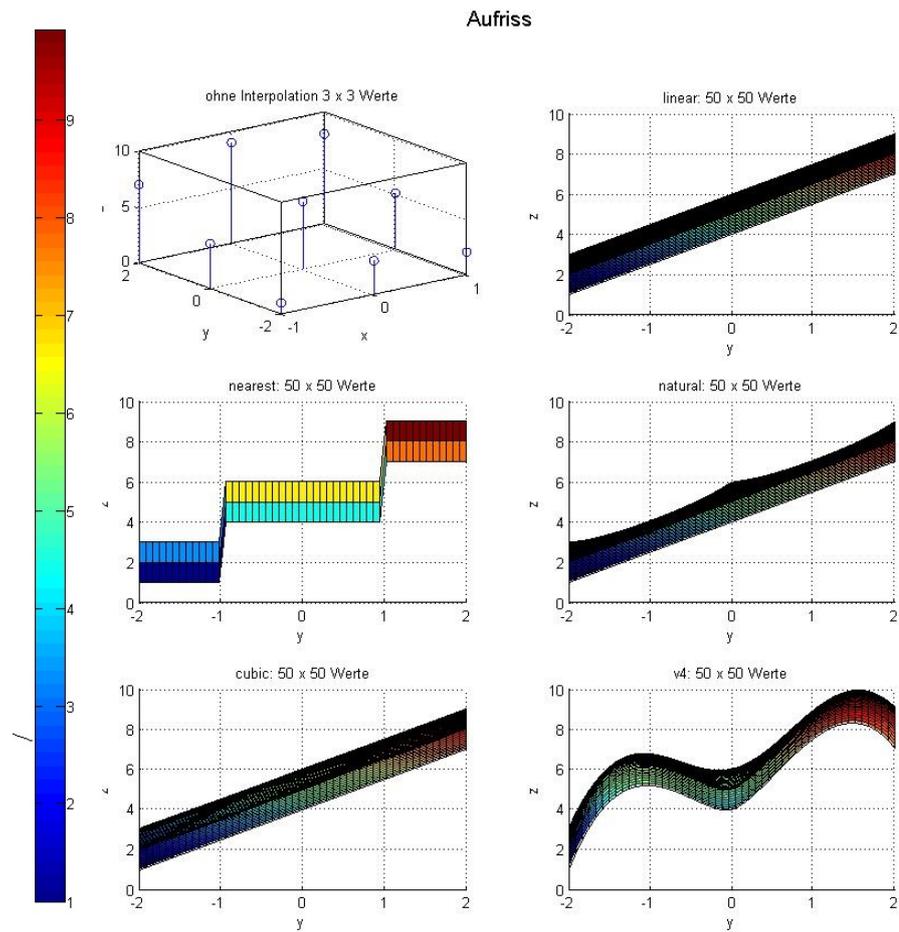


Abbildung 4.10: Darstellung als Aufriss

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

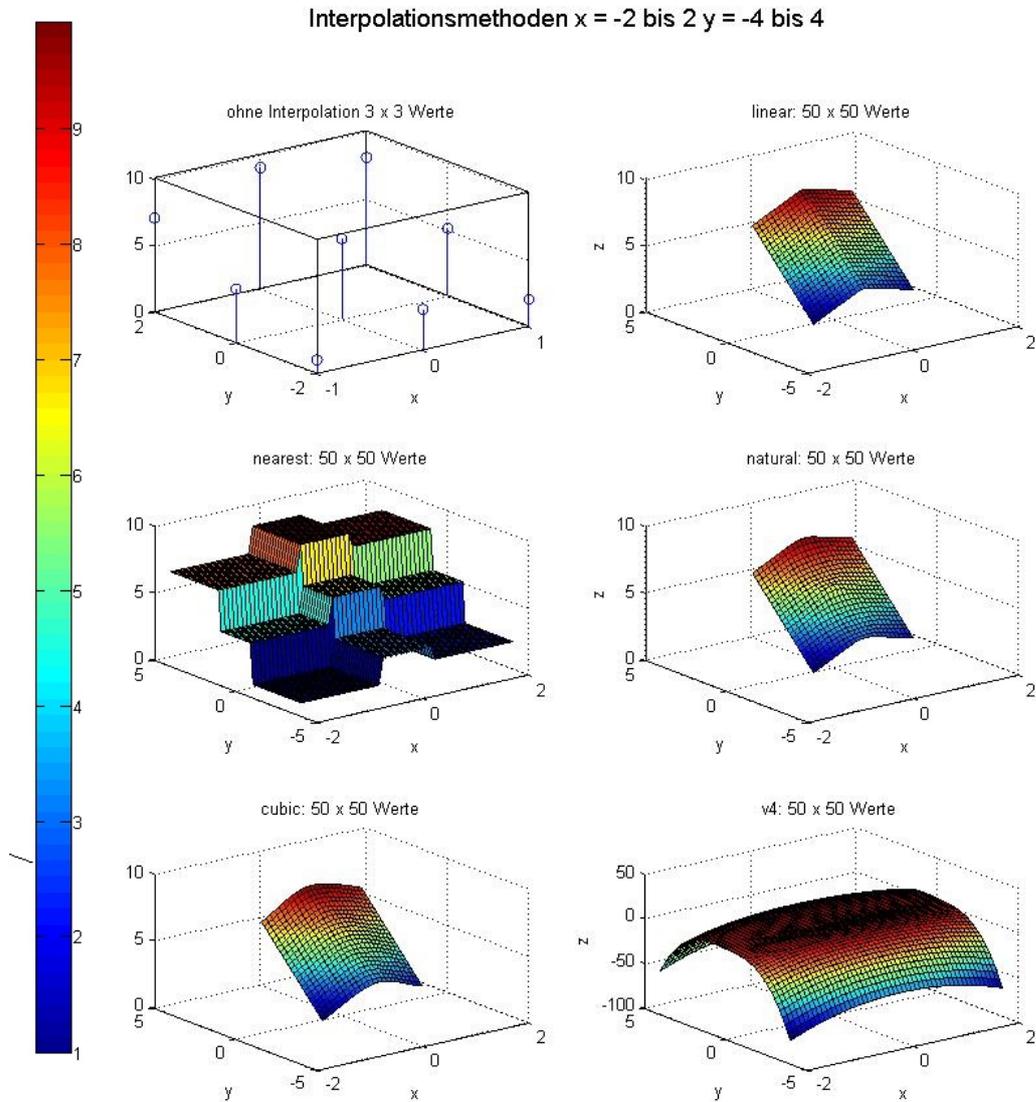


Abbildung 4.11: Darstellung der unterschiedlichen Interpolationsmethoden bei vergrößertem Interpolationsbereich

4. Ergebnisdarstellung mittels des Matlab Visualisierungs Tools (MVT)

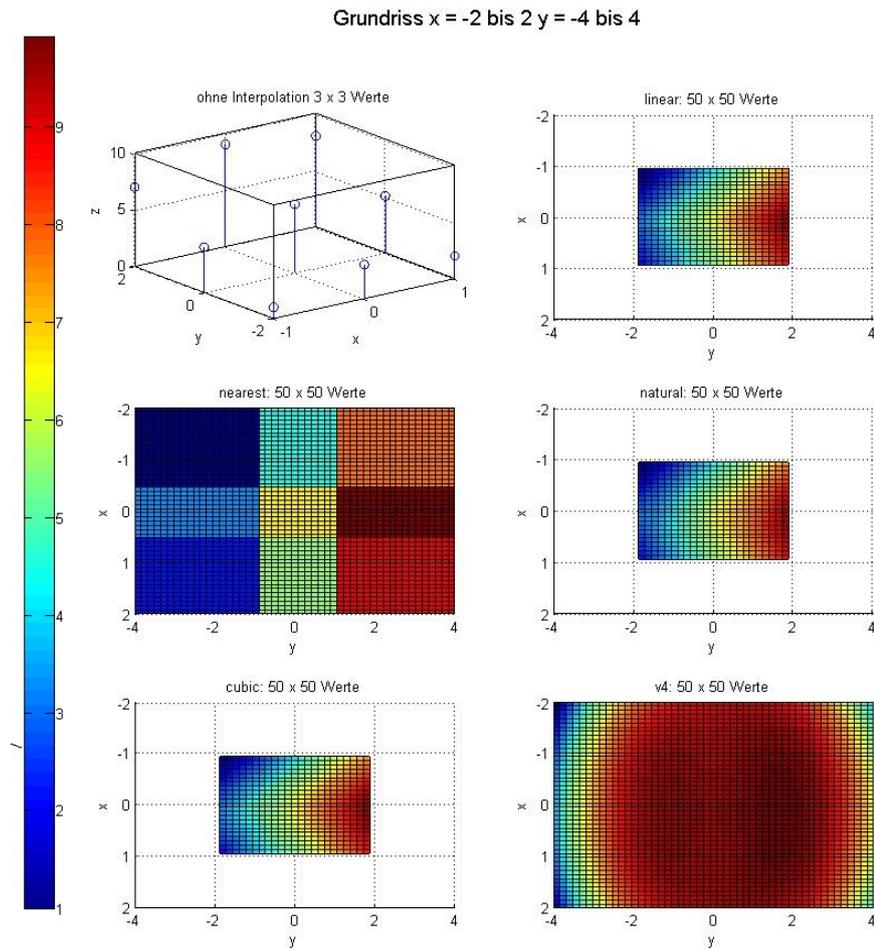


Abbildung 4.12: Darstellung im Grundriss bei vergrößertem Interpolationsbereich

5. Interpretation und Ausblick

Das folgende Kapitel enthält eine Interpretation der Ergebnisse und gibt einen Ausblick. Weitere Analysen und Informationen können im Anhang A nachgelesen werden.

5.1. Interpretation der Ergebnisse

In den folgenden Absätzen wird für den animierten Parameter der Begriff Energie aus der Signalverarbeitung verwendet. Dieser ist bei der Animation weder mit ρc normiert (= Energiedichte), noch mit dem Raumvolumen V multipliziert (akustische Schallenergie). Alle Werte werden als logarithmischer dB - Wert dargestellt und ohne weitere Skalierung miteinander verglichen. In den folgenden Abbildungen ist die Schallausbreitung im Hallraum zu sehen. Die weiße Fläche in der Mitte der Abbildungen stellt den gebogenen Plattendiffusor dar. Der farbige Bereich umfasst alle Mikrofonpositionen und der graue Bereich den restlichen Boden des Hallraumes.

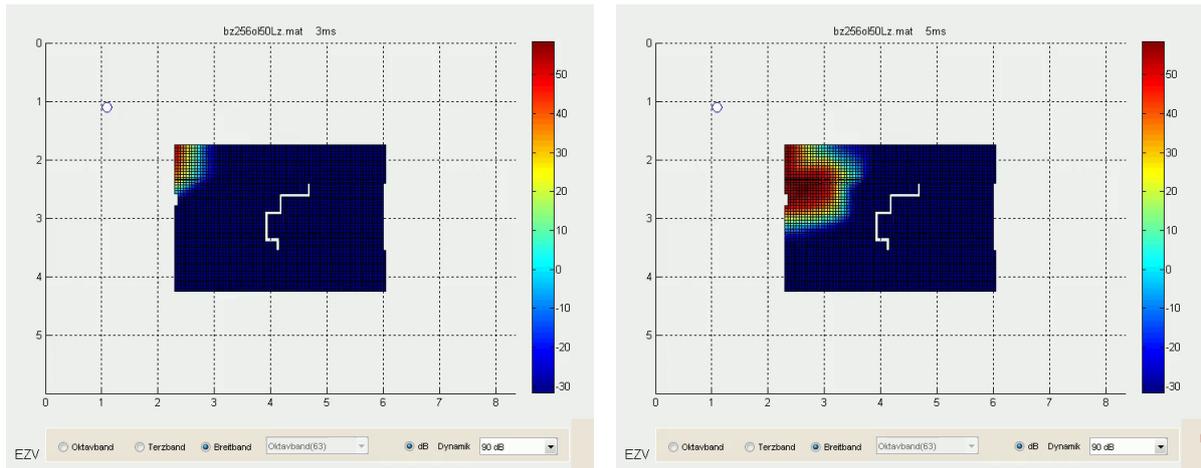
5.1.1. Schallausbreitung in den ersten Millisekunden

Beim langsamen Abspielen der Animationen ist zu erkennen, dass sich der Schall in den ersten Millisekunden bis zur letzten Mikrofonposition ausbreitet (Abbildung 5.1 für die breitbandige Ausbreitung). Nach 8 bzw. 11 ms, was einem Abstand von 2,7 m bzw. 3,7 m entspricht, sind bereits Teile der Energie hinter dem Diffusor zu erkennen (Abbildung 5.1 c und d). Danach ist die Energie vor dem Diffusor gering höher als dahinter (19 ms - Abbildung 5.2). Nachdem die Schallwellen an allen Begrenzungsflächen reflektiert wurden, ist die Differenz zwischen den einzelnen Positionen im Raum am geringsten (32 ms - Abbildung 5.3). Bis zu einer Zeit von 29 ms ist der Pegel hinter dem Diffusor um ungefähr 10 - 12 dB geringer als davor. Die gelben Bereiche bei 11 ms (Abbildung 5.1 d) entstehen auf Grund eines Messfehlers und die sternförmige Ausbreitung durch den Mikrofonabstand und die Interpolation dazwischen.

Im nächsten Schritt wird die Energieverteilung für das Terzband mit 2000 Hz analysiert (Abbildung 5.4) Der Energieunterschied vor und hinter dem Diffusor ist bei 16 ms nach Anregung gut zu erkennen. Zu den Zeitpunkten 19 - 35 ms schwankt die Energie in kurzen Zeitabschnitten bzw. verschiedenen Positionen und ist nicht gleichmäßig im Raum verteilt.

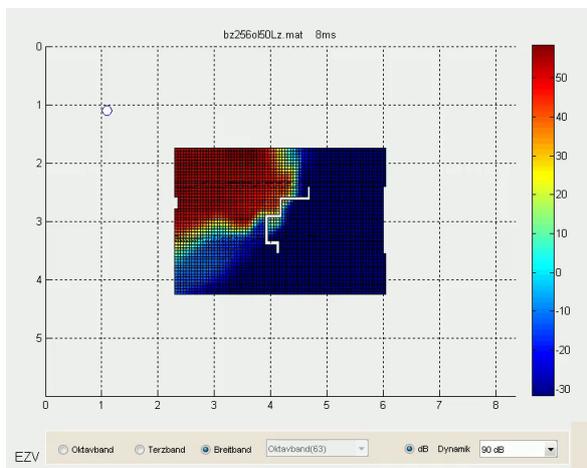
Bei der Analyse von tieferen Terzbändern sind die Fluktuationen des Schallfeldes noch größer (siehe Kapitel 5.1.3).

5. Interpretation und Ausblick

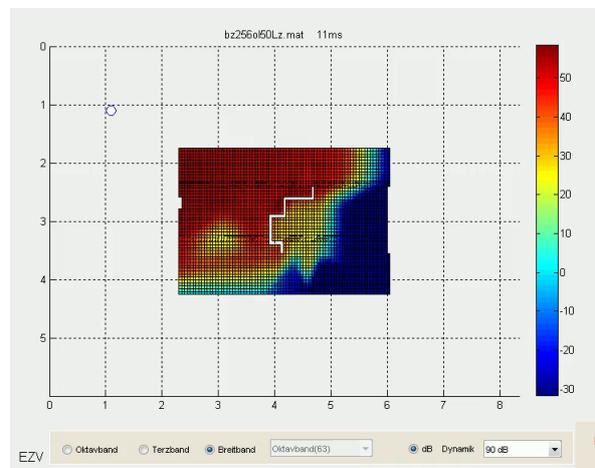


(a) 3 ms

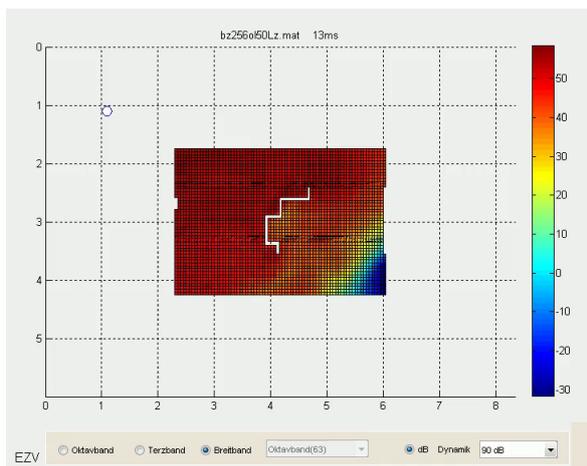
(b) 5 ms



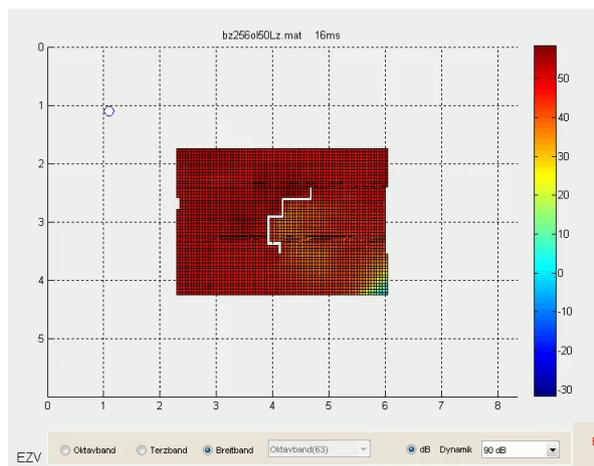
(c) 8 ms



(d) 11 ms



(e) 13 ms



(f) 16 ms

Abbildung 5.1: Energieausbreitung in den ersten Millisekunden

5. Interpretation und Ausblick

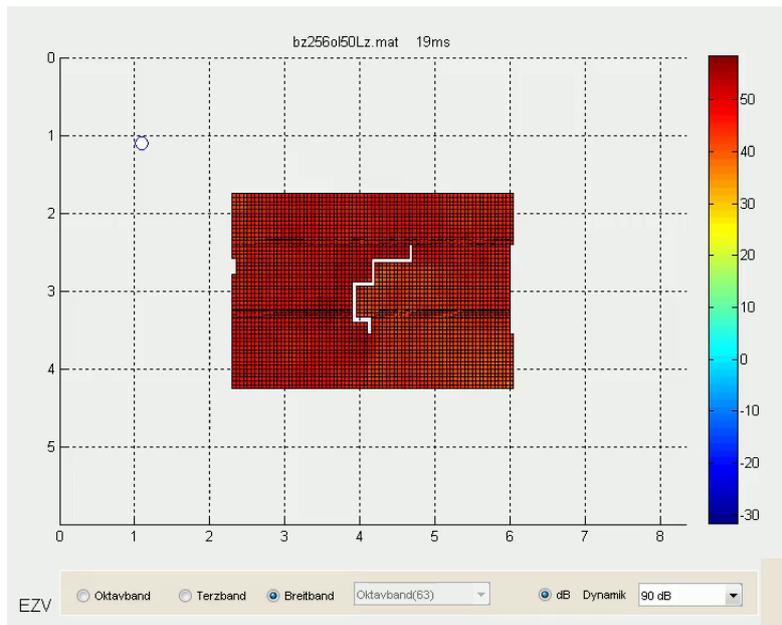


Abbildung 5.2: Energieverteilung nach 19 ms - breitbandig

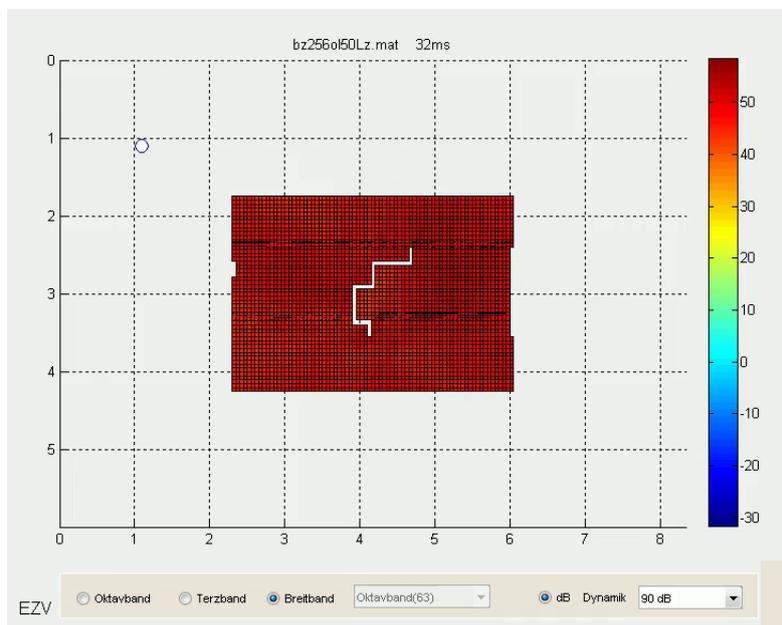


Abbildung 5.3: gleichmäßige Energieverteilung nach 32 ms - breitbandig

5. Interpretation und Ausblick

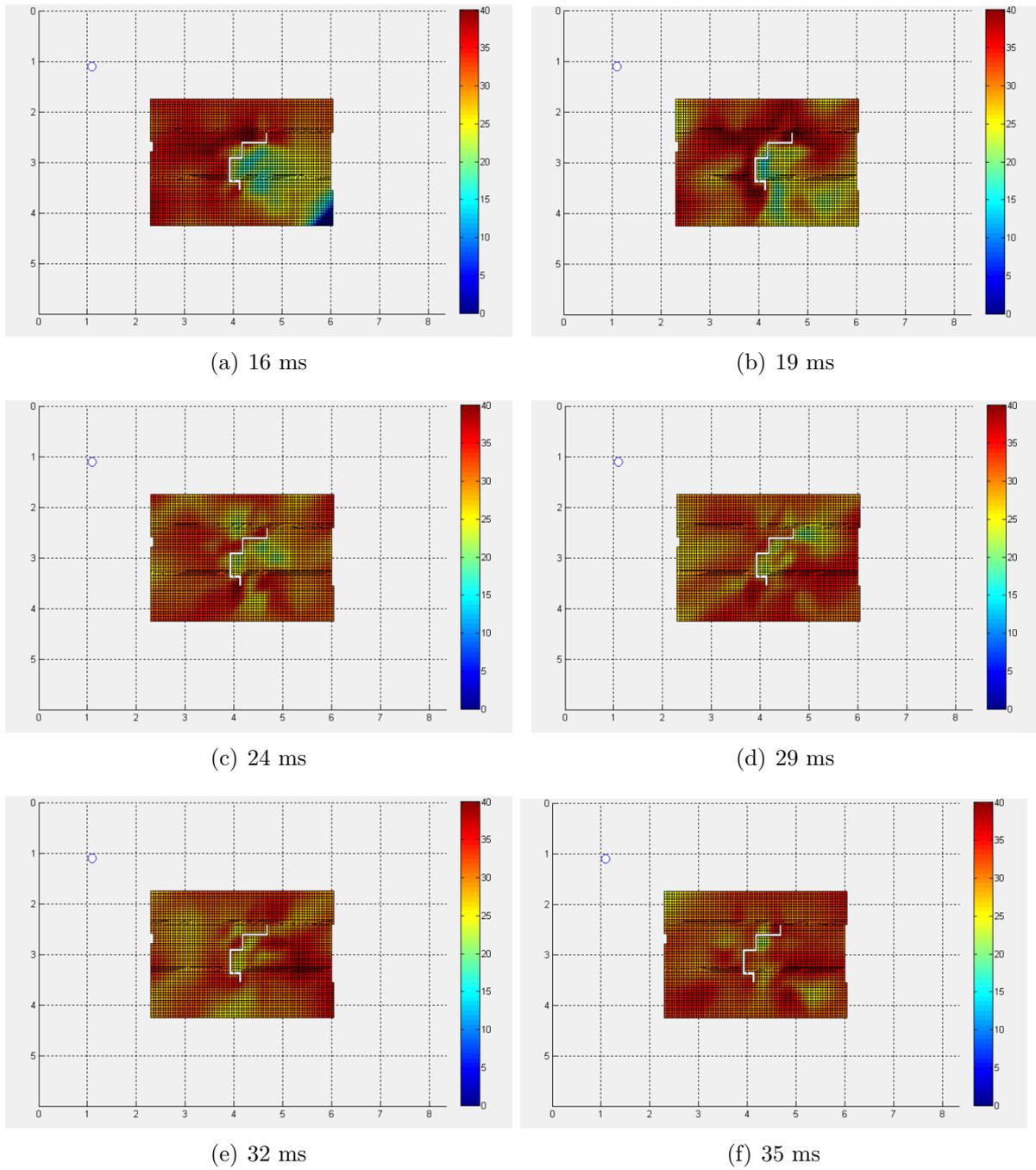


Abbildung 5.4: Energieausbreitung - 2000 Hz Terzband

5.1.2. Überprüfung der Nachhallzeit

Weiters kann man die Dauer der Nachhallzeit (Energieabfall um 60 dB) für die einzelnen Terzbänder gut aus den Animationen ablesen. Der Raum klingt in den tiefen Frequenzbändern viel länger nach als in den höheren. Die Energie des Breitbandsignals ist nach ungefähr 5 Sekunden um 60 dB abgefallen (Abbildung 5.5) und verändert sich auch in den weiteren 3 Sekunden nicht mehr stark (Grundrauschen Abbildung 5.6).

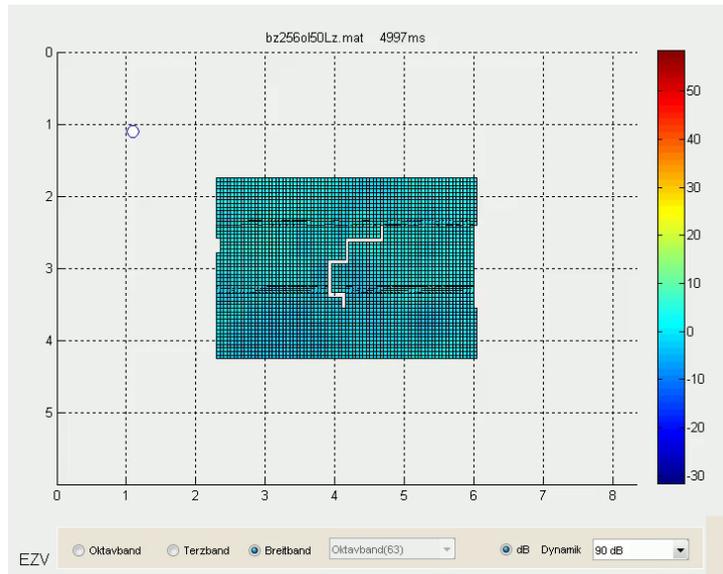


Abbildung 5.5: Energie nach 4997 ms - breitbandig

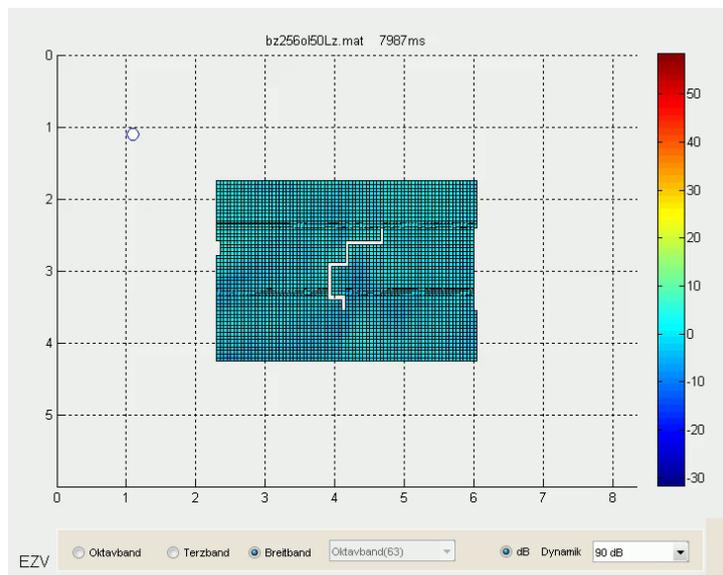


Abbildung 5.6: Energie nach 7987 ms - breitbandig

5. Interpretation und Ausblick

Wenn man die normalisierten Abklingkurven von 2 Messpositionen (MP 52 = vor dem Diffusor, MP 55 = hinter dem Diffusor) vergleicht, kann man keinen großen Unterschied erkennen. Der Abklingvorgang ist sehr homogen und vor bzw. hinter dem Diffusor ident (siehe Abbildung 5.7).

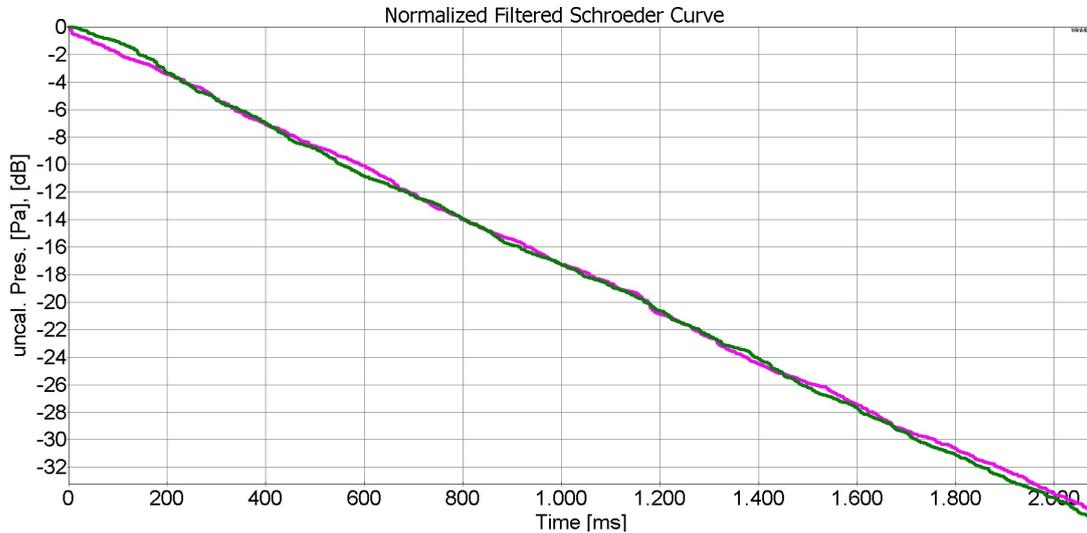


Abbildung 5.7: Abklingkurven - Terzband 2000 Hz, pink = MP 52 vor dem Diffusor, grün = MP 55 hinter dem Diffusor

5.1.3. Darstellung der Raummoden

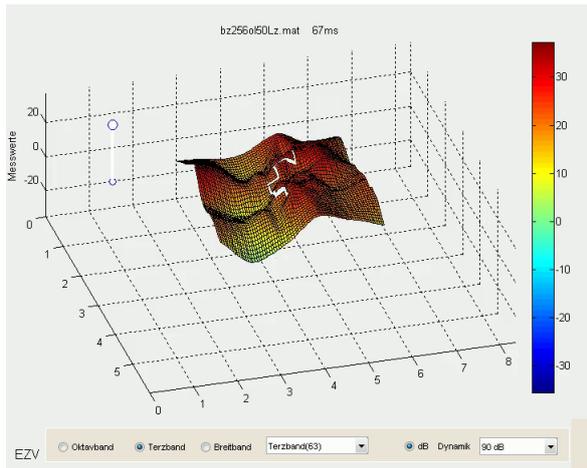
Wie bereits in Kapitel 2.7 berechnet, bilden sich unter 160 Hz vereinzelt Raummoden aus. Es kann kein diffuses Schallfeld entstehen, da die Anzahl an Moden zu gering ist. Einige Moden sind in Abbildung 5.8 für das 63 Hz Terzband (Abb. a-d) und 125 Hz Terzband (Abb. e und f) deutlich zu erkennen. Sogar nach 3 - 4 Sekunden bilden sich noch immer vereinzelt Raummoden aus (Abbildung 5.8 d und f). In Abbildungen 5.8 b und f sind Raummoden sowohl in Längs- als auch in Querrichtung zu sehen. Die Wellenlänge bei 63 Hz beträgt, wenn $c = 434$ m/s, 5,4 m und bei 125 Hz 2,7 m.

Wenn man zum Vergleich die Animation für 4 kHz genauer analysiert, ist zu erkennen, dass sich keine vereinzelt Moden ausbilden und ein diffuses Schallfeld entsteht.

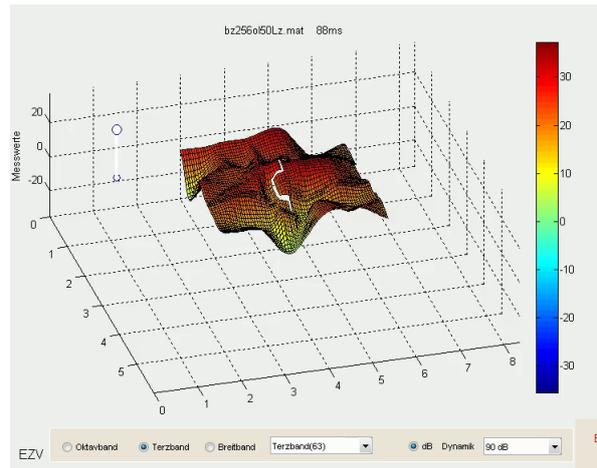
5.1.4. Einfluss des Diffusors

Die Ausbreitung in den ersten Millisekunden (Abbildung 5.1) verläuft, als ob kein Diffusor im Raum vorhanden wäre. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Schallwellen am Boden reflektiert werden und sich so unterhalb des Diffusors fortbewegen. Breitbandig betrachtet ist die Energie bis nach ungefähr 35 ms hinter dem Diffusor

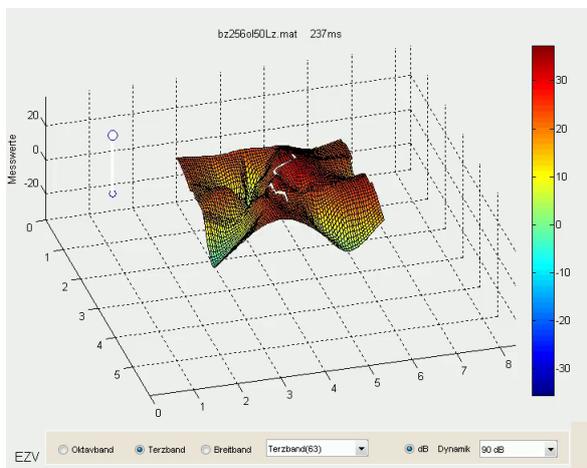
5. Interpretation und Ausblick



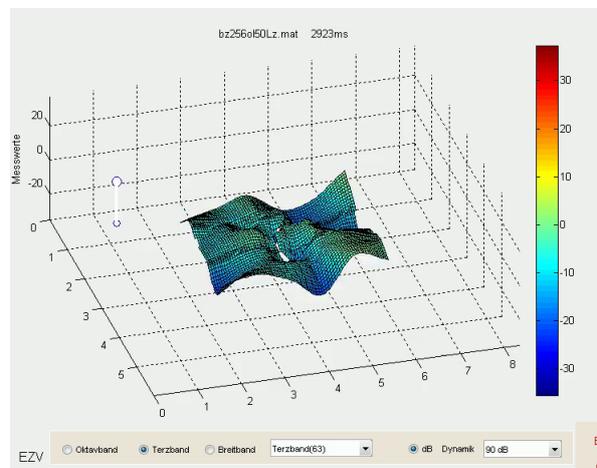
(a) 63 Hz 67 ms



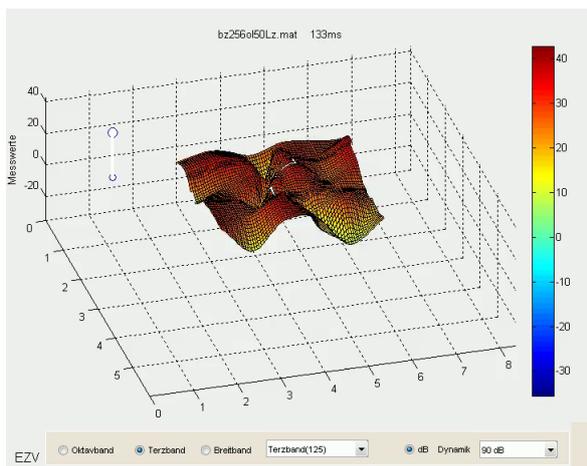
(b) 63 Hz 88 ms



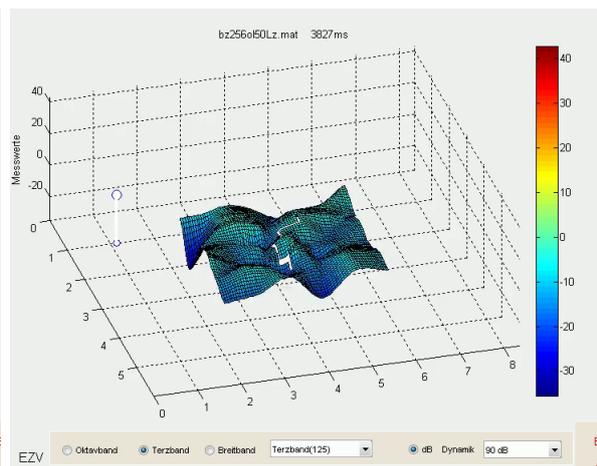
(c) 63 Hz 237 ms



(d) 63 Hz 2923 ms



(e) 125 Hz 2923 ms



(f) 125 Hz 3827 ms

Abbildung 5.8: Raummoden bei den Terzbändern 63 und 125 Hz

etwas geringer als vor dem Diffusor. Danach haben die Raumreflexionen einen Einfluss und die Energie ist beinahe gleichmäßig verteilt.

Betrachtet man alle Animationen und achtet auf die Energieverteilung um den Diffusor, merkt man, dass die Messpunkte nahe am Diffusor nicht mehr Diffusität aufweisen als jene, die sich 2 m davon weg befinden (kein Unterschied in der Energie - Schallfeld ist diffus). Es treten zu beliebigen Zeitpunkten und für beliebige Terzbänder Energiemaxima als auch Energieminima vor und hinter dem Diffusor auf. So wie auch an jedem andern Punkt im Raum.

Daher kann man darauf schließen, dass ein einzelner mittig im Raum installierter Diffusor weder bei tiefen noch bei hohen Frequenzen einen Einfluss auf die Energie und somit auf die Diffusität des Schallfeldes hat.

5.2. Ausblick

Hallräume werden normalerweise mit mehr als einem Diffusor ausgestattet. Obwohl in dieser Arbeit die Energie nach 35 ms für Frequenzen größer der Schröderfrequenz gleichmäßig verteilt ist, stellt sich die Frage, ob dies auch bei mehreren Diffusoren gilt. Oft sind die Diffusoren kaskadenförmig in der oberen Raumhälfte angebracht. Dadurch könnte es länger dauern bis eine gleichmäßige Energieverteilung eintritt.

Weiters wäre es interessant, erneute Messungen im Hallraum ohne Diffusor durchzuführen und die Abtastung des Raumes und somit die Messpunkteanzahl zu erhöhen, um bis zu den Begrenzungsflächen abtasten zu können. Damit könnten auch die Einflüsse der Wände im Laufe der Zeit dargestellt und ein Vergleich mit und ohne Diffusor hergestellt werden.

Mit mehreren Messpunkten in der vertikalen Ebene, ließe sich überprüfen, ob die Reflexionen in den ersten Millisekunden tatsächlich vom Boden kommen und wie sich die schrägen Schallwellen ausbreiten.

Anhang

Anhang A Konferenzbeitrag DAGA 2016

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen eines Konferenzbeitrages auf der 42. Jahrestagung für Akustik in Aachen präsentiert. Der Konferenzbeitrag sowie weitere Analysen sind auf den nächsten Seiten zu finden.

Sound Propagation in a Reverberation Chamber

Martina Kreuzbichler, Jamilla Balint, Gerhard Graber

Signal Processing and Speech Communication Laboratory, Graz University of Technology

8010 Graz, Email: m.kreuzbichler@student.tugraz.at, balint@tugraz.at, graber@tugraz.at

Introduction

The laboratory reproducibility of sound absorption measurements in reverberation chambers is still unsatisfactory [1]. The main requirement for measuring the absorption coefficient in a reverberation chamber is a diffuse sound field. Annex A of ISO 354 [2] states that the sound field in the chamber becomes more diffuse with an increasing amount of diffusers. The ideal amount of diffusers is reached, when the measured mean sound absorption coefficient in the frequency range from 500 Hz to 5000 Hz approaches a maximum value and remains constant with an increasing number of diffusers. Although this procedure is very common, a lot of different approaches for investigating the diffusivity of the sound field exist. Some of the approaches are described briefly in the following paragraphs.

Remmers et al. described the diffusivity of sound fields in [3] *inter alia* with the principle of a spatial constant energy density distribution. The square of the sound pressure values are proportional to the energy density and therefore the sound pressure level in third octave bands was measured. Their measurement results for the energy density with and without diffusers in a reverberation chamber were similar. The differences in the sound pressure level with and without diffusers are very low at high frequencies and increase slowly towards low frequencies.

Nolan et. al. [4] tried to verify the reverberation room's diffuse field conditions with measurements of the equivalent sound absorption area of an absorptive sample and the diffuse field factor. Low values of this factor indicate a high degree of diffusion. They performed their measurements for different diffuser settings including panel and spherical diffusers and discovered that the equivalent sound absorption area is rather sensitive to the change in the diffusivity but the diffuse field factor does not constitute an accurate indicator and can only be used for rough estimations.

Nutter et al. demonstrated in [5] that total acoustic energy density may be beneficially used in reverberation chamber measurements. They assumed that the velocity in the diffuse field is not exactly zero and calculated the total energy density impulse response by taking the squared pressure impulse response and the squared velocity magnitude impulse response. Nutter et al. showed with their measurements that using the total energy impulse response, T_{60} measurements and sound absorption calculations provide greater spatial uniformity.

Although many different investigations regarding the dif-

fusivity of the sound field in a reverberation chamber were carried out, up to this point it is still not known how diffuse a sound field can get. When measuring the reverberation time and calculating the absorption coefficient of a sample in a reverberation chamber, values of $\alpha > 1$ in the entire frequency range appear. With the so called edge effect, some of these high values can be explained [6]. This research evaluates the influence of the panel diffusers regarding the energy distribution in a reverberation chamber. Diffusers redirect the sound rays to the absorbent sample and are a barrier to the sound waves. Depending on the wave length the sound waves are either reflected or diffracted. As a consequence high frequencies are reflected and low frequencies are diffracted. In [7] the hypothesis was set up that the panel diffusers decrease the volume in a reverberation chamber and therefore the absorption coefficients are overestimated.

This paper investigates if this is a valid assumption and how the energy distribution around a diffuser looks like after excitation. We measured the impulse response around a diffuser in 70 positions and show how the sound waves propagate after the excitation.

Fundamental relations

The energy E of a discrete time signal with N samples is defined as:

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 \quad (1)$$

If we apply Parseval's theorem, the broadband signal energy E is equal to the summation of the energy spectrum across all frequencies:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (2)$$

where $x(n)$ is equal to the amplitudes of the measured impulse response - sound pressure values. $X(k)$ is the fast Fourier transform of $x(n)$ and N is the number of samples. The square of the sound pressure values is proportional to the energy density. Therefore these terms are not multiplied by the volume V of the reverberation chamber to get the energy. Moreover they are not normalized by the speed of sound c and the air density ρ and are used for comparison among themselves but not as absolute values.

Measurements

The measurements were carried out in the reverberation chamber of the Laboratory for Structural Engineering (Laboratory of Building Physics), Graz University of Technology. The reverberation chamber with sound hard, parallel walls has the dimensions of 8.34 m by 5.99 m and a height of 4.90 m. The total volume of the chamber is 244.79 m³. The room is equipped with panel diffusers according to ISO 354 [2].

Figure 1 shows the measurement setup in the reverberation chamber. A panel diffuser, made out of a 4 mm thick chipboard, with the size of 1 x 1.5 m, was bended along the length and positioned in the middle of the room. The microphone positions were distributed around it.



Figure 1: Measurement setup in the reverberation chamber

We measured the impulse response in 70 measurement points (see fig. 2) at a height of 1.3 m. For the integrated impulse method the room was excited by an MLS Signal. The distance between the microphone positions close to the diffuser was 0.25 m and 0.5 m resp. 0.75 m in the more distant area.

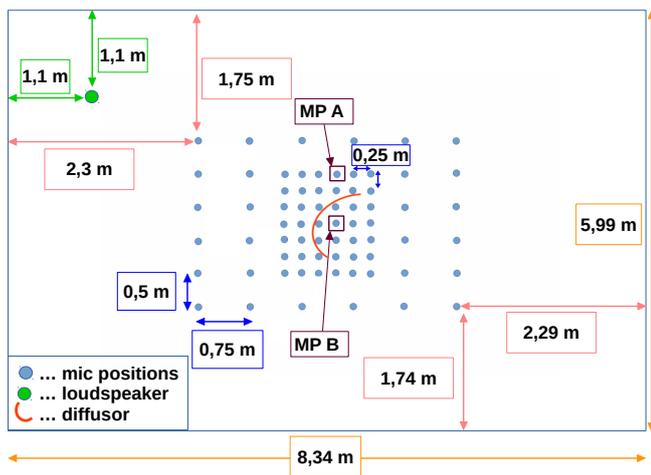


Figure 2: Floorplan of the reverberation chamber: The distance between the measurement points close to the diffuser was 0.25 m. The far-off points were placed with an interval of 0.5 m in the width and 0.75 m in the length.

Measurement results

In figure 3, the impulse responses from measurement point A and B are shown (the microphone positions are

marked in fig 2). The measurement positions are 0.75 m apart from each other and separated by the diffuser.

At measurement point B behind the diffuser (lower picture of fig. 3), no direct sound arrives and the first reflections hit the microphone at approx. 8 ms after the direct sound arrived at measurement position A. At measurement point A the direct sound is visible as a clear peak at the beginning of the impulse response. After that time frame the sound field can be regarded as diffuse. At measurement point B most of the energy arrives between 35 ms and 50 ms. At this stage the sound waves hit the entire surfaces of the reverberation chamber and were reflected at least once. From these observations we conclude that it takes up to 40 ms longer until a diffuse sound field builds up behind the diffuser. In this fig. 3 the delay between the sound source and the microphone positions, which has a length of 10 ms ($\hat{=} 3.3$ m), is not considered.

In figure 4 the decay curves from measurement point A and B are shown. No remarkable difference can be seen in this normalized curves. So the decay process in front of and behind the diffuser is equal and very homogeneous.

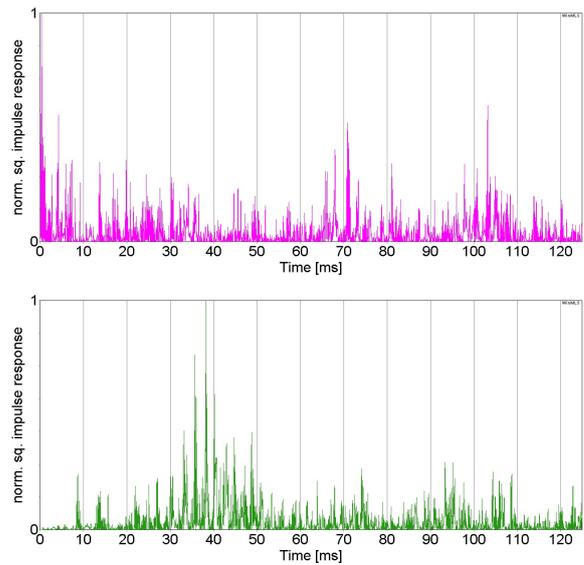
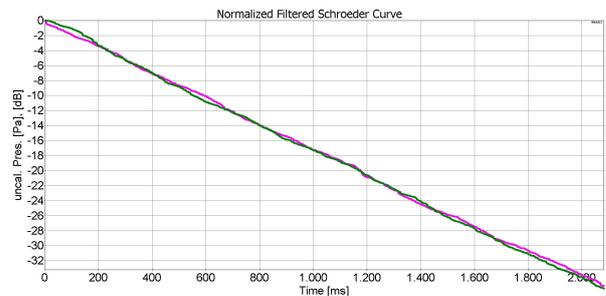


Figure 3: Squared impulse response for 2 measurement points, pink: measurement point A in front of the diffuser, green: measurement point B behind the diffuser



50 Figure 4: Decay curves for 2 measurement points at the third octave band of 2000 Hz, pink: measurement point A in front of the diffuser, green: measurement point B behind the diffuser

For a better understanding of the structure of the sound field around the diffuser, a visualization of the sound propagation was generated. The visualizations were animated over time and video clips were made. We created video clips for a broadband propagation and for six different third octave bands, the animations can be watched online and downloaded. The required link is given at the end of the paper. Certain time periods of the animation are shown in the following paragraph and will be discussed.

In figure 5 the energy propagation is displayed for the time period of 5 ms after excitation for the frequency range of 63 Hz to 8 kHz. The white area in the middle of the plot represents the bended diffuser. The measurement area covers all the microphone positions shown in fig. 2. The grey area represents the floor area of the reverberation chamber.

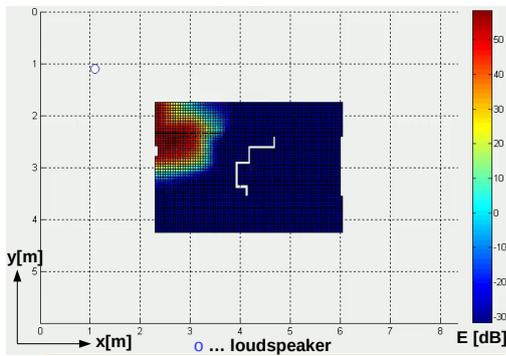


Figure 5: Energy distribution in the reverberation chamber at 5 ms after excitation for the frequency range of 63 Hz to 8 kHz

We displayed the energy propagation for the time periods of 8 ms, 11 ms, 16 ms, and 35 ms (see fig. 6 and 7). For better visibility of the results only the measurement area is shown. The colorbar from fig. 5 is also valid for fig. 6 and fig. 7. After a time period of 8 ms to 11 ms which corresponds to a distance of 2.7 m to 3.7 m referred to the loudspeaker, parts of the energy are visible behind the diffuser but it takes up to 35 ms until the energy is distributed almost equally over the measurement area. Up to 29 ms the level behind the diffuser is slightly lower (- 10 to -12 dB) compared to the area which is facing the sound source. At 11 ms the yellow area on the left side is due to a measurement error and the star shaped edge is because of the distance between the microphone positions and the interpolation in-between.

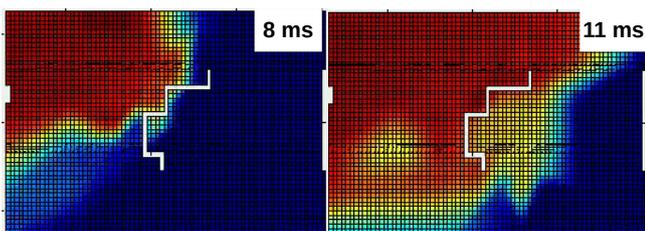


Figure 6: Energy distribution in the reverberation chamber at 8 ms and 11 ms after excitation for the frequency range of 63 Hz to 8 kHz. For colorbar see fig. 5.

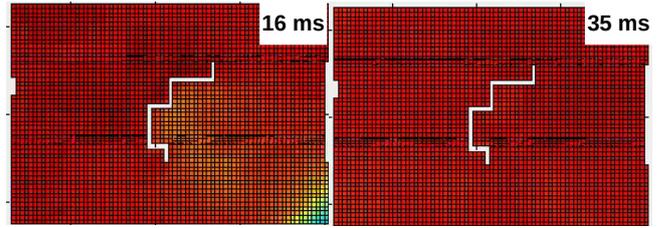


Figure 7: Energy distribution in the reverberation chamber at 16 ms and 35 ms after excitation for the frequency range of 63 Hz to 8 kHz. For colorbar see fig. 5.

In fig. 8 to 10 the energy distribution is shown for the third octave band of 2 kHz. The difference between the energy level behind the diffuser and in front of is clearly visible for the time frame of 16 ms after excitation. For the time periods of 19 ms, 24 ms, 29 ms, and 35 ms the energy still fluctuates for small time instances and is not completely equal everywhere in the room. The colorbar from fig. 8 is also valid for fig. 9 and 10

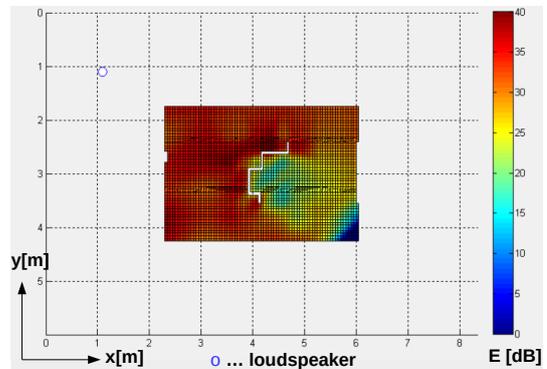


Figure 8: Energy distribution in the reverberation chamber at 16 ms after excitation for the third octave band of 2 kHz

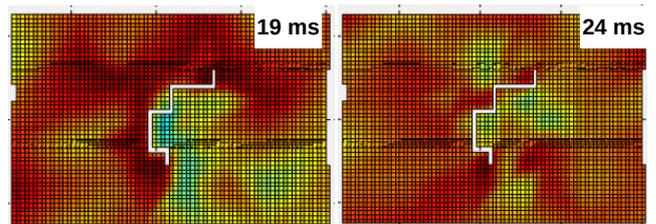


Figure 9: Energy distribution in the reverberation chamber at 19 ms and 24 ms after excitation for the third octave band of 2 kHz. For colorbar see fig. 8.

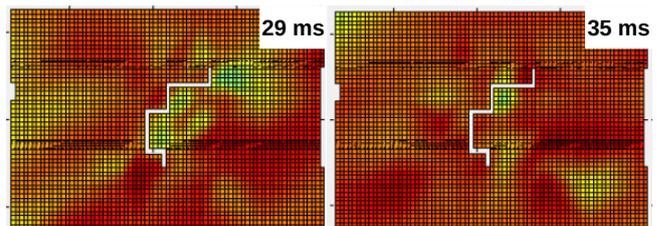


Figure 10: Energy distribution in the reverberation chamber at 29 ms and 35 ms after excitation for the third octave band of 2 kHz. For colorbar see fig. 8.

51

When analyzing the lower third octave bands the fluctuation is more pronounced.

tuations of the sound field are quite big for the entire decay process and are larger than for high frequencies. Therefore the effectivity of the diffuser is limited. Figure 11 shows a 3D - Plot at 237 ms for the 63 Hz third octave band. The measurements in this specific reverberation room are only valid above the Schroeder frequency calculated by

$$f_g = \sqrt{\frac{T}{V}} \cdot 1000 \quad (3)$$

where T is the reverberation time and V the total volume of the reverberation chamber. Below the Schroeder frequency f_g individual room modes can appear. The development of an diffuse sound field is not possible because the amount of room modes is too small. ISO 354 [2] gives no general indication for f_g but points out that is could be hard to get accurate measurement results for the low frequency range. The Schroeder frequency for this reverberation chamber is $f_g = 148.5 Hz$ when calculated with a reverberation time of $T = 5.4$ s. The fluctuation of the sound field is visible in fig. 11.

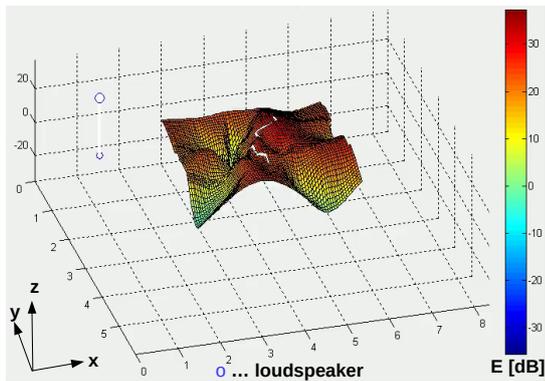


Figure 11: Energy distribution in the reverberation chamber at 237 ms after excitation for the third octave band of 63 Hz

Discussion and Conclusion

In this research we investigated the energy distribution around a panel diffuser in a reverberation chamber after excitation. We placed a diffuser in the middle of the chamber and looked at the energy level in the area behind the diffuser and compared it to the area in front of it which was facing the sound source.

We animated the measurement results of the energy distribution over time to illustrate the different energy levels in the reverberation chamber from the point of excitation through the entire decay process. Our measurements showed that the energy level of the broadband signal in front of the diffuser is higher up to a time frame of 35 ms after excitation. At around 35 ms the reflections from the reverberation chamber's surface start to weight in. After this time, the energy is distributed almost equally in the entire measurement area and the difference between the measurement positions reach a minimum value.

For low frequency bands the density of room modes is very low and the energy distribution in the room is un-

equal, therefore large fluctuations appear. This can be seen in the animations for 63 Hz and 125 Hz. For frequency bands above 125 Hz the energy is distributed almost equally after 35 ms after excitation.

Reverberation chambers are usually equipped with more than one diffusers. Although the energy in the reverberation chamber in our research is almost equally distributed after 35 ms above the Schroeder frequency, it is questionable how the energy distribution looks like when the sound field around more than one diffuser is analyzed. Usually the diffusers are cascaded in the upper half of the reverberation chamber. Therefore it could take longer until equal energy levels are reached. Moreover the panel diffusers could reduce the volume and be one of the reasons why the measured absorption coefficients differ so much in each reverberation chamber. This has to be evaluated in future research.

Webpage for Animations

The generated animations can be watched online: www.spsc.tugraz.at/student_projects/soundpropagation



References

- [1] Vercammen, M.: Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354, ISRA 2010
- [2] ISO 354: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation chamber, 2003
- [3] Remmers, H.; Kappelmann, M.; Blau, M.: Messung und Bewertung der Diffusität des Schallfeldes in einem Hallraum, DAGA 2006
- [4] Nolan, M.; Vercammen, M.; Jeong, C.: Effects of different diffuser types on the diffusivity in reverberation chambers, EuroNoise 2015
- [5] Nutter, D. B.; Leishman, T. W.; Sommerfeldt, S. D.; Blotter, J. D.: Measurement of sound power and absorption in reverberation chambers using energy density, The Journal of the Acoustical Society of America, 121(5), pp. 2700-2710, 2007
- [6] Bruin, A. de: Calculation of the edge effect of sound-absorbing structures. Doctoral thesis, Delft University of Technology 1967
- [7] Balint, J.; Graber, G; Hahn, H.: The Equivalent Volume of a Reverberation Chamber, DAGA 2015

Literatur

- [1] ALFRED, Mertins: *Signal Analysis Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*. New York : John Wiley and Sons, 1999
- [2] BALINT, Jamilla: *Theoretische Planung und messtechnische Evaluierung eines Hallraumes*. Technische Universität Graz, 2014. – Diplomarbeit
- [3] GRABER, Gerhard ; WESELAK, Werner: *Raumakustik Skript zur gleichnamigen Vorlesung*. Version 5.4. Technische Universität Graz, 2013
- [4] JACOBSEN, Finn ; JUHL, Peter M.: *Fundamentals of General Linear Acoustics*. New York : John Wiley and Sons, 2013
- [5] MOESER, Michael: *Technische Akustik*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2009
- [6] ÖNORM EN ISO 354: *Akustik - Messung der Schallabsorption im Hallraum*. Österreichisches Normungsinstitut, 2003
- [7] ÖNORM EN ISO 3741: *Akustik - Bestimmung der Schallleistungs- und Schalenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1*. Österreichisches Normungsinstitut, 2011
- [8] SCHULZE, Henrik: *Signale und Systeme Skript zur gleichnamigen Vorlesung*. Fachhochschule Südwestfalen, 26.6.2014
- [9] WARUM, Stefan: *Messung von Außenohrübertragungsfunktionen und direktionalen Raumimpulsantworten als Basis der Auralisation realer Räume*. Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, 2003. – Diplomarbeit
- [10] WEBER, Gerd: *MVT Matlab Visualisierungs Tool*. Technische Universität Graz, 2005. – Projektarbeit
- [11] WESELAK, Werner: *Akustische Messtechnik Skript zur gleichnamigen Vorlesung*. Version 9.0. Technische Universität Graz, 2014
- [12] WIKIPEDIA: *Nachhall*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Nachhall>. Version: 16.4.2015
- [13] ZWICKER, Eberhard ; ZOLLNER, Manfred: *Elektroakustik*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1984