



Entwicklung eines akustischen Prüfstandes zur Schallemissionsmessung kleiner elektrischer Geräte

Masterarbeit
von
Martin Müller, BSc.

Technische Universität Graz

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

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

Graz, im September 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Die meisten Maschinen mit bewegten oder vibrierenden Bestandteilen verursachen für das menschliche Ohr wahrnehmbaren Schall. Standardisierte Messverfahren der Schalleistung jeglicher Maschine werden in der Fertigungsindustrie entweder in Hall- oder Freifeldräumen durchgeführt, was in beiden Fällen den Betreiber solcher Räumlichkeiten vor hohe Kosten stellt, insbesondere im Falle einer reflexionsarmen Messumgebung. Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Möglichkeit, Schalleistungsmessungen von kleinen elektrischen Geräten, wie Küchengeräten und mechanischen Komponenten von größeren Maschinen in einer Kammer mit einem Volumen von ca. einem Kubikmeter zu realisieren. Zu diesem Zweck wurde eine geeignete Messkammer entworfen und angefertigt um Experimente an einem Probergerät durchzuführen. Dieses Probergerät wurde zur Etablierung von Referenzwerten zuvor in einem reflexionsarmen Raum nach standardisierten Methoden vermessen. Für die Erfassung und Untersuchung der akustischen Eigenschaften der Kammer selbst erfolgte die Integration von Lautsprechern im Kammerinneren. Die daraus erhaltenen Ergebnisse dienten als Basis für die Bildung von Korrekturstrategien zur Entzerrung der Schalleistungsmessung mit der Kammer. Abschließend wurden die aufgestellten Strategien anhand einer Kammermessung des Probergeräts angewandt und die Resultate mit den Referenzwerten aus dem Freifeld verglichen.

Abstract

Most machines that include moving or vibrating parts produce sound detectable by the human hearing. Standardized sound power level measurement methods of any machine in industrial manufacturing environments is either done in reverberation chambers or anechoic rooms, both of which generally demand large spaces and are very costly for the company operating it, especially in case of anechoic environments. This master thesis explores the possibility of measuring the sound power levels of small devices like kitchen equipment and mechanical components of larger devices in spaces of about a cubic meter. To this end a suitable measurement chamber was designed and crafted to perform experiments on a sample device. This device was beforehand measured using standardized methods in a low-reverberant room to establish reference values. Loudspeakers were integrated in the chamber to examine its acoustical properties. The findings of these examinations served as a basis for the development of correction strategies for sound power level measurements inside the chamber. Finally the established strategies were applied on a chamber measurement of the sample device and the results were brought into comparison with the free field reference values.

Danksagung

Mit der Fertigstellung dieser Arbeit geht ein langer und ereignisreicher Wegabschnitt meines Lebens zu Ende. Dass es überhaupt so weit kommen konnte, verdanke ich vielen Personen die mich auf diesem Weg begleitet haben und bei denen ich mich hiermit mit ganzem Herzen bedanken möchte. Allen voran gilt mein Dank meinem Betreuer DI Dr.techn. Werner Weselak, der mir die Gelegenheit zu dieser Masterarbeit gab, mich dabei mit größter Geduld auf allen Ebenen beraten, gefördert und vor allem stets mit positivem Gemüt motiviert hat. Auch bei jeder bei ihm abgelegten Prüfung hatte ich nachher immer das Gefühl dabei mehr als die Summe des Stoffs gelernt zu haben.

Im gleichen Umfang, wenn auch natürlich aus anderen Gründen, gilt mein Dank meiner Mutter Gerda. Sie bestand an jedem meiner Tiefpunkte darauf, dass ich meine universitären (und auch privaten) Ziele weiterverfolge und schließlich erreiche, hatte an jedem meiner Höhepunkte beinahe mehr Freude an meinem Erfolg als ich selbst und hat immer an mich und meine Fähigkeiten geglaubt. Danke liebe Mutter für alles was du für mich getan hast und tust.

Außerdem bedanke ich mich bei meiner Schwester Johanna, ihrem Mann Adam und ihren Kindern Nikolaus, Helena und Emil für unser schönes Familienleben. Es mag für manche Leute nicht „normal“ sein, aber es hat sich all die Jahre verdammt nochmal gut angefühlt ein Teil davon zu sein. Weiters möchte ich mich bei meinen Brüdern Robert und Helmut bedanken. Bei Robert insbesondere dafür, dass er immer ein offenes Ohr für meine Probleme hatte. Und für alle Ausflüge, Kletterabenteuer und gemeinsame Arbeitsstunden.

Mein Dank und eine herzliche Umarmung (wie immer) gilt auch meiner Nichte Julia für ihre Hilfe, wenn ich sie gebraucht habe, Kochrezepte mit detailreicher Anleitung, die vielen Film- und Spieleabende, für ihr großes Herz, ihren Humor und ihre bedingungslose Loyalität.

Abschließend gilt mein Dank meinen Freunden Michael K. und Michael H. für all die lustigen Stunden und Gespräche beim Tischtennis, am Minigolfplatz, auf der Couch, vor dem Fernseher, im Kino, online, beim Wandern am Berg, beim Urlaub am Meer und was wir in den letzten Jahren (oft fast täglich) sonst so alles gemeinsam gemacht haben.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 3745:2012-07: Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume.
- [2] DIN EN ISO 3741:2011-01: Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1.
- [3] DIN EN ISO 3744:2011-02: Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über reflektierenden Ebenen.
- [4] Fasold, W. & Veres, E. (1998). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Huss-Medien.
- [5] Weselak, W. (2016). *Akustische Messtechnik, Skriptum zur Vorlesung an der TU-Graz*.
- [6] Graber, G. & Weselak, W. (2009). *Raumakustik, Skriptum zur Vorlesung an der TU-Graz*.
- [7] ARTA (Mai 2017), *Application Note No.5: Eine Kammer zum Kalibrieren von Mikrofonen unterhalb 500 Hz*. (Web-Link: www.artalabs.hr/apnotes/ap5_mikromesskammer-rev03ger.pdf)
- [8] Graber, G. & Weselak, W. (2009). *Elektroakustik, Skriptum zur Vorlesung an der TU-Graz*.
- [9] Hiebel, H. & Weselak, W. (2015). *Elektroakustik, Skriptum zur Laborübung an der TU-Graz*.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Ausgangssituation | 1 |
| 1.2 | Ziele der Arbeit | 3 |
| 2 | Planung und Konstruktion der Messkammer | 5 |
| 2.1 | Grundsätzliche Überlegungen | 5 |
| 2.2 | Baustoffauswahl | 7 |
| 2.3 | Konstruktion | 8 |
| 3 | DUT-Freifeldmessungen | 13 |
| 3.1 | Messumgebung | 13 |
| 3.2 | Testobjekt | 15 |
| 3.3 | Durchführung der Messungen | 16 |
| 3.4 | Ergebnisse | 17 |
| 4 | DUT-Messungen in der Messkammer | 21 |
| 4.1 | Eigenschaften der Messumgebung | 21 |
| 4.2 | Messaufbau | 26 |
| 4.3 | Ergebnisse | 27 |
| 4.4 | Zusammenfassende Analyse | 32 |
| 5 | Lautsprechermessungen in der Messkammer | 33 |
| 5.1 | Motivation | 33 |
| 5.2 | Verändertes Messsetup | 35 |
| 5.3 | Integration des Lautsprechers in die Messkammer | 37 |
| 5.4 | Analyse des Tieftonbereichs | 45 |
| 5.5 | Analyse des Modalbereichs | 52 |
| 5.6 | Lautsprecher für den Hochtonbereich | 68 |
| 5.7 | Analyse des Diffusschallbereichs | 70 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Anwendung der Korrekturstrategien..... | 77 |
| 6.1 | DUT-Kammermessung mit verändertem Messsetup | 77 |
| 6.2 | Tieftonkorrektur | 79 |
| 6.3 | Korrektur des Modalbereichs..... | 80 |
| 6.4 | Wiederholbarkeit der Modalbereich-Entzerrungsmessung..... | 85 |
| 6.5 | Alternative Modalbereich-Entzerrungskurven | 87 |
| 6.6 | Hochtonkorrektur..... | 90 |
| 6.7 | Zusammenfassung der Korrekturen | 91 |
| 7 | Dokumentation der Kammermessung | 93 |
| 7.1 | Messumgebung..... | 93 |
| 7.2 | Anleitung für den Messablauf | 94 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 107 |

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Messung von Schallemissionen von Seiten der Hersteller aller Arten von Maschinen ist in internationalen Standards genau vorgegeben. Durch die Motivation die Maximallärmpegel in verschiedenen Umgebungen wie Arbeitsplätzen, dem Straßenverkehr, öffentlichen Parkanlagen, Wohnungen, etc. zu senken, sowie wegen der Wettbewerbssituation der Hersteller, dem Kunden akustisch optimierte Ware anzubieten, besteht ein Interesse, Geräte mit wahrnehmbarer Geräusentwicklung exakten akustischen Messungen zu unterziehen.

Im Alltag werden Geräte in akustisch verschiedenen Umgebungen benutzt. Zum Beispiel wird das exakt gleiche Küchengerät möglicherweise einmal in einer kleinen Kochnische einer Wohnung und wo anders in einer Großküche eines Restaurants verwendet. Stelle man sich vor, dass in beiden Fällen, abgesehen vom Lärm des Geräts, absolute Ruhe herrscht, wird sich trotzdem die Akustik dieser beiden Küchenräume sicherlich unterscheiden und die beispielhafte Küchenmaschine beide Lokalitäten dementsprechend unterschiedlich anregen. Aus diesem Sachverhalt lässt sich ableiten, dass es ad-hoc nicht möglich ist, Geräte in alltäglichen Räumen akustisch objektiv und vor allem reproduzierbar zu bewerten. So gewonnene Aussagen über die Lärmemission eines Gerätes würden nur in Räumen mit exakt gleichen Abmessungen, mit derselben Einrichtung und dem zu untersuchenden Gerät an der exakt gleichen Stelle auch ein gleiches Ergebnis liefern, da nur dann die Reflexionen des vom Gerät emittierten Schalls im Raum ein identisches Schallfeld erzeugen, welches von Mikrofonen gemessen werden kann.

Es ist ebenso ungenügend, lediglich mit einem Druckmikrofon den Schalldruck der Maschine als Emissionsgröße festzuhalten, da der Schalldruck im Mindesten entfernungsabhängig ist. Maschinen weisen zudem, wenn überhaupt, nur bei tiefen Frequenzbereichen eine omnidirektionale Abstrahlung auf. Eine Angabe des Schalldruckpegels bei einer bestimmten Entfernung ist daher eine zu vage Messgröße. Für einen objektiven, ortsunabhängigen Emissionswert wird stattdessen angestrebt die Schalleistung zu messen.

Die Schalleistung betrachtet die abgestrahlte Energie, welche durch eine gedachte Hüllfläche um die Quelle herum hindurchtritt. Ist die Hüllfläche eine Kugel, wird also die Wirkung der Quelle in alle möglichen Richtungen auf diesem Wege objektiv festgehalten. Um zu diesem unabhängigen Vergleichswert zu kommen, muss daher die Wirkung der Raumakustik umgangen oder gar zur Gänze verhindert werden. Dies lässt sich auf zwei Wege bewerkstelligen, mit einem reflexionsarmen Raum oder einem Hallraum.

Der reflexionsarme Raum verhindert durch Dämmmaterial im optimalen Fall weitgehend die Reflexion von Schallwellen jeglicher Frequenz im Hörbereich des menschlichen Ohrs. Das

verwendete Dämmmaterial besteht aus porösen Schäumen, welche den bewegten Luftmolekülen durch Reibung im Inneren des Materials Energie entziehen. Damit wird effektiv die Propagation der Schallwelle gemindert. Diese Beschreibung mag simpel klingen, in der Realität stellt es den Bauherrn eines reflexionsarmen Raumes jedoch vor viele Herausforderungen. Das größte Problem stellen sicherlich die großen Wellenlängen tieffrequenter Schallwellen dar.

Die nötige Dicke der Absorber wird durch den Viertelwellenlängenwert dimensioniert. Für eine Messung im Bereich von 20Hz bis 20kHz stellt dies mit etwa 4m jedoch einen unrealistischen Wert dar. Da viele Geräte, die in reflexionsarmen Räumen vermessen werden sollen, im Subbass- und Hochton-Bereich möglicherweise eine nur geringfügige Schallemission aufweisen, könnte man dieses Problem jedoch durch einen eingeschränkten Messbereich von z.B. 100Hz bis 10kHz umgehen. In diesem Fall sinkt die benötigte Dicke des Dämmmaterials auf etwa 86cm, was schon etwas realisierbarer ist. Das Dämmmaterial sollte dabei im Optimalfall einen Absorptionsgrad von mindestens 0,99 aufweisen. Hinzu kommt für einen vollwertigen reflexionsarmen Raum noch die Konstruktion eines „schwebenden“ Bodens in Form eines hängenden Gitters zur Aufstellung der Geräte und für den Zugang, da ja alle Flächen inklusive Boden aus Schalldämmmaterial bestehen müssen. Auch muss unter Umständen eine Lagerung des gesamten Raumes auf Dämpfern mit eingeplant werden, um ihn von tieffrequenten Fremdgeräuschen von außen zu isolieren.

Ein reflexionsarmer Raum ist eine aufwendige und kostspielige Einrichtung, bietet jedoch ohne Frage die Möglichkeit einer isolierten akustischen Messung einer Maschine.

Eine Alternative für die Schalleistungsmessung stellen Hallräume dar. Ein Hallraum besitzt im Gegenzug zum reflexionsarmen Raum maximal reflektierende Wände mit einem Absorptionsgrad von höchstens 0,06. Eine Schallquelle in ihrem Inneren erzeugt nach einem Einschwingvorgang ein Schallfeld, das im Optimalfall aus Überlagerungen aller Reflexionen an allen Wänden besteht. Dieser Zustand wird diffus und isotrop genannt, was bedeutet, dass an jedem Punkt im Raum im zeitlichen Mittel die eintreffende Schallenergie gleich groß ist. Ein Gerät, welches in einem solchen Raum betrieben wird, verursacht daher ein diffuses Schallfeld mit der dafür zur Verfügung stehenden Schallenergie. Der Raum trägt nur zur Zerstreung der Schallwellen bei, er kann natürlich von sich selbst aus keine weitere Energie erzeugen. Dieser spezielle akustische Fall kann nun ausgenutzt werden um mit einer geringen Anzahl von Mikrofonen im Raum einen gemittelten Schalldruckpegel zu bestimmen, der wiederum mit Kenntnis der akustischen Raumkenngrößen Volumen, Oberfläche und Nachhallzeit in einen Schalleistungspegel umgerechnet werden kann.

Beide Arten von akustischen Messräumen müssen jedoch auch große Volumen aufweisen um den standardisierten Messungen zu genügen. Beim reflexionsarmen Raum wird nach EN ISO 3745 [1] für die Genauigkeitsklasse 1 ein Volumen empfohlen, welches 200-mal größer ist als die zu überprüfende Schallquelle. Ein Hallraum sollte laut EN ISO 3741 [2] ein Volumen von mindestens 200m³ aufweisen. Anders als beim reflexionsarmen Raum wird hier die Größe der

Schallquelle mit maximal 2% des Raumvolumens limitiert. Die Größe des Hallraums legt aber auch seinen Nutzungsfrequenzbereich fest, da bei tiefen Frequenzen nicht genügend Diffusität im Schallfeld gegeben ist, um reproduzierbare Ergebnisse messen zu können. Je größer das Volumen des Messraumes ist, desto tiefer kann generell gemessen werden.

Die Messung der Schalleistung in diesen Umgebungen ist also in Normen vollständig standardisiert. Das vorhandene Raumvolumen und die Eigenschaften der Messumgebung bestimmt jedoch entscheidend, auf welchen Frequenzbereich die Messung beschränkt werden muss. Ein großes Volumen für den Messraum und die Einhaltung der benötigten Raumeigenschaften ist den Normen für Schalleistungsmessung nach also keine Option, sondern eine Anforderung! Möchte ein Hersteller seine Geräte akustisch vermessen und diese Messungen im eigenen Haus durchführen, gibt es keinen anderen Weg. Ein Messraum muss den jeweiligen Anforderungen gemäß gebaut werden.

1.2 Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit greift die Problematik der kostspieligen und groß dimensionierten Messumgebung für Schalleistungsmessungen in reflexionsarmen Räumen und Hallräumen auf und untersucht durch praktische Experimente die Durchführbarkeit von solchen Messungen in Messkammern mit sehr geringem Volumen. Angelehnt an die Messung der Schalleistung im reflexionsarmen Raum nach EN ISO 3744 [3], wie in Abbildung 1-1 dargestellt, wo die Mikrofone an Punkten auf einer gedachten Quaderhüllfläche um das Messobjekt sitzen, stellt sich die Frage, welche Auswirkungen eine tatsächlich vorhandene, solide Fläche um eine Maschine mit den Mikrofonen an den gleichen Punkten auf das Messergebnis hat.

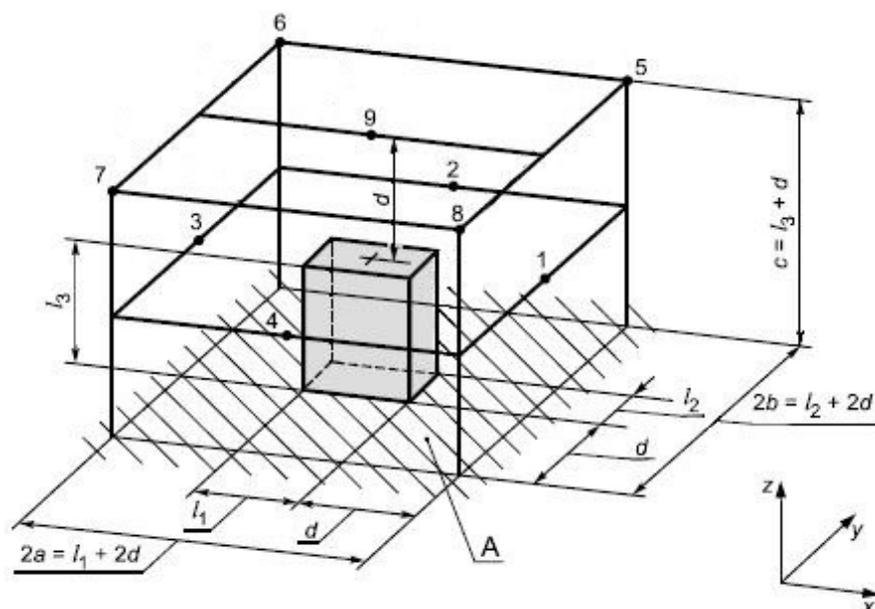


Abbildung 1-1: Messaufbau nach EN ISO 3744 mit Quadermessflächen

Das erste Ziel bestand also in der Planung und Konstruktion einer quaderförmigen Kammer mit dicken, schallharten Wänden und Öffnungen an den Flächenmittelpunkten um Mikrofone mit der Membran auf einer Ebene mit der Wandfläche zu positionieren. Abbildung 1-2 stellt den ersten Entwurf dieser Kammer dar. Für die Messungen der elektrischen Geräte in dieser Messkammer wurde im Prinzip eine Mixtur der oben erwähnten Verfahren angestrebt. Vom Aufbau her ähnelt die Messkammer einem Miniaturhallraum. Die Standorte der Messmikrofone sind hingegen dem Hüllflächenverfahren im Freifeld nachempfunden. Die zu untersuchende Maschine sollte analog dazu für die ersten Untersuchungen mittig im Innenraum stehen.

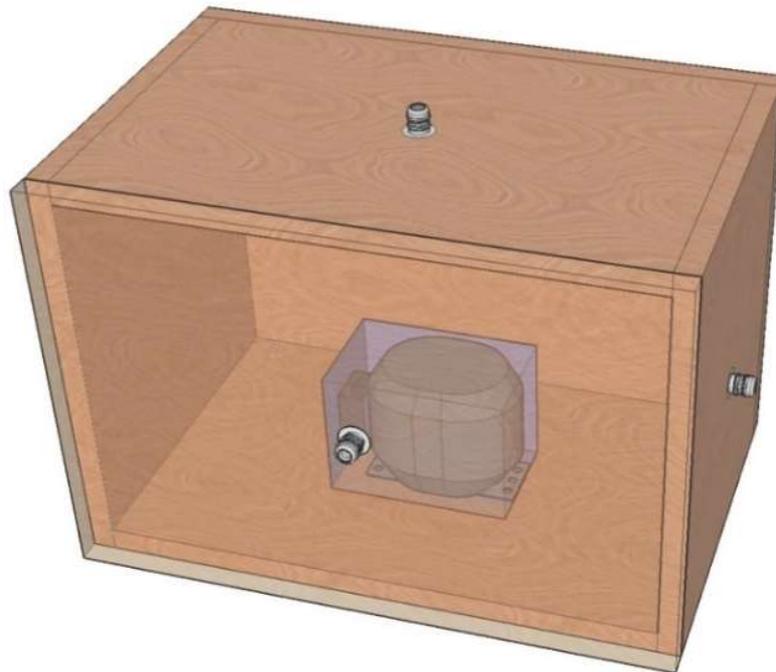


Abbildung 1-2: 3D-Illustration für den ersten Entwurf der Messkammer

Um die Ergebnisse der Messungen in der Kammer einer konventionellen Messmethode gegenüberzustellen, wurde für die ersten Versuche das ausgesuchte Messobjekt ebenso in einem wenig reflektierenden Aufnahmeraum des Tonstudios der TU-Graz in einer quasi-reflexionsarmen Situation gemäß Norm EN ISO 3744 [3] vermessen. Aufbauend auf den Unterschieden beider Messergebnisse wurde nun versucht eine, für möglichst viele Testobjekte anwendbare Messmethode zu entwickeln.

2 Planung und Konstruktion der Messkammer

Obgleich es sich bei der Messkammer schlussendlich lediglich um eine quaderförmige Kiste handelt, welche je eine Öffnung auf allen Wandflächen und der Deckenfläche für Mikrofone und einen Deckel mit Spannverschlüssen besitzt, sind dennoch einige Faktoren bei der Konstruktion einer solchen Kammer zu bedenken.

2.1 Grundsätzliche Überlegungen

Als Testobjekt für die durchgeführten Experimente mit der Messkammer diene ein Kompressor, welcher in Kapitel 3.2 näher beschrieben ist. Vorweg war bekannt, dass der Kompressor nach längerem Normalbetrieb Temperaturen von über 60 Grad Celsius an der Oberfläche aufweisen würde. Der Normalbetrieb erfordert jedoch eine komplexe Peripherie, die eingespart werden musste. Der Kompressor lief stattdessen stets im Leerlaufbetrieb ohne Peripherie. In diesem Zustand muss er zwar weit weniger Arbeit leisten, der Temperaturanstieg bleibt dadurch aber nicht gänzlich aus. Da es nun grundsätzlich von Interesse ist die Schallabstrahlung sowohl eines kalten, als auch eines eingelaufenen und warmen Geräts zu untersuchen, wurde beschlossen die Deckenfläche der Kammer als Deckel festzulegen. Damit kann das Gerät in der Kammer warmlaufen und dabei die erwärmte Luft durch Konvektion nach Außen gelangen.

Die Größe der Kammer ist in einem gewissen Bereich völlig frei wählbar. Trotzdem tauchten bei näherer Überlegung einige Einschränkungen auf. Zunächst wurden die Messhüllflächen bei den Referenzmessungen, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, in Messabständen von 15cm, 30cm und 60cm von der Bezugsquaderfläche des Messobjekts festgelegt. Natürlich wiesen dabei die Messungen mit der geringsten Entfernung den höchsten Signalrauschabstand auf, was bei den geringen Pegeln des Testkandidaten in manchen Frequenzbändern einen durchaus wichtigen Faktor darstellt. Zusätzlich sollte für einen ersten Prototyp der Messkammer diese kein allzu großes Volumen besitzen, um trotz allem transportabel und handlich zu sein. Die Abmessungen des Kompressors, bzw. sein daraus resultierender Bezugsquader, sowie die gewählten Messflächen sind in Tabelle 3-2 angeführt. Es wurde entschieden, sich an der kleinsten Messfläche zu orientieren.

Die gewählte Bezugsfläche des Kompressors ist im Prinzip ein Quader mit den Kantenlängen bestimmt durch die „Längen über alles“ des Kompressors, also bestimmt durch die rechtwinklig aufeinander gemessene maximale Länge, Breite und Höhe des Objekts. Dies entspricht 15cm Breite, 25cm Länge und 18cm Höhe. Damit ergibt sich beispielsweise in 15cm Entfernung eine Messhüllfläche mit den Kantenlängen 45cm, 55cm und 33cm. Dies entspricht, wie in Kapitel 3.2 einzusehen ist, einer der für die Referenzmessung gewählten Messflächen. Da diese Maße einen Kammerinnenraum ergeben würden, welcher als ausreichend für die gewählte Bandbreite an zukünftigen Testgeräten anzusehen ist, liegt nahe, sich daran zu orientieren. Aus der Raumakustik ist nun bekannt, dass die Verhältnisse der Kantenlängen entscheidende Auswirkungen auf das Schallfeld eines einfachen Quaderraumes haben. Dies hat vor allem

Bedeutung, wenn ein Raum ein akustisch ausgeglichenes Schallfeld aufweisen soll. Obwohl kein besonderes Interesse darin bestand, in der Messkammer das diffuse Schallfeld zu beeinflussen, wurde dennoch entschieden die Maße der Kammer nicht „blind“ festzulegen.

Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Raummoden zu erreichen, wird beim Bau von Hallräumen darauf geachtet, dass keine der Kantenlängen zueinander in einem Verhältnis kleiner ganzer Zahlen steht [2]. Im Falle der genannten Kantenlängen trifft dies streng genommen auf jedes Paar zu, vor allem jedoch beim Verhältnis von Länge zu Höhe, wie in Tabelle 2-1 dargestellt:

| Kante zu Kante | Verhältnis |
|----------------|------------|
| 45cm : 55cm | 9:11 |
| 33cm : 45cm | 11:15 |
| 33cm : 55cm | 3:5 |

Tabelle 2-1: Kantenverhältnisse der Messhüllfläche in 15cm Abstand zum Kompressor

Zur Sicherheit wurden die Kantenlängen daher leicht angehoben. Die Wahl fiel dabei auf eine Breite von 47cm, eine Länge von 56cm und eine Höhe von 34cm. Tabelle 2-2 zeigt die daraus entstehenden Verhältnisse:

| Kante zu Kante | Verhältnis |
|----------------|-------------|
| 47cm : 56cm | 0,8392857:1 |
| 34cm : 47cm | 0,7234042:1 |
| 34cm : 56cm | 0,6071428:1 |

Tabelle 2-2: Gewählte alternative Kantenverhältnisse für die Messkammer

Damit war die Vorauswahl des Kammerinnenvolumens und der generellen Konstruktion getroffen und es konnte mit der Planung fortgeschritten werden.

2.2 Baustoffauswahl

Vom Grundprinzip gestaltet sich der Bau der geplanten Messkammer, wie in Kapitel 1.2 erwähnt, ähnlich dem Bau eines Modells eines Hallraums. Bei der Konstruktion eines Hallraums sollte darauf geachtet werden, dass die begrenzenden Wände einen möglichst hohen Grad an akustischer Isolierung nach außen bieten, indem sie selbst keine oder nur sehr wenig Schallenergie absorbieren und eine hohe Durchgangsdämmung aufweisen. Im Falle der Messkammer gilt ähnliches, denn schließlich sollte erreicht werden, dass sämtliche, von den Messobjekten abgegebene Energie in der Kammer behalten und dabei so wenig wie möglich von ihrer Innenoberfläche absorbiert wird.

Diese Einschränkungen geben eine klare Weisung welche Materialien zum Bau der Kammer in Frage kommen. Die Wände sollten eine hohe innere Dämpfung (Körperschall) und eine hohe Dichte aufweisen. Die Innenoberfläche muss zudem so schallhart wie möglich sein, oder beschichtet werden um diese Eigenschaft zu erreichen.

Aus einem vergangenen Projekt des Autors war die Konstruktion einer akustischen Messkammer aus Acrylglas bekannt. Diese Option ist sehr ansprechend, da Acrylglas die Vorgaben für Dichte und innere Dämpfung (Körperschall) weitgehend erfüllt und zudem natürlich den Vorteil der Transparenz und damit Einsicht in die Messkammer bietet. Für die Herstellung Acrylglas zu verwenden hat jedoch auch den Nachteil erhöhte Kosten aufzuwerfen. Außerdem kam noch der Erfahrungswert aus dem vergangenen Projekt hinzu, dass die Acrylglaswände selbst bei einer Dicke von 8mm noch eine deutliche Nachgiebigkeit aufwiesen. Dies führte zu einem dazu, dass der Deckel durch den Anpressdruck der Spannverschlüsse deformiert und an weiter von den Verschlüssen entfernten Stellen weniger fest auf den Kistenrand gepresst wurde als direkt daneben und zum anderen deformierten sich die Wände unter ihrem eigenen Gewicht.

Um möglichst rasch eine fertige Kammer zur Verfügung zu haben, wurde daher stattdessen auf eine gewöhnliche Konstruktion aus Holz zurückgegriffen. Möglichst starre Wände lassen sich aus sogenannten Holzwerkstoffen zügig anfertigen. Holzwerkstoffe sind zum Beispiel Holzspanplatten, Sperrholz oder Faserplatten. Dabei haben Spanplatten den Nachteil handwerklich sehr schlecht verarbeitbar zu sein. Ecken können leicht splintern und eine schöne, glatte Oberfläche lässt sich ohne maschinelle Beschichtung nur sehr aufwendig bewerkstelligen. Sperrholz wird bei vielen Lautsprecherboxen der gehobeneren Preisklasse verwendet, da sehr harte Varianten hergestellt werden, wie zum Beispiel Birken-sperrholz. Preiswerter und in den passenden Stärken leichter erhältlich waren jedoch Faserplatten.

Diese werden in drei Hauptkategorien angeboten: leichte, mitteldichte und hochdichte Faserplatten. Mitteldichte Faserplatten, oder kurz MDF, weisen eine durchschnittliche Dichte von $600-700\text{kg/m}^3$ auf und werden in Dicken von 3mm bis 40mm hergestellt. Die Materialstruktur ist wesentlich feiner als bei Spanplatten, weshalb eine gewöhnliche Lackierung mit Anschliff

der Oberfläche leichter fällt. Eine Lackierung ist jedoch zwingend notwendig, da MDF oberflächlich, wenn überhaupt, nur spartanisch beschichtet wird. Die Oberfläche wirkt daher akustisch vor allem für höhere Frequenzen absorbierend, da die bewegten Luftmoleküle durch die offenporige Oberfläche zu einem Teil in das Holz gelangen können. Die Lackierung von MDF kann durch eine Vielzahl an Lackfarben erfolgen. Gewählt wurde Neu-Email-Lack, da sich damit schönere Probestücke anfertigen ließen als mit einem Acrylhochglanzlack. Für eine akzeptable Oberfläche sind mindestens drei Anstriche notwendig. Nach dem ersten Anstrich ist die Oberfläche rauer als zuvor, da einige der Fasern sich durch den Lack aufrichten. Wird diese raue Schicht sauber mit einem Vibrationsschleifer geglättet und weiter lackiert, entsteht spätestens nach dem dritten Anstrich eine feste und glatte Oberfläche.

2.3 Konstruktion

Die Verbindung von MDF-Platten kann mit gewöhnlichem Holzleim durchgeführt werden und solange spezielle Spanplattenschrauben verwendet werden, entsteht beim Anschrauben von Beschlägen auch genügend Festigkeit.

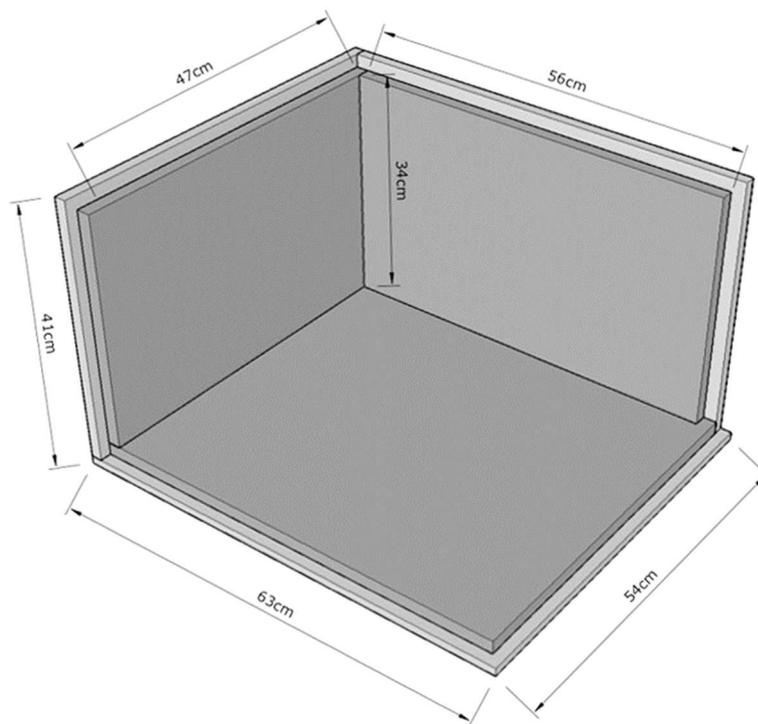


Abbildung 2-1: Konstruktionsskizze der Messkammer

Abbildung 2-1 zeigt die drei verschiedenen Wandflächen der Kammer im entworfenen 3D-Modell. Wie dabei zu sehen ist, besteht jede Wandfläche aus zwei Platten unterschiedlicher Größe. Diese Konstruktionsentscheidung fiel aus zwei Gründen: zum einen konnten so schnell und einfach je eine 19mm (Innenwand) und eine 16mm (Außenwand) starke Platte zu einer 35mm dicken Wand verleimt werden, zum anderen fiel die Verleimung der fertigen Plattenteile auf diese Weise wesentlich leichter, da so eine Wand nach der anderen auf der Bodenplatte

befestigt werden konnte, während eine andere Platte sich als Stütze und als Lot verwenden ließ, um keine der Wände, vor allem aber nicht die erste, schiefwinklig zu verkleben.

| Innenkante, Länge | Innenkante, Breite | Innenkante, Höhe | Innenvolumen | Innenoberfläche |
|-------------------|--------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| 56cm | 47cm | 34cm | 0,0895m ³ | 1,2268m ² |
| Außenkante, Länge | Außenkante, Breite | Außenkante, Höhe | Wanddicke | Gewicht |
| 63cm | 54cm | 41cm | 3,5cm | ~40kg |

Tabelle 2-3: Daten der Messkammer

In Tabelle 2-3 sind die Daten, die sich aus dieser Konstruktion ergeben, aufgelistet. Jede der Platten, außer der Bodenplatte, wurde vor der Verleimung schon für die Mikrofondurchführung vorbereitet. Diese Mikrofondurchführungen sind in Abbildung 2-2 als 3D-Planungsskizze dargestellt. Die Werkstücke bestehen aus gedrehtem Aluminium und besitzen eine Innenöffnung von 7mm um ein ¼-Zoll-Mikrofon durchzuführen. Der Durchmesser des Durchführungszyllinders beträgt 22mm, die größere Befestigungsscheibe auf der Außenseite misst 50mm.

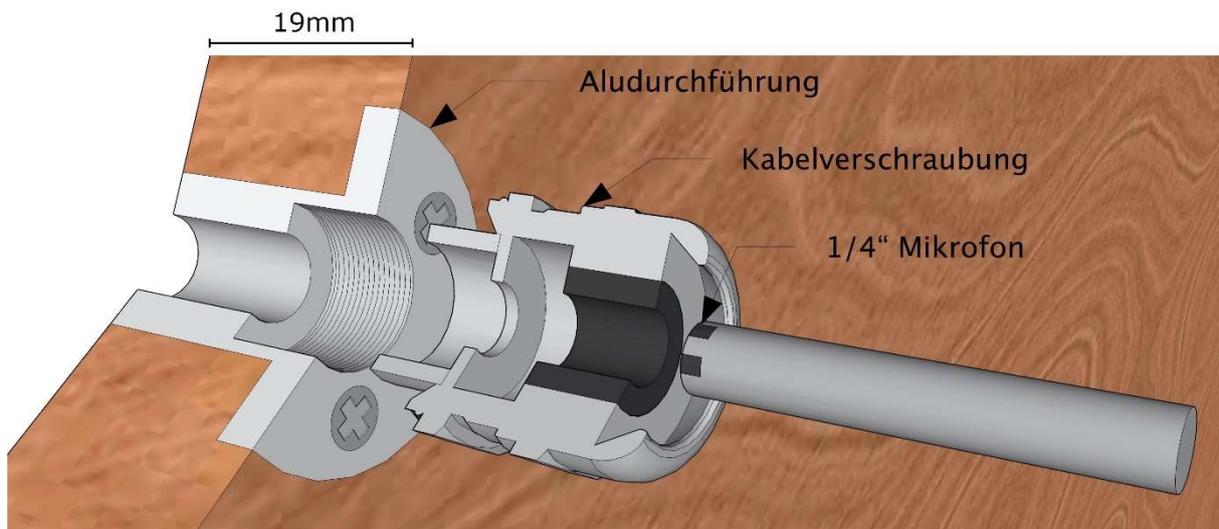


Abbildung 2-2: Planung der Mikrofondurchführung

Dabei wurden mit Absicht Durchführungsdurchmesser gewählt, welche größer als nötig waren, um, im Falle, dass ¼-Zoll-Mikrofone messtechnisch nicht ausreichend sein sollten, auch noch Spielraum für ½-Zoll-Mikrofone zu haben.

Für eine möglichst schalldichte Befestigung der Mikrofone ist in jede der Aluminium-Durchführungen für die ¼-Zoll-Mikrofone ein M12-Gewinde eingelassen, in welchem eine sogenannte Kabelverschraubung angebracht werden kann. Diese Verschraubungen besitzen für die gewählte Größe eine Schlussweite von etwa 3mm bis 7mm. Die ¼-Zoll-Mikrofone können

durch sie durchgesteckt werden und ragen damit exakt bis an die vordere Öffnung der Durchführung heraus. In Abbildung 2-3 ist eine der Kabelverschraubungen und das fertige Werkstück dargestellt.



Abbildung 2-3: Kabelverschraubung und erstes Werkstück der Durchführung

Abbildung 2-4 zeigt die montierte Durchführung von außen und innen gesehen. Durch Festziehen der Kabelverschraubung (Kunststoffteil) presst dessen Gummi auf das Mikrofon, was die Öffnung der Kammer zum einen abdichtet, zum anderen das Mikro ebenso fest positioniert. Die Aluminium-Durchführung selbst wird durch 4 Holzschrauben von außen an der Wand befestigt. Die Löcher in den Innenwandplatten der Kammer weisen den Durchführungen entsprechend Durchmesser von 22mm innen und 55mm außen auf.



Abbildung 2-4: Fertige Mikrofon-Durchführung an der Kammer

Weiters wurde eine ähnliche Methode angewandt, um den Kompressor und zukünftige andere Messobjekte mit Netzstrom zu versorgen und auch andere Kabel abgedichtet ins Innere zu leiten (Abbildung 2-5). Je eine Scheibe aus weißem PVC beherbergt eine Kabeldurchführung für das Netzkabel und optionale Leitungen. Zwischen der PVC-Scheibe und dem lackierten

Wandstück befindet sich ein je 1mm dicker Dichtungsgummi. Durch die Befestigungsschrauben werden die Scheiben auf den jeweiligen Gummi gepresst.

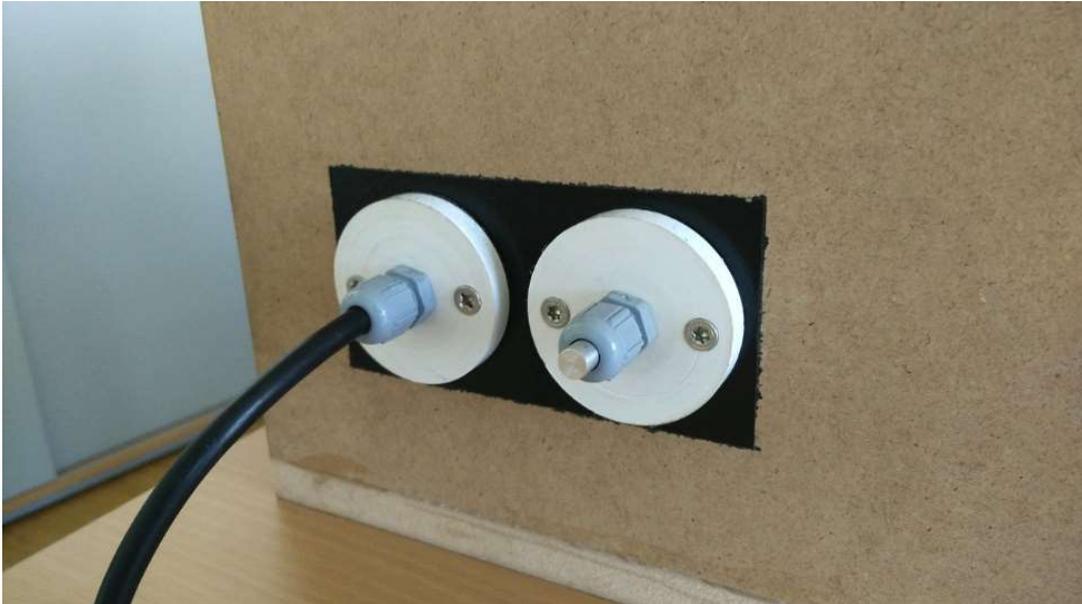


Abbildung 2-5: Durchführung für den Netzstrom und weitere Sensorkabel

Für die Dichtung des Deckels der Kammer umläuft ein Dichtungsstreifen für Fenster und Türen den inneren Kistenrand, wie in Abbildung 2-6 zu sehen ist. Wird der Deckel durch die Spannschlösser auf den Rand gepresst, lässt sich der Gummi von etwa 4mm Stärke auf bis zu 1mm zusammendrücken.



Abbildung 2-6: Abdichtung des Deckels

Für alle Messungen mit der Messkammer galt folgende Nomenklatur der Mikrofone, wie sie in Abbildung 2-7 gezeigt wird. Wie oben beschrieben, besitzt die Kammer eine Durchführung für den Netzstrom, der zum Betrieb des Kompressors benötigt wird. Diese befindet sich auf einer der kürzeren Seitenwände. Das Mikrofon in der, dieser Durchführung am nächsten liegenden, längeren Seitenwand wurde als „Mikrofon 1“ betitelt. In Abbildung 2-7 im Uhrzeigersinn laufend ist das Mikrofon links von „Mikrofon 1“ demnach „Mikrofon 2“ und so weiter. Der Umlauf endet bei der Position im Kammerdeckel mit „Mikrofon 5“.

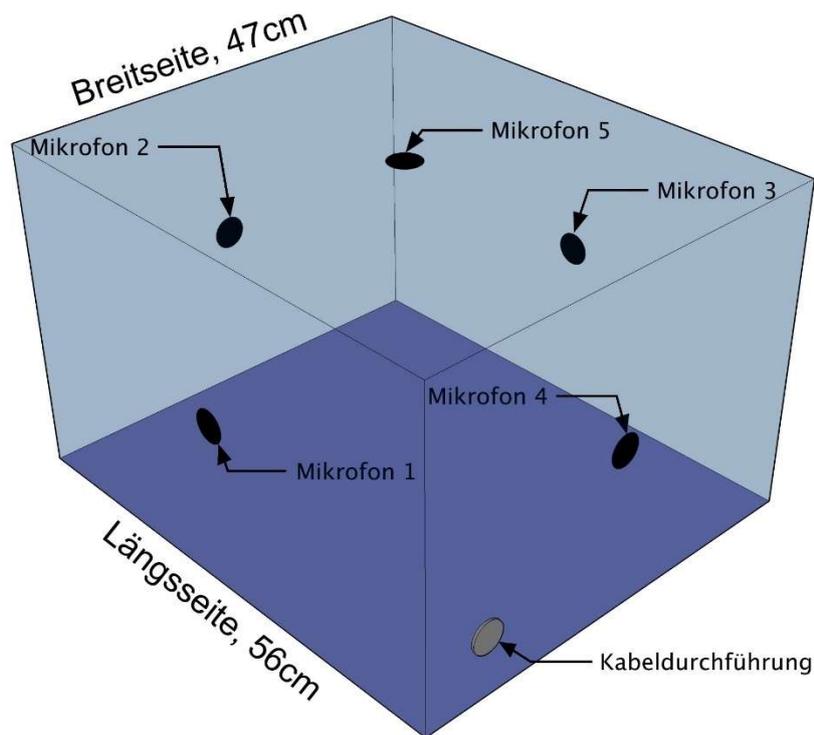


Abbildung 2-7: Schematische Übersicht der Mikrofonpositionen

3 DUT-Freifeldmessungen

Als Referenz- bzw. Vergleichsmessung für das eigentliche Vorhaben, Messungen in einer kleinen Messkammer durchzuführen, wurde das ausgesuchte Testobjekt zuerst nach dem Hüllflächenverfahren vermessen.

3.1 Messumgebung

Da der TU-Graz leider kein reflexionsarmer Messraum zur Verfügung steht, welcher die Anforderungen der Norm EN ISO 3744 einhalten kann, erfolgten die Messungen stattdessen im Aufnahmestudio des Instituts für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation. Dessen Aufnahmeraum besitzt ein Volumen von etwa 118m³ und ist akustisch für sehr trockene Tonaufnahmen ausgelegt. In Tabelle 3-1 sind Nachhallzeiten des Raumes dargestellt. Die Zugänge des Aufnahmeraumes sind durch zwei 30cm dicke Türen mit einem abgedichteten Türrahmen gegeben. Für mittlere und hohe Frequenzen von Luftschall ist damit eine sehr hohe Durchtrittsämpfung bewerkstelligt. Lediglich sehr tiefe Frequenzen unter 100 Hz werden durch die Wände und die Lüftungsschächte der Klimaanlage in den Raum geleitet.

| Frequenz in Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nachhallzeit in s | 0,33 | 0,60 | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,14 |

Tabelle 3-1: Nachhallzeiten des Aufnahmeraumes der TU-Graz

Der Fußboden ist mit einem Teppichboden ausgelegt. Die Wände besitzen Holzpaneele zur akustischen Optimierung. Etwa 30cm vor der eigentlichen Wand ist ein Molton-Vorhang angebracht.



Abbildung 3-1: Raumsituation für die Messung im TU-Studio

Für die Messung stand eine 5m x 5m große, freie Messfläche zur Verfügung. Die Raumsituation ist in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 dargestellt. Mittig auf dieser Messfläche wurden zwei 150cm x 75cm große und 25mm dicke Sperrholzplatten positioniert, um insgesamt eine 1,5m x 1,5m große Reflexionsfläche zu bilden.

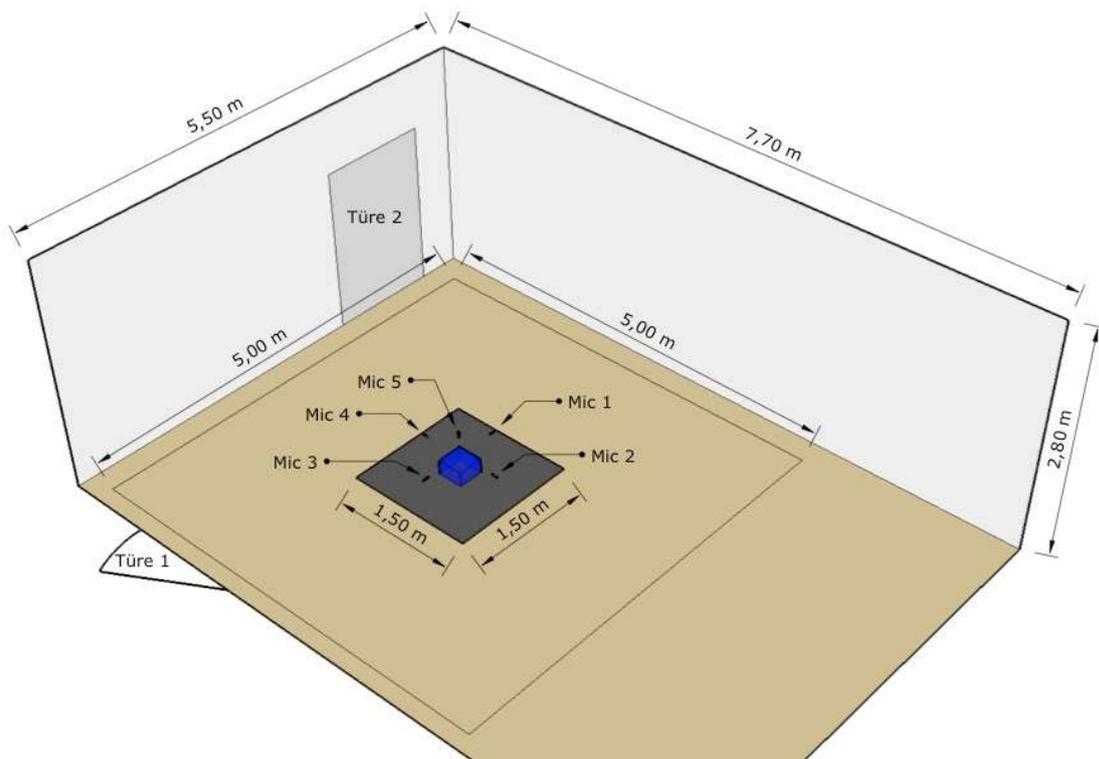


Abbildung 3-2: Skizze des Messaufbaus im Aufnahmezimmer

Das gewählte Sperrholz ist gewöhnliches Buchensperrholz, es wurde jedoch bei der Produktion mit einem Siebdruck auf einer Seite mit einer sehr glatten, auf der anderen Seite mit einer rauen Oberfläche aus Phenolharz beschichtet. Die glatte Seite stellt zusammen mit den Eigenschaften des Holzwerkstoffs Sperrholz eine akustisch stark reflektierende Wand dar. Laut Fasold [4] besitzt Sperrholz eine Dichte von etwa 700kg/m^3 . Bei einem Volumen von $0,05625\text{m}^3$ kann also schätzungsweise mit einem Gewicht von fast 20kg für eine Plattenhälfte gerechnet werden. Ebenso ist im Sachbuch von Fasold [4] nachzulesen, dass glattes Sperrholz einen Absorptionsgrad von unter 0,06 besitzt.

Eine 25mm dicke, beschichtete und etwa 40kg schwere Sperrholzfläche darf also als stark reflektierende Oberfläche angenommen werden. Der Kompressor wurde nun zentriert auf der Bodenplatte positioniert, in drei Abständen von 15cm, 30cm und 60cm, bezogen auf seine Bezugsquaderfläche, eine Messfläche aufgespannt und anschließend seine akustische Emission mit dem Hüllflächenverfahren vermessen. Von Interesse war dabei nur die Messung an den 5 Messflächenmittelpunkten der Quadermessfläche.

3.2 Testobjekt

Beim gewählten Testobjekt handelt es sich um einen Kompressor. Das Gerät saugt im Normalbetrieb ein spezielles Kühlgas an, welches sich in einem Kühlkreislauf befindet und stößt selbiges aus einer zweiten Öffnung komprimiert wieder aus. Da der Normalbetrieb sowohl das Kühlgas, als auch weitere Teile des Kühlsystems benötigt, wurde bei allen Messungen darauf verzichtet diesen Betriebszustand zu simulieren. Stattdessen lief der Kompressor stets im Leerlauf mit Luft. Bei allen Ergebnissen ist also zu berücksichtigen, dass sowohl Ansaug- als auch Ausstoßgeräusche hinzukamen, die normalerweise nicht auftreten würden. Abbildung 3-3 zeigt ein Foto des verwendeten Testobjekts, Tabelle 3-2 einige Geometriedaten zur Messung.



Abbildung 3-3: Als Schallquelle verwendetes Testobjekt

| Gerät | Bezugsquadermaße | | | Messfläche ohne Boden im Abstand von | | |
|-------------------|------------------|--------|------|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Länge | Breite | Höhe | 15 cm | 30 cm | 60 cm |
| Kompressor | 25cm | 15cm | 18cm | 0,9075m ² | 2,1735m ² | 6,3255m ² |

Tabelle 3-2: Verwendetes Testobjekt, seine Abmessungen und die gewählten Messhüllflächen

Folgende Tabelle 3-3 zeigt weiters das sich aus diesen Maßen ergebende Volumen des Bezugsquaders, dessen Prozentsatz in Relation zur geplanten Messkammer mit 0,0895m³ Innenraumvolumen und die Volumina der Messquader im Freifeld in den festgelegten Abständen zum Bezugsquader.

| Gerät | Bezugsquader | | Messquadervolumen im Abstand von | | |
|-------------------|----------------------|----------|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Volumen | Kammer % | 15 cm | 30 cm | 60 cm |
| Kompressor | 0,0067m ³ | 7,48% | 0,0817m ³ | 0,3060m ³ | 1,5268m ³ |

Tabelle 3-3: Volumen der festgelegten Mess- und Bezugsquader

Da das Gerät Vibrationen am gesamten Gehäuse aufwies, hätte eine Platzierung des Gehäuses direkt auf die schallharte Messoberfläche zur akustischen Kopplung mit derselben und möglicherweise auch zur Bewegung des Objekts auf der Platte geführt. Der Kompressor war deshalb mit speziellen Gummidämpfern ausgerüstet, die passgenau auf seinem Montagerahmen angebracht werden konnten. Diese Dämpfer ermöglichen einerseits eine einfache, horizontale Aufstellung der Maschine am Boden und andererseits eine gute Isolierung der Vibrationen.

3.3 Durchführung der Messungen

Nach dem Aufbau der Testumgebung wurde der Kompressor in der Mitte der schallharten Platte platziert und seiner gewählten Hüllfläche entsprechend je eine Messfläche in 15cm, 30cm und 60cm angenommen und für jede Messung die Mikrofone auf diesen Flächen positioniert. Die Maße dieser Messflächen sind in Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3 zu finden. Zu diesem Aufbau sind noch zwei Dinge anzumerken: erstens wiesen die Abmessungen des Testobjekts in keinem Fall vom Zentrum der Plattenfläche aus gesehen eine größere Ausdehnung als 15cm in alle Richtungen. Damit war ausgeschlossen, dass die Mikrofone im Falle der 60cm Hüllfläche außerhalb der schallharten Unterlegplatte geraten würden. Zweitens empfiehlt EN ISO 3744 einen Messabstand von etwa 1m von der Oberfläche der Schallquelle aus zu wählen, schreibt jedoch vor, ihn auf jeden Fall nicht kleiner als 25cm zu wählen. Die gewählten 15cm stellen ein erstes Herantasten an die Gegebenheiten der geplanten Messkammer dar und sind daher nicht irrtümlich oder fehlerhaft zustande gekommen.

Als Messmikrofon wurden 5 Exemplare des G.R.A.S. 46AE verwendet, einer Type, die speziell für Freifeldmessungen ausgelegt ist. Ein Müller BBM PAK Mobile MKII und die zugehörige Software auf einem Laptop diente zur Aufzeichnung der Daten. Die Mikrofone wurden am Beginn jeder Messsession mit Hilfe eines Kalibrators Type 4231 von Brüel & Kjær kalibriert. In Abbildung 3-4 ist der Messaufbau schematisch in einem Diagramm festgehalten.



Abbildung 3-4: Schematischer Messaufbau für die Messungen mit dem PAK Mobile MKII und den G.R.A.S. 46AE Mikrofonen

Die Einmessung der Mikrofonpositionen erfolgt mit Hilfe eines Maßbandes. Nach dem Aufbau jeder Messung wurde mit einem kleinen Handsensor die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit aufgenommen und notiert, deren Werte in Tabelle 3-4 zu finden sind. Beide Werte werden von der Klimaanlage des Studios gemessen und kontrolliert. Dadurch war jedoch eine hörbare, störende Fremdgeräuschquelle im Raum gegeben. Die Anlage musste durch die Anwesenheit des Experimentators im Aufnahmezimmer während des Aufbaus natürlich auch eine erhöhte Kühl- und Entfeuchtungsarbeit leisten. Um zu ungestörten Messergebnissen zu kommen, wurde für alle jeweiligen Messflächen je eine Messung mit normalem Betrieb der Klimaanlage, einem „Silence“-Ruhebetriebsmodus und mit abgeschalteter Anlage hintereinander durchgeführt. Außerdem wurde für jede Messung der Fremdgeräuschpegel bei abgeschalteter Schallquelle für alle drei Zustände der Klimaanlage erfasst.

Gemessen wurde stets mit einer Dauer von 60 Sekunden nach 1-minütiger Einlaufphase. Für Messungen bei unterschiedlichen Modi der Klimaanlage wurde das Gerät durchgehend laufen gelassen und der Messraum nicht betreten.

3.4 Ergebnisse

Zunächst war der Störabstand der Messung von Interesse. In Abbildung 3-5 ist der Einfluss der Klimaanlage deutlich zu erkennen. Während die Störgeräusche im Aufnahmezimmer des Tonstudios ab etwa 800Hz im Eigenrauschen des Messequipments untergehen, liegt das Brummen der normal laufenden Klimaanlage deutlich über dem Ruhepegel. Bei tieferen Frequenzen als 100Hz lag der Störschallpegel noch wesentlich höher, was aber auf Grund des gewählten Messspektrums von 100Hz bis 10kHz ignoriert wurde.

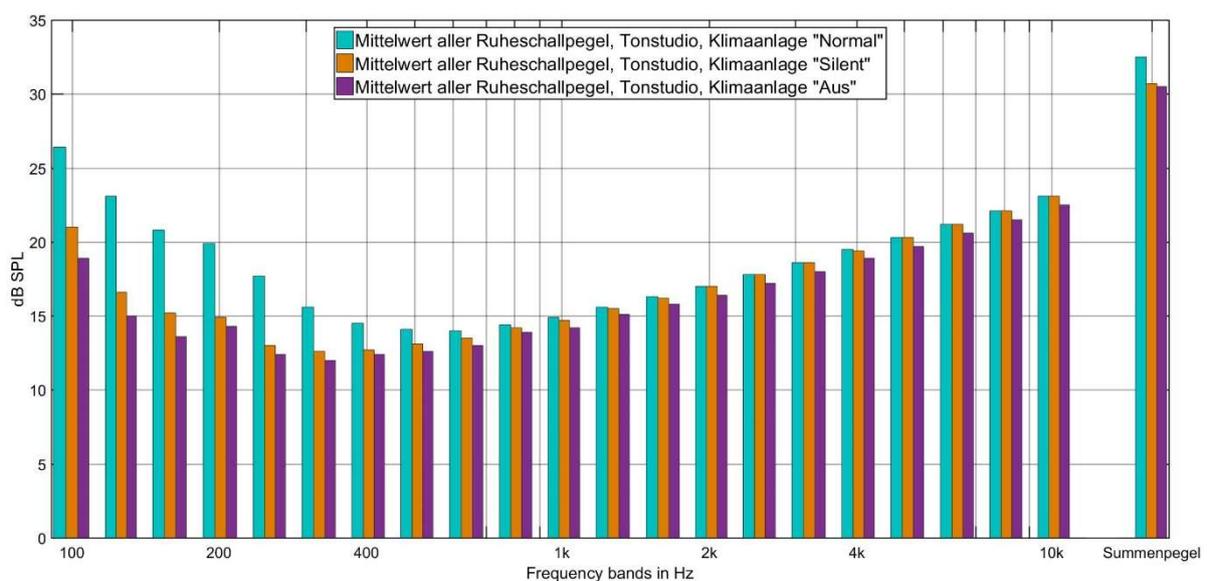


Abbildung 3-5: Ruheschalldruckpegel im TU-Tonstudio

Da die Klimaanlage bei Betrachtung der Ergebnisse nachweislich einen erheblichen Störschall im tieffrequenten Bereich produzierte, wurde sie für die weiteren Messdurchgänge vor jeder Messung standardmäßig abgeschaltet.

An diesem Punkt sei noch einmal kurz darauf hingewiesen, dass der Kompressor im Leerlauf mit Luft betrieben wurde. Dies bedingte natürlich auch die Öffnung der Zugangs- und Abflussrohre. Dabei mussten zwei Kompromisse eingegangen werden, die für die Messergebnisse entscheidend waren. Erstens entwickelt der Kompressor, wie schon in Kapitel 3.2 erwähnt, ohne die vorgesehene Kühlleitung ein anderes Klangbild, da mit dem Ausstoßrohr eine Art Mündungsgeräusch, ähnlich einem Automobilauspuff gegeben war.

Zweitens sorgt der Leerlaufbetrieb bei geöffneten Rohren dafür, dass die innere Mechanik gelegentlich ein paar Tröpfchen ihres Schmieröls zusammen mit der Luft ausstößt. Um sowohl das Tonstudio als auch später die Messkammer vor Ölflecken zu schützen, wurde daher ein luftdurchlässiger Schaumstoffabschluss auf das Ausstoßrohr des Kompressors gesteckt. Damit ist das Mündungsgeräusch aber wieder ein anderes als das eines Rohres ohne Ölfilter-schaumstoff. Zudem genügte es nicht die Messumgebung mit dem Schaumstoff vor Flecken zu schützen, da er sich nach längeren Laufzeiten mit Öl gesättigt hatte und hernach zu tropfen begann. Es musste also ein kleiner Papierbecher untergestellt werden, welcher genaugenommen, wenn auch nur geringfügig, das Schallfeld im Vergleich zu einer realen Einsatzsituation ebenso stört.

Diese Fakten waren jedoch von Beginn an bekannt und wurden in Kauf genommen, da es bei der vorliegenden Arbeit primär um die Möglichkeit der Messung in der Messkammer geht und nicht um eine vollwertige Messung eines bestimmten Testobjekts.

Abbildung 3-6 zeigt nun die aufgenommenen Schalldruckpegel des Kompressors. Die Messungen sind hier einem Durchschnitt aller Ruhepegel, wie er für Abbildung 3-5 bestimmt wurde, gegenübergestellt. Wie zu sehen ist, liegt der Schalldruckpegel für alle Messungen zumindest oberhalb des Grundrauschens, für die Messabstände von 15cm und 30cm auch in jedem Frequenzband die von Normen empfohlenen 10dB darüber.

Folgende Tabelle 3-4 listet die aufgenommenen Werte für Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit während der Messung im Tonstudio der TU-Graz auf.

| Messobjekt | Messabst. | Datum | Uhrzeit | Temp. ϑ_{Luft} | Rel. Luftfeuchtigkeit |
|------------|-----------|----------|---------|--------------------------|-----------------------|
| Kompressor | 60cm | 7.4.2017 | 17:55 | 22,2°C | 55,2% |
| Kompressor | 30cm | 7.4.2017 | 18:25 | 22,0°C | 55,2% |
| Kompressor | 15cm | 7.4.2017 | 18:50 | 22,1°C | 55,2% |

Tabelle 3-4: Aufgenommene Werte für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Tonstudio

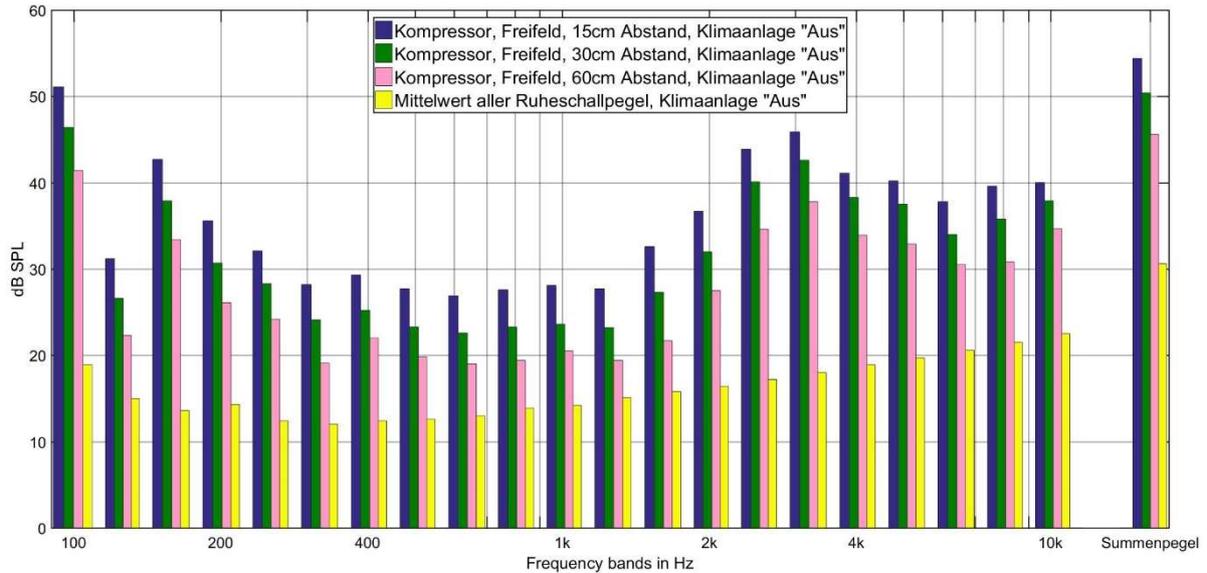


Abbildung 3-6: Schalldruckpegel des Kompressors im Freifeld

Interessanter für das weitere Vorhaben waren natürlich die Schalleistungspegel und die Vergleichbarkeit der Kurven verschiedener Messhüllflächen zueinander. Die Berechnung der Schalleistungspegel wurde entsprechend der Schalleistungsberechnungsformel aus Norm EN ISO 3744 in der Arithmetik der PAK-Software implementiert und die in Tabelle 3-2 angegebenen Hüllflächen für die entsprechenden Entfernungen eingesetzt. Jede der Kurven berechnet sich aus den arithmetischen Mittelwerten von drei Schalldruckmessungen pro Hüllfläche. Abbildung 3-7 zeigt eine Gegenüberstellung der, aus Messungen in den drei Entfernungen von 15cm bis 60cm berechneten Schalleistungspegel des Kompressors. Wie darin zu sehen ist, liegen die berechneten Leistungspegel eng beieinander.

In beiden Abbildungen lassen sich gut der erste und zweite Oberton des Kompressorantriebs in den 100Hz- und 160Hz-Terzbändern erkennen. Die Grundfrequenz der Maschine liegt mit 50Hz außerhalb unseres Beobachtungsspektrums. Die höhere Leistungspegeldichte des Kompressors ab etwa 2kHz erklärt sich durch das Mündungsgeräusch des Ausstoßrohrs und dem Ventilationsgeräusch des Luft-Öl-Gemisches im Filterschaumstoff.

Bei genauer Betrachtung zeigen die Resultate jedoch auch die Beschränkungen der Messumgebung auf. So müsste in Abbildung 3-6 entsprechend der Norm pro Entfernungsverdopplung eigentlich ein Unterschied von 6dB SPL von Kurve zu Kurve feststellbar sein. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass die Schalleistungsmessung im Freifeld eigentlich einen Mindestabstand von 0,25m veranschlagt, um nicht im Nahfeld der Quelle zu messen. Dieser Mindestabstand wurde mit 15cm Abstand deutlich unterschritten. Und auch die Messungen in 30cm und 60cm Entfernung fallen unter den empfohlenen Abstand von 1m.

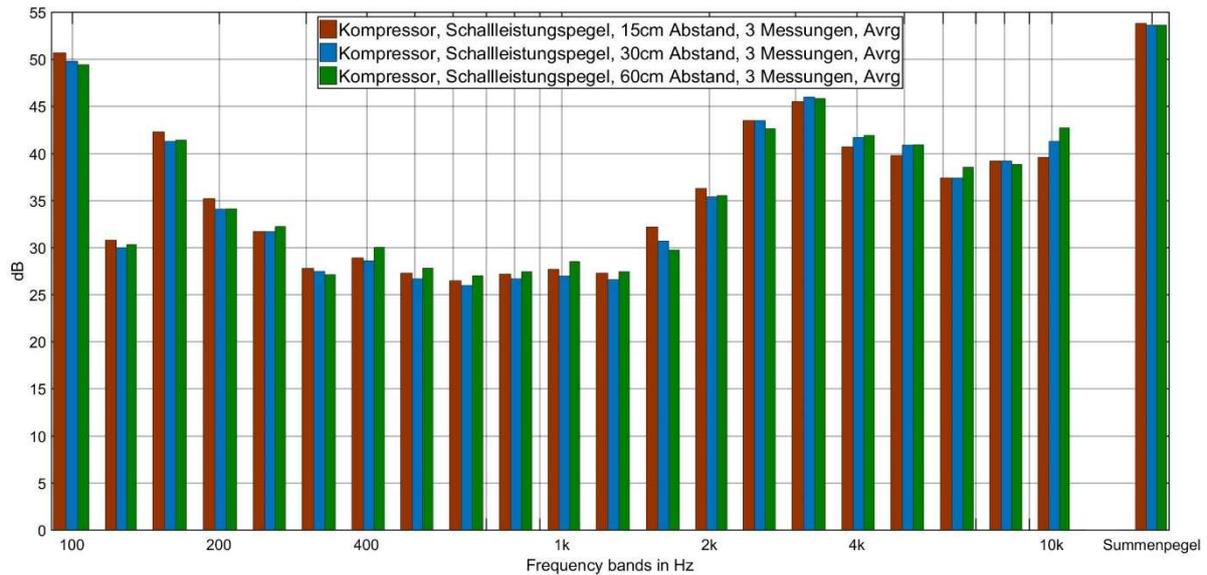


Abbildung 3-7: Vergleich der berechneten Schalleistungspegel des Kompressors

Diese Wahl der Messabstände war jedoch notwendig, da der Kompressor, relativ gesehen zu den Ruheschallpegeln der Messumgebung, einen eher niedrigen Pegel produziert, dessen Messung in 1m Entfernung größtenteils im Fremdgeräusch untergehen würde. Hinzu kommt noch die zwar ruhige und reflexionsarme aber nicht normgerechte Freifeldsituation des Tonstudios.

Trotzdem hält sich die Messflächen-Streuung der berechneten Schalleistungspegel in Grenzen. Im Hinblick auf die Eigenschaften der provisorischen Messumgebung können die ermittelten Ergebnisse des Kompressors als gute Basis für die Vergleiche mit der Messkammer gesehen werden.

4 DUT-Messungen in der Messkammer

4.1 Eigenschaften der Messumgebung

Für die Messungen in der Messkammer sollten vorweg einmal die zu erwartenden Effekte besprochen werden, die diese besondere akustische Umgebung aufweist. Zunächst lässt sich über das Wissen über grundlegende Raumakustik im Allgemeinen und Hallräume im Speziellen mit Sicherheit sagen, dass die Kammer durch ihre glatten, harten Wände auf jeden Fall für einen Bereich des akustischen Frequenzspektrums ein näherungsweise diffuses Schallfeld erzeugen wird.

Wie aus der theoretischen Raumakustik bekannt, besitzt sogar ein ideal reflektierender Hallraum zu tiefen Frequenzen hin eine sinkende Modendichte. Die Akustik des Hallraums besitzt bei tiefer werdenden Frequenzen also deutlich hervorgehobene Eigenfrequenzen, auf Grund deren Einwirkung die Voraussetzungen des diffusen Schallfeldes nicht mehr erfüllt werden kann. Die Klassifizierung eines Quader-raums, ab welcher Frequenz ein ausreichendes Maß an Diffusität gegeben ist, ist jedoch nicht eindeutig. Aus den Überlegungen zu einem Quader-raum mit reflektierenden Wänden kann jedoch folgende Diffusitätsgrenzfrequenz ausgedrückt werden. Für eine Modendichte von 20 schrägen Moden je Halbtonintervall, sprich $\Delta N_V = 20$ und $\Delta f/f \approx 0,06$ erhält man die Grenzfrequenz f_g [5].

$$f_g = \sqrt[3]{\frac{c^3}{4 \cdot \pi}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta N_V}{\Delta f/f}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{V}} \approx \frac{1000}{\sqrt[3]{V}} \approx 2200 \text{ Hz} \quad 4-1$$

Gleichung 4-1 gibt für das gewählte Kammervolumen von $0,0895 \text{ m}^3$ aus Tabelle 2-3 eine Frequenz von 2,2kHz an. In diesem Fall liegt also eine Auswertung ab dem 2,5kHz-Terzband garantiert im Diffusschallbereich.

Unterhalb des Diffusschallbereichs liegt der Modalbereich. Hierbei handelt es sich um die ersten Eigenfrequenzen des Kammervolumens, die per Definition der Grenzfrequenz f_g jedoch noch frequenzhalber so weit voneinander getrennt sind, dass eben kein diffuses Schallfeld zu erwarten ist. Die Erfassung des Schallfeldes ist sehr ortsabhängig und komplex. Wir definieren den Modalbereich als Frequenzspanne, welche bei der ersten Resonanzfrequenz des Raumes beginnt und bei der Diffusitätsgrenzfrequenz f_g endet.

Da es sich bei der Messkammer um einen einfachen Quader-raum handelt, lässt sich die theoretische Raumakustik hier gut anwenden. Diese besagt, dass die Wellengleichung des Schalldrucks für ein bekanntes Quader-raumvolumen mit den Abmessungen l_x , l_y und l_z gelöst werden kann [6]. Dies liefert die bekannte Gleichung 4-2.

$$p(x, y, z) = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} \sum_{n_z=0}^{\infty} p_{n_x n_y n_z} \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right) \quad 4-2$$

Die daraus berechenbaren Resonanzfrequenzen, oder auch Raummoden, können durch Formel 4-3 für ganzzahlige Vielfache der Modenzahlen n_x , n_y und n_z bestimmt werden.

$$f_r = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right)^2} \quad 4-3$$

Die Moden berechnen sich dabei aus der Konstellation der ganzzahligen Werte der Modenzahlen. Man unterscheidet zwischen Kombinationen für axiale Moden, bei denen lediglich eine Modenzahl ungleich Null ist, tangentiale Moden im Falle zweier Modenzahlen ungleich Null und schräge Moden, wenn alle drei Zahlen ungleich Null gewählt werden. Da es mathematisch natürlich weit mehr Kombinationen für letztere Möglichkeit gibt, steigt die Anzahl der schrägen Moden am schnellsten an und sorgt bei hohen Frequenzen dementsprechend für eine hohe Modendichte, die in Summe die Frequenzbetonungen der Einzelmoden ausgleichen und so für ein diffuses Feld sorgen.

Abbildung 4-1 zeigt eine Darstellung der Verteilung der Moden für einen Quader mit den Abmessungen der Messkammer. Das Diagramm hat dabei nur eine Aussage darüber, an welchen Frequenzen eine oder mehrere Moden auftreten werden.

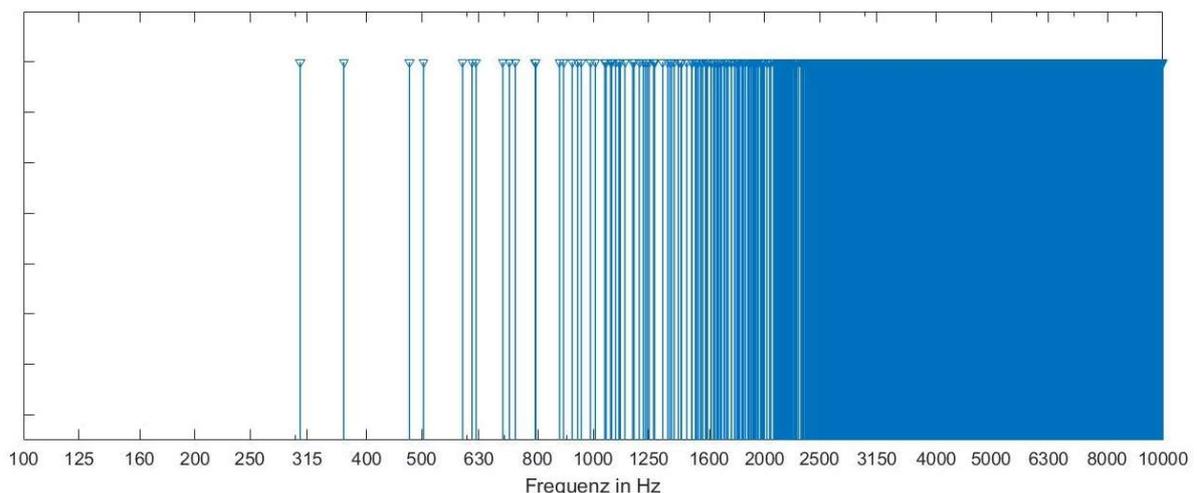


Abbildung 4-1: Berechnete Moden der Kammer

Für die Berechnung wurden Modenzahlen von Null bis 30 betrachtet. Gut zu erkennen ist, dass erst ab einer Frequenz von etwa 300Hz überhaupt eine Mode im Kammerraum auftritt.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, tastet die geplante Messung das Schallfeld der Kammer nicht mitten im Raum, sondern nur an seinen Begrenzungsflächen ab. Die ersten Moden, die sich aus Gleichung 4-3 für jedes Volumen berechnen stellen stets axial ausgerichtete Resonanzen dar, die der Ausrichtung halber nicht in allen Mikrofonen gleich stark ausgeprägt sein werden. Die isolierte Betrachtung dieser Moden ist daher in Abbildung 4-2 zu finden.

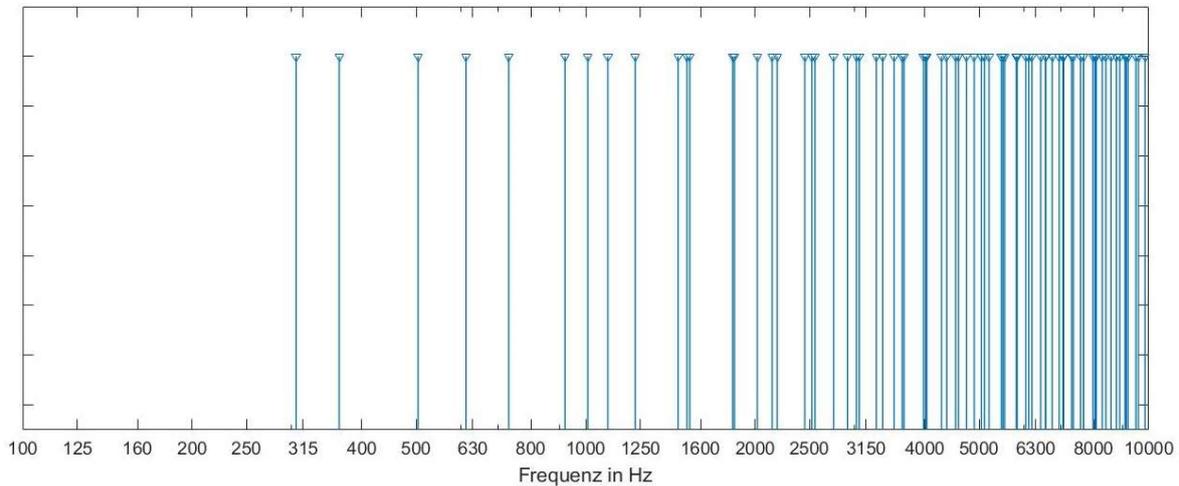


Abbildung 4-2: Berechnete Moden der Kammer, nur axiale Moden

Damit erscheinen die gewählten Positionen für den Modalbereich vorab schon nicht optimal, da auf diese Weise Moden von einem gegenüberliegenden Mikrofonpaar gut registriert wird, während das Mikrofonpaar der übrigen Wandflächen genau im Knotenpunkt der stehenden Welle liegt.

Auf die Auswirkung dieses Umstandes wird in den weiteren Kapiteln noch genauer eingegangen. Da allgemein der Modalbereich wegen der zu geringen Modendichte für übliche Hallraummessverfahren vermieden wird und es keine etablierten Vorgangsweisen für Fälle wie diese gibt, wurde im Weiteren anhand der Ergebnisse empirisch nach Lösungsansätzen gesucht.

Folgende Tabelle 4-1 zeigt alle durch Formel 4-3 berechneten Moden mit aufsteigender Frequenz bis etwa 1kHz für eine Raumtemperatur von 20°C und dementsprechend einer Schallgeschwindigkeit von 343m/s. In der dritten Spalte ist jeweilig angegeben, ob es sich um eine axiale, eine tangentielle oder eine schräge Mode handelt. Die als Koordinaten bezeichneten Werte in der jeweils ersten Spalte stellen die Modenzahlen n_x , n_y und n_z dar, die in Formel 4-3 eingesetzt werden müssen, um die jeweilige Modenfrequenz zu berechnen.

| # | Koordinaten | Frequenz | Art | # | Koordinaten | Frequenz | Art |
|----|-------------|----------|------------|----|-------------|----------|------------|
| 1 | 1 – 0 – 0 | 306Hz | Axial | 12 | 2 – 0 – 1 | 793Hz | Tangential |
| 2 | 0 – 1 – 0 | 365Hz | Axial | 13 | 2 – 1 – 1 | 873Hz | Schräg |
| 3 | 1 – 1 – 0 | 476Hz | Tangential | 14 | 0 – 2 – 1 | 887Hz | Tangential |
| 4 | 0 – 0 – 1 | 504Hz | Axial | 15 | 3 – 0 – 0 | 919Hz | Axial |
| 5 | 1 – 0 – 1 | 590Hz | Tangential | 16 | 1 – 2 – 1 | 938Hz | Schräg |
| 6 | 2 – 0 – 0 | 612Hz | Axial | 17 | 2 – 2 – 0 | 953Hz | Tangential |
| 7 | 0 – 1 – 1 | 622Hz | Tangential | 18 | 3 – 1 – 0 | 989Hz | Tangential |
| 8 | 1 – 1 – 1 | 694Hz | Schräg | 19 | 1 – 0 – 2 | 1009Hz | Tangential |
| 9 | 2 – 1 – 0 | 713Hz | Tangential | 20 | 0 – 1 – 2 | 1048Hz | Tangential |
| 10 | 0 – 2 – 0 | 730Hz | Axial | 21 | 2 – 2 – 1 | 1054Hz | Schräg |
| 11 | 1 – 2 – 0 | 791Hz | Tangential | 22 | 0 – 0 – 2 | 1073Hz | Axial |

Tabelle 4-1: Auflistung der Moden der Messkammer bis ca. 1kHz bei 20°C Raumtemperatur

Folgende Tabelle 4-2 gleicht Tabelle 4-1, es wurde bei der Berechnung jedoch für eine real herrschende maximale Temperatur während der Messungen von 30°C eine Schallgeschwindigkeit von $c = 350\text{m/s}$ berechnet und eingesetzt. Die Modenfrequenzen verschieben sich dadurch zu höheren Frequenzen hin.

| # | Koordinaten | Frequenz | Art | # | Koordinaten | Frequenz | Art |
|----|-------------|----------|------------|----|-------------|----------|------------|
| 1 | 1 – 0 – 0 | 312Hz | Axial | 12 | 2 – 0 – 1 | 810Hz | Tangential |
| 2 | 0 – 1 – 0 | 372Hz | Axial | 13 | 2 – 1 – 1 | 891Hz | Schräg |
| 3 | 1 – 1 – 0 | 486Hz | Tangential | 14 | 0 – 2 – 1 | 905Hz | Tangential |
| 4 | 0 – 0 – 1 | 515Hz | Axial | 15 | 3 – 0 – 0 | 937Hz | Axial |
| 5 | 1 – 0 – 1 | 602Hz | Tangential | 16 | 1 – 2 – 1 | 958Hz | Schräg |
| 6 | 2 – 0 – 0 | 625Hz | Axial | 17 | 2 – 2 – 0 | 972Hz | Tangential |
| 7 | 0 – 1 – 1 | 635Hz | Tangential | 18 | 3 – 1 – 0 | 1009Hz | Tangential |
| 8 | 1 – 1 – 1 | 708Hz | Schräg | 19 | 1 – 0 – 2 | 1054Hz | Tangential |
| 9 | 2 – 1 – 0 | 727Hz | Tangential | 20 | 0 – 1 – 2 | 1095Hz | Tangential |
| 10 | 0 – 2 – 0 | 745Hz | Axial | 21 | 2 – 2 – 1 | 1100Hz | Schräg |
| 11 | 1 – 2 – 0 | 808Hz | Tangential | 22 | 0 – 0 – 2 | 1129Hz | Axial |

Tabelle 4-2: Moden der Kammer bei 30°C

Für tiefe Frequenzen unter dem Modalbereich ist hingegen ein Übergang zu Druckkammerverhältnissen anzunehmen. Für tatsächliche Druckkammerverhältnisse geht man davon aus, dass die längste Abmessung der Kammer im Vergleich zur Wellenlänge der Schallwelle weit kleiner ist. In diesem speziellen Fall steigt und sinkt einfach der Luftdruck im Volumen mit der Frequenz der Welle.

Die Definitionen für eine Grenzfrequenz des Druckkammerbereichs variieren in der Literatur zwischen einem Sechstel und einem Zehntel der Wellenlänge. Im ersteren Falle ergäben die gewählten 56cm Kantenlänge der Kammer eine Wellenlänge von 3,36m, was etwa einer Frequenz von 100Hz entspricht [7]. Da diese Frequenz für ein Zehntel der Wellenlänge nur noch tiefer liegt, können wir mit Gewissheit das Teilspektrum zwischen 100Hz und der tiefsten Eigenresonanz der Kammer als Druckkammerübergangsbereich bezeichnen.

Zusammenfassend teilen wir unseren Messbereich für ein erstes Herangehen daher in drei grobe Teile auf: in den Druckkammerübergangsbereich, den Modalbereich und den Diffusschallbereich. Die genauen Eigenschaften von ersterem müssen im Folgenden erst ergründet werden. Vom Modalbereich sind erhebliche Pegelschwankungen zu erwarten, dessen Ausmaß und Entzerrungsmöglichkeiten jedoch ebenso umfassender Untersuchungen bedürfen. Der Diffusschallbereich hingegen könnte durch die Erfahrungen mit Miniaturhallräumen eventuell einen Teil der Messung mit bestehenden, wenn auch adaptierten Messverfahren abdecken. Tabelle 4-3 fasst die besprochenen Bereiche in einer Übersicht zusammen.

| Bereich: | Druckkammerübergangsbereich | | Modalbereich | | Diffusschallbereich | |
|-------------|-----------------------------|-------|--------------|------|---------------------|-------|
| | von | bis | von | bis | von | bis |
| Frequenzen: | 100Hz | 300Hz | 300Hz | 2kHz | 2kHz | 10kHz |

Tabelle 4-3: Übersicht der Frequenzbereiche in der Kammer

4.2 Messaufbau

Für die Messung des Kompressors wurde die Messkammer auf 4 Schaumstoffklötzchen auf der schallharten Platte, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben ist, gelagert, um eine zusätzliche Entkopplung von Trittschall und anderen Tieftonstörfrequenzen zu erreichen, wie Abbildung 4-3 zeigt.

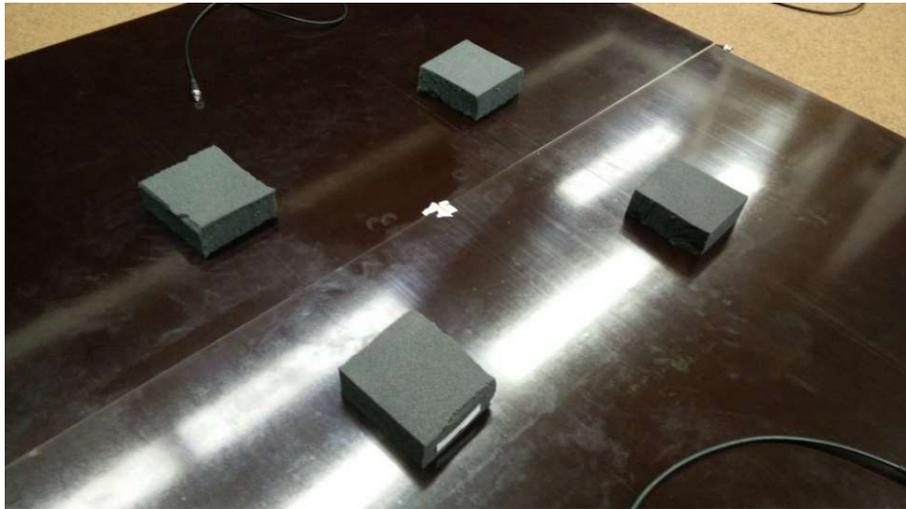


Abbildung 4-3: Lagerung der Messkammer am Boden des Studioraumes

Als Messsystem kam erneut das PAK Mobile MKII von Müller BBM und die zugehörige Software zum Einsatz. Als Mikrofone dienen jedoch, anders als bei den Freifeldmessungen, 5 Stück $\frac{1}{4}$ -Zoll-Freifeldmikrofone des Typs G.R.A.S. 40PL. Kalibriert wurde wieder vor jeder Session mit Hilfe eines Brüel & Kjær Type 4231. Abbildung 4-4 zeigt einen exemplarischen Messaufbau des Kompressors in der Messkammer.



Abbildung 4-4: Exemplarische Messung in der Messkammer

4.3 Ergebnisse

Auch für die Messung in der Kammer war zunächst von Interesse, welche Störgeräusche währenddessen auftraten, wie sich diese auf die Ergebnisse auswirken könnten und wie hoch der resultierende Signalrauschabstand sein würde. Die in Abbildung 4-5 dargestellten Kurven zeigen eine Gegenüberstellung der Ruheschallmessung im Tonstudio mit den $\frac{1}{2}$ -Zoll-Mikrofonen in Violett (Freifeld) zu den $\frac{1}{4}$ -Zoll-Mikrofonen in Grün (Kammer). Die $\frac{1}{4}$ -Zoll-Mikrofone besitzen ein deutlich höheres Eigenrauschen, was in einem um etwa 11dB SPL höheren Ruheschall-drucksummenpegel resultiert.

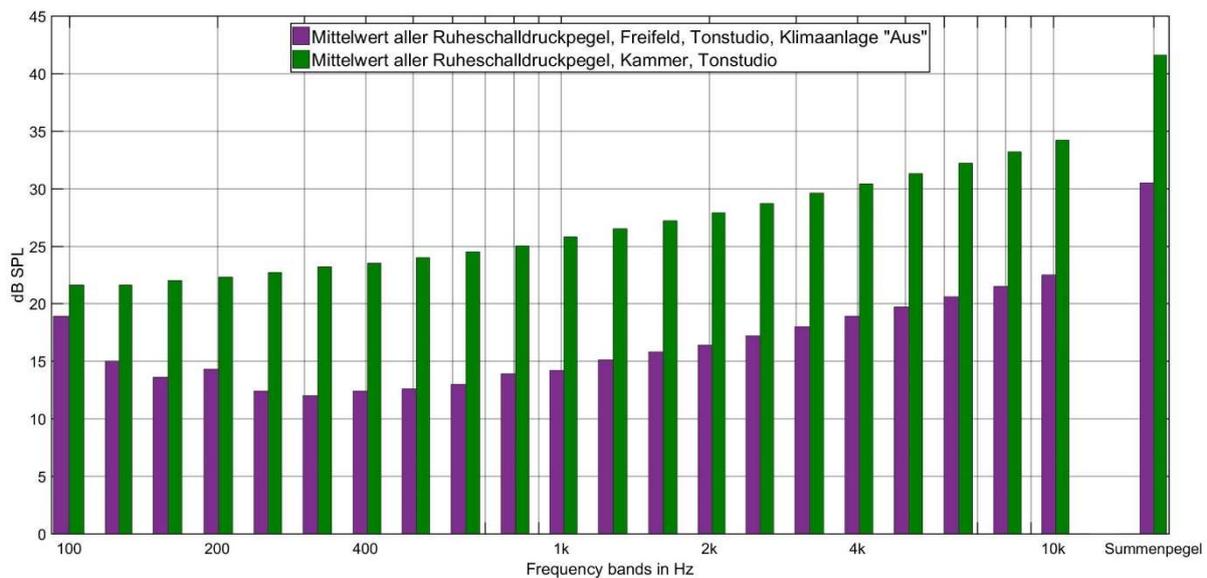


Abbildung 4-5: Ruheschalldruckpegel in der Messkammer (G.R.A.S. 40PL) versus jenen aus der Freifeldmessung (G.R.A.S. 46AE)

Kombiniert mit dem Fakt, dass die Messkammer Fremdschalleinwirkungen durch die näherungsweise luftdichte Isolierung weiter mindert, kann davon ausgegangen werden, dass akustischer Störschall von außen nur im geringsten Maße Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Abbildung 4-6 zeigt die gemessenen Schalldruckpegel des Kompressors in der Messkammer dem bestimmten Ruheschallpegel gegenübergestellt. Gut erkennbar ist die geringe Streuung der Messergebnisse und ein Signalrauschabstand von über 10dB SPL in allen gemessenen Frequenzbändern. Der Kompressor wurde bei jeder Messung für eine Dauer von 1 Minute laufen gelassen, dann 1 Minute vermessen und anschließend ca. 10 Minuten abgeschaltet. Nach jedem Durchlauf folgte die Öffnung der Messkammer, um die erwärmte Luft entweichen zu lassen.

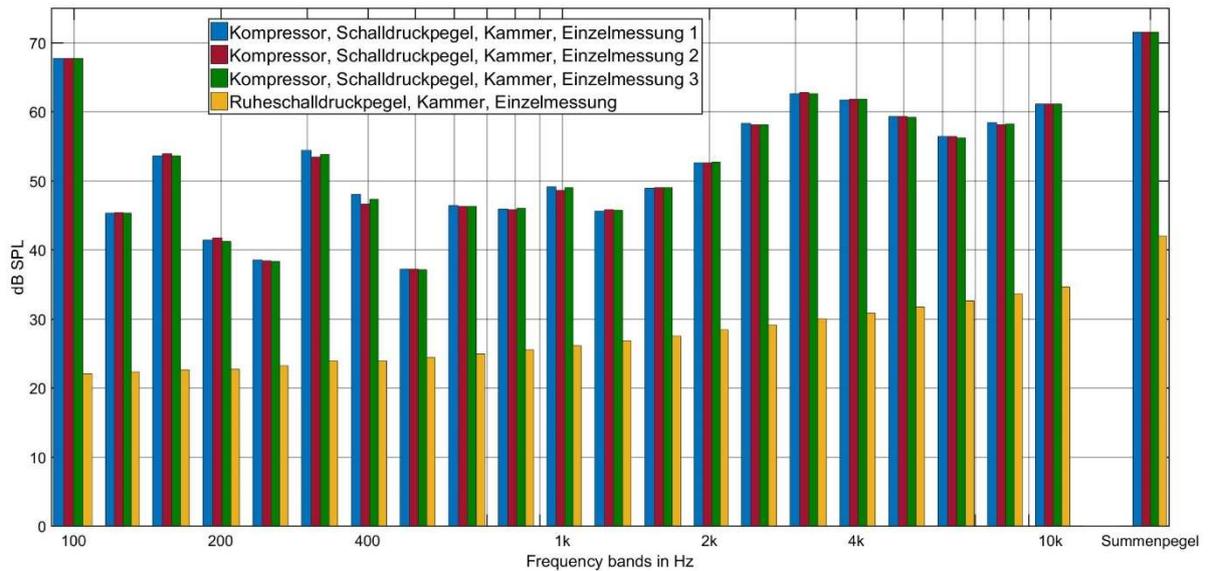


Abbildung 4-6: Schalldruckpegelmessung des Kompressors in der Messkammer

Im Vergleich zur Messkurve der Freifeldmessung, wie sie in Abbildung 4-7 dargestellt ist, weist die Messung in der Messkammer eine deutliche Pegelüberhöhung von bis zu 20dB SPL auf. Ab 2kHz besitzen die Kurven zu höheren Frequenzen hin ähnliche Verläufe. In den untersten Terzbändern sind die Vielfachen der Antriebsfrequenz des Motors für die deutlichen Pegelspitzen verantwortlich. Eine weitere resonante Spitze im 315Hz-Terzband ist hingegen in der Freifeldmessung völlig abwesend. Im Modalbereich differieren die Kurvenmuster deutlich.

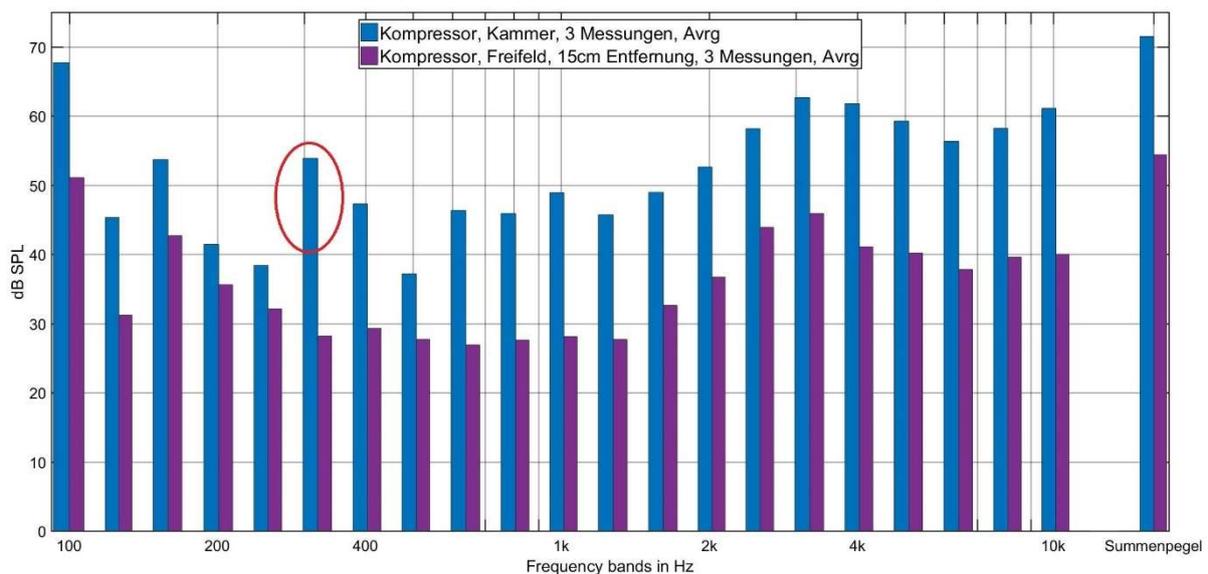


Abbildung 4-7: Vergleich der Kammermessung des Kompressors mit der Freifeldmessung

Um einen besseren Vergleichswert zu schaffen, wurden die Messungen des Kompressors in der Messkammer mehrfach wiederholt. Abbildung 4-8 zeigt den direkten Vergleich einer zweiten, dritten und vierten Messreihe zur ersten Kammermessreihe aus Abbildung 4-7. Die neu ermittelten Kurven bilden sich ebenso aus 3 separaten Messungen, mit Ausnahme der 4. Messreihe (Einzelmessung).

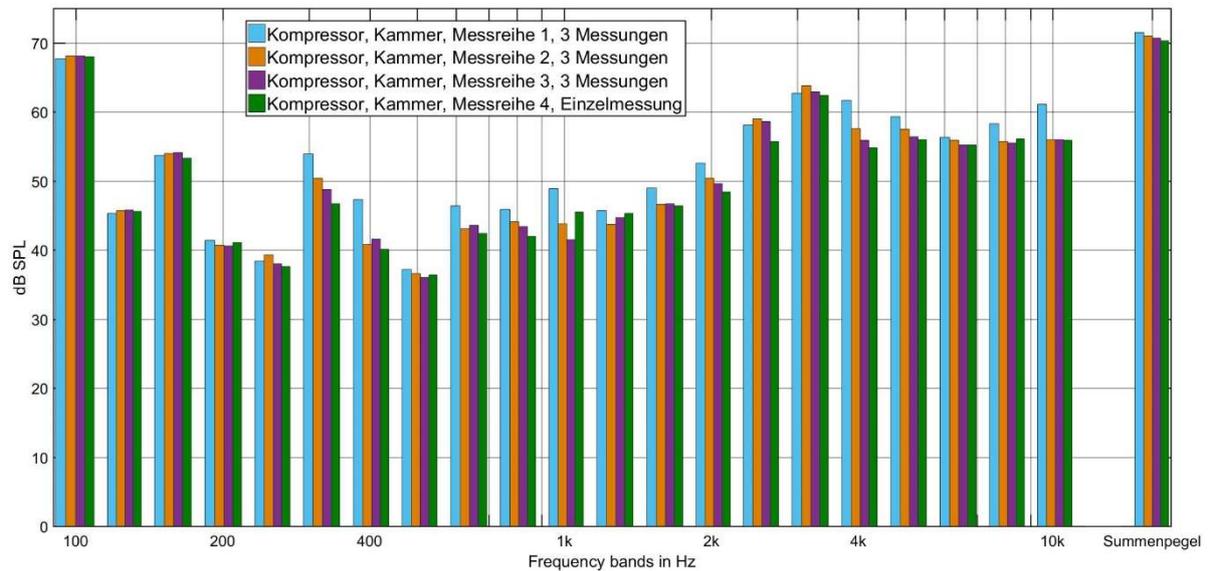


Abbildung 4-8: Vergleich mehrerer Messreihen des Kompressors in der Messkammer

Die Wiederholungen der Messungen für den Kompressor zeigten in den meisten Frequenzbändern nur geringe Unterschiede. Die Pegel im Bereich von 100Hz bis 250Hz sind durchwegs beinahe identisch. Auffällig sind jedoch die unterschiedlich stark ausgeprägten Pegelspitzen bei 315Hz und der Vergleich zwischen der ersten Messreihe und den Folgemessreihen ab etwa dem 4kHz-Terzband aufwärts. Die Messreihen 2 bis 4 liegen hier eng beieinander, weichen aber von der ersten Messreihe ab.

Bei der zweiten Messreihe kam zudem die Idee auf, die Entkoppelung des Kompressors zu untersuchen. Wie in Kapitel 3.2 geschildert, würden jegliche maschinellen Messobjekte, welche einfach direkt auf den Boden der Kammer gelegt werden, ein beträchtliches Störgeräusch durch Vibrationen verursachen. Der Kompressor ist deshalb mit passenden Gummifüßen ausgestattet. Die gegebene Entkopplung wurde nun durch weiteres Dämpfungsmaterial erhöht und der Unterschied mit einer weiteren Kammermessung analysiert.

Dafür kamen vier ca. 16cm² große und etwa 1,5cm dicke Moosgummistücke zum Einsatz. Abbildung 4-9 zeigt die Lagerung der Testgeräte auf den Pads. Der Kompressor wurde jeweils abwechselnd mit den aufgesteckten Gummifüßen allein und mit den zusätzlichen Dämpfern gemessen.



Abbildung 4-9: Zusätzliche Lagerung des Kompressors

Die Frage der Entkopplung hat Relevanz, da die Vibrationen, die möglicherweise trotz der Gummidämpfer auf den Boden der Messkammer übertragen werden, die Wände selbst zum Schwingen anregen könnten. Und obwohl die Mikrofone durch eine Gummischicht in den Kabelverschraubungen festgeklemmt werden, stellt dies für sie nur einen geringen Schutz gegen signifikante Körperschallkopplungen dar.

Die zusätzlichen Dämpfer kamen jeweils abwechselnd zu den normalen Messungen zum Einsatz. Nach jedem Durchgang wurde also die Kammer geöffnet, die Maschine abgeschaltet und die Dämpfer platziert oder entfernt. Dies bedingte natürlich ein Bewegen des Kompressors und ein erneutes Einmessen seiner Position mit dem Maßband. Die Konsistenz der Messergebnisse hat deshalb umso mehr Gewicht.

Abbildung 4-10 zeigt die Schalldruckpegel-Mittelwertkurven von je drei Messungen mit und ohne Dämpfer des Kompressors. Wie das Ergebnis vermuten lässt, haben die Dämpfer kaum Einfluss im betrachteten Frequenzbereich. Die Pegel der ersten drei Oktaven sind quasi deckungsgleich. Im Gesamtbild gibt es lediglich nur in den 1kHz- und 1,25kHz-Terzbändern signifikante Unterschiede. Auf Grund der beobachteten Varianz der Ergebnisse bisher kann diese Abweichung wahrscheinlicher auf die Veränderlichkeit der Schallquelle zurückgeführt werden. Der Vergleich unterstreicht also vielmehr die Wiederholbarkeit der Messung, als dass der Unterschied des Entkopplungsgrades festgehalten wird.

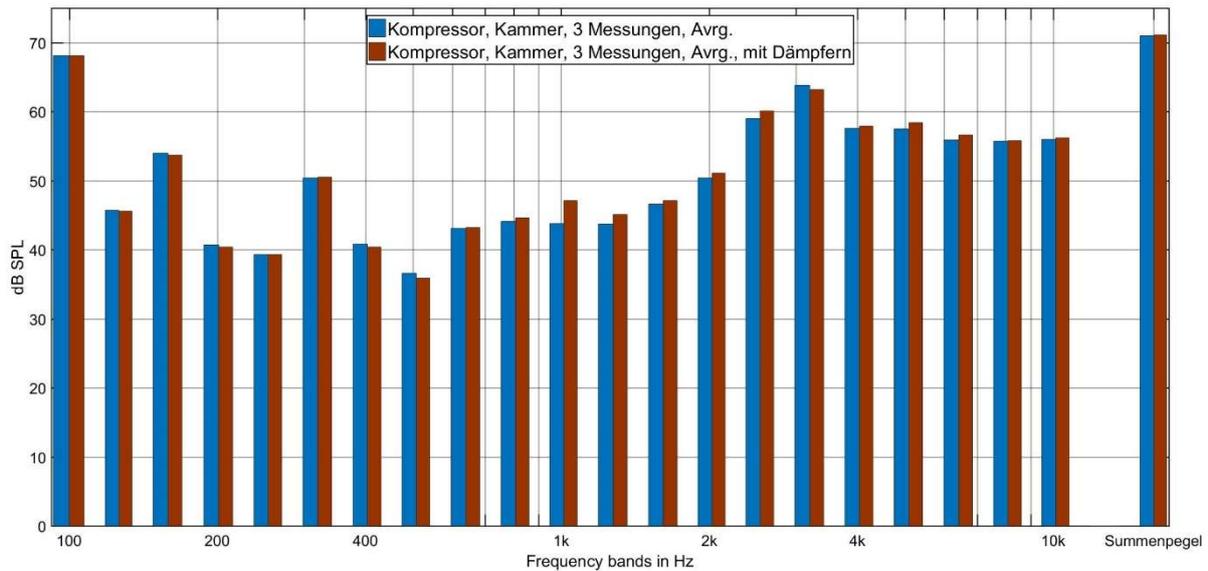


Abbildung 4-10: Vergleich der Schalldruckpegel des Kompressors mit und ohne zusätzliche Dämpfer

Tabelle 4-4 zeigt abschließend die Werte der Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur bei den Messungen des Kompressors in der Messkammer. Die Messung fand ebenso im Tonstudio der TU-Graz statt. Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Angaben der Luft im Nahbereich der Messkammer. Die atmosphärischen Bedingungen der 3. und 4. Messreihe wurden nicht dokumentiert.

| Messobjekt | Datum | Uhrzeit | Temp. ϑ_{Luft} | Rel. Luftfeuchtigkeit |
|-----------------------|-----------|---------|--------------------------|-----------------------|
| Kompressor, 1. MR | 8.4.2017 | 14:00 | 21,1°C | 61,9% |
| Kompressor, 1. MR | 8.4.2017 | 14:07 | 21,1°C | 59,9% |
| Kompressor, 1. MR | 8.4.2017 | 14:12 | 21,8°C | 62,1% |
| Leermessung | 8.4.2017 | 14:24 | 21,8°C | 62,1% |
| Kompressor, 2. MR | 29.4.2017 | 16:01 | 27,5°C | 31,7% |
| Kompressor, mit Gummi | 29.4.2017 | 16:05 | 27,5°C | 31,8% |
| Kompressor, 2. MR | 29.4.2017 | 16:14 | 27,4°C | 32,0% |
| Kompressor, mit Gummi | 29.4.2017 | 16:18 | 27,4°C | 32,4% |
| Kompressor, 2. MR | 29.4.2017 | 16:23 | 27,4°C | 32,0% |
| Kompressor, mit Gummi | 29.4.2017 | 16:26 | 27,5°C | 32,2% |

Tabelle 4-4: Aufgenommene Werte für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der Messkammer

4.4 Zusammenfassende Analyse

Aus den bisherigen Ergebnissen lassen sich also schon einige Informationen ableiten. Zunächst liefert die Messung in der Messkammer bis zu 20dB SPL Pegelüberhöhung. Die Überhöhungen sind jedoch offenbar unregelmäßig. In Abbildung 4-11 ist die Pegeldifferenz zwischen dem Durchschnitt der Schalldruckpegel-Messungen der zweiten Kammermessreihe und der Freifeld-Messung des Kompressors im Abstand von 15cm angeführt. Die Differenzpegel liegen im Diffusschallbereich etwas näher beieinander. Könnte dieser Sachverhalt durch weitere Messungen und Bildungen von Mittelwertkurven bestätigt werden, so ließen sich eventuell simple Pegelüberhöhungsregeln für diesen Bereich aufstellen. Eine Kammermessung lässt sich dann durch Subtraktion von Pegelwerten korrigieren.

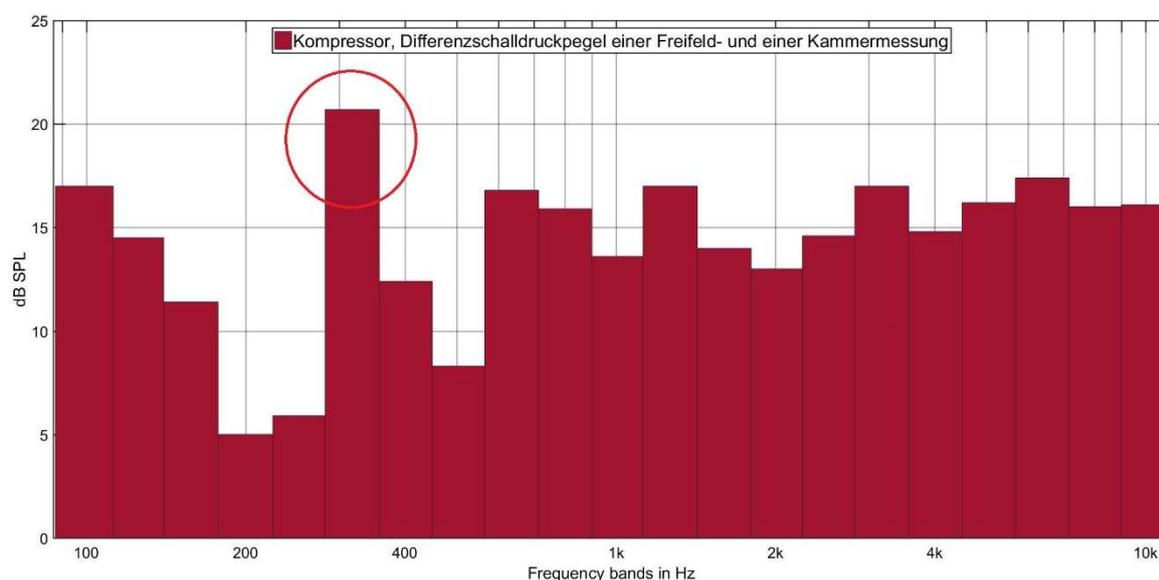


Abbildung 4-11: Pegeldifferenzen zwischen der Freifeldmessung und der Kammermessung

Dem Verlauf in den untersten drei Terzbändern zufolge steigt die Druckdifferenz zu tiefen Frequenzen hin kontinuierlich an. Wegen der guten Wiederholbarkeit der Pegel in diesen Frequenzbändern, besteht auch hier die Möglichkeit eine statische Korrektur zu entwickeln. Die einzigen aus den bisherigen Messergebnissen treffbaren Aussagen über den Mitteltonbereich der Messung sind die eindeutig hervorgehobenen Pegelspitzen bei 315Hz und 400Hz. Wenden wir die in Punkt 4.1 besprochenen Prädiktionen aus der Theorie an, so lässt sich vermuten, dass die dort besprochenen Moden der Messkammer in Form einer axialen Mode genau im 315Hz-Terzband für diese Resonanz verantwortlich ist. Dies würde auch die Abwesenheit derselben Pegelspitze im Freifeld erklären. Da es sich um eine axiale Mode handelt, wirkt sich dieser Effekt direkt auf die Mikrofone aus, da mit den Mikrofonpositionen in den Wandflächenmittelpunkten die Kammer genau an den, von der Mode betroffenen Stellen abgetastet wird. Selbes gilt auch für die in Abbildung 4-2 ebenso isoliert sichtbare axiale Mode bei ca. 360Hz, deren Wirkung sich zum Teil auch auf das benachbarte Terzband bei 400Hz auslagert.

5 Lautsprechermessungen in der Messkammer

Im Folgenden soll nun die Integration einer reproduzierbaren Messmethode in der Messkammer mittels Lautsprecher beschrieben werden. Dafür wurden zwei verschiedene Wege erwogen den Lautsprecher in der Kammer zu betreiben.

5.1 Motivation

Aus den bisherigen Untersuchungen konnten einige Schlüsse gezogen werden, wonach im Kontrast zur Freifeldmessung im TU-Studio eindeutig nachteilige Effekte in der Messkammer auftreten. So zum Beispiel sichtbar hervorgehobene Frequenzbereiche, die auf Modenwirkungen schließen lassen. Eine genauere, analytische Untersuchung der akustischen Situation ist jedoch mit Testgeräten (DUT) alleine nicht möglich, weil von diesen kein eindeutiger Frequenzgang existiert. Der Frequenzgang eines Lautsprechers hingegen ist vergleichsweise einfach zu erfassen und es darf davon ausgegangen werden, dass im Rahmen der Genauigkeit der akustischen Messtechnik dessen Abstrahleigenschaften als gut reproduzierbar gelten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der die Motivation fördert eine Lautsprechermessung zu implementieren, ist die Vermutung, dass die Akustik im Inneren der Messkammer vor allem für den Modalfrequenzbereich von den Abmessungen und den akustischen Eigenschaften des Testgeräts selbst abhängig ist (der Kompressor nimmt gut 6-7% des Kammervolumens ein und besitzt schallhart wirkende Blechoberflächen). Außerdem ist es ebenso interessant welche Eigenschaften die leere Messkammer liefert. Da es sich um einen einfachen Quaderraum handelt, besteht in diesem Fall eine gute Vergleichsmöglichkeit mit der grundlegenden Theorie der Raumakustik. Wie im Weiteren genauer beschrieben, lässt sich mit dem Lautsprecher der Unterschied der Akustik beider Fälle festhalten.

Ein Lautsprecher vermag jedoch nicht alle Aspekte der Kammermessung in Bezug auf die Testgeräte analytisch abzudecken. Zum einen ist die mitunter komplexe Richtwirkung von mechanischen Geräten unmöglich durch Lautsprecher exakt reproduzierbar. Zum anderen ist es auch schwierig mit einem einzigen Breitbandlautsprecher den gesamten Messbereich von 100Hz bis 10kHz mit linearem Frequenzgang abzudecken. Vereinfacht betrachtet: wählt man eine kleine, leichte Membran für eine optimale Abstrahlung von höheren Frequenzen, fehlt Hubvermögen und Fläche um tiefe Frequenzen zu emittieren. Wählt man eine große Membran für eine gute Tieftonwiedergabe, behindert die größere Masse, die Richtwirkung dieser Membranfläche und die zusätzliche Tendenz der Membran bei höheren Frequenzen in komplexe Eigenschwingungen überzugehen wiederum eine lineare Wiedergabe des oberen Spektrums [8]. In Betracht all dieser angeschnittenen Probleme müssen also Kompromisse geschlossen werden. Wie in der Lautsprechertechnik üblich, lag daher eingangs nahe, das Messspektrum auf mehrere Lautsprecher mit unterschiedlichen Membrandurchmessern aufzuteilen.

Für die Untersuchungen mit dem Lautsprecher besonders interessant waren zunächst die in Kapitel 4.1 als „Druckkammerübergangs-“ und „Modalbereich“ bezeichneten Frequenzregionen, sprich jene Bereiche von der unteren Grenzfrequenz der Messung bis zur ersten auftretenden Mode in der Messkammer, sowie die darüberliegende Region bis zu jener Grenze, ab der die Theorie annähernde Diffusschallsituation voraussagt. Die Summe dieser beiden Bereiche kann gemäß Tabelle 4-3 pauschal von 100Hz bis etwa 2kHz angegeben werden. Den eingangs beschriebenen Beschränkungen von Lautsprechern zufolge ist dabei eine goldene Mitte für die Membrangröße gefragt, die jedoch Anhand von Datenblättern abgeschätzt werden kann. Bei Lautsprechern mit Membrandurchmessern im Bereich von z.B. 3 Zoll, beziehungsweise 8cm finden sich Modelle im Handel, deren untere Grenzfrequenz bei 100Hz liegt.

Ein Lautsprecher mit solchen Abmessungen stellt jedoch für das Volumen der Messkammer schon ein vergleichsweise großes Objekt dar. Aus diesem Grund sollte daher nur ein einziger solcher Lautsprecher in die Messung integriert werden. Dies warf die Frage auf, bis zu welcher Frequenz in diesem Falle von omnidirektionaler Abstrahlung ausgegangen werden konnte. Aus der Elektroakustik ist bekannt, dass eine eingebaute Lautsprechermembran tiefe Frequenzen quasi omnidirektional abstrahlt. Für die theoretische Grundbetrachtung des Lautsprechers als konphas schwingende Kolbenfläche ist die obere Grenze, für welche dieser Zustand noch angenommen werden kann mit $k \cdot r_M < 1$ festgelegt. Das heißt für größere Membranradien r_M liegt die Grenze des omnidirektionalen Bereichs des Lautsprechers umso tiefer. Unter Berücksichtigung der Theorie der Kolbenmembran kann für einen kleinen Lautsprecher mit beispielsweise 8cm Durchmesser folgende Grenzfrequenz für die omnidirektionale Abstrahlung berechnet werden (Formel 5-1).

$$k \cdot r_M = \frac{\omega}{c} \cdot r_M < 1 \rightarrow f < \frac{c}{2\pi \cdot r_M} = \frac{343 \text{ m/s}}{2\pi \cdot 0,08 \text{ m}} \approx 1350 \text{ Hz} \quad 5-1$$

In diesem Fall ist für die tieffrequente Region von Druckkammerübergangs- und Modalbereich ein einzelner Breitbandlautsprecher dieser Größe ausreichend. Für höhere Frequenzen nimmt die Bündelung der Abstrahlung zu. Der zweite Messlautsprecher aus einem vergangenen Projekt des Autors besitzt daher eine kugelförmige Anordnung von 6 Hochtonlautsprechern, um der Bündelung und damit der Richtschallabstrahlung entgegenzuwirken. Seine Eigenschaften sind in Kapitel 5.6 genauer erläutert.

5.2 Verändertes Messsetup

Für die Untersuchungen mit dem Lautsprecher musste eine Änderung im Setup der Messung vorgenommen werden, da das Müller BBM PAK Mobile MKII und dessen Software, welche für alle bisherigen Messungen verwendet wurde, weder alle im Folgenden geforderten analytischen Funktionen direkt beinhaltet, noch bietet die Hardware-Seite des vorhandenen PAK-Systems die Möglichkeit ein gewöhnliches, analoges Line-Signal an einen Leistungsverstärker zu senden, um einen Lautsprecher betreiben zu können.

Als Alternative wurde auf die Hochpräzision des PAK MKII verzichtet und stattdessen ein gewöhnliches, wenn auch in der gehobeneren Qualitäts- und Preisklasse angesiedeltes Audiointerface von RME benutzt. Da die bei allen Messungen verwendeten G.R.A.S.-Mikrofone zudem nur mit einer ICP-Konstant-Strom-Versorgung betrieben werden können, musste außerdem noch ein ICP-Conditioner als Zwischenglied dienen. Dieser, in diesem Fall in ein-kanaliger Variante vorhandene Vorverstärker, versorgt ICP-Sensoren über den BNC-Eingang und extrahiert möglichst unverfälscht das analoge Spannungssignal, welches am Ausgang abgreifbar ist. Dieses Analogsignal kann daraufhin wie ein gewöhnliches Mikrofonsignal im Audiointerface digitalisiert werden. Ein Flussdiagramm dieses Aufbaus in Abbildung 5-1 veranschaulicht das veränderte Messsetup.

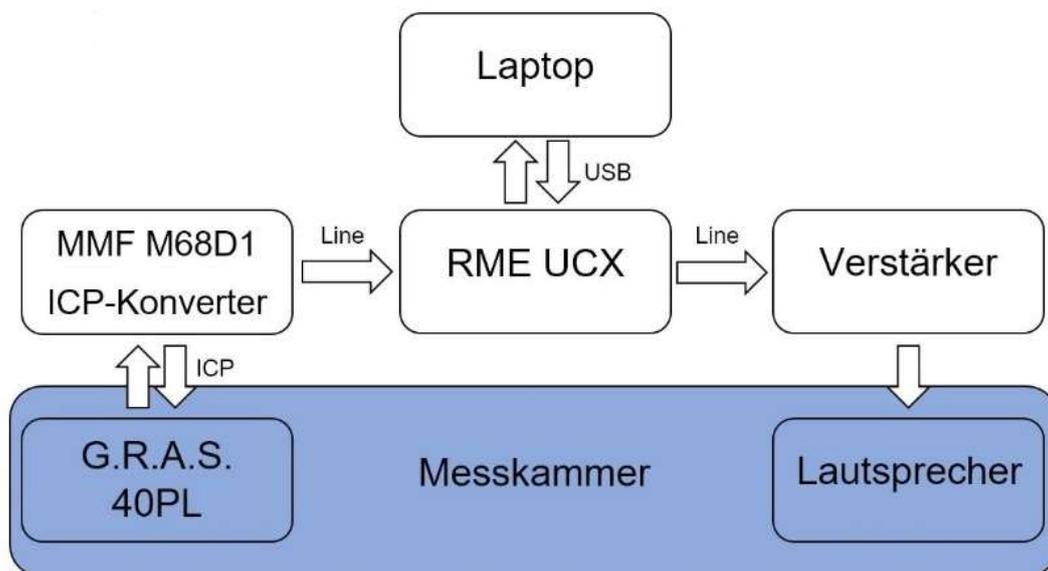


Abbildung 5-1: Messsetup für die Lautsprechermessungen

Für die benötigte Signalverarbeitung am Computer existiert eine Erweiterung für das Programm Matlab namens „ITA-Toolbox“, welches von Mitarbeitern des Instituts für technische Akustik an der RWTH Aachen als Open Source Software programmiert wurde. Mit diesem Paket lassen sich schnell und einfach akustische Messungen in Matlab implementieren und viele der gängigen signalverarbeitenden Funktionen, wie die Berechnung der Nachhallzeiten

aus einer Impulsantwort, eine übersichtliche FFT-Analyse, Fensterung von Signalen im Zeitbereich, die Berechnung von Terzbandanalysen aus einer vorhandenen FFT oder einem Zeitsignal etc. sind schon im funktionsfähigen Zustand darin enthalten. Die Messung von Impulsantworten in dieser Software-Umgebung benötigt beispielsweise lediglich genaue Angaben zur Messung, wie Messfrequenzbereich und Anregungssignal, die eigentliche Durchführung ist aber schon fertig vorprogrammiert und muss lediglich gestartet werden.

Wie in Matlab üblich, werden die gemessenen Daten in Matrizen und Vektoren abgelegt. Man hat also jederzeit vollen Zugriff auf jegliche Datenebene. Das ITA-Toolbox-Paket vereinfacht das Datenmanagement dahingehend noch weiter, dass die objekt-orientierte Programmierung Audiodaten als Audio-Objekte speichert. Diese Objekte haben in sich schon Methoden einprogrammiert um die Daten schnell optisch darzustellen.

Als Leistungsverstärker für den Lautsprecher diente ein sehr lineares Modell für Studiomonitore von Parasound. Die gesamte AD/DA-Wandlung wurde dem RME-Audio-Interface überlassen. RME gibt im Datenblatt zum verwendeten UCX-Modell für den AD-Eingang eine Unsicherheit von 0,5dB für den gesamten Frequenzbereich von 6Hz bis 20kHz an. Für den DA-Ausgang ist hingegen von 8Hz bis 20kHz lediglich mit einer Unsicherheit von 0,1 dB zu rechnen. Der Rauschabstand beider Wandler liegt bei etwa 111dB. Gewandelt wurde mit 24bit und 44,1kHz. Abbildung 5-2 zeigt einen exemplarischen Messaufbau mit der Messkammer.



Abbildung 5-2: Exemplarischer Messaufbau der Kammermessungen

Ist im Folgenden von Messungen in der Messkammer die Rede, erfolgte aus den oben genannten Gründen stets nur ein Durchlauf mit einem einzelnen Mikrofon und daher sequentiellen Messungen an jeder der fünf Haupt- oder weiteren Stützpositionen. Im Fall der Hauptpositionen wurden die jeweils übrigen vier (oder fünf) Mikrofondurchführungen entweder mit

nicht angeschlossenen Mikrofonen oder kleinen Aluminiumzylindern mit ähnlichen Abmessungen besetzt um die akustische Situation wie bei den Messungen mit dem PAK MKII beizubehalten. Tabelle 5-1 fasst das verwendete Messequipment zusammen.

| Art des Gerätes | Bezeichnung |
|------------------------|-------------------------------------|
| Mikrofon, 1/4-Zoll | G.R.A.S. 40 PL |
| Messmikrofonkalibrator | Brüel & Kjær Typ 4231 |
| Audio-Interface | RME UCX |
| ICP-Konverter | MMF Radebeul Charge Amplifier M68D1 |
| Thermometer/Hygrometer | Testo 608-H1 |
| Leistungsverstärker | Parasound HCA-800II |

Tabelle 5-1: Geräteliste für das veränderte Messsetup

5.3 Integration des Lautsprechers in die Messkammer

Die erste zu lösende Frage für die Integration des Lautsprechers war nun, in welcher Form er in der Messkammer betrieben werden sollte. Entgegen den schon ab Werk in sich gekapselten Hochtonlautsprechern des vorhandenen Miniaturlautsprechers finden sich für den Tiefmitteltongbereich im Handel lediglich offene Lautsprecherchassis, die erst eingebaut werden müssen. Ein Betrieb ohne Box führt bekannter Maßen zum akustischen Kurzschluss.

Praktisch gibt es nur zwei Möglichkeiten ein gewöhnliches Lautsprecherchassis in der Messkammer so zu betreiben, dass die linearen Eigenschaften optimal ausgeschöpft werden können: durch den Einbau des Chassis in eine geeignete Lautsprecherbox, welche in unserem Fall ein ähnliches Verdrängungsvolumen aufwies, wie das Testobjekt selbst und zum anderen durch den Einbau des Chassis in eine der Wandflächen der Messkammer. Um das Risiko zu vermeiden die angefertigte Messkammer durch den Einbau oder durch dafür notwendige Modifikationen irreparabel zu beschädigen, sodass nur ein Neubau die gemessenen Ergebnisse wieder reproduzieren könnte, wurde entschieden den Deckel als Lautsprecher-Schallwand zu wählen und einfach kurzer Hand weitere Exemplare davon anzufertigen.

Mit diesen gefassten Entschlüssen musste nun für beide Varianten ein passender Lautsprecher gefunden werden. Einen solchen Kandidaten stellt der Visaton FRS8 dar, welcher in Abbildung 5-3 zu sehen ist. Die Eckdaten dieses Breitband-Chassis sind in folgender Tabelle 5-2 angeführt.

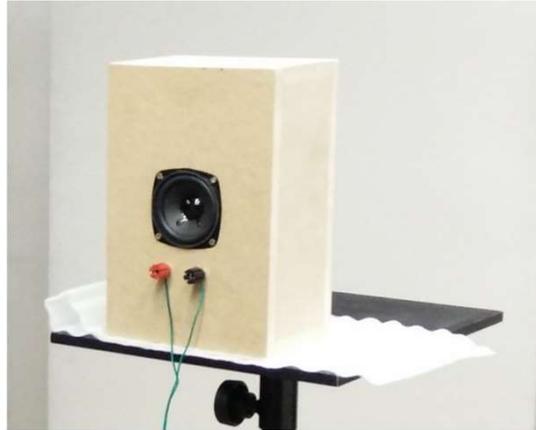


Abbildung 5-3: Das gewählte Visaton FRS8 Lautsprecherchassis

| | |
|--|-------------------|
| Marke, Name | Visaton, FRS8 |
| Nennbelastbarkeit | 30W |
| Nennimpedanz | 8Ω |
| Übertragungsbereich (-10dB) | 100-20000Hz |
| Mittlerer Schalldruckpegel | 82dB (1W/1m) |
| Abstrahlwinkel (-6dB) | 180°/4kHz |
| Max. Auslenkung | +/- 2,5mm |
| Resonanzfrequenz | 120Hz |
| Magnetische Induktion | 0,8T |
| Magnetischer Fluss | 200μWb |
| Schwingspulendurchmesser | 20mm |
| Wickelhöhe | 4,5mm |
| Gewicht, netto | 280g |
| Gleichstromwiderstand R_{dc} | 7,2Ω |
| Mechanische Güte Q_{ms} | 4,85 |
| Elektrische Güte Q_{es} | 1,32 |
| Gesamte Güte Q_{ts} | 1,04 |
| Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen V_{as} | 0,9 Liter |
| Effektive Membranfläche S_d | 31cm ² |
| Dynamisch bewegte Masse M_{ms} | 2,5g |
| Antriebsfaktor B_{xl} | 3,2Tm |
| Schwingspuleninduktivität L | 0,9 mH |

Tabelle 5-2: Daten des Visaton FRS8 Breitbandlautsprechers

Laut Hersteller liefert der Lautsprecher einen Frequenzgang, dessen Kurve in Abbildung 5-4 zu sehen ist. Der Lautsprecher weist laut diesen Angaben in 1m Entfernung breitbandig einen Schalldruck von etwa 80dB SPL auf.

Vertraut man der angegebenen Amplitudenfrequenzgang-Kurve, so ist der FRS8 zwar nicht vollkommen linear, jedoch ab etwa 300Hz bis etwa 3kHz sehr neutral und besitzt unter 300Hz lediglich eine leichte Anhebung, die sich bis zum -3dB Abfall bei ca. 100Hz erstreckt. Diese Varianz kann durchaus in einer Messung berücksichtigt und ausgeglichen werden.

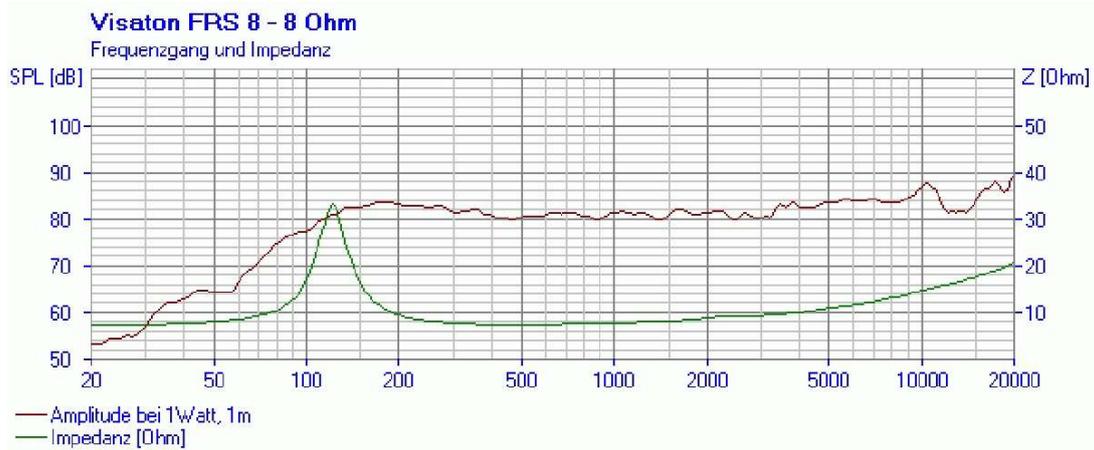


Abbildung 5-4: Amplitudenfrequenzgang und Impedanzkurve des Visaton FRS8 laut Herstellerangaben

Der gewählte Lautsprecher liefert also mehr als genügend Schalldruck um ihn im Vergleich mit dem Kompressor verwenden zu können und weist laut Herstellerangaben einen zumindest ausgleichsfähigen Frequenzgang auf. Die durch eigenständige Messungen erfassten Eigenschaften des gekauften Modells zur Bestätigung der Herstellerangaben seien im Folgenden beschrieben.

Zunächst musste jedoch erst noch ein Gehäuse für den gewählten Lautsprecher dimensioniert werden. Wie in Tabelle 5-2 angeführt, besitzt das FRS8-Chassis ein äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen V_{as} von 0,9 Litern und eine Gesamtgüte der Membran Q_{ts} von 1,04. Für die Dimensionierung einer geschlossenen Lautsprecherbox, locker gefüllt mit schalldämmenden Material und einer Ziel-Güte der gesamten Box $Q_{g,G}$ von 1,1 ergibt sich nach der Dimensionierungsformel von Thiele und Small [8] folgendes Volumen V_{gG} für die Lautsprecherbox:

$$V_{\tilde{a},gG} \approx V_{gG} \approx \frac{V_{as}}{1,15 \cdot \left(\frac{Q_{g,gG}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} = \frac{0,9l}{1,15 \cdot \left(\frac{1,1}{1,04}\right)^2 - 1} = 3,1l \quad 5-2$$

Das Gehäuse sollte daher also etwa 3 Liter tatsächlichen inneren Luftraum aufweisen. Zudem empfiehlt die klassische Vorgangsweise nach Thiele-Small für den Lautsprecherboxenbau die Seitenkantenverhältnisse des Innenvolumens z.B. anhand des „zweifachen goldenen Schnitts“ von $0,618 : 1 : 1,618$ zu dimensionieren. Um die Größe des Kompressors in das Boxendesign einfließen zu lassen, wurde eine Breite des Innenvolumens von 15cm entsprechend der Bezugsfläche in Tabelle 3-2 gewählt. Dem goldenen Schnitt nach ergeben sich aus dieser Breite eine Länge von 24,3cm und eine Höhe von 9,3cm, was in Summe einem Volumen von 3,7 Litern entspricht. Da beim Zuschnitt der Platten auf Bestellung keine engeren Schnitte als 10cm Breite möglich waren, wurden die in folgender Tabelle 5-3 angeführten Maße gewählt.

| Außenabmessungen | | | Innenabmessungen | | | Wanddicke | Material |
|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|-----------|----------|
| Länge | Breite | Höhe | Länge | Breite | Höhe | | |
| 27,5cm | 18,2cm | 13,7cm | 24,3cm | 15cm | 10,5cm | 1,6cm | MDF |

Tabelle 5-3: Gewählte Maße für den Bau einer Box für den Visaton FRS8

Damit ergibt sich ein Innenvolumen von 3,8 Litern. Das fertige Produkt dieser Überlegungen ist in Abbildung 5-3 und Abbildung 5-5 angeführt. Die 16mm MDF-Platten wurden dabei ebenso wie bei der großen Kammer mit Holzleim vereint und nicht verschraubt.

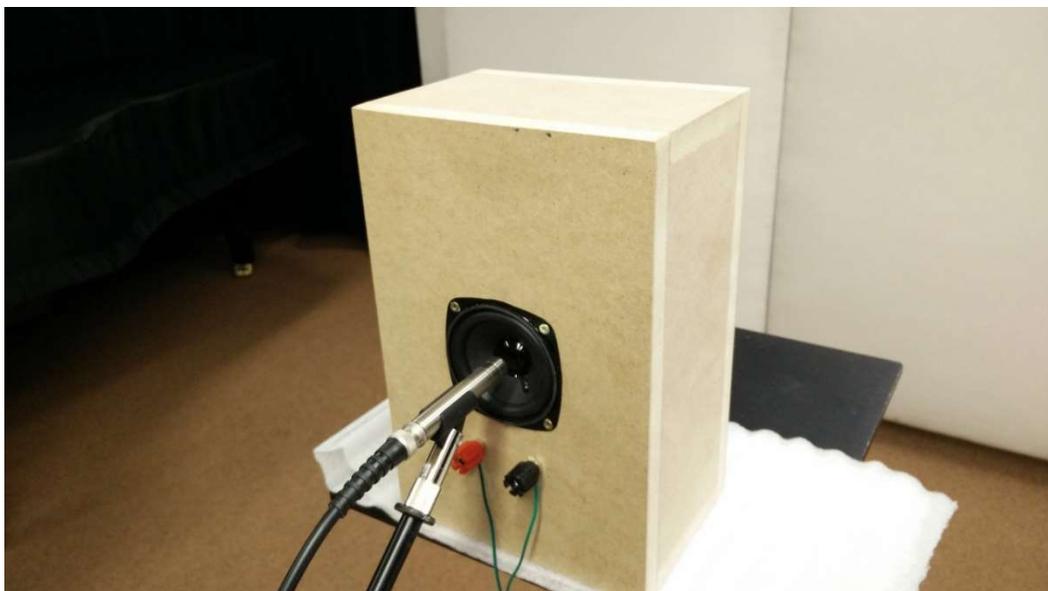


Abbildung 5-5: Fertiges Lautsprechergehäuse bei der Nahfeld-Messung

Im nächsten Schritt folgte die Nachprüfung der Übertragungsfunktion des Lautsprechers. Die Vermessungsstrategie von Lautsprecherboxen sei dazu in aller Kürze beschrieben. In der Lautsprechertechnik behilft man sich ob dem Umstand, dass man vor allem im Privatgebrauch nicht den Luxus einer reflexionsarmen Umgebung als Messsituation anfinden wird, dadurch, dass man die Messung des Lautsprechers in zwei Messungen von je einer Nahfeldmessung

und einer Fernfeldmessung aufteilt. Die Nahfeldmessung des Lautsprechers mit einem geeigneten Druckempfänger-Messmikrofon erfordert lediglich eine einigermaßen ruhige Umgebung, da der Schalldruck im Bereich von einigen wenigen Zentimetern vor der Membran weit über den Pegeln liegt, welche die von den Raumbegrenzungsflächen zurückreflektierten Schallwellen aufweisen. Die resultierende Impulsantwort, bestimmt durch MLS- oder Sweep-Methode zeigt deshalb auch in gewöhnlichen Wohnräumen ein akkurates Freifeldmessergebnis an [9].

Allerdings kann diese Messung nur bis zu einer oberen Grenzfrequenz f_{oG} von $k \cdot r_M = 1$ beurteilt werden! Für den FRS8 mit seiner 8cm-Membran entspräche dies theoretisch einer Frequenz von etwa 1,35kHz. Abbildung 5-6 zeigt den auf diese Weise im TU-Studio bestimmten Frequenzgang des FRS8 durch die Nahfeldmessung, welcher die Angabe des Herstellers bestätigt.

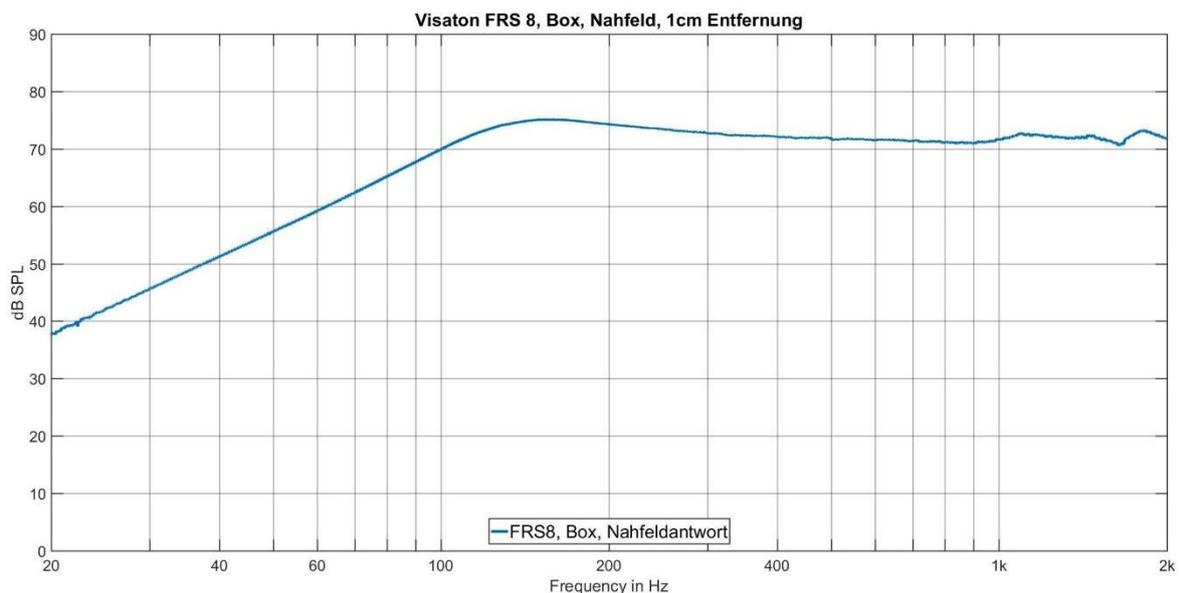


Abbildung 5-6: Überprüfung des Visaton FRS8, Nahfeldmessung

Für die Integration des Lautsprechers in eine der Wandflächen war es lediglich erforderlich einen identischen Messkammerdeckel anzufertigen und mit einer Lochsäge an einer geeigneten Stelle ein passendes Durchführungsloch zu bohren. Um weiterhin alle fünf Hauptmikrofonpositionen der Messungen wie gehabt beibehalten zu können, wurde für den ersten dieser zusätzlichen Deckel davon abgesehen, den Lautsprecher in die Mitte der Fläche zu positionieren.

Auch bestand die Sorge durch eine Positionierung zu nahe neben dem Mikrofon ungewollte Körperschallkopplungseffekte zu provozieren. Stattdessen wurde ein Ort gewählt, dessen Mittelpunkt von den nächstgelegenen Wandflächen und der zentrierten Mikrofonposition etwa gleich weit entfernt lag. Dies entspricht in etwa einer vierteldiagonalen Positionierung. Der Deckel samt dem Lautsprecher ist in Abbildung 5-7 dargestellt.



Abbildung 5-7: Ansicht des ersten Deckels mit dem eingebauten Lautsprecher bei der Nahfeldmessung

Bisher haben wir mit dem Kompressor in der Kammer aber nur Messungen betrachtet, bei denen der Bezugsquader zentriert in der Mitte der Kammer platziert wurde. Geht man von den Ansätzen in der Norm EN ISO 3744 aus, wird in diesem Fall im Freifeld das akustische Zentrum vereinfacht in der Mitte der Bezugsquaderbodenfläche angenommen. Eine entsprechende Lautsprecherposition liegt demnach genau im Zentrum der Boden- bzw. Deckelfläche.

Zum Zwecke einer dahingehenden Untersuchung musste also ein weiterer Deckel angefertigt werden, bei dem statt der Mikrofondurchführung Nummer 5 ein zentrales 7,5cm Loch für den Visaton FRS8 ausgebohrt wurde. Der Aufbau der Deckelplatte und die Lackierung der Innenoberfläche erfolgte jedoch identisch zum Bau der eigentlichen Kammer. Das Ergebnis ist in Abbildung 5-8 dargestellt.



Abbildung 5-8: Der zweite Lautsprecherdeckel für die Messkammer mit zentraler Lautsprecherposition

Eine dritte Integrationsmöglichkeit sah vor, den Lautsprecher in eine der Kammerecken zu verlegen. Ideal wäre in diesem Fall natürlich die Positionierung des Lautspechters direkt in der Ecke, wie es Abbildung 5-9 illustriert, um später auch raumdiagonale Messungen von einer oberen zu einer unteren Ecke durchführen zu können.

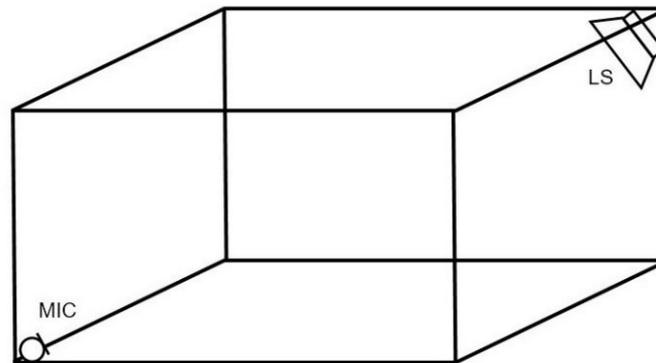


Abbildung 5-9: Simplifizierte Veranschaulichung der Eckenlautsprechermessung

Eine solche Installation eines gewöhnlichen Lautsprecherchassis ist aber eher schwierig zu realisieren. Das Chassis einfach in eine Ecke zu stellen hat natürlich keinen praktischen Sinn, weder frei noch eng gekapselt. Eine schräge zusätzliche Wand einzuziehen, in die der Lautsprecher eingesetzt werden kann, bedingt den Bau einer weiteren Kammer, oder die Modifikation der vorhandenen. Da die Messkammer auch für diesen Zweck nicht maßgeblich verändert werden sollte, musste stattdessen die Eckenposition durch Ausschneiden der Lautsprecherdurchführung so nahe als möglich in eine der Ecken approximiert werden.

Anstatt schräg auf das Zentrum der Kammer gerichtet sitzt der Visaton FRS8 also weiterhin in der Ebene der inneren Deckelfläche, jedoch berührt er die angrenzenden Wandflächen, wie Abbildung 5-10 verdeutlichen soll.

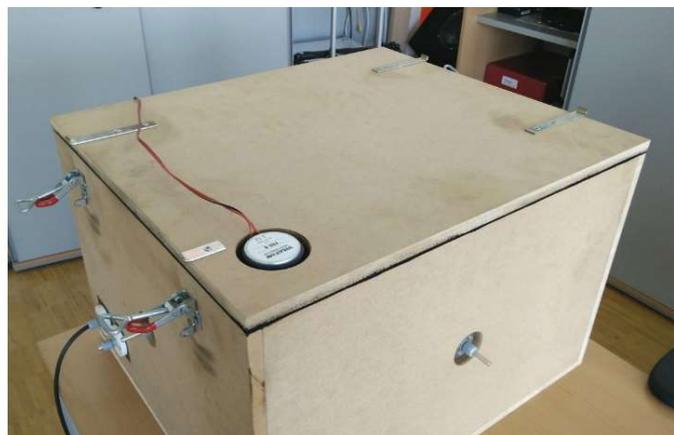


Abbildung 5-10: 3D-Modell-Representation und Foto des Eckenlautspechters

Der Approximation kommt zu Gute, dass wir für den Tiefmitteltonbereich hauptsächlich den omnidirektional abgestrahlten Frequenzbereich des Lautsprechers nutzen. Näherungsweise können wir daher von Achtel-Kugelwellenausbreitung ausgehen, die aus einer der Ecken abgestrahlt wird.

Mit fertig im Deckel installiertem Lautsprecher (siehe Abbildung 5-7) lieferte eine Nahfeldmessung mit dem gleichen Messsetup wie für den Lautsprecher im Gehäuse den Nahfeld-Frequenzgang in Abbildung 5-11. Für diese Messung wurde der Deckel verkehrt auf der Messkammer platziert. Die Gummidichtung der Kammer, in Verbindung mit dem Gewicht des Deckels bot neben den weit größeren Abmessungen der Deckelplatte im Vergleich zum Membrandurchmesser zusätzliche Entkopplung zwischen den Lufträumen vor und hinter der Membran. Wie in Abbildung 5-11 auch gut zu sehen ist, äußert sich der Betrieb des Lautsprechers im Kammerdeckel durch eine etwas optimierte Tieftonwiedergabe im Vergleich zur Lautsprecherbox.

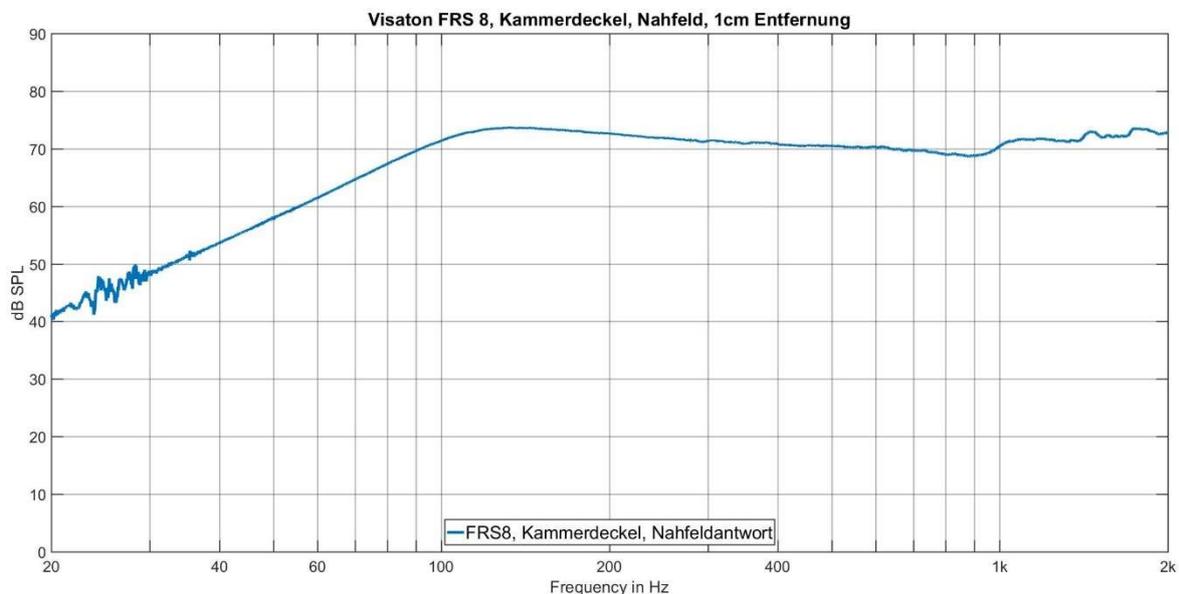


Abbildung 5-11: Nahfeldmessung des Lautsprechers im Deckel zur Überprüfung

Dabei ist anzumerken, dass aus praktischen Gründen für den Deckel ein weiteres Exemplar des Visaton FRS8 gekauft wurde. Inwiefern sich dessen Frequenzgang vom ersten Exemplar in der Box unterscheidet, blieb dabei offen. Es ist jedoch eindeutig zu erkennen, dass sich die Kurven stark ähneln und denselben „Buckel“ zwischen 100Hz und 400Hz aufweisen.

Es könnte nun noch argumentiert werden, dass das eingeschlossene Luftvolumen in der Kammer eine relevante akustische Feder darstellt. Damit würde die Belastung der Membranauslenkung sich von jener zur Außenwelt hin unterscheiden. Das Chassis des FRS8 besitzt ein äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen von 0,9 Litern. Die Messkammer hingegen fasst leer etwa 90 Liter. Wir sprechen also von einem Feder-Verhältnis von 1:100. Der Betrieb des Lautsprechers wird daher, wenn überhaupt, nur geringfügig gestört.

5.4 Analyse des Tieftonbereichs

Die ersten Untersuchungen erfolgten mit dem Lautsprecher eingebaut im geschlossenen Gehäuse, welches für die Messung mittig am Boden der Messkammer positioniert war. Um eventuelle Körperschallkopplungen zu vermeiden, wurden analog zu den Gummidämpfern des Kompressors kleine 2cm^3 Moosgummiunterlagen zurechtgeschnitten und auf dem Boden der Messkammer platziert. Das Lautsprechergehäuse fand hernach auf diesen Dämpfern aufgelegt Platz, wobei die Lautsprecherseite dabei nach oben gerichtet war. Die dafür eigens geschaffene abgedichtete Kabeldurchführung bot die Möglichkeit, das Anschlusskabel des Lautspechters in die Messkammer einzufädeln. Alle Bezeichnungen der Mikrofone in den folgenden Untersuchungen halten sich an die Konvention, wie sie in Abbildung 2-7 in Kapitel 2.3 beschrieben ist.

Abbildung 5-12 zeigt nun die FFT-Analyse von sequentiellen Messungen an allen fünf Mikrofonhauptpositionen mit unveränderter Ausgangsleistung des Lautsprecherverstärkers und unveränderter Position des Lautspechters. Die Impulsantwort wurde hierbei durch einen exponentiellen Sweep mit 10 Sekunden Dauer bestimmt und durch eine aufgenommene Nahfeldmessung der Lautsprecherbox, wie jene aus Abbildung 5-6, von deren Einflüssen entzerrt. Die Analyse beschränkt sich, wie zu sehen ist, auf 100Hz bis 400Hz, jenen Bereich bis einschließlich der ersten Eigenmoden der Kammer. Wie schon aus den bisherigen Ergebnissen und aus der Theorie ermittelt, zeigt auch Abbildung 5-12 unmittelbar den Unterschied zwischen den, in Kapitel 4.1 zuvor schon als „Druckkammerübergangs-“ und „Modal-Bereich“ bezeichneten Frequenzregionen, sowie deren Grenzbereich zueinander.

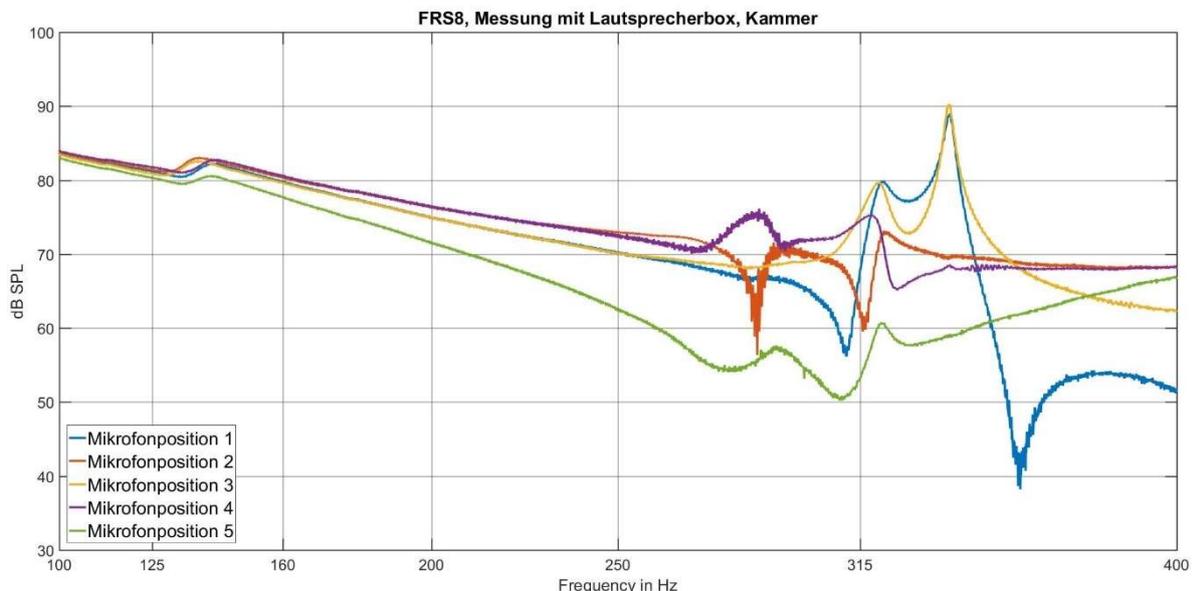


Abbildung 5-12: Gegenüberstellung aller Mikrofone der Lautsprecherboxmessung, Lautsprecherfrequenzgang entzerrt

Den Kurvenverläufen zufolge dürfte nur der Bereich bis etwa 270Hz als Druckkammerübergangsbereich angesehen werden. Interessant sind hier folgende Beobachtungen:

Zunächst fällt auf, dass der prinzipielle Verlauf aller fünf Kurven bis ca. 270Hz mit etwa 20dB pro Oktave abfällt. Der Abfall erreicht bei etwa 140Hz einen Knick, die Kurven vollführen eine kleine Welle und stabilisieren sich zu einem sehr einheitlichen Restverlauf am unteren Ende des Messbereichs. Weiters liegen im Druckkammerübergangsbereich die Kurven von gegenüberliegenden Mikrofonpositionen, also zum Beispiel Mikrofon 1 und Mikrofon 3, recht eindeutig übereinander, während benachbarte Positionen sich leicht unterscheiden. Die Kurve von Mikrofon 5 weist bei 270Hz über 10dB SPL weniger Pegel auf als alle anderen vier Kurven und misst im Druckkammerübergangsbereich auch insgesamt den geringsten Schalldruck.

Auch der Grenzbereich zwischen dem Druckkammerübergangs- und dem Modal-Bereich wirft Fragen auf. Laut der Theorie sollte die erste Mode ja erst bei etwa 306Hz auftreten. Räumt man eine gewisse Unsicherheit ein, da das Lautsprechergehäuse einen nicht zu unterschätzenden Teil des Kammervolumens einnimmt, könnte die Frequenz der ersten Mode durch Anwesenheit der Box sogar auf 320Hz angestiegen sein. Allerdings wird diese Spitze hauptsächlich von Mikrofon 1 und 3 dargestellt, welche sich auf den längeren Wandseiten befinden. Gerade diese Mikrofone sollten die erste Mode weniger ausgeprägt wiedergeben als Mikrofon 2 und 4, da die erste Mode immer entlang der längsten Raumkante auftritt. Diese Überlegungen führen zum Schluss, dass Abbildung 5-12 im Vergleich zu den berechneten Modenfrequenzen in Tabelle 4-1 nicht die erwarteten Verläufe zeigt. Der Grund dafür liegt vermutlich zum einen an der Veränderung des Modalbereichs durch Anwesenheit der Box selbst und zum anderen möglicherweise auch an der Lautsprecherposition und deren Nähe zu den Mikrofonen.

Die folgenden Analysen versuchen diese Ergebnisse näher zu durchleuchten. Dafür wurde die Messkammer mit dem Lautsprecher einmal komplett leer und einmal mit dem Kompressor als rein passives, „akustisches Hindernis“ untersucht. Zu diesem Zweck musste lediglich die Lautsprecherbox entfernt und der Deckel mit dem eingesetzten Deckenlautsprecher in Vierteldiagonalposition verwendet werden. Abbildung 5-13 zeigt zunächst die Übertragungskurven der einzelnen Mikrofone im Falle der leeren Messkammer. Im Vergleich zu Tabelle 4-1 finden sich hier weit mehr Übereinstimmungen mit der Theorie, was zumindest die Möglichkeit einräumt, dass mit der Deckenlautsprechermessung der Leerraumzustand messtechnisch besser erfasst werden kann. Es lässt sich auch sehr gut erkennen, dass die Mikrofone in den Positionen 2 und 4, welche die Kammer in Längsrichtung abtasten, die erste Mode 1-0-0 sehr gut sichtbar abbilden, die Mikrofone in den Positionen 1 und 3 jedoch nicht, da sie eben, wie zuvor beschrieben, etwa im Knotenpunkt der stehenden Welle liegen. Umgekehrt zeigen die Mikrofone 1 und 3 die breitseitige Mode 0-1-0, die für die Mikrofone 2 und 4 nicht erfassbar ist.

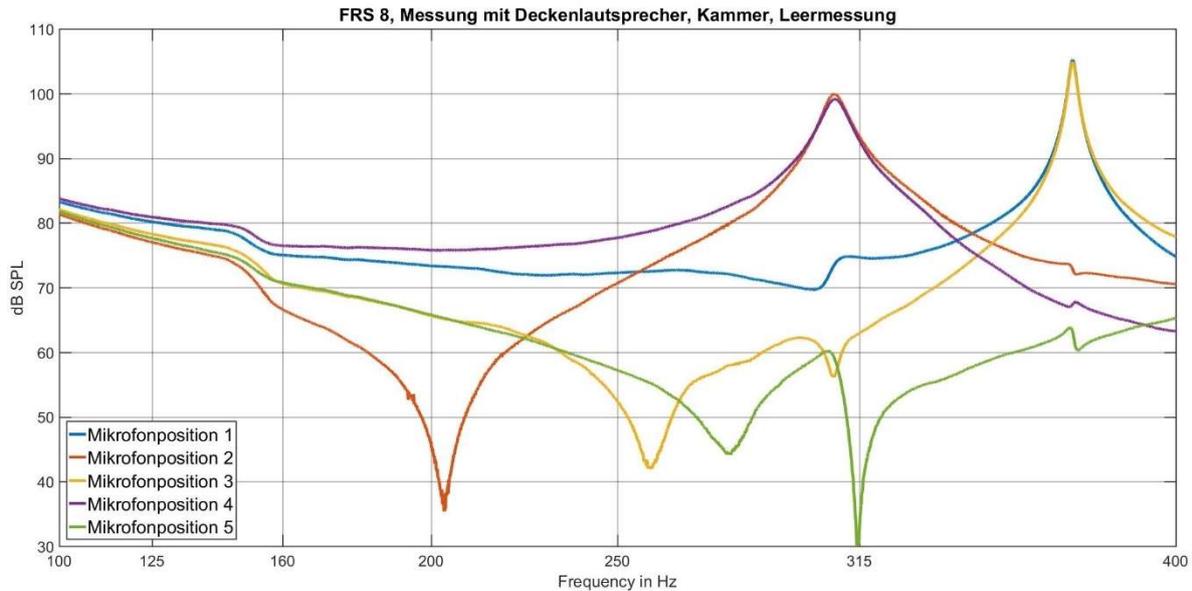


Abbildung 5-13: Gegenüberstellung aller Mikrofone, Messung mit dem in den Deckel integrierten Lautsprecher in Vierteldiagonalposition, Lautsprecher entzerrt

Die Kurven zeigen neben den gut sichtbaren Modenfrequenzen jedoch auch ein drastisch verändertes Bild des Druckkammerübergangsbereichs mit tiefen Einbrüchen von 30dB SPL. Da jedoch jeweils gegenüberliegende Mikrofonpositionen einerseits einen Einbruch und andererseits keinen Einbruch und auch keine Resonanz aufweisen, verschärft sich der Verdacht, dass die Effekte von der Lautsprecherposition abhängen, welche im Gegensatz zur vorherigen Untersuchung mit der Lautsprecherbox nicht symmetrisch ist. Abbildung 5-14 zeigt eine Wiederholung dieser Messung der leeren Kammer mit dem Deckel um 180° gewendet. Der Lautsprecher lag also einfach in der gegenüberliegenden Vierteldiagonale im Vergleich zu davor.

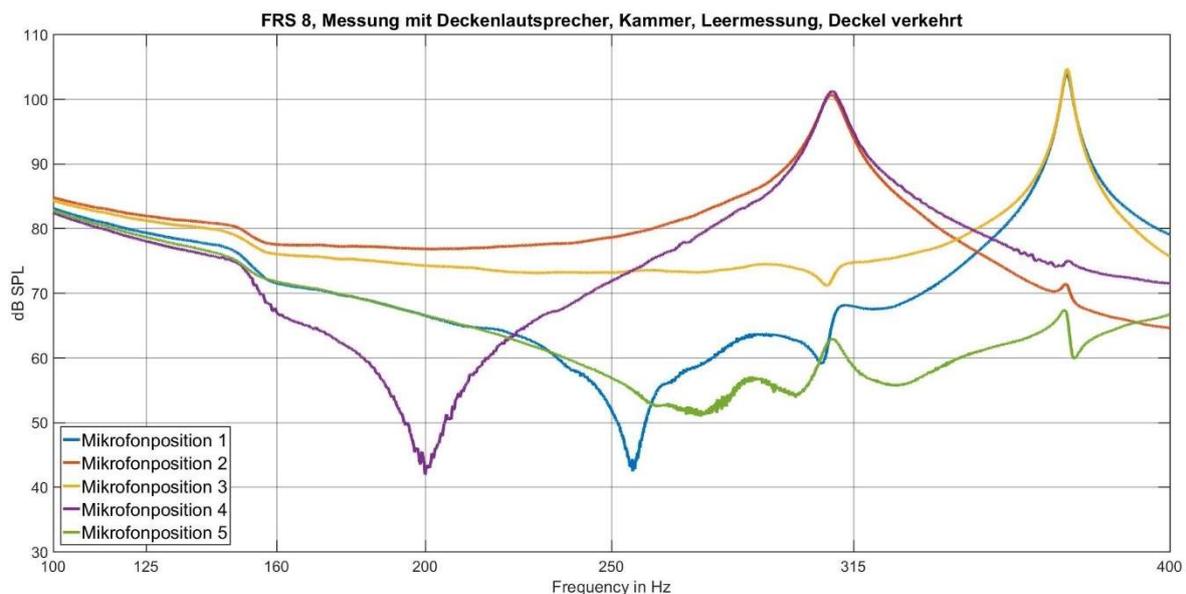


Abbildung 5-14: Gegenüberstellung aller Mikrofone, Messung mit dem in den Deckel integrierten Lautsprecher in Vierteldiagonalposition, LS entzerrt, Deckel gewendet

Bis auf eine Abweichung der Kurven des Deckenmikrofons, sieht man hier sehr gut, dass die Kurvenverläufe ein sehr ähnliches Bild zeigen, jedoch die Mikrofon-signale dem Positionswechsel des Lautsprechers entsprechend ebenfalls getauscht sind. So existiert der 200Hz-Einbruch hier in Mikrofon-signal 4, während er ursprünglich in Mikrofon-signal 2, dem gegenüberliegenden Mikrofon, registriert wurde.

Wie in folgender Abbildung 5-15 zu erkennen ist, mitteln sich diese Einbrüche aber bis zu den prägnanten Moden bei 300Hz zu einem ähnlichen Bild, wie es schon bei der Lautsprecherbox zu sehen war, heraus. Ebenso ist in Abbildung 5-15 der Vergleich der über alle Positionen gemittelten Leerraummessung zu den Messungen mit abgeschalteten, aber in der Kammer präsenten und für eine Messung mittig aufgestellten Kompressor gegenübergestellt.

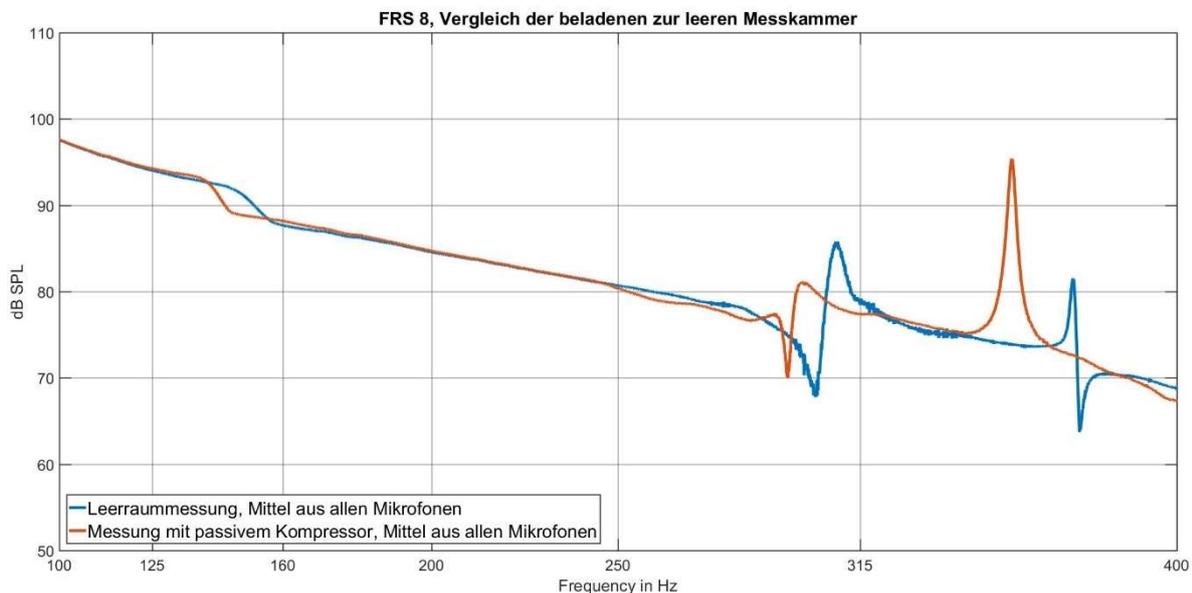


Abbildung 5-15: Vergleich der über alle Mikrofone gemittelten Übertragungskurven des leeren und mit dem passiven Kompressor belegten Raums, Lautsprecher entzerrt

Dabei fällt auf, dass sich das Modenbild im Falle eines anwesenden Messobjekts verschiebt. Nachdem sonst keine Änderungen am Experiment vorgenommen wurden, muss der passive Kompressor für das veränderte Bild verantwortlich sein.

Erfreulich ist in Abbildung 5-15 wiederum das tieffrequente Bild der gemittelten Kurven, bei der die Anwesenheit des Kompressors nur marginale Unterschiede zu verursachen scheint. Ließe sich dieser Verlauf in weiteren Versuchen bestätigen, könnte man zumindest zwischen 100Hz und 250Hz für die ersten vier oder fünf Terzbänder eine statische Anhebung herausrechnen.

Eine Annahme dieser Art setzt jedoch voraus, dass das Schalldruckverhalten im Druckkammerübergangsbereich eine lineare Dynamik besitzt. Daher wurde folgende Überprüfung durchgeführt. Abbildung 5-16 zeigt die Kurve einer Messung bei Mikrofonposition 1. Die

oberste Kurve stellt dabei eine Referenzmessung mit frei gewählter Lautstärke des Lautsprechers dar. Bei den Kurven darunter wurde nun die exakt gleiche Messung gestartet, jedoch zuvor in einem Fall der digitale Output-Regler des RME-Interfaces um 10dB und im zweiten Fall um 20dB gesenkt. Die Kurven zeigen einen um je exakt 10dB SPL versetzten, parallelen Verlauf. Die Dynamik ist also offenbar linear.

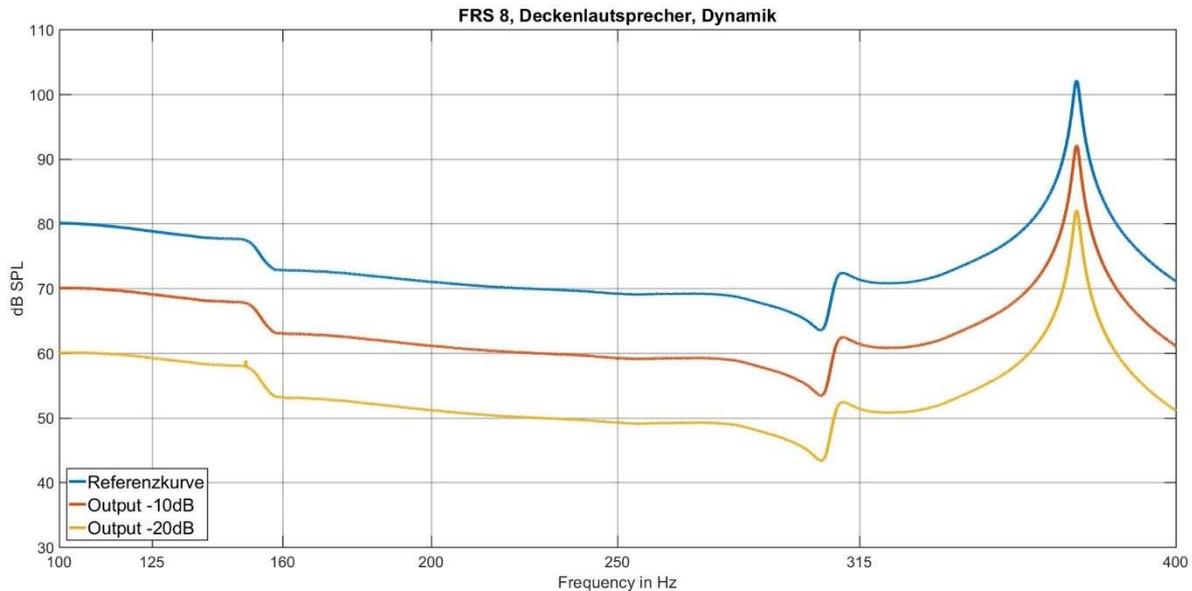


Abbildung 5-16: Dynamik-Überprüfung des Schalldrucks in der Messkammer, ohne Lautsprecherentzerrung

Wie aus den Messungen sehr deutlich hervorgeht, liefert die Messkammer unter dem Modalbereich eine Form von Druckanstieg bei sinkender Frequenz. Die Moden im Modalbereich verschieben sich dabei leicht abhängig von den Objekten in der Kammer, während im Mittel aller aufgezeichneten Mikrofonsignale der Druckkammerübergangsbereich davon unbeeinflusst bleibt, wie Abbildung 5-15 vermuten lässt.

Die Untersuchungen konnten jedoch auch bestätigen, dass die wichtigste Eigenschaft der Druckkammer, nämlich eine statische Druckanhebungen in jedem Punkt des betrachteten Volumens im Druckkammerübergangsbereich nicht gegeben ist. Der Logik nach müsste im Druckkammer-Fall ein Teil des gemessenen Spektrums die um eine statische Anhebung verstärkte Freifeldantwort der Quelle zeigen. Zwar fallen die Kurven sowohl bei den Messungen mit der Lautsprecherbox, als auch jenen mit dem Deckenlautsprecher erst im Bereich zwischen 160Hz und 100Hz zusammen, der gemessene Druck steigt von dort aus aber mit sinkender Frequenz weiter an. In der Theorie der Raumakustik lautet die allgemeine Zustandsgleichung für Gase:

$$p \cdot V = m \cdot \frac{k}{\mu} T \quad 5-3$$

Wir können uns daraus also ableiten, dass wir in einem kleineren Kammervolumen V noch höhere Drücke p zu erwarten haben. Was die Formel nicht unmittelbar zeigt ist, bei welcher Frequenz die Druckerhöhung wie stark ausgeprägt ist. Durch die Resultate der Lautsprechermessungen können wir dies jedoch auch empirisch abschätzen. In Abbildung 4-11 zeichnete sich aus den Differenzpegeln von Freifeld- und Kammermessung schon eine Art Anstieg zu tiefen Frequenzen in diesem Bereich ab. Folgende Methode erwies sich als vielversprechend:

Da in der Lautsprechertechnik manchmal eine Nahfeldmessung mit einer Fernfeldmessung kombiniert wird, die sich durch den Messabstand erheblich im Pegel unterscheidet, gibt es eine Umrechnungsformel, um die Nahfeldmessung pegelhalber aus dem Nahfeld auf das Fernfeld im Abstand d_{ref} zu skalieren [9]. Da wir mit der vorhandenen Lautsprecherbox zumindest für tiefe Frequenzen eine omnidirektionale Abstrahlung annehmen, berechnet sich der Skalierungsfaktor im Abstand d_{ref} mit Formel 5-4 zu:

$$Scale_{NF,FF} = 20 \cdot \log \left(\frac{r_M}{4 \cdot d_{\text{ref}}} \right) \quad 5-4$$

Beim Visaton FRS8 ist ein Membranradius von 4cm gegeben. Der Referenzabstand kann durch die durchschnittliche Entfernung der Hauptmikrofonpositionen von der Quelle in der Kammer abgeschätzt werden. Diese beträgt etwa 25cm. Durch Einsetzen in die Formel erhält man daraus einen Faktor von etwa -28dB. Der Pegel der Nahfeldmessung des FRS8 müsste also um diesen Faktor abgesenkt werden. Abbildung 5-17 zeigt die Kurve einer schon pegelkorrigierten Nahfeldmessung der Lautsprecherbox dem gemittelten Messergebnis aus allen fünf Hauptmikrofonpositionen gegenübergestellt.

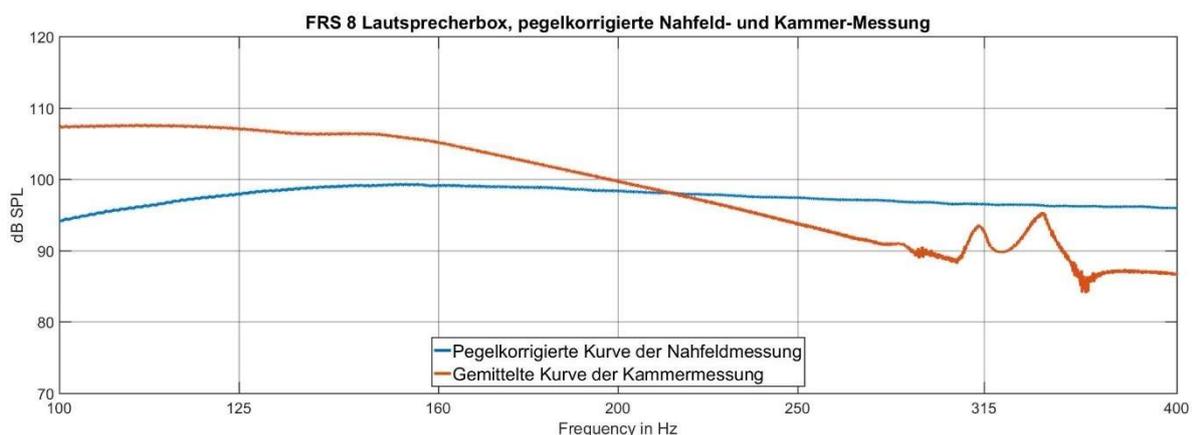


Abbildung 5-17: Schalldruckpegelverläufe der Nahfeld- versus Kammermessung, Lautsprecherbox

Die Pegeldifferenz von pegelkorrigiertem Terzbandspektrum des Lautsprechers und der über alle 5 Mikrofonpositionen gemittelten Messung in der Kammer ist nun in Abbildung 5-18 angeführt. Sofort erkennbar ist ein näherungsweise kontinuierlicher Differenzpegelanstieg zu tiefen Frequenzen hin, dessen Pegelwerte auch im Bereich der Messergebnisse von Abbildung 4-11

liegen. Legt man eine Ausgleichsgerade durch die Messwerte, lässt sich etwa von tiefen zu hohen Frequenzen hin ein Pegelabfall von -12dB pro Oktave verzeichnen. Dies entspricht einer Funktion von $1/f^2$.

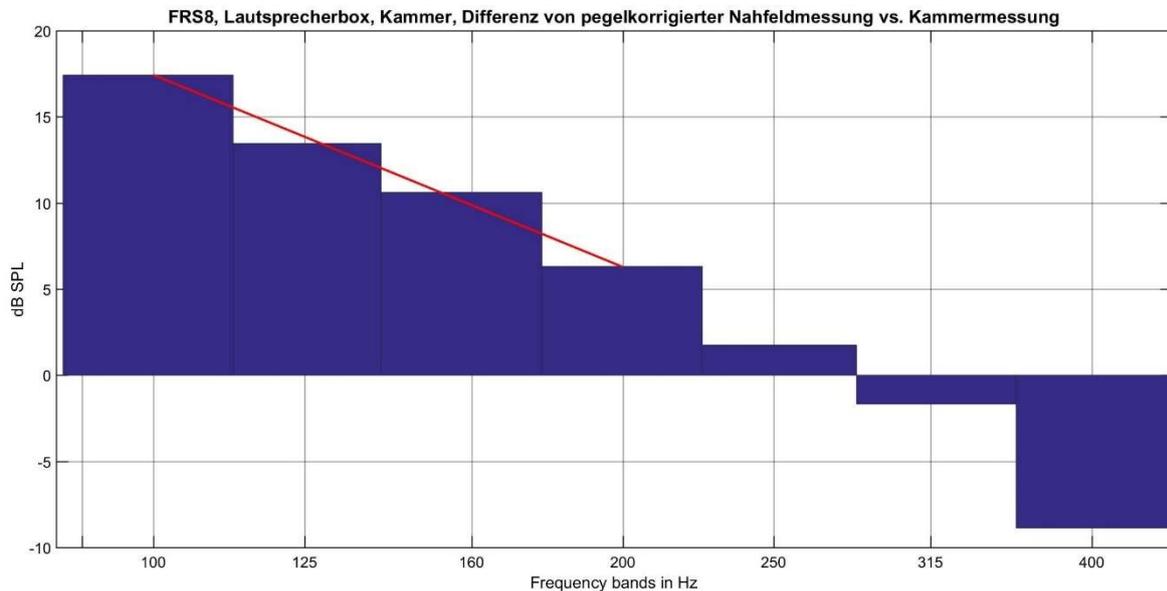


Abbildung 5-18: Pegeldifferenzen zwischen pegelkorrigierter Nahfeld- und Kammermessung der Lautsprecherbox

Die Pegel in Abbildung 5-18 oberhalb von 200Hz unterscheiden sich jedoch gänzlich von jenen, die in Abbildung 4-11 aufgenommen wurden. Tabelle 5-4 enthält die Pegelwerte aus Abbildung 5-18, sowie die Werte der Differenzen der Kompressor-Messung aus Abbildung 4-11 bis zum 250Hz-Terzband.

| | 100Hz | 125Hz | 160Hz | 200Hz | 250Hz |
|-----------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Kompressor | 17dB | 14,5dB | 11,3dB | 5,1dB | 7,2dB |
| Lautsprecherbox | 17,4dB | 13,4dB | 10,6dB | 6,3dB | 1,7dB |

Tabelle 5-4: Pegeldifferenzen (Freifeld versus Kammer) der Kompressor- und der Lautsprecherbox-Messung

Wie wir in Abbildung 5-12 schon beobachtet haben, tauchen bei der Lautsprecherboxmessung spektrale Besonderheiten, vor allem in Form von scharfen Pegelbrüchen auf, wo der Theorie der Raumakustik zufolge keine spektralen Extrema auftauchen sollten. So zum Beispiel die Welligkeiten bei 290Hz in Abbildung 5-12. Dieses Phänomen tritt unter der ersten Modenfrequenz von 306Hz auf.

Für die untersten 4 Frequenzbänder der Auswertung ist mit den oben bestimmten Pegeldifferenzen eine Korrekturmethode eingeräumt und der „Druckkammerübergangsbereich“ wurde als Übergang zwischen tatsächlicher Druckkammer und Modalbereich bestätigt. Hinzu kommt,

dass für diesen Bereich empirisch eine annähernd lineare Druckerhöhung bei sinkender Frequenz identifiziert wurde. Die Signifikanz und Richtigkeit dieser Aussage müsste in weiteren Experimenten noch untersucht werden.

5.5 Analyse des Modalbereichs

Der Modalbereich stellt für die Analyse der Kammer die größte Herausforderung dar. Wie Abbildung 5-12 schon vermuten ließ, verursachen die Moden der Kammer Resonanzspitzen und Einbrüche, deren Pegel um mehrere 10dB SPL auseinanderliegen. Dies ist an sich nichts Außergewöhnliches. In Hallräumen mit Volumen von etwa 200m³ begegnet man in tieferen Frequenzbereichen, abhängig von der Raumgeometrie, ähnlichen Verhältnissen, jedoch verbieten die Regeln der Normen für Schallemissions- und Schallabsorptionsmessungen im Hallraum auch die Erfassung von Ergebnissen in diesem Frequenzbereich.

Um den Modalbereich zu untersuchen, ist es nötig, das Auftreten der Resonanzen in den Übertragungsfunktionen aller Mikrofonpositionen genau zu durchleuchten. Im vorangegangenen Kapitelabschnitt konnte ein Ansatz für die Korrektur der Kammerwirkung auf das Messergebnis von 100Hz bis etwa 200Hz aufgestellt werden. In Kapitel 5.7 wird der Frequenzabschnitt oberhalb 2kHz besprochen. Damit liegt der zu untersuchende Bereich also zwischen 200Hz und 2kHz. Betrachten wir nun die aufgenommenen Kurven des Deckenlautsprechers in der Kammer (Abbildung 5-13) in diesem zu hohen Frequenzen hin erweiterten Bereich und mit linearer Frequenzachse in folgender Abbildung 5-19. Zum Vergleich mit den berechneten Moden in Tabelle 4-1 sind die entsprechenden Spitzen hier mit den jeweiligen Modennummern vermerkt.

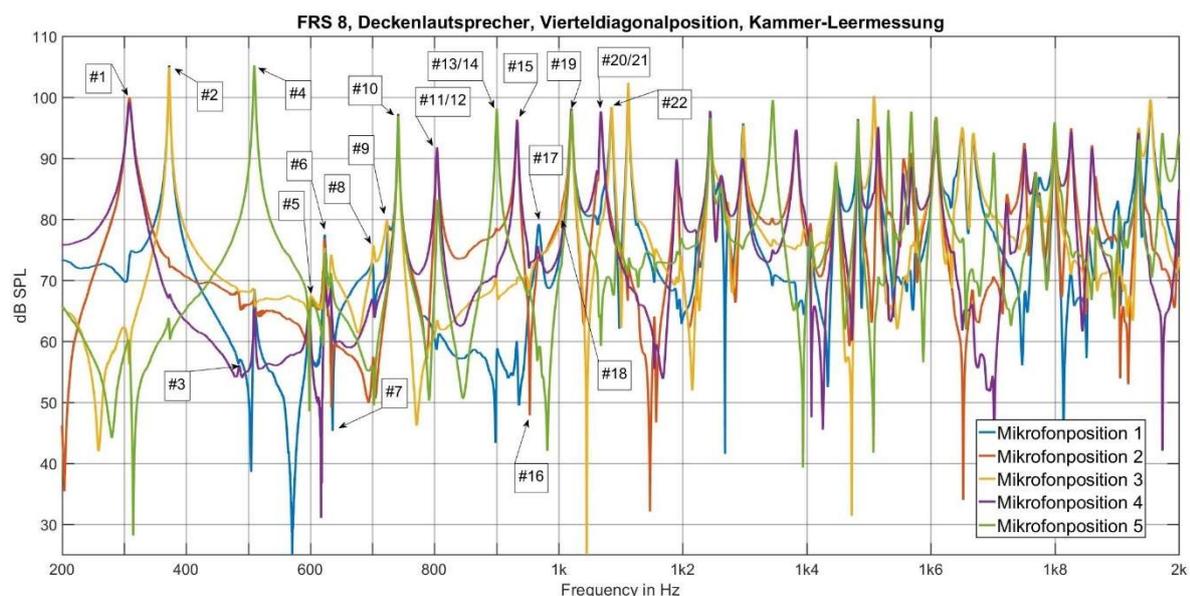


Abbildung 5-19: Bestimmung der Modenfrequenzen bei der Deckenlautsprechermessung in der Vierteldiagonalposition

Tabelle 5-5 zeigt nun die in der FFT gemessenen Frequenzen der in Abbildung 5-19 eingezeichneten Modenummern. Wie sich im Vergleich zu Tabelle 4-1 zeigt, unterscheiden sich die Frequenzen voneinander, allerdings weisen alle aus der Messung aufgenommenen Punkte ausschließlich einen um einige Hertz höheren Wert auf. Bei der Berechnung der Moden in Tabelle 4-1 wurde, wie dort schon erwähnt, eine Schallgeschwindigkeit von 343m/s eingesetzt. Das entspricht dem Pauschalwert bei einer Raumtemperatur von 20°C.

| Mode | $f_{gemessen}$ | $f_{berechnet,20^{\circ}C}$ | Mode | $f_{gemessen}$ | $f_{berechnet,20^{\circ}C}$ |
|------|----------------|-----------------------------|------|----------------|-----------------------------|
| #1 | 308Hz | 306Hz | #12 | 804Hz | 793Hz |
| #2 | 372Hz | 364Hz | #13 | 900Hz | 873Hz |
| #3 | 485Hz | 476Hz | #14 | 900Hz | 887Hz |
| #4 | 509Hz | 504Hz | #15 | 933Hz | 919Hz |
| #5 | 601Hz | 590Hz | #16 | 953Hz | 938Hz |
| #6 | 623Hz | 612Hz | #17 | 968Hz | 953Hz |
| #7 | 633Hz | 622Hz | #18 | 1004Hz | 989Hz |
| #8 | 704Hz | 693Hz | #19 | 1025Hz | 1009Hz |
| #9 | 723Hz | 712Hz | #20 | 1068Hz | 1048Hz |
| #10 | 741Hz | 729Hz | #21 | 1086Hz | 1054Hz |
| #11 | 804Hz | 791Hz | #22 | 1086Hz | 1073Hz |

Tabelle 5-5: Vergleich der gemessenen Modenfrequenzen zu den bei Raumtemperatur berechneten Moden in Tabelle 4-1

Die gemessenen Modenfrequenzen nähern sich mit Berücksichtigung der herrschenden Temperaturen während der Kammermessungen, welche in Tabelle 5-6 aufgelistet sind, sehr nahe an die berechneten Moden bei Raumtemperatur an. Ungeklärt bleiben jedoch noch viele weitere Effekte in Abbildung 5-19. Und es sind nicht nur die Einbrüche vor den ersten Moden bei 203Hz, 260Hz und 280Hz sondern auch solche Ausreißer an Frequenzen, die zwischen den berechneten Modenfrequenzen liegen. Studiert man die Abbildung genauer, so lässt sich auch erkennen, dass ein Großteil der beschrifteten Moden nur Resonanzspitzen betrifft, während es sich bei den unbekanntem Effekten ausschließlich um Einbrüche zu handeln scheint.

Um weitere Aussagen über die Einflüsse des Lautsprechers auf das Modenbild treffen zu können, mussten im Weiteren andere Mikrofon- und Quellenpositionen getestet werden. Da nicht in Frage kam, lediglich auf Verdacht, weitere Mikrofondurchführungen an ausgewählten Orten auszubohren, bot sich stattdessen an, die zusätzliche Kabeldurchführung zu benutzen und das einzelne Mikrofon mit Klebeband in der Kammer zu positionieren.

Die Möglichkeit, ein Mikrofon auf diese Weise an quasi jeder möglichen Stelle an den Wandflächen, dem Deckel und dem Boden anbringen zu können, ermöglichte folgende Messreihe: in äquidistanten Schritten sollte einmal von einer Raumecke am Boden entlang diagonal zur gegenüberliegenden Ecke und einmal in Längsrichtung der längsten Wandkante entlang mittig in jeweils 10 Positionen je eine Übertragungsfunktion mit dem Deckenlautsprecher aufgenommen werden. Die Position „Mitte“ erwies sich dabei als relativ wenig informativ und wurde zur besseren Übersicht der folgenden Diagramme ignoriert. Abbildung 5-20 stellt diese Messreihe schematisch dar.

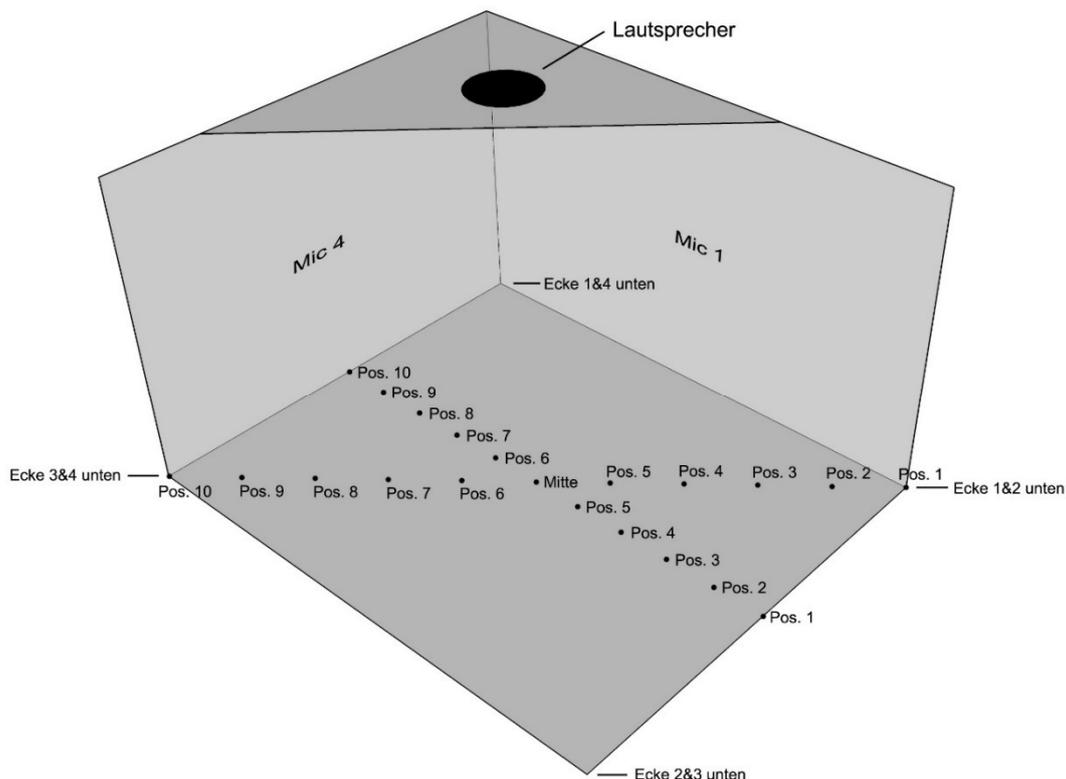


Abbildung 5-20: Schematische Darstellung der Diagonal- und Längsmessreihen

Die Abbildung führt auch eine fortan geltende Bezeichnung der Ecken ein. Jene Ecke am Boden der Kammer, in dessen angrenzenden Wandflächen die Mikrofone 1 und 4 sitzen, wird mit „Ecke 1&4 unten“ betitelt. Die anderen Ecken sind den restlichen Mikrofonpaarungen entsprechend reihum analog dazu beschriftet.

Abbildung 5-21 zeigt eine Fotoaufnahme der Markierungen in der leeren Kammer. Da in Anbetracht der Ergebnisse aus Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14 auch für die neu gewählten Mikrofonpositionen Einflüsse der Lautsprecherposition zu erwarten waren, wurden die Messreihen längs und diagonal auch für alle Positionen mit einem gewendeten Deckel durchgeführt. Wieder sollte damit untersucht werden, ob sich die auftauchenden Effekte mit einer verkehrten Anordnung auch spiegelverkehrt feststellen lassen können. Zunächst wurde die Messreihe mittig entlang der Längsseite betrachtet, wie sie in Abbildung 5-20 dargestellt wird.



Abbildung 5-21: Markierungen in der Messkammer für die Messreihen

Abbildung 5-22 fasst alle Messungen dieser Messreihe in einem Diagramm zusammen. Da die dargestellten Kurven abseits der Moden sehr differenzierte Verläufe aufweisen, beschränken wir uns für eine bessere Übersicht auf einen Frequenzbereich von 200Hz bis 1kHz. Auch bei dieser Messreihe scheinen sofort tiefe Pegelbrüche auf, die sich vor allem auf jene Positionen auswirken, welche sich in der, dem Lautsprecher näher gelegenen Kammerhälfte befinden.

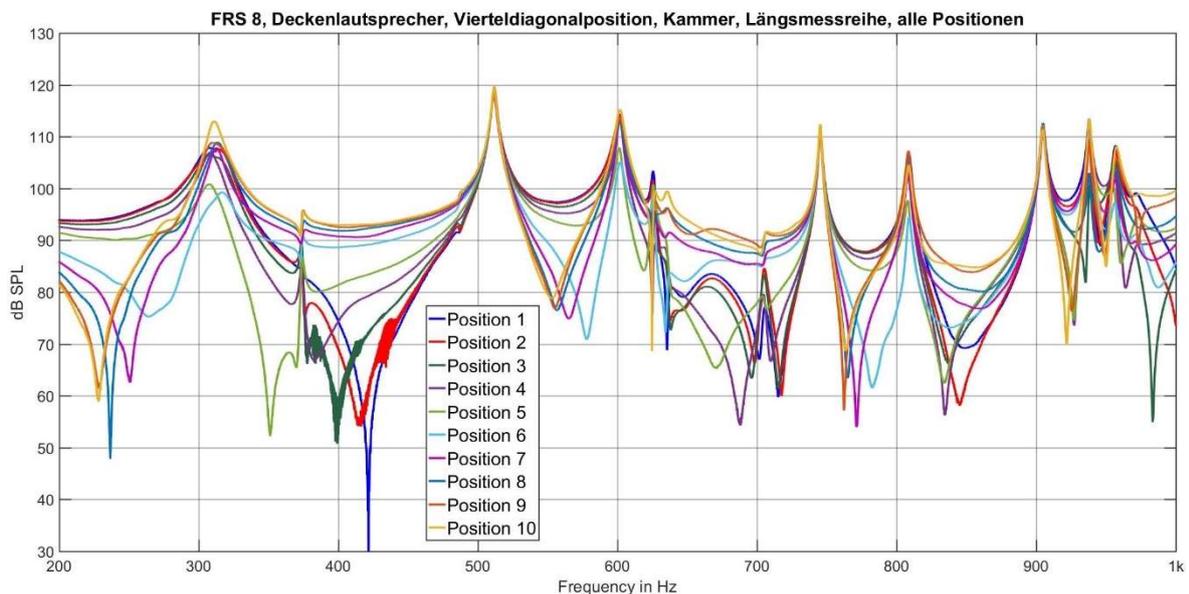


Abbildung 5-22: Übersicht der Messung in Längsrichtung mit dem Deckenlautsprecher

Wie die Kurven der Positionen 6 bis 10 zudem sehr deutlich zeigen, liegen die Längspositionen im Mittelpunkt der zweiten axialen Mode mit den Koordinaten 0-1-0. Wir befinden uns im Knotenpunkt der stehenden Welle. Durch leichte Varianzen in der Aufstellung des Mikrofons äußert sich die Resonanz zwar durch eine kleine Verzerrung mit wenigen dB SPL Dynamik, es ist jedoch offensichtlich, dass die zweite Mode auf diesem Wege kaum erfasst wird. Abbildung 5-23 stellt die gleiche Messung bei gewendetem Deckel dar.

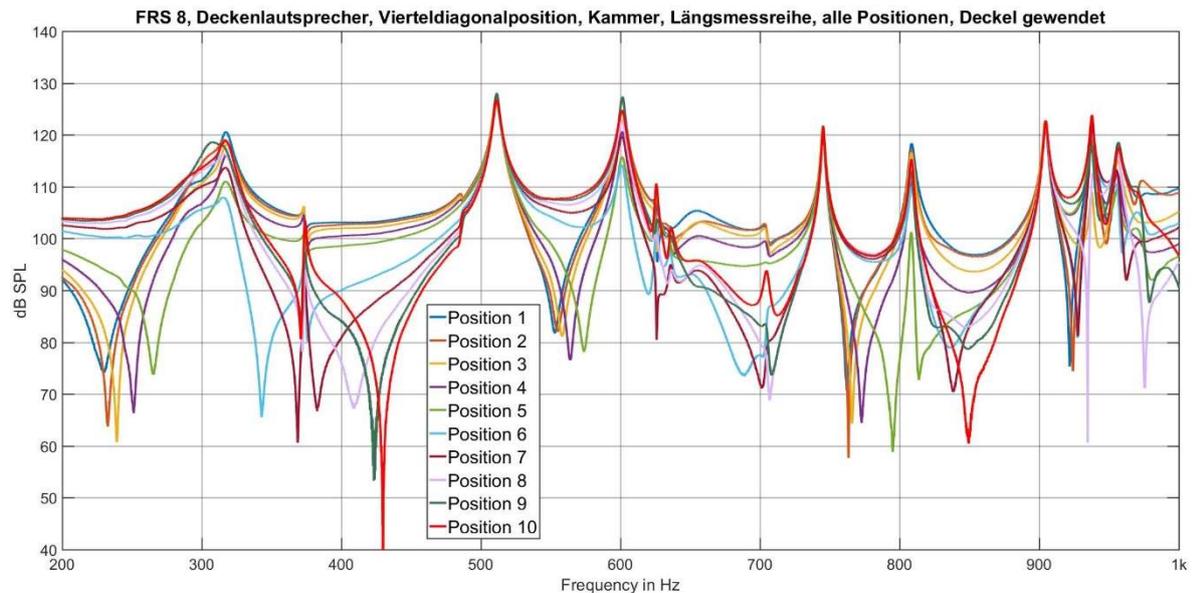


Abbildung 5-23: Übersicht der Messung in Längsrichtung mit dem Deckenlautsprecher bei gewendetem Deckel

Reduzieren wir Abbildung 5-22 auf die Positionen 1 bis 5, erhalten wir Abbildung 5-24. Es lässt sich durch die Auftrennung erkennen, dass wir an den Längspositionen die Anzahl der starken Einbrüche zwar reduzieren, ihnen aber nicht gänzlich ausweichen können, da wir z.B. entweder die Einbrüche im Bereich von 400Hz in den Positionen 1 bis 5, oder jene Einbrüche im Bereich von 250Hz in den Positionen 6 bis 10 antreffen.

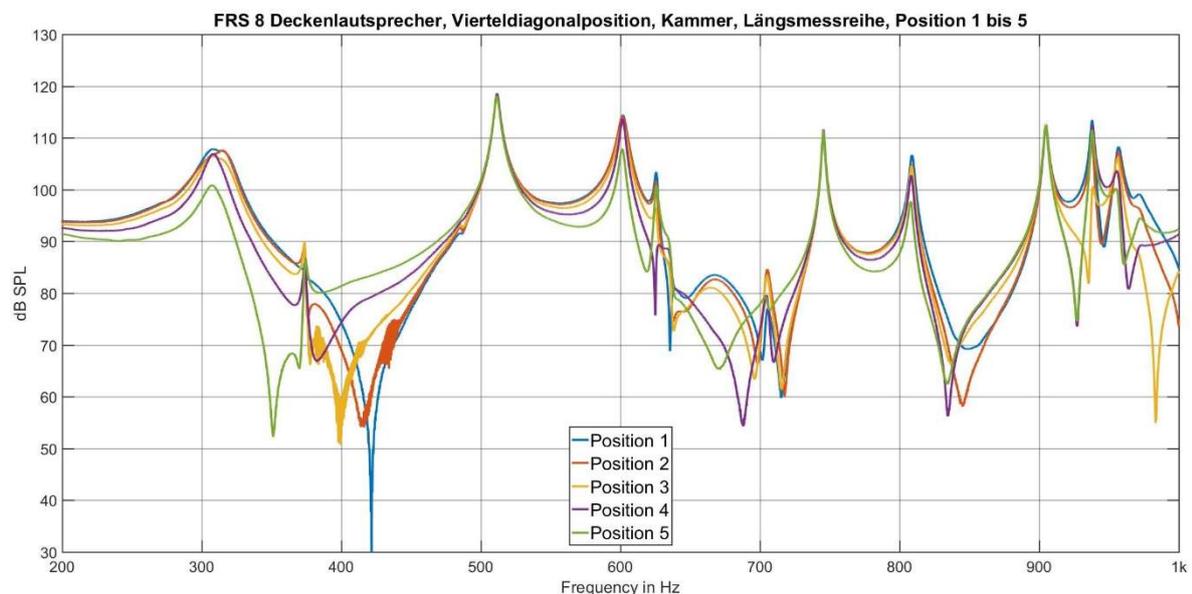


Abbildung 5-24: Übersicht der Längsmessung mit dem Deckenlautsprecher, Pos. 1 bis 5

Außerdem finden sich in Abbildung 5-22 in allen Signalen noch weitere Einbrüche vor allem zwischen 600Hz und 700Hz, sowie zwischen 800Hz und 900Hz. Die Positionen erweisen sich für uns daher zum Zwecke der Lautsprechermessung alle als unbrauchbar. Die Verwendung einer der Positionen in der Mitte der Breitseitenkante oder an einem anderen Punkt der in Abbildung 5-20 definierten Längsachse als Stützmikrofonposition wird damit ausgeschlossen.

Es folgte die Messreihe der Diagonalmessung. Abbildung 5-25 fasst alle 10 Positionen in der in Abbildung 5-20 beschriebenen Konstellation von Lautsprecher und Mikrofonen zusammen. Im Bereich von 200Hz bis 300Hz lässt sich nun für die Positionen 1 bis 5, also den, dem Lautsprecher in der gegenüberliegenden Kammerhälfte gelegenen Mikrofonpositionen zwar eine Abweichung des Pegelanstiegs zur ersten Mode bei 311Hz feststellen, im Vergleich zu den Positionen 6 bis 10 jedoch kein Einbruch. Dieser Einbruch ist offenbar auch in diesem Fall umso stärker, je näher das Mikro in Richtung Position 10, bzw. „Ecke 3&4 unten“ wandert. Auch beobachten wir dabei eine sinkende Einbruchsfrequenz. Für Position 7 liegt der Tiefpunkt bei 261Hz, bei Position 10 sind es nur noch 249Hz. Wieder registrieren wir an nicht-modalen Ausreißern nur Einbrüche. Trotz der Einbrüche lassen sich die Modenfrequenzen des leeren Raumes jedoch selbst auf der vom Lautsprecher stärker beeinflussten Seite von Position 6 bis 10 gut als Resonanzspitzen ablesen.

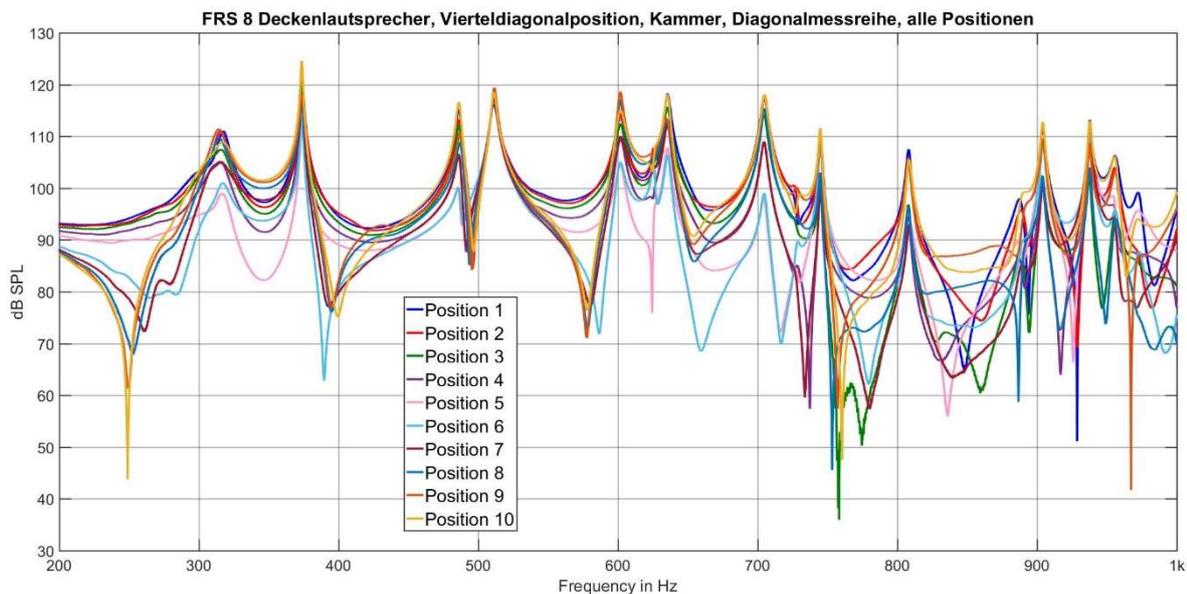


Abbildung 5-25: Übersicht der Diagonalmessung mit dem Deckenlautsprecher

Abbildung 5-26 stellt wieder die gleiche Messung mit gewendetem Deckel dar. Es lässt sich erkennen, dass die Kurvenverläufe, abgesehen von einigen Abweichungen, im Wesentlichen auch hier die Verhältnisse in Abbildung 5-25 spiegelverkehrt wiedergeben. So sind beispielsweise die erwähnten nicht-modalen Einbrüche in den Positionen 1 bis 5 zu erkennen, während die Positionen 6 bis 10 weniger davon betroffen zu sein scheinen.

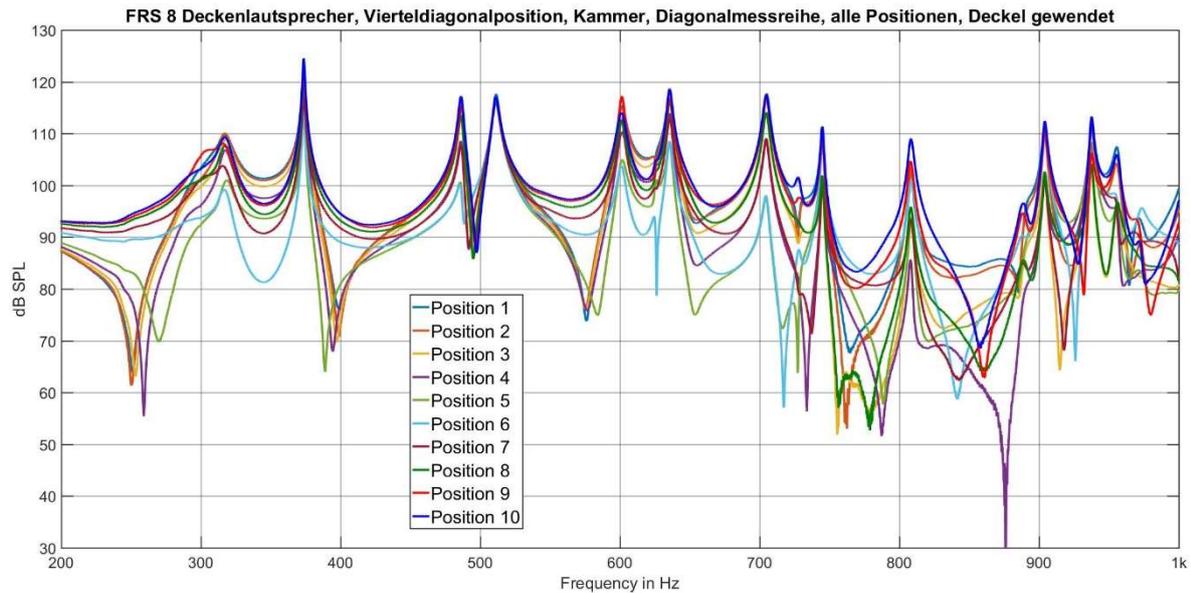


Abbildung 5-26: Spiegelverkehrte Anordnung der Diagonalmessung mit dem Deckenlautsprecher

Da die Menge der Kurven in den letzten beiden Abbildungen für einen Vergleich mitunter zu unübersichtlich ist, betrachten wir kurz zwei isolierte Messungen an entsprechenden Positionen. Abbildung 5-27 stellt die Messung der Position 1 aus Abbildung 5-25 der Messung der Position 10 aus Abbildung 5-26 gegenüber. Geometrisch entspricht dies der exakt gleichen Messung in spiegelverkehrter Anordnung. Bis auf einige kleinere Abweichungen, die der Genauigkeit der Positionierung des Mikrofons zuzuschreiben sind, zeigt sich über weite Teile ein identischer Frequenzgang.

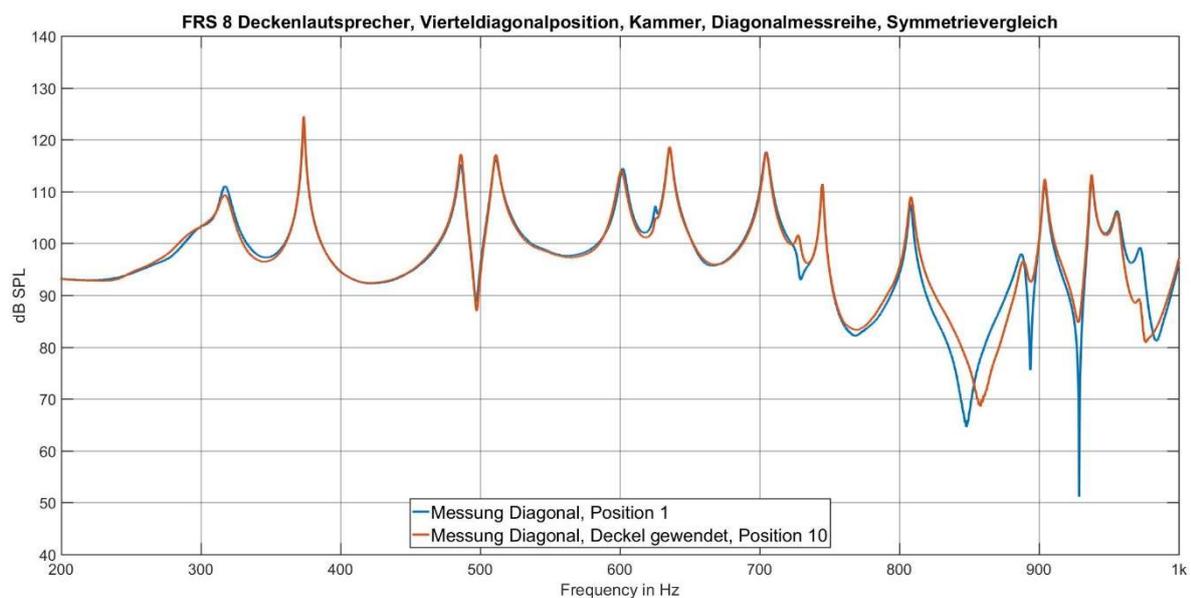


Abbildung 5-27: Vergleich der Eckenmessungen bei der ersten und der zweiten Diagonalmessreihe

Einzig die Scheitelfrequenzen der Einbrüche bei etwa 850Hz liegen einige Hertz auseinander und die Einbrüche der Messung von Position 1 bei 895Hz und 930Hz sind in der Messung an Position 10 bei gewendetem Deckel reduziert. In beiden Fällen muss es sich bei den Einbrüchen in Abbildung 5-27 um Quellenposition-Abhängigkeitseffekte handeln, da zum Beispiel auch in Hinblick auf eine temperaturkorrigierte Schallgeschwindigkeit bei 850Hz von der Theorie her keine Mode zu erwarten ist.

Der Unterschied in der Frequenz des Scheitelpunktes des Einbruchs mag sich daher durch leichte geometrische Änderungen der Kammer-Lautsprecher-Mikrofon-Konstellation ergeben haben, da wir auch in den Sammeldiagrammen aller Kurven beider Messreihen eine Änderung der Scheitelfrequenz der Einbrüche erkennen können, wenn das Mikrofon sich ab einer gewissen Entfernung dem Lautsprecher weiter nähert.

Interessant ist jedoch im Weiteren, ob es gelingen kann die Lautsprechereffekte zu minimieren, oder zu meiden. Sollte es möglich sein eine Mikrofon-Quellen-Kombination zu finden, die ausschließlich oder hauptsächlich das Modenbild der Kammer wiedergibt, so bestünde die Möglichkeit einfach den Frequenzgang dieses Mikrofons durch Invertierung der Übertragungsfunktion zu entzerren. In diesem Fall fiel die Auswertung von Messungen des Kompressors und anderen Testobjekten im Modalbereich sogar nur auf eine einzige Stützstelle anstatt den geplanten 5 Hauptpositionen zurück. Da die Kammer stark reflektierend ist, eliminiert sich die richtungsabhängige Schallemission einer zu untersuchenden Maschine, analog zur Hallraummessung, ohnehin.

Sehen wir uns die weniger beeinflussten Kurven von Position 1 bis 5 aus Abbildung 5-25 in Abbildung 5-28 von den anderen getrennt an. Vielleicht am schnellsten fällt in dieser Gegenüberstellung der im Signal von Position 3 zwischen 700Hz und 800Hz deutlich erkennbare Ausreißer und die Divergenz des Kurvenverlaufs der Position 5 von den anderen Kurven auf.

Je weiter wir mit dem Mikrofon in die Ecke wandern, scheint sich das Modenbild jedoch zu stabilisieren. Trotzdem lassen sich auch in Position 1 die oben diskutierten Einbrüche feststellen. Eliminieren wir nun weitere Kurven der Diagonalmessung und betrachten ein weiteres Mal die Messung an Position 1 der nächstgelegenen Position 2 über den gesamten Modalbereich von 200Hz bis 2kHz in Abbildung 5-29 gegenübergestellt.

Zwar scheint das Signal an Position 2 weniger betroffen vom besprochenen Einbruch bei 850Hz, in der Oktave zwischen 1kHz und 2kHz ergeben sich jedoch gravierende Unterschiede in den Pegeln der Resonanzen.

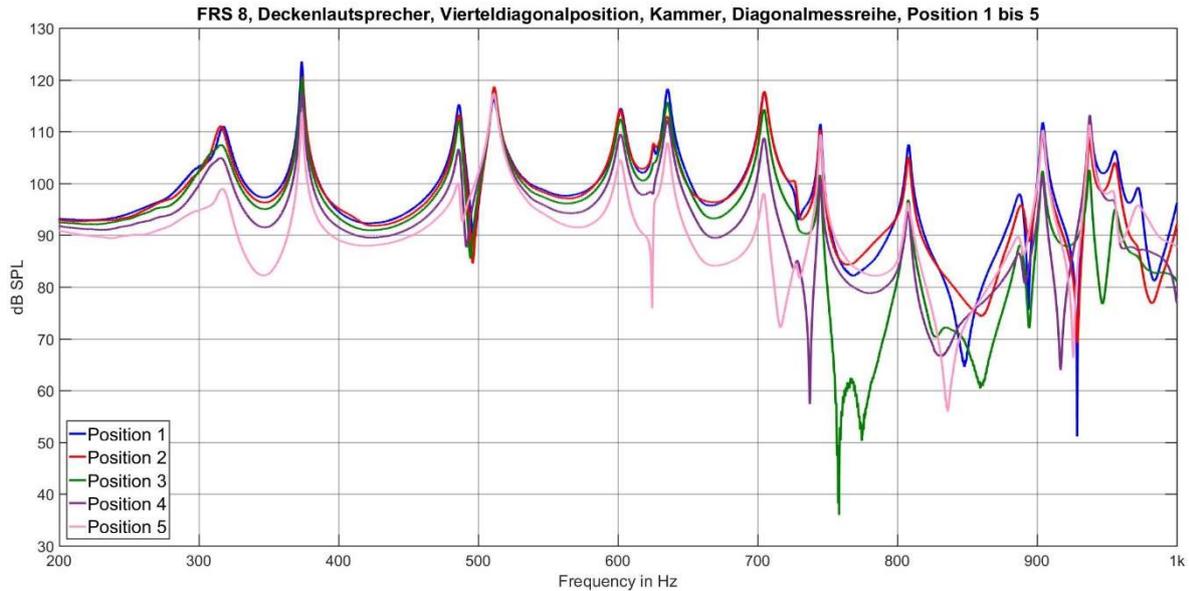


Abbildung 5-28: Übersicht der Diagonalmessung mit dem Deckenlautsprecher, Positionen 1 bis 5

Auf der anderen Seite stellen wir bis auf einen allgemeinen Pegelbauch zwischen 700Hz und 1100Hz und vier tiefe Senken bei 850Hz, 920Hz, 1180Hz und 1500Hz in der Kurve von Position 1 ein Modenbild mit einer Dynamik von grob etwa „nur“ 30dB SPL fest. Allgemein scheint die Eckposition ein guter Kandidat für eine Stützmikrofonposition zu sein.

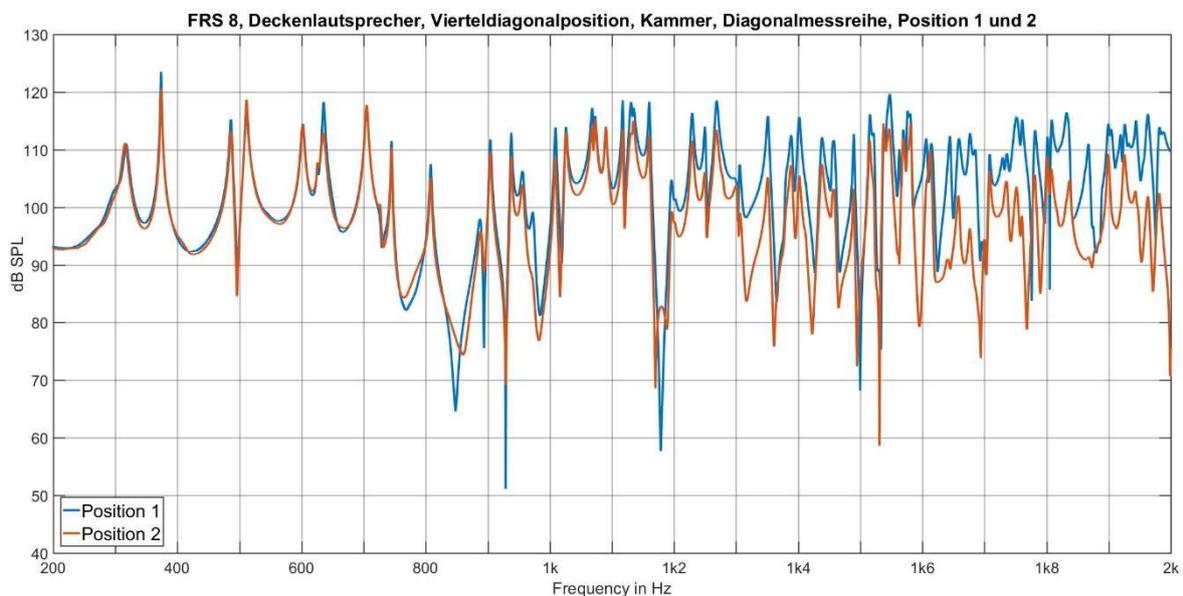


Abbildung 5-29: Übersicht der Diagonalmessung mit dem Deckenlautsprecher, Positionen 1 und 2

Im Folgenden seien nun die Messungen mit dem Deckenlautsprecher in Zentralposition beschrieben. Auf Grund der Ergebnisse aus den Messreihen in Abbildung 5-25 und Abbildung 5-22 konzentriert sich die Untersuchung mit dem Zentraldeckenlautsprecher ausschließlich auf die Eckenpositionen. Da in diesem Fall die Entfernungen aller Mikrofonstandorte gleich groß sind, sowie die Wände jeweils spiegelsymmetrisch liegen, erwarten wir uns dementsprechend auch identische Übertragungskurven. Die tatsächlichen Messergebnisse sind einander in Abbildung 5-30 gegenübergestellt.

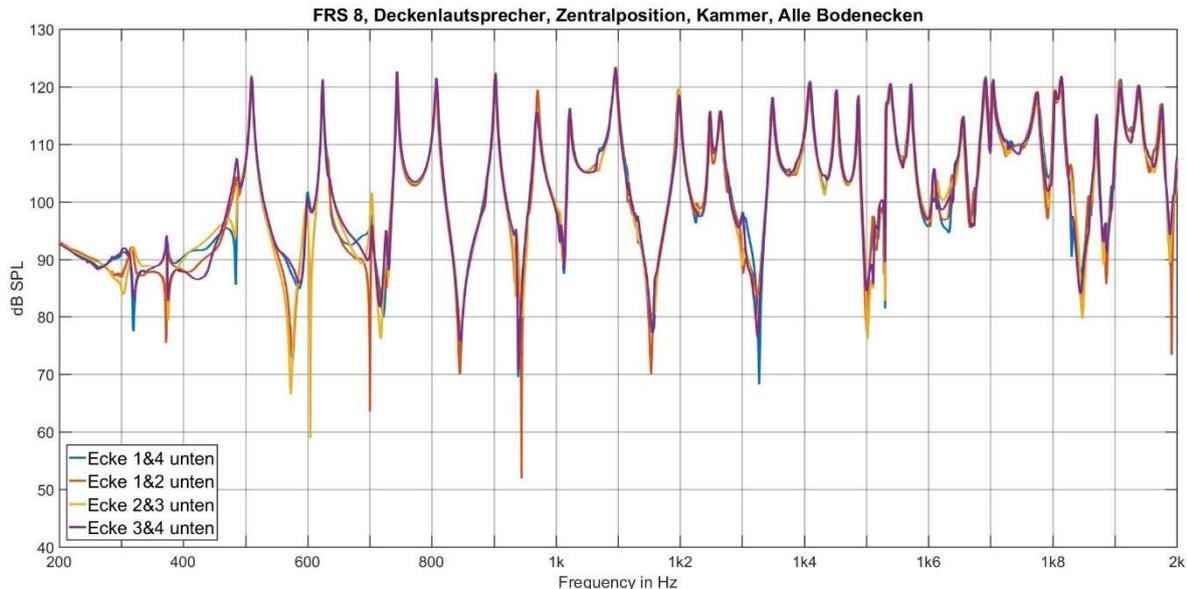


Abbildung 5-30: Übertragungskurven aller 4 Bodenecken mit dem zentralen Deckenlautsprecher

Über große Teile finden wir auch in der Tat identische Kurvenverläufe. Etwaige engbandige Ausreißer mit Pegelunterschieden von 20 bis 40dB SPL müssen wieder den feinen Unterschieden der Mikrofonpositionierung zugeschrieben werden. Interessant ist jedoch zunächst der Verlauf der Kurven bei etwa 575Hz. Den Kurven zufolge ist der Einbruch in der einen Hälfte der Messkammer in den Ecken „1&2 unten“ und „2&3 unten“ relativ ähnlich, jedoch verschieden von den ebenso ähnlichen Verläufen in den Ecken „1&4 unten“ und „3&4 unten“.

Die Relevanz dieses Unterschieds und das Ausmaß der Einbrüche einzelner Kurven in den Senken werden jedoch von den fast gänzlich unterdrückten ersten beiden Moden überschattet. Durch die spezielle Quellposition scheinen diese nur in vermindertem Maße angeregt zu werden. Dies deckt sich weder mit den Messungen des Kompressors in der Messkammer, noch den bisherigen Ergebnissen der Hauptpositionen, bei denen wir die Wirkung der ersten beiden Moden deutlich festhalten konnten.

Es ist daher für die gesetzten Ziele und Zwecke eher unerheblich warum der zentrale Deckenlautsprecher in Konstellation mit den gewählten Eckenmikrofonen die ersten Moden unterdrückt. Fakt ist lediglich, dass für diesen Fall eine eindeutige Quellpositionsabhängigkeit nachweisbar ist, welche diese Positionskonstellation unattraktiv macht.

Wie wir aus allen bisherigen Beobachtungen schließen können, besteht eindeutig eine Abhängigkeit des Modenbildes von der Entfernung Mikrofone/Lautsprecher und der Quellenposition. Im gewählten Rahmen des Experiments bleibt noch als weitere Möglichkeit, mit dem Lautsprecher aus einer der Ecken die Kammer zu beschallen und in den Ecken der gegenüberliegenden Seite mit einem einzelnen Mikrofon zu messen. Abbildung 5-31 zeigt die Positionierung eines Eckenmikrofons an einer oberen Ecke mit Kreppband. Um das Experiment schneller durchführen zu können, wurde davon abgesehen, der Kammer eine Eckenmikrofondurchführung hinzuzufügen.



Abbildung 5-31: Provisorische Positionierung des Mikrofons

Abbildung 5-32 zeigt nun Übertragungsfunktionen der Eckenlautsprecherlösung in „Ecke 3&4 oben“ gemessen an den gegenüberliegenden Ecken „1&2 oben/unten“, sowie „2&3 oben/unten“, also an allen Ecken der dem Lautsprecher gegenüberliegenden Seitenwand der Kammer. Die aufgenommenen Kurven zeigen für jede Ecke prinzipiell viele Ähnlichkeiten bei den Modenfrequenzen. Dazwischen gibt es jedoch offenbar wieder größere Schwankungen. Vorweg scheint die Übertragungsfunktion der flächendiagonal zum Lautsprecher liegenden Ecke „1&2 oben“ am Deckel zusammen mit Ecke „2&3 oben“ sehr stark der Quellenwirkung des Lautsprechers ausgesetzt.

Erfreulicher Weise taucht dieser Effekt bei den anderen beiden Ecken am Boden nicht auf. Reduzieren wir die Kurven im Diagramm auf jene Signale mit den schwächer ausgeprägten Ausreißern, erhalten wir Abbildung 5-33. Mit besserer Sicht auf die weniger verzerrten Kurven lassen sich aber trotzdem weitere Einbrüche ausmachen. Beide Kurven zeigen über 1kHz zudem auch sehr unterschiedliche Frequenzverläufe. Auch aus diesen Ergebnissen lässt sich kein „bester Kandidat“ für die Stützstelle herausfiltern.

Aus Mangel an weiteren Optionen sei die Ecke-Ecke-Strategie aber noch nicht verworfen. Zum einen lässt sich für den oberen Modalbereich durchaus rechtfertigen, dass verschiedene Eckenpositionen der Mikrofone relativ zu einer Quelle in einer fixen Ecke Unterschiede aufweisen.

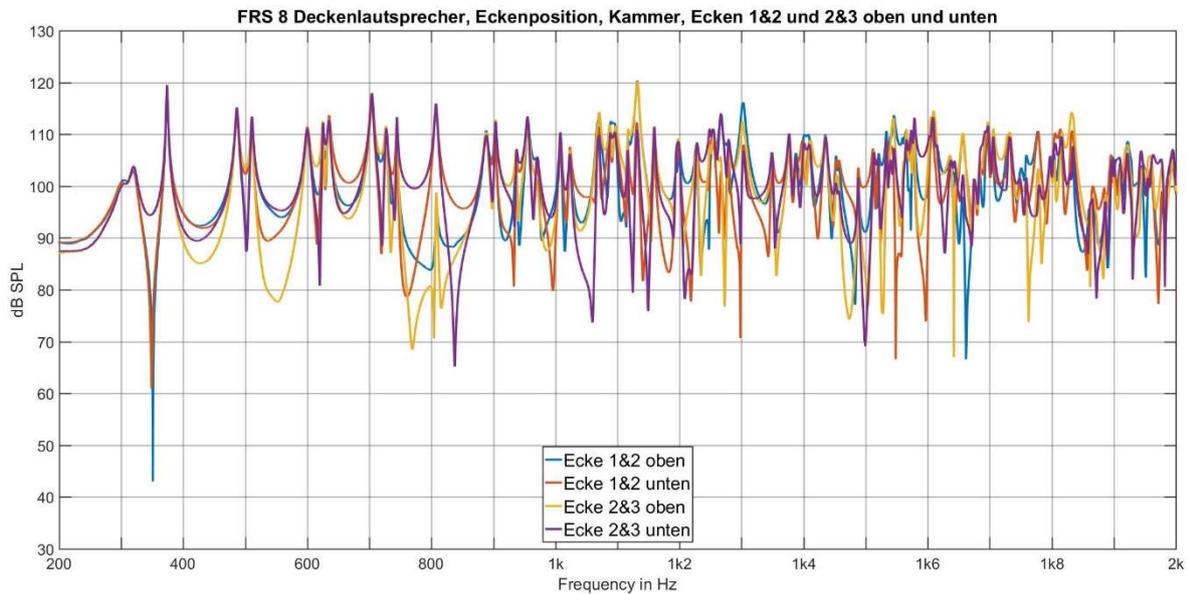


Abbildung 5-32: Messungen der Eckenpositionen mit dem Eckenlautsprecher im Deckel

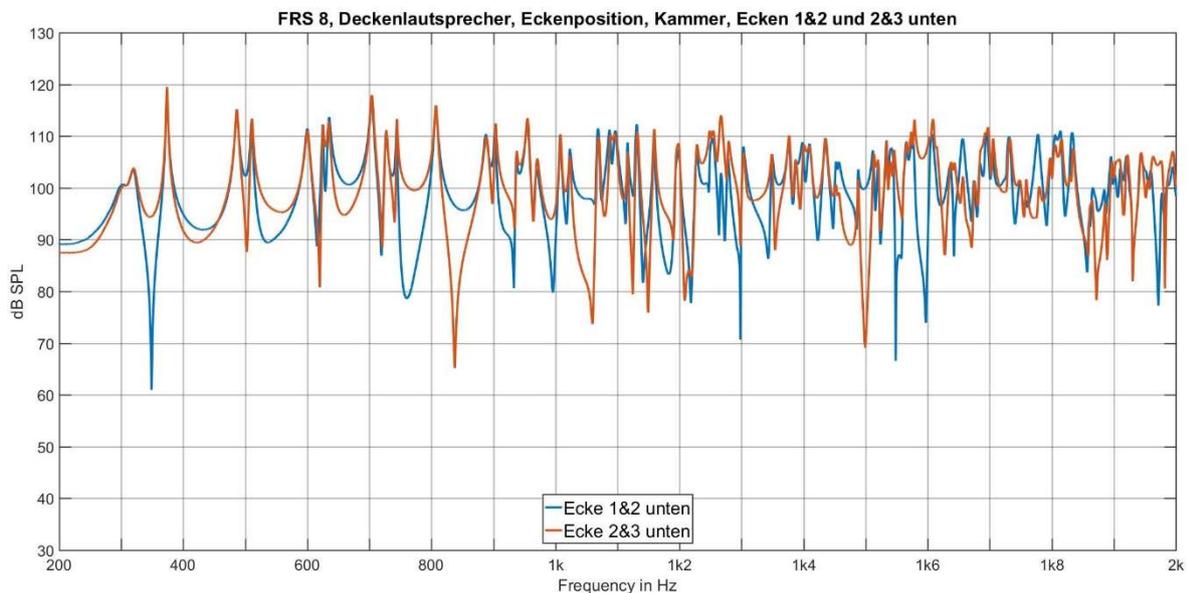


Abbildung 5-33: Messungen der Eckenpositionen am Boden mit dem Eckenlautsprecher im Deckel

Zum anderen wurde bis jetzt fast ausschließlich nur die Antwort der leeren Kammer betrachtet! Wie die Untersuchungen in Abbildung 5-15 aus Kapitel 5.4 ergaben, haben relativ zur Kammer gesehen große Messobjekte entscheidenden Einfluss auf den Modalbereich.

Für den Messaufbau mit dem Eckenlautsprecher und den Eckenmikrofonpositionen folgte daher durch Aufstellen des Kompressors in abgeschaltetem Zustand in der Kammer wieder eine Messung zur Untersuchung seines passiv-akustischen Einflusses durch Absorption, Reflexion und Volumenverdrängung auf die Lautsprechermessung. Abbildung 5-34 zeigt die Ergebnisse der gleichen Quell- und Mikrofonpositionen wie in Abbildung 5-33 bei Anwesenheit des Kompressors.

Wie in Abbildung 5-15 lässt sich im Vergleich zum leeren Raum in Abbildung 5-33 erneut erkennen, dass die Modenfrequenzen durch den Einfluss des Kompressors gesunken sind. Umgekehrt ist in Bezug auf die Einbrüche aber keine große Änderung zu verzeichnen. Die Ausreißer im Spektrum haben allgemein andere Verläufe, Einbrüche sinken im Pegel stärker ab und zeigen sich in ihrer Wirkung breitbandiger, aber beide Abbildungen vermitteln etwa den gleichen notwendigen Korrekturaufwand.

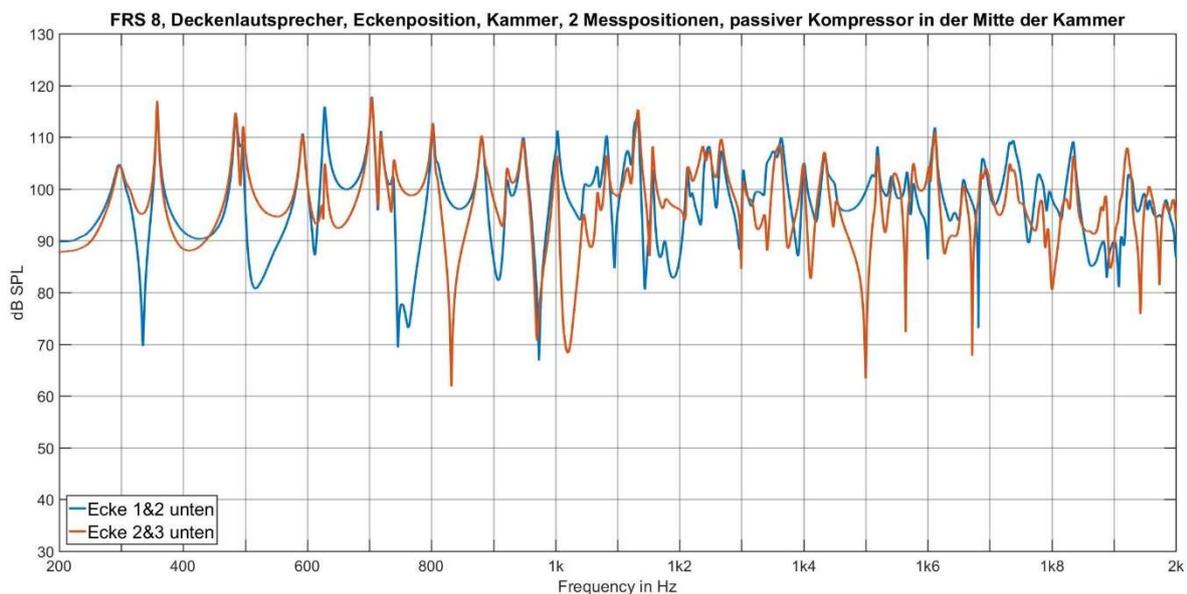


Abbildung 5-34: Messungen der Eckenpositionen am Boden mit dem Eckenlautsprecher im Deckel bei Beladung mit dem passiven Kompressor in zentrierter Position

Die experimentelle Aufstellung ignoriert neben den unterschiedlichen Quelleigenschaften natürlich ebenfalls die örtliche Trennung von passivem Kompressor und Lautsprecher. Diesen Umstand müssen wir in Kauf nehmen, da es schlicht und ergreifend keine realistische Möglichkeit gibt den Lautsprecher mit dem Kompressor örtlich zu kombinieren.

Auf der anderen Seite stellt sich auch noch die Frage, wie bedeutend und auch wie klug gewählt die Aufstellung des Kompressors in der Mitte des Raumes ist. Mit dem Wissen, dass für den Modalbereich die Hauptmikrofonpositionen in den Wandflächenmitten als unattraktiv entlarvt wurden und Stützmikrofonpositionen in den Ecken benötigt werden, ist eventuell der geplante Messaufbau selbst zu überdenken. Für den nunmehr als Druckkammerübergangsbereich bezeichneten Frequenzabschnitt (unter 300Hz) ändert sich durch die probierten Quell- und Mikrofonkonstellationen im Großen und Ganzen wenig. Und auch für den Hochtonbereich

ist die Quellposition weniger kritisch, in beiden Fällen natürlich vorausgesetzt, dass Quelle und Mikrofon weit genug voneinander getrennt sind. Sprich in beiden Fällen kann vermutet werden, dass eventuell eine Aufstellung des Testobjekts außerhalb der geplanten Mittenposition keinen oder wenig Einfluss auf das Ergebnis hat. Das heißt, die Lautsprecher- und Messpositionen sollen dieselben bleiben, der Kompressor hingegen wird aber statt in der Mitte so nah als möglich in eine Ecke gestellt. Versuchsweise wurden jene Ausrichtungen gewählt, bei denen der Kompressor am dichtesten an die Wand gestellt werden konnte, wie folgende Abbildung 5-35 beispielhalber zeigt.

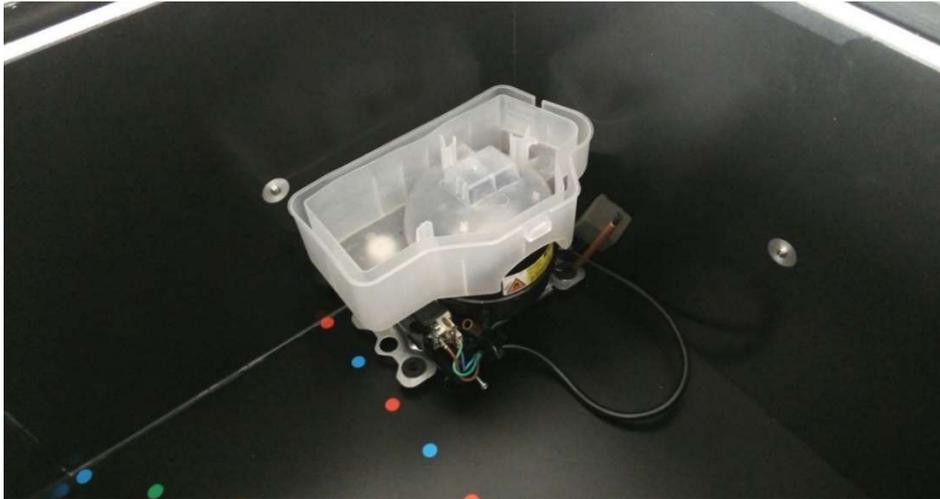


Abbildung 5-35: Aufstellung eines Kompressors in der Kammerecke

Die Mikrofonantworten für diese Ecken-Aufstellung sind in Abbildung 5-36 für zwei Positionen des passiven Kompressors in den Ecken „1&4 unten“, sowie „2&3 unten“ und dem Mikrofon in Ecke „1&2 unten“ dargestellt.

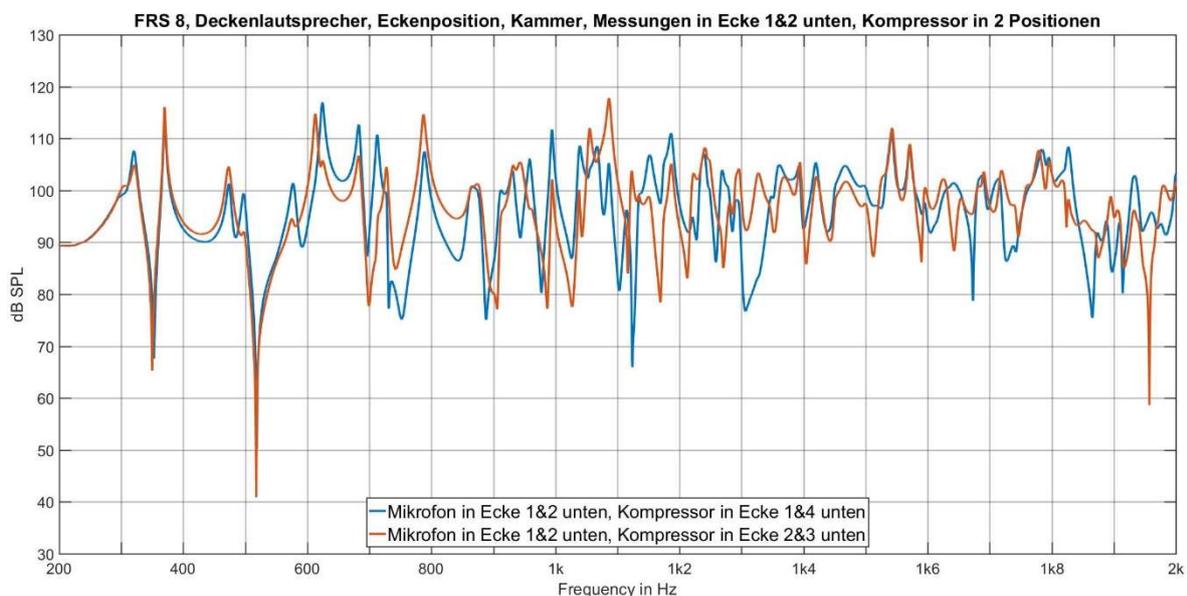


Abbildung 5-36: Übertragungskurven für ein Eckenmikrofon in Ecke „1&2 unten“ und zwei Positionen des passiven Kompressors

Die Aufstellung des Kompressors direkt unter dem Lautsprecher in Ecke „3&4 unten“ ist prinzipiell eher ungünstig, da auf diesem Wege zu viele Schallfeldstörungen provoziert werden würden, mit denen im Fall des aktiven Kompressors nicht zu rechnen ist. Der Übersicht halber wird auf eine Darstellung dieser Kurve verzichtet. Die Ergebnisse sind etwas ernüchternd, da wir für beide Positionen des Kompressors bei ca. 350Hz und bei etwa 520Hz starke Einbrüche erkennen können. Ein Wechsel auf die Mikrofonposition „2&3 unten“ und Aufstellung des Kompressors in den Ecken „1&4 unten“ sowie „1&2 unten“ liefert die Übertragungskurven in Abbildung 5-37.

Auch in diesem Fall können Einbrüche festgestellt werden, aber vor allem für die Konstellation des Lautsprechers in Ecke „3&4 oben“, dem Mikrofon in Ecke „2&3 unten“ und dem passiven Kompressor in Ecke „1&4 unten“ (blaue Kurve) halten sich die Menge der Einbrüche und die Pegel im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen in Grenzen.

Die zweite, orange-rote Kurve scheint dagegen etwas mehr von „nicht-modalen“ Einbrüchen geprägt. Primär ist die blaue Kurve jedoch wegen der übersichtlichen Dynamik der Moden attraktiv. Eine Analyse dieser Übertragungskurve im Hinblick auf die Modenfrequenzen ist wegen der Einmischung des Kompressors als passives Objekt im Raum eher aufwändig. Sie ist für einen Versuch der Entzerrung der Stützmikrofonposition aber auch nicht notwendig.

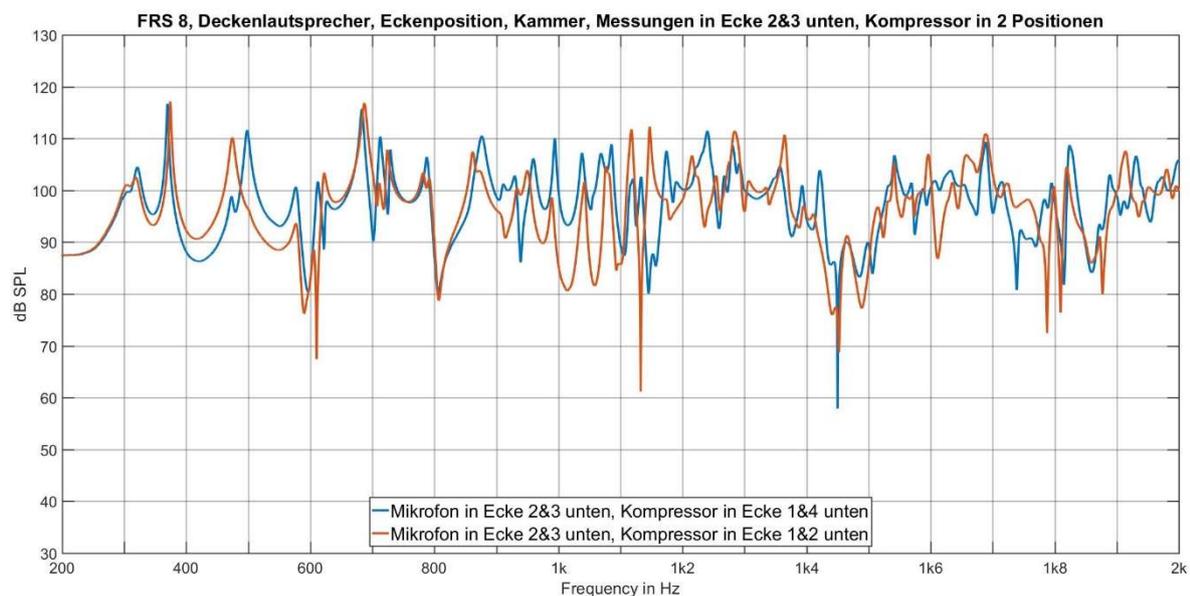


Abbildung 5-37: Übertragungskurven für ein Eckenmikrofon in Ecke „2&3 unten“ und zwei Positionen eines passiven Kompressors

Zusammenfassend lieferten Messungen im Modalbereich keine Kurven, welche nur die Resonanzerscheinungen der Messkammer wiedergeben. Durch die Nähe der Mikrofone zum Lautsprecher, oder jeder anderen Art von Quelle, tauchen immer wieder quellenabhängige Einbrüche in den Kurven auf. Der Grund, warum diese Effekte die Bedeutung der ermittelten Kurven nicht mindert, ist der Ansatz, dass der Kompressor und jedes andere Testobjekt sicherlich

ebenfalls eine Ortsabhängigkeit zeigen werden. Damit sind die mit dem Lautsprecher gewonnenen Übertragungsfunktionen zwar nur eine Approximation, die Ergebnisse der durch diese Approximation möglich gemachten Entzerrungsmessung stellen jedoch den Kern des Experiments dar.

Durch die hohen Pegelsenken der Einbrüche besteht trotzdem die Sorge, durch sture Anwendung der Übertragungsfunktion als Korrekturkurve spektrale Bereiche des Kompressors radikal anzuheben, welche in Wahrheit die Kammer gar nicht unterdrückt hat und deshalb falsch korrigiert werden würden. Wie in Kapitel 6 bei der Anwendung aller Korrekturmethode näher besprochen wird, bestünde die Möglichkeit die Dynamik der Korrekturkurve zu beschränken. Das reduziert die Modalbereichsentzerrung zwar weiter auf Annahmen und Approximationen, am Ende zählt für das Ziel dieser Arbeit jedoch hauptsächlich das Ergebnis der Terzbandauswertung im Vergleich zu den Referenzwerten der Freifeldmessung.

Tabelle 5-6 zeigt abschließend die Werte der Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur bei Deckenlautsprechermessungen in der Messkammer. Die Messungen fanden ebenso im Tonstudio der TU-Graz statt. Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Angaben der Luft in der Messkammer.

| Messobjekt | Datum | Uhrzeit | Temp. ϑ_{Luft} | Rel. Luftfeuchtigkeit |
|---|-----------|---------|--------------------------|-----------------------|
| Deckenlautsprecher, Kammer leer | 12.6.2017 | 12:26 | 27,5°C | 42,0% |
| Hochtonlautsprecher, Kammer leer | 14.6.2017 | 11:00 | 29,0°C | 42,4% |
| Deckenlautsprecher, 10-Positionsmessung, Längs & Quer | 28.6.2017 | 16:00 | 29,9°C | 44,5% |
| Deckenlautsprecher, 10-Positionsmessung, Längs & Quer | 2.7.2017 | 16:00 | 29,3°C | 42,6% |
| Deckenlautsprecher, Entzerrungsmessung | 5.7.2017 | 14:45 | 28,9°C | 40,5% |
| Deckenlautsprecher, Entzerrungsmessung | 7.7.2017 | 15:20 | 29,8°C | 46,4% |
| Deckenlautsprecher, Entzerrungsmessung | 11.7.2017 | 14:20 | 31,1°C | 42,1%% |
| Deckenlautsprecher, Entzerrungsmessung | 19.7.2017 | 16:00 | 29,6°C | 41,5% |
| Deckenlautsprecher, Entzerrungsmessung | 21.7.2017 | 13:00 | 29,4°C | 43,4% |
| Deckenlautsprecher, Entzerrungsmessung | 22.7.2017 | 15:45 | 30,4°C | 46,1% |

Tabelle 5-6: Aufgenommene Werte für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der Messkammer

5.6 Lautsprecher für den Hochtonbereich

Wie schon erwähnt, existierte neben dem Visaton-Breitbandlautsprecher auch ein Hexaeder-Lautsprecher bestückt mit 6 Hochtönern, die für einen Miniaturhallraum wegen ihres Wiedergabevermögens von 1kHz bis zu 40kHz ausgewählt worden waren.

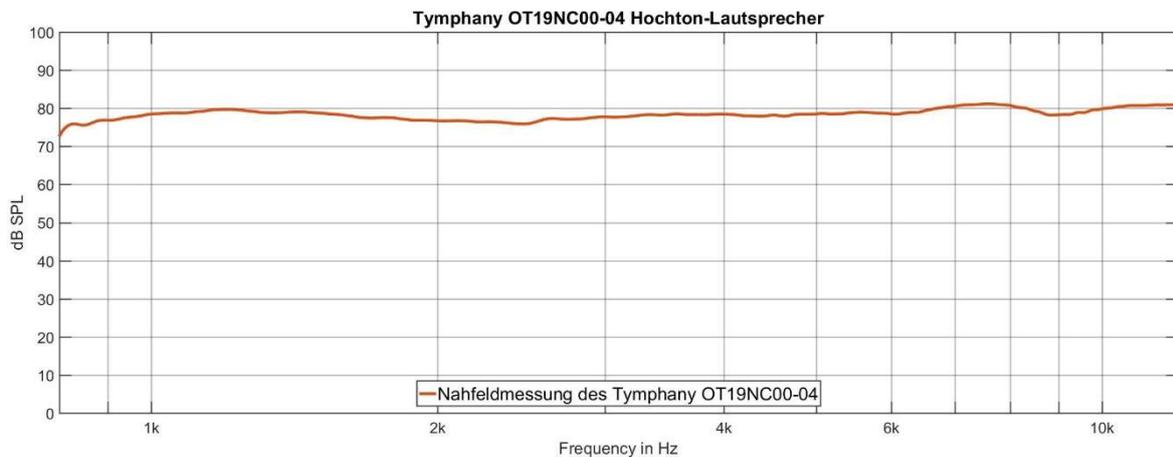


Abbildung 5-38: Nahfeldmessung des OT19NC00-04 Hochtוןlautsprechers

Die Anforderung der Messkammer – ein linearer Frequenzgang von 2kHz bis 10kHz – ist laut den Herstellerangaben und den Messungen durchaus gegeben. Abbildung 5-38 stellt den experimentell bestimmten Frequenzgang aus einer Nahfeldmessung eines der sechs Lautsprecher dar. Abbildung 5-39 zeigt ein Foto des Lautsprechers.



Abbildung 5-39: Hexaeder-Hochtוןlautsprecher für Miniaturhallraummessungen

Die Hochtöner des Lautsprechersystems sind in einer Kugelanordnung in ein 3D-Druck-Gehäuse eingepasst, welches durch eine Achse auf einem Podest ruht. Die Achse lässt sich

tauschen, um den Lautsprecher in der Höhe über dem Boden verändern zu können. Verwendet wurde zunächst die Höhe der vorhandenen Achse von 17 cm. Tabelle 5-7 zeigt die Herstellerangaben der verwendeten Hochtonlautsprecher im Detail.

| | |
|--|-----------------------|
| Marke, Name | Tymphany, OT19NC00-04 |
| Nennbelastbarkeit | 80W Rauschleistung |
| Nennimpedanz | 4Ω |
| Übertragungsbereich (-10dB) | 1000-40000Hz |
| Mittlerer Schalldruckpegel | 85dB (1W/1m) |
| Max. Auslenkung | +/- 0,1mm |
| Resonanzfrequenz | 1029Hz |
| Schwingspulendurchmesser | 19,3mm |
| Spalthöhe | 2mm |
| Gewicht, netto | 40g |
| Gleichstromwiderstand R_{dc} | 3,17Ω |
| Mechanische Güte Q_{ms} | 7,03 |
| Elektrische Güte Q_{es} | 1,56 |
| Gesamte Güte Q_{ts} | 1,27 |
| Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen V_{as} | 0 Liter (gekapselt) |
| Effektive Membranfläche S_d | 4,5cm ² |
| Dynamisch bewegte Masse M_{ms} | 0,2g |
| Antriebsfaktor B_{xl} | 1,64Tm |
| Schwingspuleninduktivität L | 0,1mH |

Tabelle 5-7: Daten der Tymphany OT19NC00-04 Hochtonlautsprecher

5.7 Analyse des Diffusschallbereichs

Zur Erreichung des Ziels, die Schalleistung in der Messkammer zu messen, wurde in Kapitel 4.1 schon ausführlich beschrieben, dass man das untersuchte Spektrum der Messkammermessung am besten in mehrere Bereiche aufteilt. Die Übertragungskurve des oberen Teilspektrums der Messkammer (siehe Abbildung 5-41) gibt einen groben, visuellen Einblick, ab welcher Frequenz im Vergleich zur Theorie der Modalbereich keine isolierten Resonanzen mehr aufweist.

Laut der Theorie der Raumakustik und praktischen Experimenten ist im Hochtonbereich durch die schallharten Wände der Kammer also für einen Teil des Hochtonspektrums ein diffuses Schallfeld zu erwarten. Unter Berücksichtigung, dass wir uns mit den Abmessungen der Kammer, vor allem in Kombination mit den Volumina der zu untersuchenden Geräte, bei weitem nicht im Rahmen der Normen befinden, soll im Folgenden dennoch eine Bestimmung des Schalleistungspegels nach EN ISO 3741 für den oberen Teil des Spektrums aufgestellt werden. Wie dort dargelegt, benötigt eine Messung des Schalleistungspegels im Hallraum neben den bestimmten Schalldruckpegelwerten ebenso Kenntnis über die Eigenschaften des Hallraums in Form seiner Oberfläche, seinem Volumen, sowie den, aus Messungen bestimmten Nachhallzeiten für jedes Frequenzband.

Die Bestimmung der Nachhallzeiten erfolgt in der akustischen Messtechnik heutzutage zumeist durch die Rückwärtsintegration über die quadrierte Impulsantwort des Raumes. Dieses Verfahren approximiert aus dieser Arithmetik eine Abfallkurve, in welche hernach eine Nachhallzeit-Gerade gefittet werden kann, um die Zeiten zu bestimmen.

Zu diesem Zweck stammte aus der Miniaturhallraum-Arbeit neben dem Hochtonlautsprecher auch ein Matlab-Programm zur Bestimmung der Nachhallzeiten eines Hallraums mittels Sweep-Messung, welches, wie die Messsoftware für die bisherigen 1-kanaligen Untersuchungen in der Messkammer ebenfalls auf den Funktionen der ITA-Toolbox basiert. In Abbildung 5-40 ist ein Foto der Positionierung der Hochton-Quelle in der Messkammer abgebildet. Abbildung 5-41 zeigt die FFT-Analyse der Impulsantworten an allen 5 Mikrofonpositionen der Messkammer, ermittelt durch einen exponentiellen Sweep von 1600Hz bis 12kHz.

Der Grund für die Messung ab 1600Hz ist die Störung durch die Signalflanke des Sweeps bei Beginn der Messung. Die Position des Hochtonlautsprechers für die Messung in der Messkammer lag genau in der Mitte der Bodenfläche.



Abbildung 5-40: Aufstellung des Hochtonlautsprechers für die Messung in der Kammer

Wie man sehr gut erkennen kann, setzen sich zwischen 2kHz und 3kHz noch einige isolierte Resonanzen durch. Darüber nimmt, wie von der Theorie in Kapitel 4.1 vorausgesagt, die Modendichte jedoch mit steigender Frequenz weiter rasch zu, sodass ein brauchbares Diffusschallfeld vermutet werden kann.

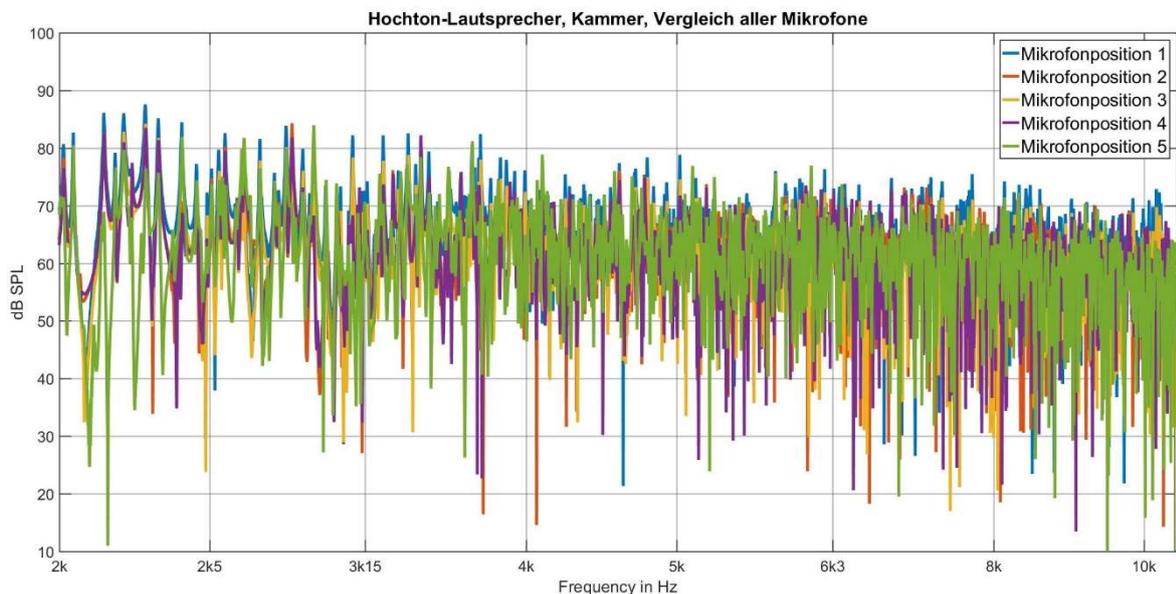


Abbildung 5-41: Gegenüberstellung der Frequenzantworten aller Mikrofonpositionen im Hochtonbereich

Für jede dieser Kurven wurde gesondert eine Nachhallzeitberechnung über die Impulsantwort durchgeführt. Die in Abbildung 5-42 gezeigten Nachhallzeiten stellen ein Mittel aus allen Ergebnissen dar. Wie für eine Kammer dieser Größe zu erwarten ist, erhält man aus der Berechnung Zeiten zwischen etwa 300 und 600 Millisekunden für den Auswertebereich zwischen 2kHz und 10kHz, wobei durchaus zu erkennen ist, dass die Nachhallzeit allgemein für

höhere Frequenzen abnimmt, da logischer Weise bei hohen Frequenzen die Absorption der Wände und vor allem der Luft selbst zunimmt. Den Erfahrungen mit Miniaturhallräumen zufolge entspricht dies auch glaubhaften und brauchbaren Werten, da eine Kammer mit etwa doppeltem Volumen im gleichen Frequenzbereich beispielsweise Nachhallzeiten von 0,4 bis 1,2 Sekunden liefert. Legt man diese Beobachtungen gedanklich im Maßstab 1:10 auf reale Hallräume um, so sprechen wir von 3 bis 6 beziehungsweise von 4 bis 12 Sekunden. Dies entspricht durchaus Werten, denen man in einem echten Hallraum begegnen wird.

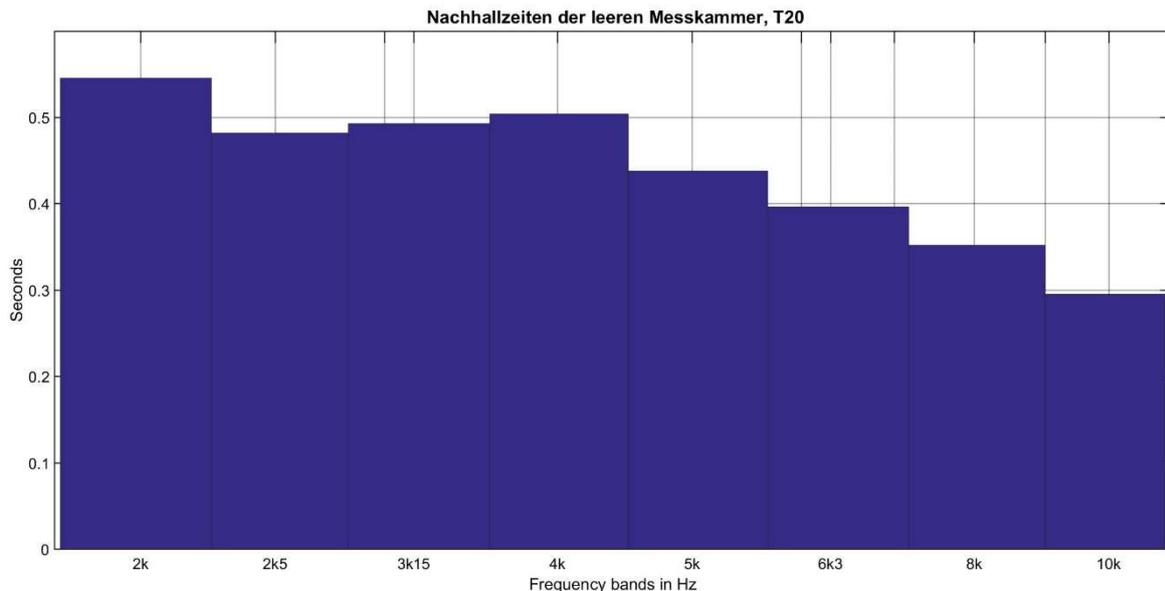


Abbildung 5-42: Nachhallzeiten der Messkammer bestimmt durch den Hochtonlautsprecher und T20-Arithmetik

Damit ergeben sich die im Weiteren berechneten Korrekturpegel durch folgende Formel 5-5:

$$L_{W,Ka,Korr} = 10 \log \left[\frac{A(f_m)}{A_0} \right] + 4,34 \cdot \frac{A(f_m)}{S} \quad 5-5$$

$$+ 10 \log \left(1 + \frac{Sc}{8Vf_m} \right) - 6dB$$

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A ergibt sich dabei zusammen mit dem Volumen der Kammer V und der Schallgeschwindigkeit c aus der Nachhallzeitformel 5-6 von Sabine. Der Faktor A_0 stellt wieder einen einfachen Bezugswert von $1m^2$ dar, der Faktor S beschreibt die eigentliche Rauminnenoberfläche.

$$A(f_m) = \frac{24 \cdot \ln(10)}{c} \cdot \frac{V}{T_{20}(f_m)} \quad 5-6$$

Auf diese Weise erhalten wir jene Korrekturpegel, welche die Schalldruckpegelmessung im Hallraum zu einer Schalleistungspegelmessung L_W umformen. Die auf diese Weise korrigierten Pegel eines zu messenden Testgeräts in der Kammer entsprechen also schon den endgültigen Schalleistungspegeln. Abbildung 5-43 zeigt eine Balkengrafik der berechneten Korrekturpegelwerte für die Nachhallzeiten aus Abbildung 5-42 und den geometrischen Eigenschaften der Messkammer. Aus den Freifeldmessungen und den Messungen in der Kammer konnten wir bisher im Bereich zwischen 2kHz und 10kHz vor allem eine starke Pegelanhebung beobachten, der sich für den Kompressor relativ konsistent abzeichnet und etwa zwischen 15dB und 20dB beträgt.

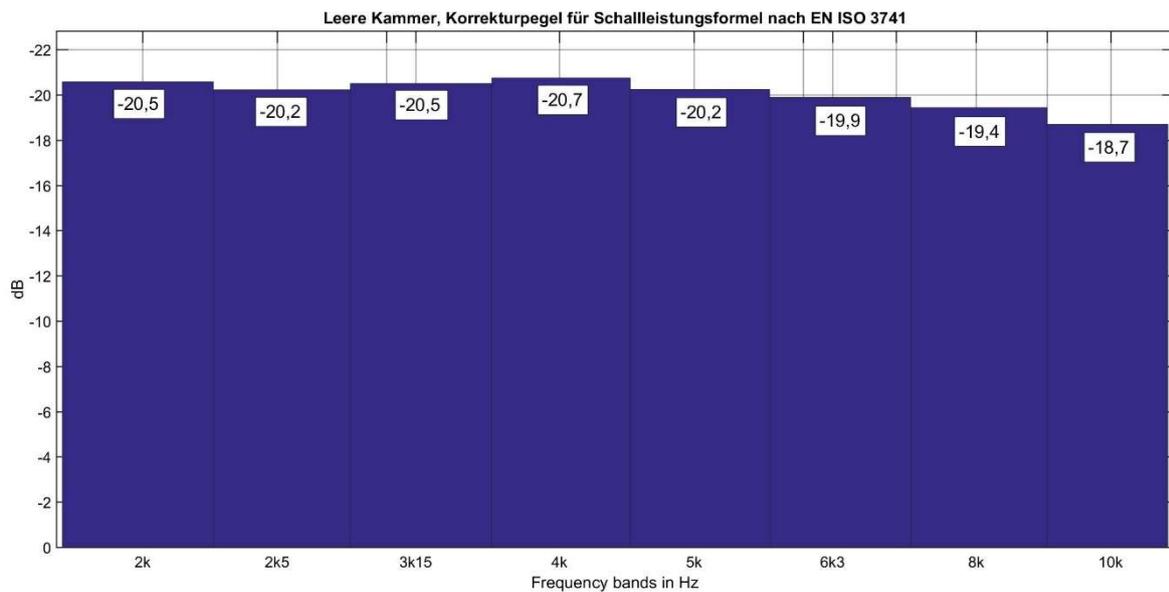


Abbildung 5-43: Korrekturpegel nach Formel 5-5 zur Schalleistungsbestimmung im Hochtonbereich

Die aus den Nachhallzeiten gewonnenen Pegel zeigen eine Reduktion um durchschnittlich etwa 20dB SPL, was, wie bei den Messungen in Abbildung 4-7 beobachtet, tendenziell passt. Vergleichen wir die ermittelten Pegel mit den Differenzpegeln zwischen Freifeld- und Kammermessung aus Abbildung 4-11, so liegen die Korrekturpegel etwas darüber. Allerdings berücksichtigt die Bestimmung der Nachhallzeiten aus Abbildung 5-42 nicht die Anwesenheit des Kompressors in der Messkammer.

Mit dem Bewusstsein, dass weder der Abstand des Lautsprechers zu den Wänden, noch die Mikrofonpositionen, noch die Proportionen von Hochtonlautsprecher und Messobjekt zur Kammergröße sich an skalierte Vorgaben der Norm EN ISO 3741 hält, wurden im nächsten Schritt Nachhallzeiten bei Anwesenheit des passiven Kompressors in der Kammer aufgenommen. Der Kompressor stand dabei in der Mitte der Kammer, bzw. wies sein Bezugsquader äquidistante Entfernungen zu den gegenüberliegenden Wandflächen auf. Der Hochtonlautsprecher fand in einer der Ecken Platz. Sein Mittelpunkt befand sich an der „Position 8“ aus der Diagonalmessung in Kapitel 5.5.

Abbildung 5-44 zeigt ein Foto des Messaufbaus. Wieder wurden Sweep-Messungen von 1600Hz-12kHz mit einer Dauer von 10 Sekunden durchgeführt und die Nachhallzeiten für den Bereich von 2kHz bis 10kHz mit Hilfe der ITA-Toolbox-Arithmetik ausgewertet. Da die Schallquelle in diesem Fall asymmetrisch im Raum steht, gilt unsere erste Frage dem Einfluss dieser Anordnung.

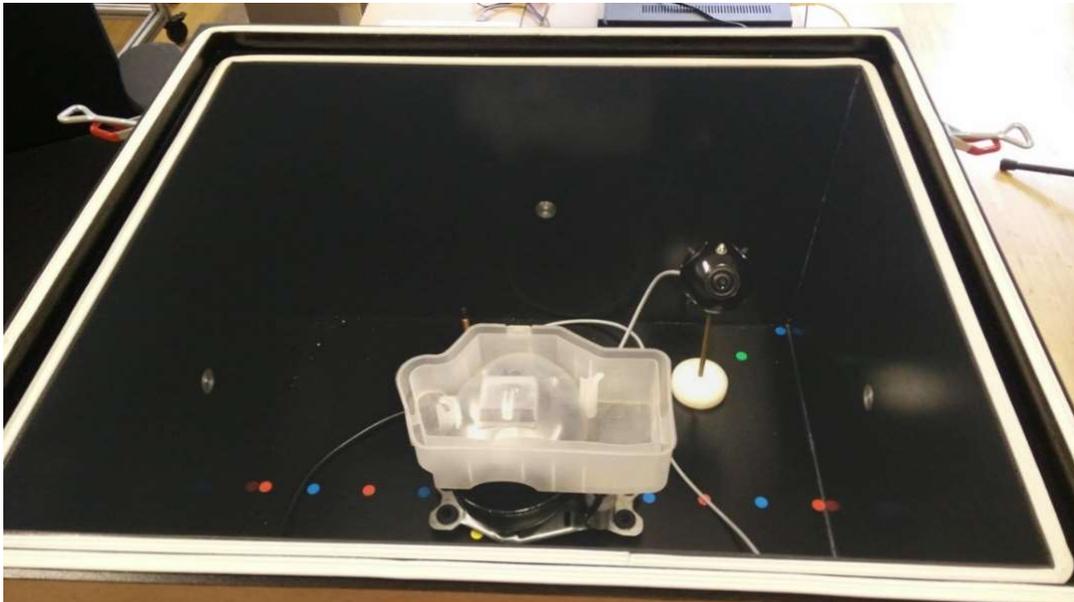


Abbildung 5-44: Messaufbau für die Hochtonmessung mit passivem Kompressor

In Abbildung 5-45 sind aus diesem Grund nicht wie in Abbildung 5-42 die Zeiten einer aus allen Hauptmikrofonpositionen gemittelten Durchschnittsauswertung angeführt, sondern die berechneten Zeitwerte für jedes der 5 Mikrofonsignale einzeln.

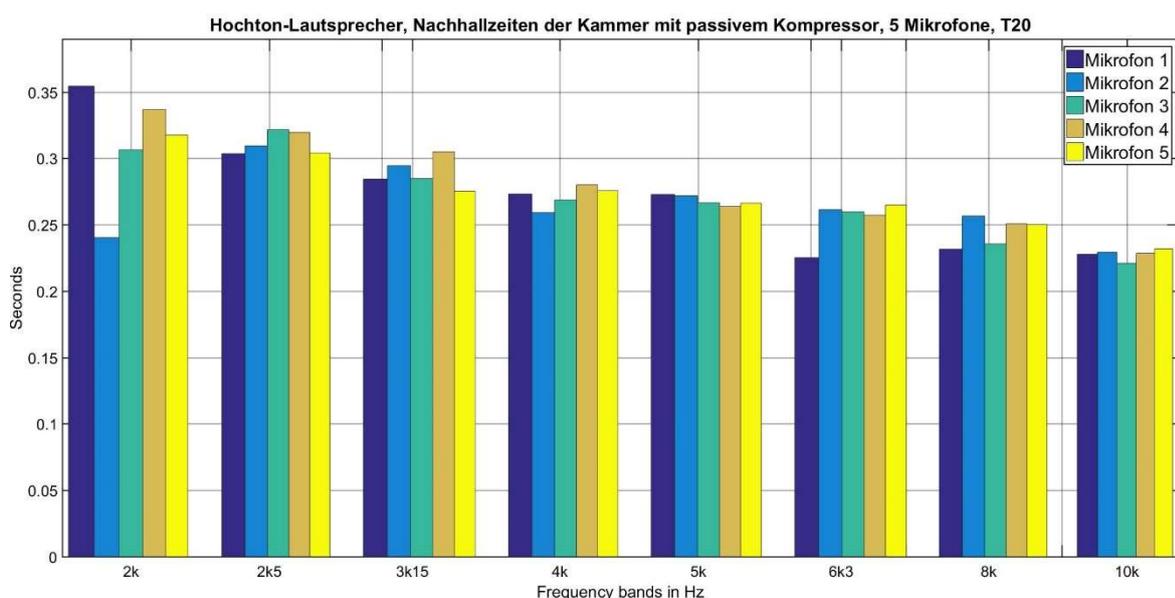


Abbildung 5-45: Nachhallzeiten aller Mikrofone mit passiven Kompressor in der Kammer

Räumt man eine gewisse Unsicherheit in der Nachhallzeitberechnung ein, so unterscheiden sich die Ergebnisse hauptsächlich beim 2kHz-Terzband. Dies erscheint auch logisch, denn die Theorie gab erst im Bereich ab 2,2kHz ein ausreichendes Diffusschallfeld an. Damit erhält man erst oberhalb dieser Frequenzgrenze nahezu positionsunabhängig dieselben Nachhallzeiten.

Mit dem passiven Kompressor fallen die Nachhallzeiten im Vergleich zur leeren Kammer kürzer aus. Dies mag unter anderem auf die Plastikverdunsterschale des Kompressors zurückzuführen sein, wie sie in Abbildung 3-3 und Abbildung 5-44 auf dem Kompressor aufgesteckt zu sehen ist. Diese Schale wurde bei allen Messungen auf dem Gerät angebracht gelassen.

Für eine Nachhallzeitmessung stellt das weiche Plastik akustisch sowohl reflektierende, als auch absorbierende Flächen dar. Der Kompressor selbst wirkt durch die runde Form eher als Diffusor. Wie aus Versuchen in Hallräumen bekannt, senken auch Diffusoren die Nachhallzeiten leicht. Durch die kürzeren Nachhallzeiten fallen die resultierenden Pegelabzüge in Formel 5-5 ebenso geringer aus, wie in Abbildung 5-46 im Vergleich zu Abbildung 5-43 ersichtlich ist. Die Werte passen nun auch besser zu den Differenzpegeln der Freifeld- zur Kammermessung in Abbildung 4-11.

Für eine Bestimmung des Schalleistungspegels im Hochtonbereich in Anlehnung an die Vorgangsweise der Hallraummethode nach EN ISO 3741 scheint es daher notwendig, vorher erst den Einfluss des Messobjekts auf das Schallfeld in der Kammer zu untersuchen, indem, wie oben durchgeführt, die Nachhallzeiten durch eine Hochtonquelle im Raum bestimmt werden. Aus diesen Nachhallzeiten lässt sich dann, wie in der Norm beschrieben, für den gültigen Frequenzbereich die Schalleistung bestimmen.

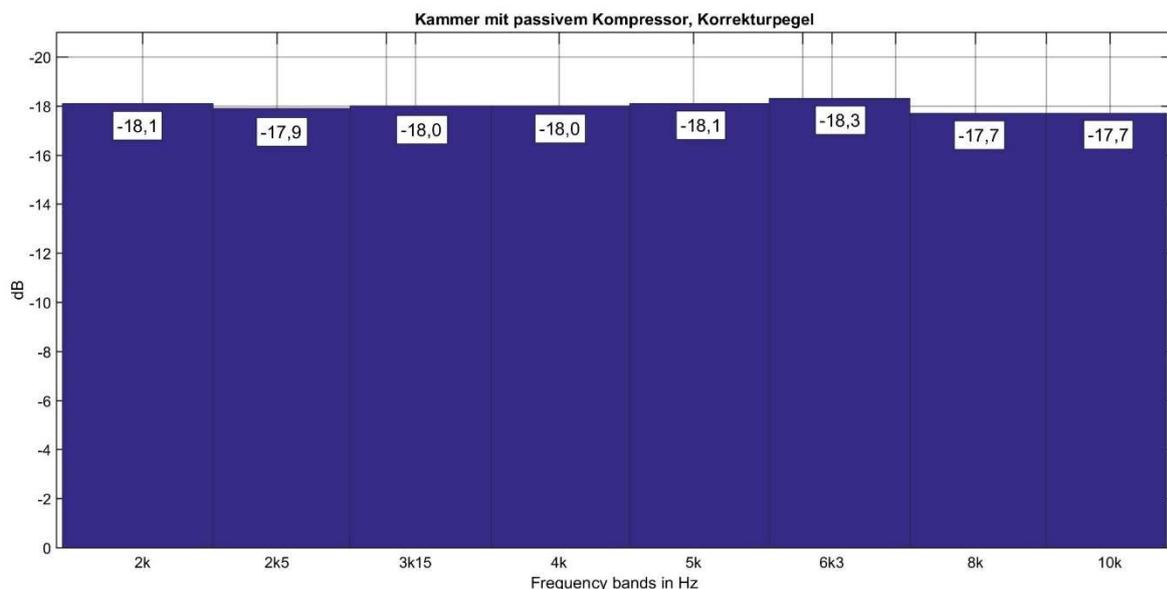


Abbildung 5-46: Korrekturpegel nach Formel 5-5 zur Schalleistungsbestimmung im Hochtonbereich mit passivem Kompressor

6 Anwendung der Korrekturstrategien

Im Folgenden sollen nun die im vergangenen Kapitel aufgestellten Strategien zur Pegelkorrektur der Kammermessung für den Kompressor umgesetzt werden. Im ersten Schritt wollen wir sicherstellen, dass die vergangenen Messungen mit dem PAK MKII zu Vergleichszwecken auch mit der Matlab-Messumgebung wiederholbar sind. Dies dient zum einen der Überprüfung der bisherigen Kammermessungen und zum anderen als Basis für die Korrekturschritte, da mit der Matlab-Messumgebung ja noch keine Messungen des aktiven Kompressors durchgeführt wurden.

6.1 DUT-Kammermessung mit verändertem Messsetup

Da für den Korrekturversuch weiterhin auf die flexibleren arithmetischen Funktionen von Matlab zurückgegriffen werden sollte, blieb es vorerst auch bei einer einkanaligen Messung mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Messsetup. Jegliche Ergebnisse aus der Messkammer, die bisher parallel erfasst werden konnten, mussten hier also wieder seriell gemessen werden. Der Schritt erscheint notwendig, um den Nachweis zu liefern, dass die Präzision der Messung mit dem MMF ICP-Konverter, dem RME-Audio-Interface und der ITA-Toolbox-Software den Ergebnissen der in Kapitel 4.3 durchgeführten PAK Mobile MKII-Messung näherungsweise gegenübergestellt werden kann.

Analog zum Messaufbau in Kapitel 4.2 erfolgte die Positionierung des Kompressors auch hier wieder in der Mitte der Kammer. Ein G.R.A.S. 40PL Mikrofon wurde in 5 Messungen von Hauptmikrofonposition 1 bis 5 umgesteckt und der Schalldruck des Kompressors in der Kammer je 60 Sekunden lang erfasst.

Durch den Umbau des Mikrofons vergingen zwischen den Messungen auch einige Minuten, in welchen der Kompressor wieder abkühlen konnte. Auf diese Weise sollte zum einen verhindert werden, dass der Kompressor durch längere Betriebsphasen signifikante Temperaturerhöhungen im Inneren und an der Oberfläche entwickeln konnte, die sich auf den Betriebszustand und die resultierende Schallentwicklung auswirken könnten und zum anderen ein möglichst einheitlicher Messablauf geschaffen und eingehalten werden, um die getrennten Einzelmessungen besser miteinander vergleichbar machen zu können.

Die Mittelwertbildung der Ergebnisse aus den 5 Signalen erfolgte erst nach der Terzbandfilterung. Abbildung 6-1 zeigt nun die Gegenüberstellung der auf diese Weise erhaltenen Werte zu jenen der zweiten Messreihe aus Abbildung 4-8.

Wie in Abbildung 6-1 zu erkennen ist, liegen die Pegel eng beieinander. Etwaige Abweichungen zwischen den Messreihen fielen bei der ersten und zweiten PAK-Kammermessreihe wesentlich umfangreicher aus. Der Summenpegel der orangenen Kurve in Abbildung 4-8 (hier ebenfalls in orange) berechnet sich zu 71,0dB SPL. Für die Werte der Matlab-Messung ergibt sich ein Pegel von 70,6dB SPL.

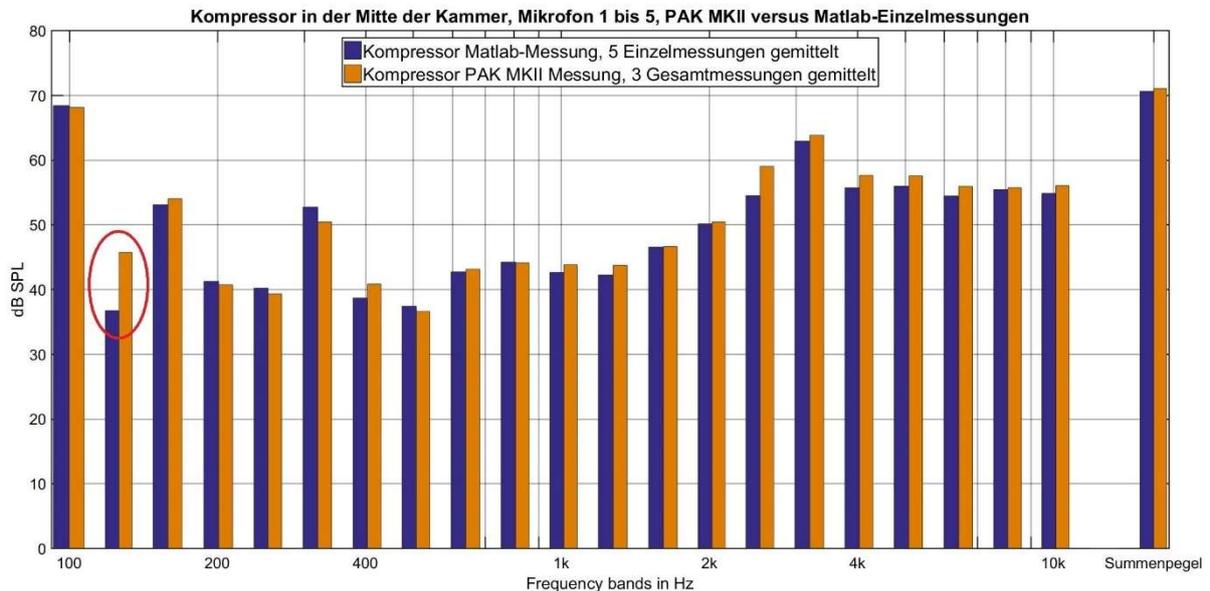


Abbildung 6-1: Reproduktion der Kammermessergebnisse mit der einkanaligen Matlab-Messung

Die Varianz der einzelnen Werte liegt etwa auf dem Niveau der Schwankungen zwischen der zweiten und dritten Messreihe des Kompressors mit dem PAK MKII. Einzig der in der Tat weit geringere Pegel des 125Hz-Bands sticht im Vergleich zu den bisherigen Kammermessergebnissen heraus, da sich die Resultate der ersten 3 Bänder bei den Messungen mit dem PAK MKII erstaunlich gut reproduzieren ließen.

Ob dieser Unterschied an der genaueren Messung mit dem PAK MKII liegt, oder an einem Fehler in der Matlab-Messreihe bleibt vorerst unbeantwortet. Betrachten wir das FFT-Spektrum eines der aufgenommenen Hauptmikrofon-Signale in diesem Frequenzbereich in Abbildung 6-2, so wird ersichtlich, dass der Grundpegel abseits der Vielfachen der Motorfrequenz sehr niedrig liegt. Bisher wurde darauf aufgebaut, dass die Kammer genügend Schallisolation nach außen bietet. Bei diesen Frequenzen kann aber gut sein, dass Körperschall über den Boden übertragen wurde und die Messung gestört hat. Das 125Hz-Terzband liegt genau zwischen den hohen Spitzen bei 100Hz und 150Hz.

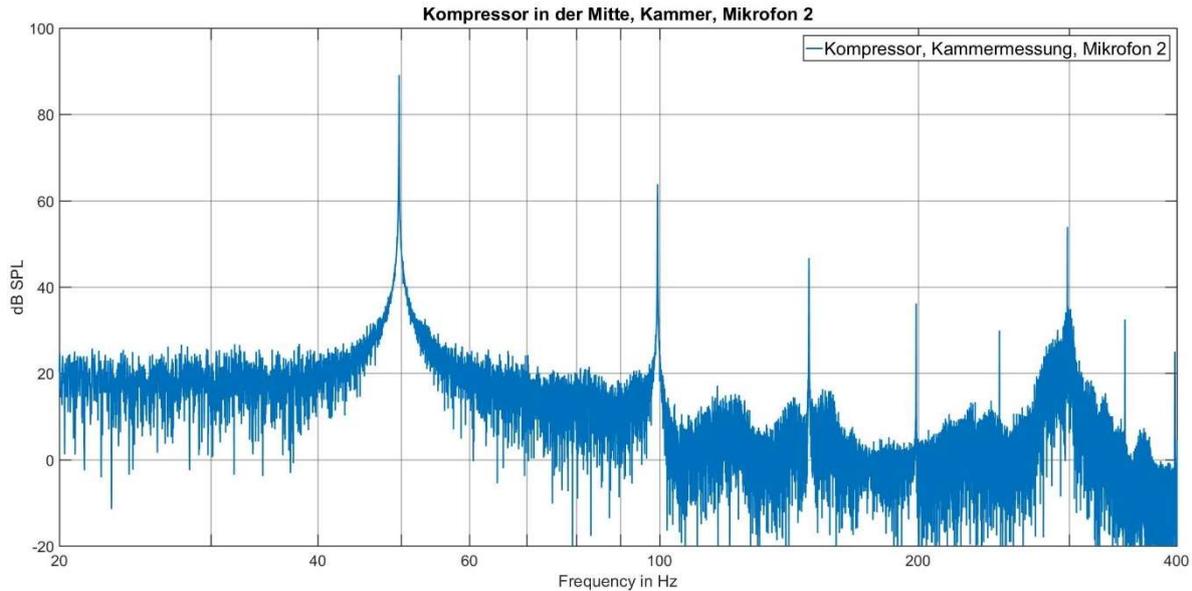


Abbildung 6-2: FFT-Analyse der Matlab-Messung, Mikrofonposition 2

Trotzdem darf die Reproduktion als zufriedenstellend angesehen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Messergebnisse mit Matlab in der Tat im Bereich der Schwankungen liegen, die in den Ergebnissen mit der vergleichsweise hochpräzisen Hard- und Software des PAK MKII ebenso aufschienen.

6.2 Tieftonkorrektur

Wie in Kapitel 5.4 dargelegt, erfährt eine Schalldruckmessung in der Kammer im Bereich unter den ersten Moden eine Pegelanhebung mit sinkender Frequenz. Durch die Differenzbildung aus einer Lautsprecher-Nahfeldmessung und der Übertragungsfunktion dieses Lautsprechers im Inneren der Kammer und anschließender Terzbandfilterung konnten die Pegel aus Tabelle 5-4 für Frequenzen bis 200Hz ermittelt werden. Tabelle 6-1 zeigt nun die Terzbandpegel aus der vierten PAK-MKII-Kammermessreihe des Kompressors für die ersten vier Frequenzbänder, die Korrekturpegel aus Tabelle 5-4, die damit korrigierten Pegel ersterer Messung und die Referenzwerte der Freifeldmessung des Kompressors aus Abbildung 4-8.

| | 100Hz | 125Hz | 160Hz | 200Hz |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| PAK-Kammermessung 4. MR | 68,0dB | 45,6dB | 53,3dB | 41,1dB |
| Korrekturpegel | 17,4dB | 13,4dB | 10,6dB | 6,3dB |
| Korrigierte Messung | 50,6dB | 32,2dB | 42,7dB | 34,8dB |
| Freifeldmessung | 50,7dB | 30,8dB | 42,3dB | 35,2dB |

Tabelle 6-1: Pegelkorrektur der Kammermessung und Vergleich zur Freifeldmessung

Wir erhalten bis auf das 125Hz-Terzband eine hervorragende Übereinstimmung der Pegel. Durch die sehr konsistenten Pegel des Kompressors im Tieftonbereich lässt sich also rein durch einen statischen Pegelabzug auf die Freifeldpegel zurückrechnen.

6.3 Korrektur des Modalbereichs

Obwohl das generelle Vorhaben für den Modalbereich in Kapitel 5.5 schon detailliert erklärt und untersucht wurde, fehlt noch ein klar ausgelegter Algorithmus, der mit dem Computer umgesetzt werden kann.

Rein von der Signalverarbeitung her gehen wir davon aus, dass der Ausgang und der Eingang des Audiointerfaces, sowie das G.R.A.S. Mikrofon und der ICP-Konverter so linear sind, dass sie keinen nennenswerten Einfluss auf den Signalweg haben. In diesem Fall reduzieren sich die frequenzabhängigen Komponenten der Messung des Kompressors lediglich auf die Messkammer selbst. Der Frequenzgang der Kammer ist aber nicht eindeutig. Er ist abhängig von der Quellengröße, dem Standort der Quelle, der Nähe der Quelle zum Mikrofon und dessen Standort. Eine Entzerrungskurve kann prinzipiell also nur für einen bestimmten Übertragungsweg angegeben werden.

Um eine solche Entzerrungskurve zu erhalten, muss ein Lautsprecher als Quelle dienen. Da es so gut wie kein Lautsprecherchassis mit absolut linearem Frequenzgang gibt, ist dessen mangelnde Linearität im Weiteren ebenso zu berücksichtigen. Der Lautsprecher kann nun an bestimmten Stellen in oder an der Kammer angebracht werden, um hernach mittels Sweep- oder MLS-Methode eine Impulsantwort zu messen. Das Ergebnis ist natürlich eine Kombination aus dem Frequenzgang des Lautsprechers und der Übertragungskurve der Messkammer von der gewählten Lautsprecherposition zur gewählten Mikrofonposition.

Misst man diese Übertragungsfunktion, muss, wie ermittelt wurde, auf Grund der geringen Abmessungen der Messkammer in Bezug auf die Größe des Kompressors, dessen Einfluss auf die Akustik ebenso bedacht werden. Deshalb erscheint es logisch für die Erfassung der Entzerrungskurve die Kammer mit dem abgeschalteten Messobjekt zu beladen. Da nun weder das Abstrahlverhalten des Kompressors mit dem Lautsprecher imitierbar, noch die Lautsprecherposition mit der Messobjektposition vereinbar ist, beschränkt sich die Erfassung der Entzerrungskurve auf eine Approximation. Wie gut sich eine passende Kurve annähern lässt, wurde in Kapitel 5.5 danach bewertet, welche räumliche Quelle-Empfänger-Kombination die wenigsten Lautsprechereinflüsse und die eindeutigsten und nachvollziehbarsten Modenbilder aufweisen konnte. Die besten Ergebnisse zeigten dabei jene Kombinationen an raumdiagonal gegenüberliegenden Ecken. Wurde eine solche Kurve erfasst und ausgewählt, kann nun in erster Näherung die Quelle-Empfänger-Kombination, sprich die Position des Kompressors und des Mikrofons angenähert werden. Da der Lautsprecher im vorliegenden Fall im Deckel sitzt, der Kompressor aber sicher auf dem Boden stehen wird, muss die Aufstellung also spiegel-symmetrisch umgekehrt erfolgen.

Die aufgenommene Entzerrungskurve muss nun zum einen noch von den nicht-idealen Eigenschaften des Lautsprechers getrennt und zum anderen so eingeppegelt werden, dass sie im Prinzip direkt die durch die Kammer verursachte Pegelüberhöhung wiedergibt. Dabei beruft sich der Algorithmus wieder auf die Pegelkorrektur einer Lautsprecher-Nahfeldmessung. Die Nahfeldmessung wird dabei so eingeppegelt, als hätte das Mikrofon im Freifeld jenen Abstand vom Lautsprecher wie Lautsprecher und Mikrofon in der Kammer voneinander getrennt stehen. Die korrigierte Nahfeldantwort kann daraufhin durch Frequenzgangdivision der Lautsprecher-Kammer-Messung abgezogen werden. Übrig bleibt nach dieser Operation die vom Lautsprechereinfluss getrennte Entzerrungskurve. Wird nun der Schalldruck des Messobjekts an der entsprechenden Mikrofonposition gemessen und die Frequenzantwort dieser Messung durch die Entzerrungskurve dividiert, erhält man theoretisch die korrigierte Frequenzantwort des Messobjekts, welche von den Einflüssen der Kammer befreit ist.

In Abbildung 6-3 ist dieser Ablauf in einem einfachen Flussdiagramm zusammengefasst. Um die Messung mit den bisherigen Auswertungen vergleichen zu können, muss natürlich noch ein Terzbandfilter auf die Übertragungskurve angewandt werden.

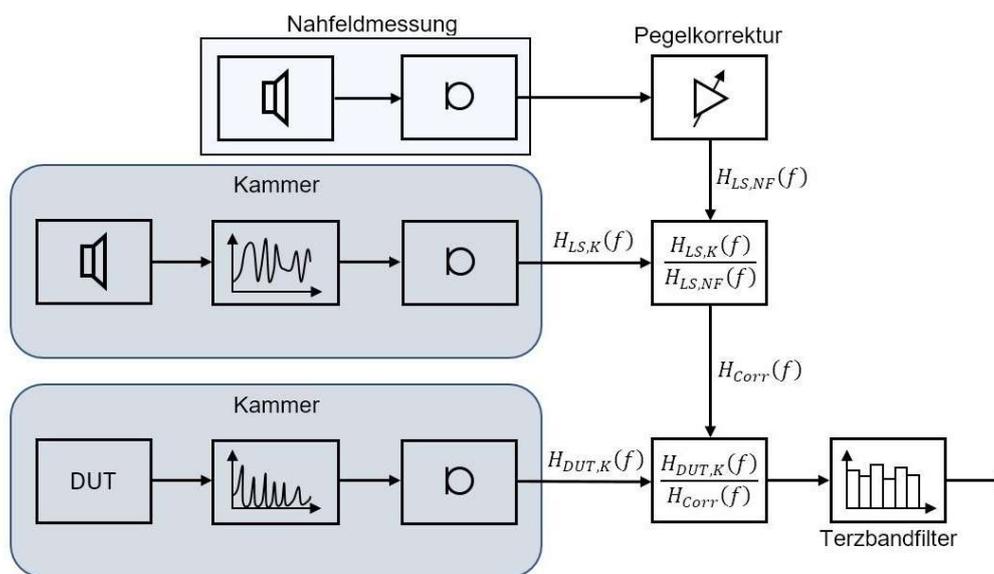


Abbildung 6-3: Flussdiagramm des Modalbereich-Entzerrungsvorgangs

Im Vergleich zur Pegelkorrektur der Lautsprecherbox in Kapitel 5.4 messen wir hier jedoch nicht mit einer Kugelquelle. Genaugenommen entspricht der Eckenlautsprecher auch keiner Halbkugelquelle, jedoch stellte sich empirisch heraus, dass die Formel für die Halbkugelquelle gute Ergebnisse liefert. Im ersten Schritt wird also eine Übertragungskurve analog zu jener in Abbildung 5-11 mit dem Deckenlautsprecher erfasst und mit Formel 6-1 im Pegel der Entfernung von etwa 72cm angepasst.

$$Scale_{NF,FF} = 20 \cdot \log \left(\frac{r_M}{2 \cdot d_{ref}} \right) \quad 6-1$$

Diese Entfernung ergibt sich aus einer Abschätzung der Quellenentfernung vom Eckenlautsprecher zur gegenüberliegenden Ecke, wobei hier aber eben nicht einfach Höhe, Breite und Tiefe der Kammer und die Querdiagonale daraus hergenommen werden kann, da der Lautsprecher eigentlich außerhalb der Eckenposition sitzt. Der äußerste Punkt des Lautsprechers liegt etwa je 6,8cm von den angrenzenden Wandflächen entfernt. Ebenso darf die Mikrokapsel nicht direkt in der Ecke, sondern muss etwa 5mm über dem Kammerboden miteinberechnet werden. Die Diagonale zieht sich also durch einen Quader mit den Maßen 49,2cm x 40,2cm x 33,5cm, was sich ca. zu 72cm berechnet. Für diese Entfernung gibt Formel 6-1 für den Visaton FRS8 mit 4cm Membranradius eine Pegelkorrektur der Nahfeldmessung von rund -31dB an. In Abbildung 6-4 wurde die dargestellte Kurve des Lautsprechers schon um diesen Pegel abgesenkt.

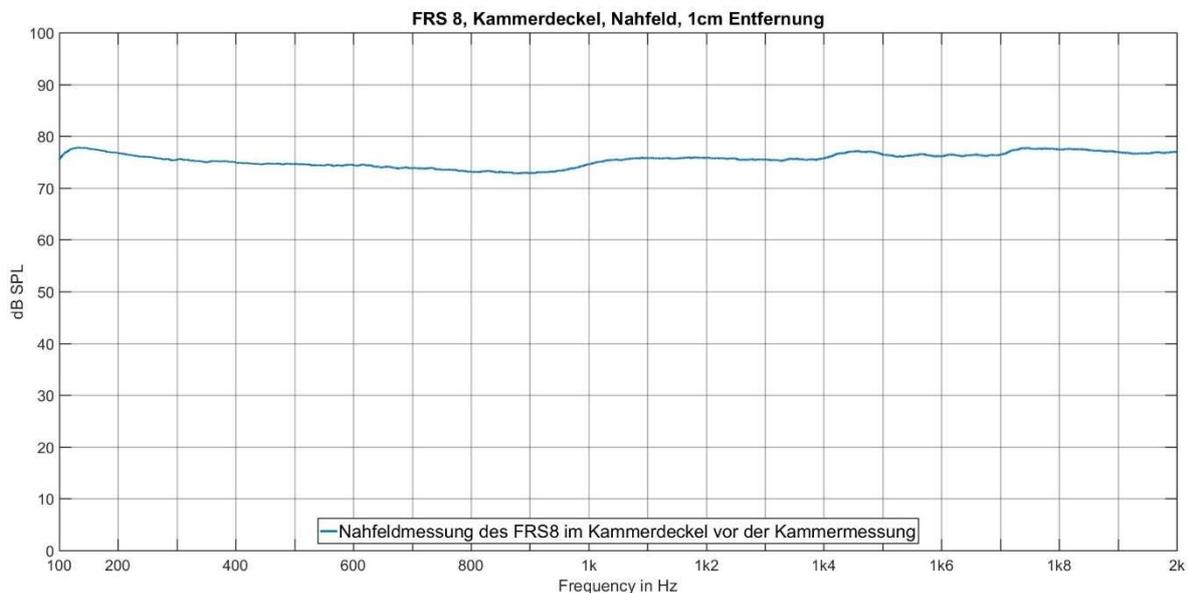


Abbildung 6-4: Pegelkorrigierte Nahfeldmessung des Deckenlautsprechers

Eine Aufstellung von Lautsprecher und Mikrofon mit passivem Kompressor wurde wie folgt gewählt. Der Lautsprecher befand sich im Deckel mit der Eckenpositionierungsmöglichkeit und damit in der in Kapitel 5.5 so getauften Ecke „3&4 oben“. Das Mikrofon fand entsprechend diagonal davon in „Ecke 1&2 unten“ Platz. Um den Effekt des passiven Kompressors mit in die Messung einfließen lassen zu können, erfolgte dessen Aufstellung in Ecke „1&4 unten“, so nah es eben möglich war. Aus dieser Konstellation konnte die in Abbildung 6-5 dargestellte Übertragungskurve ermittelt werden.

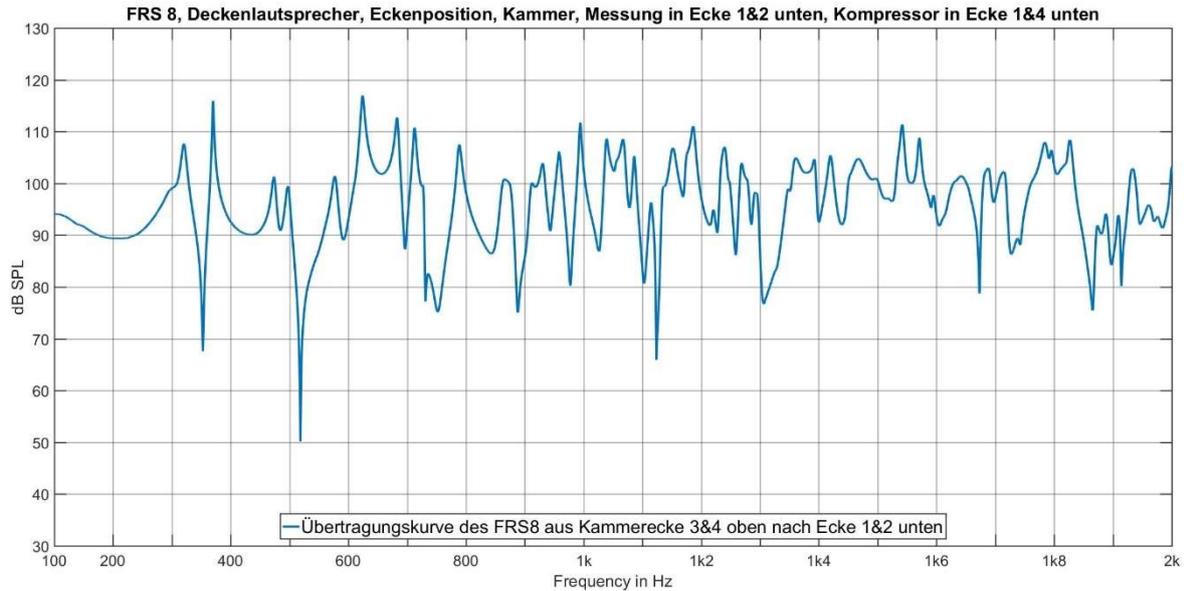


Abbildung 6-5: Übertragungskurve von Ecke zu Ecke

Nun folgt nach der Vorgehensweise aus Abbildung 6-3 die Division der Kammerübertragungsdurch die pegelkorrigierte Nahfeld-Übertragungskurve des Lautsprechers. Auf diese Weise erhält man die approximierte Korrekturkurve in Abbildung 6-6. Da eine Division mit logarithmischen Größen bekannter Maßen einer Subtraktion entspricht, reduzieren sich die Pegel dieser Kurve auf Werte, die auch im groben Überblick als Pegelüberhöhung der Kammermessung glaubhaft erscheinen.

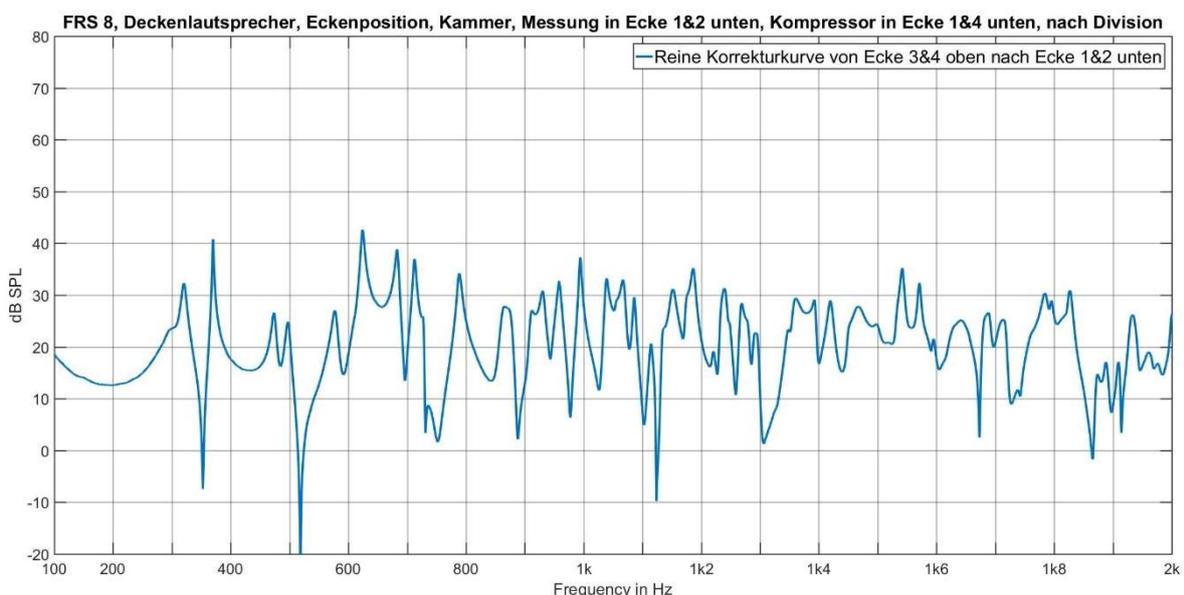


Abbildung 6-6: Korrekturkurve der Kammermessung von Ecke zu Ecke für den Kompressor

Der Verlauf der Korrekturkurve zeigt leider wieder einige Stellen, die auf Grund ihrer Scheitelfrequenz und wegen der Tatsache, dass es sich dabei um Einbrüche handelt, wieder der Quellenabhängigkeit angerechnet werden müssen. Es ist unbekannt, ob diese Einbrüche für den aktiven Kompressor in dieser Form überhaupt auftreten. Belässt man es bei dieser Korrekturkurve, würden unter Umständen Frequenzen des Spektrums des Kompressors angehoben werden, für welche diese Korrektur falsch ist. Eine Idee für einen Kompromiss wäre nun die Dynamik so zu begrenzen, dass hauptsächlich die Modenspitzen ausgeglichen werden. Aus den Beobachtungen der Modenanalyse heraus soll zu diesem Zwecke per Konvention das Minimum des Druckanstiegsbereichs bei etwa 200Hz gewählt werden. Würde die unberührte Kurve den Minimalpegel unterschreiten, setzt ihn ein Matlab-Befehl stattdessen auf den Minimalwert. Folgende Abbildung 6-7 zeigt nun die auf diese Weise pegellimitierte Korrekturkurve.

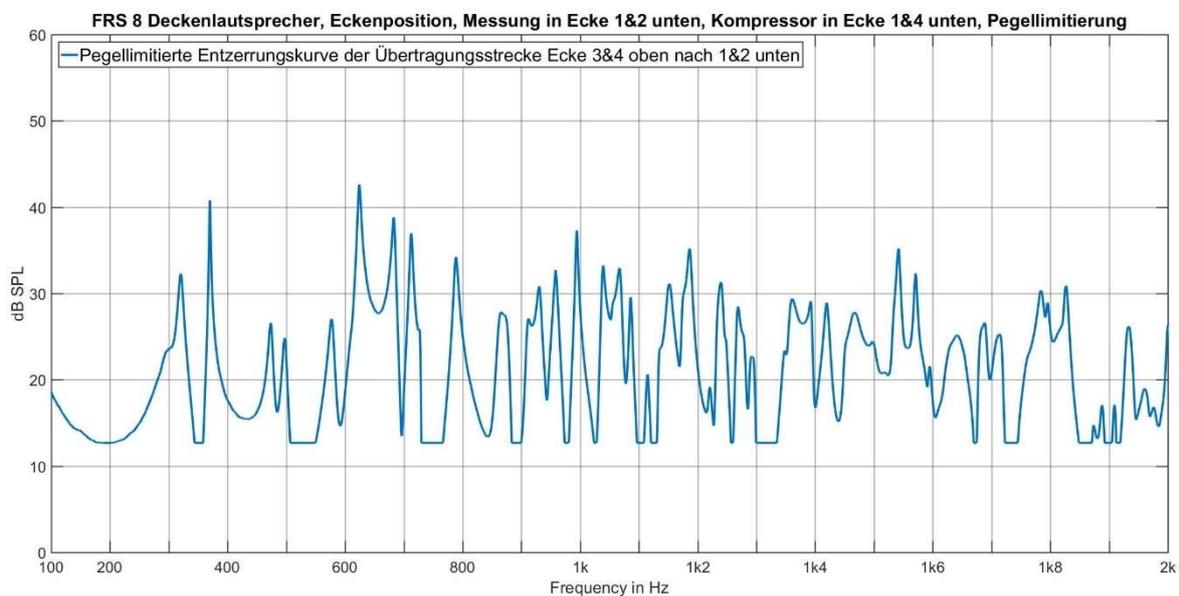


Abbildung 6-7: Pegellimitierte Korrekturkurve des Kompressors

Die erhaltene Kurve wird nun im letzten Schritt für die Division mit einer Messung des Kompressors in der Ecke „1&4 unten“ und dem Mikrofon in Ecke „2&3 oben“ verwendet. Abbildung 6-8 stellt das Ergebnis direkt Terzband-gefiltert dar, um es den Freifeld-Schalleistungsreferenzwerten aus Abbildung 3-7 (rote Kurve) gegenüberstellen zu können. Die resultierenden Pegel liegen teilweise mit den Referenzwerten gleich auf.

Erfreulich ist auch die gute Übereinstimmung der ersten vier Terzbänder, die zu Vergleichszwecken ebenso mit der Entzerrungsmethode statt mit der Tieftonpegelkorrektur aus dem vorherigen Unterkapitel ermittelt wurden. In diesem Fall weist sogar das 125Hz-Band einen verwandteren Pegel auf. Merklich falsch liegt die Korrektur der Kammermessung in den 400Hz, 800Hz, 1000Hz und 1250Hz-Bändern. Bei allen anderen Pegelunterschieden kann, aus der Erfahrung mit den Messreihen des Kompressors her auch eine Varianz des Betriebszustandes vermutet werden. Um diese Unsicherheit zu überwinden müsste im Weiteren eine Messung

des Kompressors im Freifeld mit einer anschließenden Messung in der Kammer unter kontrollierten Bedingungen im TU-Tonstudio erfolgen, bzw. mehrere dieser Messreihen durchgeführt werden.

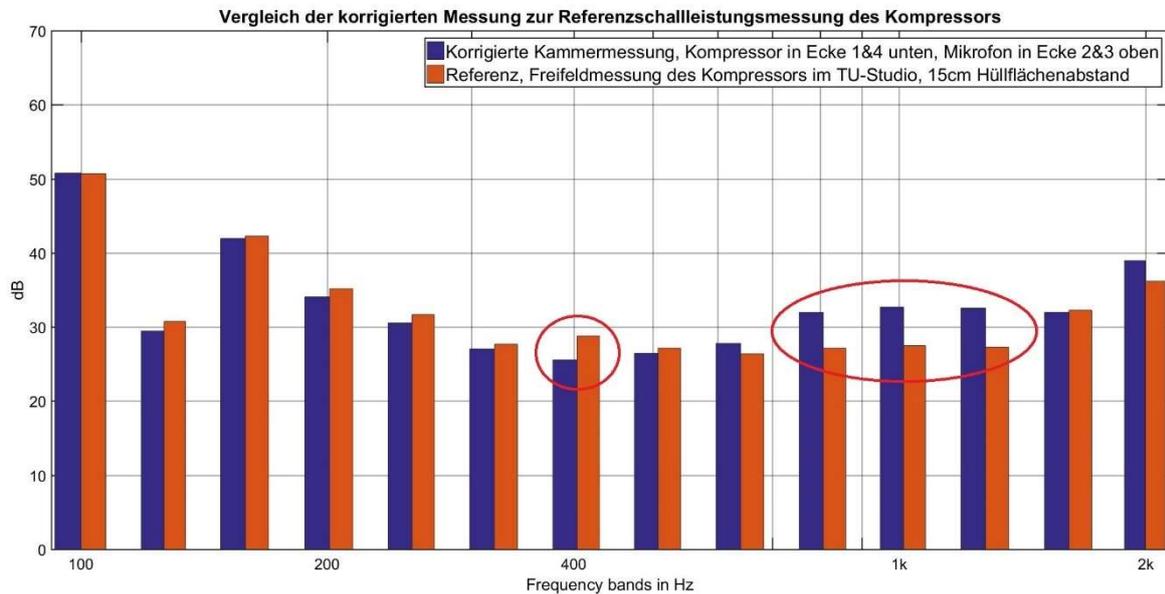


Abbildung 6-8: Resultierende Terzbandschalleistungspegel für eine entzerrte Kammermessung des Kompressors im Vergleich zur Referenz (Freifeld)

6.4 Wiederholbarkeit der Modalbereich-Entzerrungsmessung

Wie die bisherigen Gegenüberstellungen von Kammermessungen des Kompressors mit gleichem Messaufbau (Messreihen in Kapitel 4.3) aufzeigen, sind die Ergebnisse auch mit der Präzision des Müller BBM PAK MKII nicht absolut reproduzierbar. Ein Vergleich der aufgenommenen Messreihen des Kompressors in der Messkammer mit den Hauptmikrofonpositionen und dem PAK MKII ist in Tabelle 6-2 von 100Hz bis 2kHz zu Referenzzwecken dargestellt. Daraus ist ablesbar, dass immer eine leichte Varianz der Pegel gemessen wurde.

Die geringsten Abweichungen stellt man dabei in den ersten Terzbändern von 100Hz bis etwa 200Hz fest. Ab dem Modalbereich, beziehungsweise ab der Terzbandfrequenz von 315Hz und aufwärts liegen die Unterschiede dann jedoch nicht mehr innerhalb von 1dB SPL sondern variieren durchaus auch um 7dB SPL zwischen der ältesten und der aktuellsten Messung.

Berücksichtigt man diesen Sachverhalt, so wird in Bezug auf die entzerrte Messung im vorherigen Kapitel klar, dass Überprüfungen nötig sind, um den Ergebnissen eine tiefere Bedeutung beimessen zu können. Schließlich kann mit dem Wissen über die Varianzen des Kompressors selbst keine Aussage darüber getroffen werden, ob bei der entzerrten Messung in der Kammer nun die möglicherweise fehlerhafte Messmethode oder die Varianz des Betriebszustandes für die Abweichungen verantwortlich ist. Dafür wurde derselbe Messaufbau für den Kompressor

mit dem gleichen Messsetup wie in Kapitel 6.3 erneut angewandt und die Messung inklusive aller Schritte mit dem Eckenlautsprecher wiederholt.

| Frequenz | Messreihe 1 | Messreihe 2 | Messreihe 3 | Messreihe 4 |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 100Hz | 67,7dB | 68,1dB | 68,1dB | 68,0dB |
| 125Hz | 45,3dB | 45,7dB | 45,8dB | 45,6dB |
| 160Hz | 53,7dB | 54,0dB | 54,1dB | 53,3dB |
| 200Hz | 41,4dB | 40,7dB | 40,6dB | 41,1dB |
| 250Hz | 38,4dB | 39,3dB | 38,0dB | 37,6dB |
| 315Hz | 53,9dB | 50,4dB | 48,8dB | 46,7dB |
| 400Hz | 47,3dB | 40,8dB | 41,6dB | 40,1dB |
| 500Hz | 37,2dB | 36,6dB | 36,0dB | 36,4dB |
| 630Hz | 46,4dB | 43,1dB | 43,6dB | 42,4dB |
| 800Hz | 45,9dB | 44,1dB | 43,4dB | 42,0dB |
| 1000Hz | 48,9dB | 43,8dB | 41,5dB | 45,5dB |
| 1250Hz | 45,7dB | 43,7dB | 44,7dB | 45,3dB |
| 1600Hz | 49,0dB | 46,6dB | 46,7dB | 46,4dB |
| 2000Hz | 52,6dB | 50,4dB | 49,6dB | 48,4dB |

Tabelle 6-2: Vergleich von zeitlich weit getrennten Messungen des Kompressors in der Messkammer mit dem PAK MKII

Es erfolgte also erneut eine Nahfeldmessung des Deckenlautsprechers und mit demselben eine Übertragungsfunktionsmessung der Kammer für den raumdiagonalen Weg von Ecke „3&4 oben“ zu diagonal gelegener Ecke „1&2 unten“. Die Messung des Schalldrucks des Kompressors in Ecke „1&4 unten“ über einen Zeitraum von 60 Sekunden wurde dementsprechend symmetrisch in der Kammerecke „2&3 oben“ erfasst.

Auf die Zwischenschritte für die Ermittlung der Korrekturkurve sei für die Überprüfung der Messung hier verzichtet. Abbildung 6-9 stellt deshalb in Terzbandpegeln direkt die Ergebnisse der zweiten ITA-Messung den Ergebnissen der ersten ITA-Messung und den Pegeln der Freifeld-Referenz aus Abbildung 6-8 gegenüber.

Erfreulicher Weise liefert die zweite ITA-Messung ähnliche Werte im gesamten Bereich von 100Hz bis 2kHz. So liegt auch hier die Kurve zwischen 200Hz und 400Hz leicht unter der Referenzkurve, folgt aber demselben generellen Verlauf. Auch die Pegelüberhöhung der ersten ITA-Messung bei 800Hz bis 1250Hz ist wieder vorhanden. Vergleicht man die Abweichungen der Kammermessungen in Tabelle 6-2, die mit dem PAK MKII aufgenommen wurden, mit jenen, die bei den korrigierten ITA-Messungen auftraten, lässt sich zum Beispiel im 400Hz-

Terzband für die PAK-Messungen eine maximale Pegelabweichung von 7dB ablesen, während in Abbildung 6-9 zwischen der zweiten korrigierten Messung und den Freifeldpegeln maximal 5dB Abweichung auftritt.

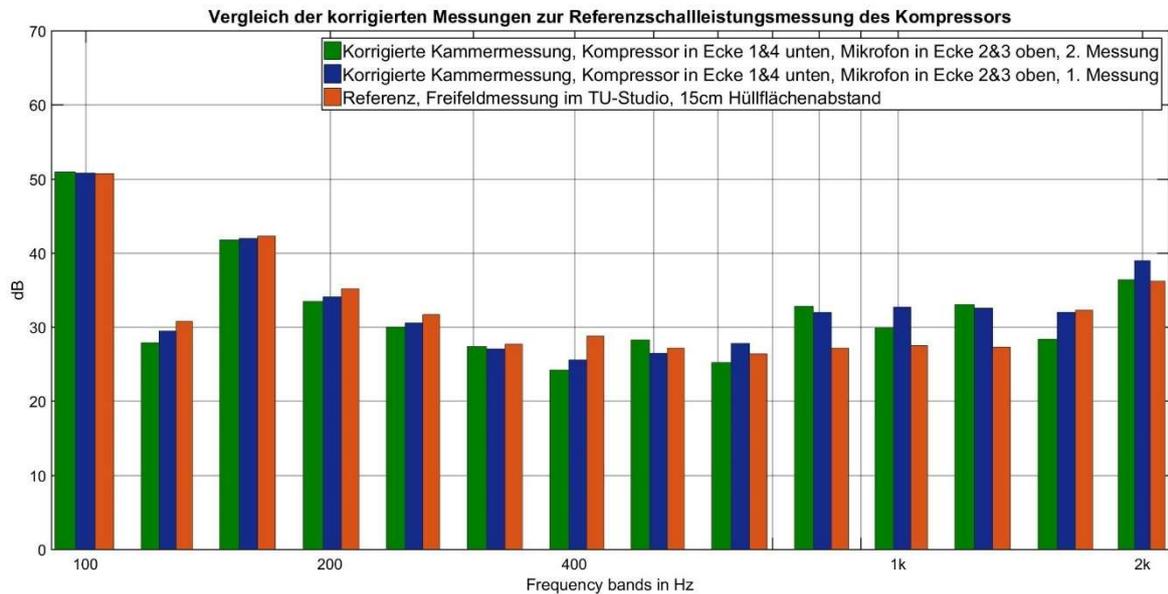


Abbildung 6-9: Vergleich der Freifeldschalleistungsmessung des Kompressors mit der ersten und zweiten ITA-Messung in der Messkammer mit durchgeführter Korrektur

Der Summenpegel bis 2kHz berechnet sich für die zweite Messung zu 51,9dB, für die erste Messung ebenfalls zu 51,9dB und für die Referenzmessung zu 51,7dB. Gerundet wird also in allen Fällen 52dB gemessen.

6.5 Alternative Modalbereich-Entzerrungskurven

Der versuchte Entzerrungsvorgang in Kapitel 6.3 stützte sich in den Ausführungen bisher auf das Argument, dass eine raumdiagonale Bestimmung der Übertragungskurve der Messkammer mit dem Lautsprecher am besten funktioniert, da auf diese Weise die Quelle am weitesten möglichen Punkt in der Kammer vom Mikrofon entfernt liegt. Wie die Untersuchungen in Abbildung 5-37 zeigten, ergeben sich für eine nur flächendiagonal gelegene Mikrofonposition, nämlich von Ecke „3&4 oben“ zur Ecke „2&3 unten“ und passivem Kompressor in der Kammer in Ecke „1&4 unten“ weit weniger tiefe Einbrüche in der Übertragungskurve.

Der Ansatz, dass sich eine Entzerrung mittels dieser Übertragungskurve positiv auf die Genauigkeit des Messergebnisses auswirken könnte, führte zum Entschluss, eine weitere Messung durchzuführen. Während für die Bildung der Entzerrungskurve also der oben beschriebene Übertragungsweg gewählt wurde, musste der Symmetrie wegen der Schalldruck des aktiven Kompressors in Ecke „1&4 unten“ daher mit dem Mikrofon in Ecke „1&2 oben“ gemessen werden. Abbildung 6-10 zeigt die daraus resultierende Entzerrungskurve mit

Pegellimitierung auf den Wert des tiefsten Punktes im Bereich von 200Hz, wie zuvor in Abbildung 6-7.

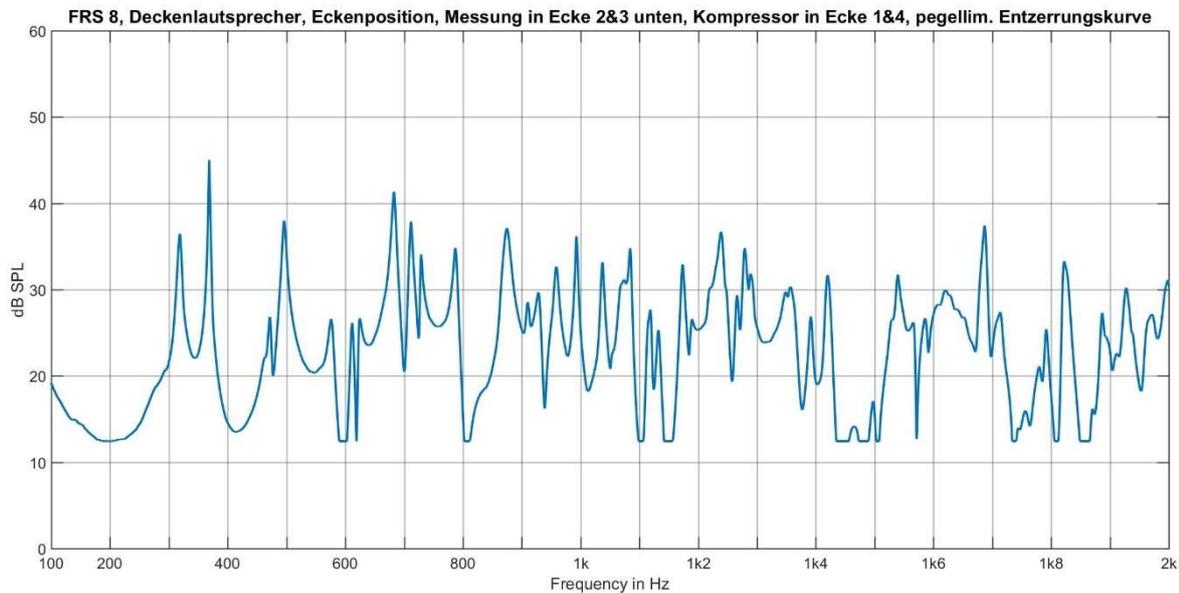


Abbildung 6-10: Alternative, pegellimitierte Korrekturkurve für die Kammermessung des Kompressors

Schon im visuellen Vergleich zur anderen Korrekturkurve fällt auf, dass abseits der stärksten, axialen Moden ganz andere Frequenzen stärker oder schwächer korrigiert werden. Natürlich handelt es sich hier ja auch um einen anderen Übertragungsweg. Wie im Ergebnis der korrigierten Messung in Abbildung 6-11 zu beobachten ist, liegen die korrigierten Terzbandpegel aber mitunter weit neben den Referenzpegeln.

Zwar liegen einige Terzbandpegel näher an der Freifeld-Messung, als bei den Messungen in Abbildung 6-9, dafür ist der Unterschied für andere Bänder weitaus stärker ausgeprägt. Von einer Verbesserung der Korrekturmethode kann also über diesen Weg nicht gesprochen werden. Der Summenpegel dieser Messung liegt mit rund 51dB auch merklich niedriger als jener der 1. und 2. ITA-Messung, welcher ja etwa bei 52dB lag.

Ein etwas experimentellerer Ansatz die nicht-raumdiagonale Korrekturkurve trotzdem zu verwenden, sieht vor, die Mikrofonkombinationen zu mischen. Das heißt, auf eine geometrische Symmetrie zwischen Lautsprecher- und DUT-Messung wird verzichtet und eine nur optisch als besser passend bezeichnete Korrekturkurve für die Korrekturmethode einer nicht-zugehörigen Messung des Kompressors verwendet.

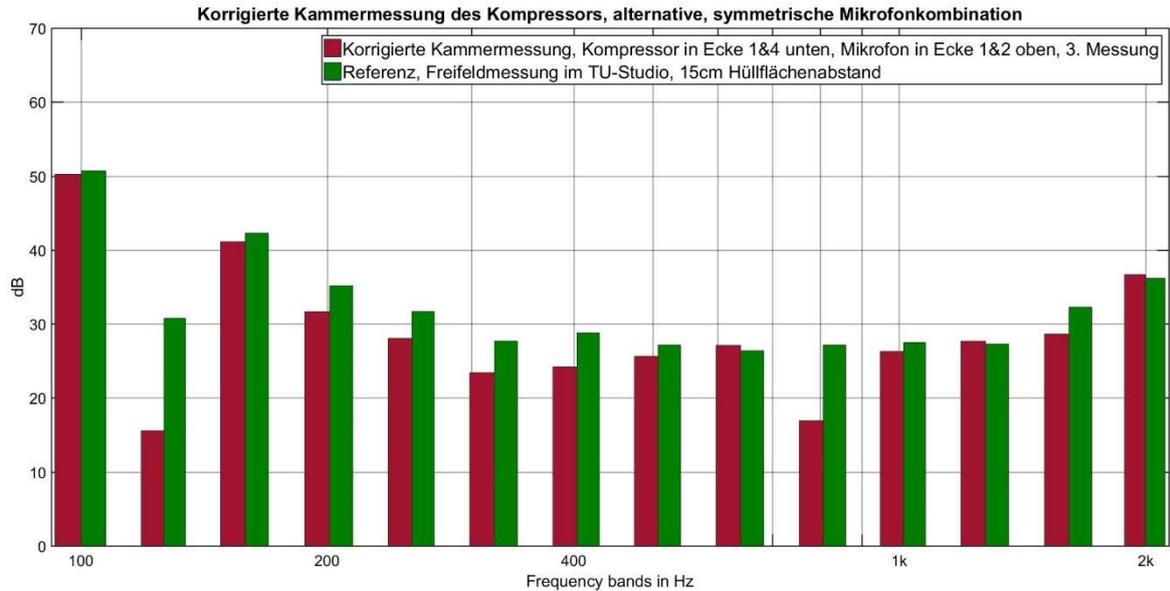


Abbildung 6-11: Mit der alternativen Korrekturkurve und Mikrofonkombination bestimmte, korrigierte Kammermessung versus Freifeld-Referenz des Kompressors, Schalleistungspegel

Im folgenden Versuch wird daher die Korrekturkurve aus Abbildung 6-10 wieder mit der Messung des Kompressors in Ecke „1&4 unten“ und dem Mikrofon in Ecke „2&3 oben“ kombiniert. Das Resultat ist in Abbildung 6-12 zu sehen.

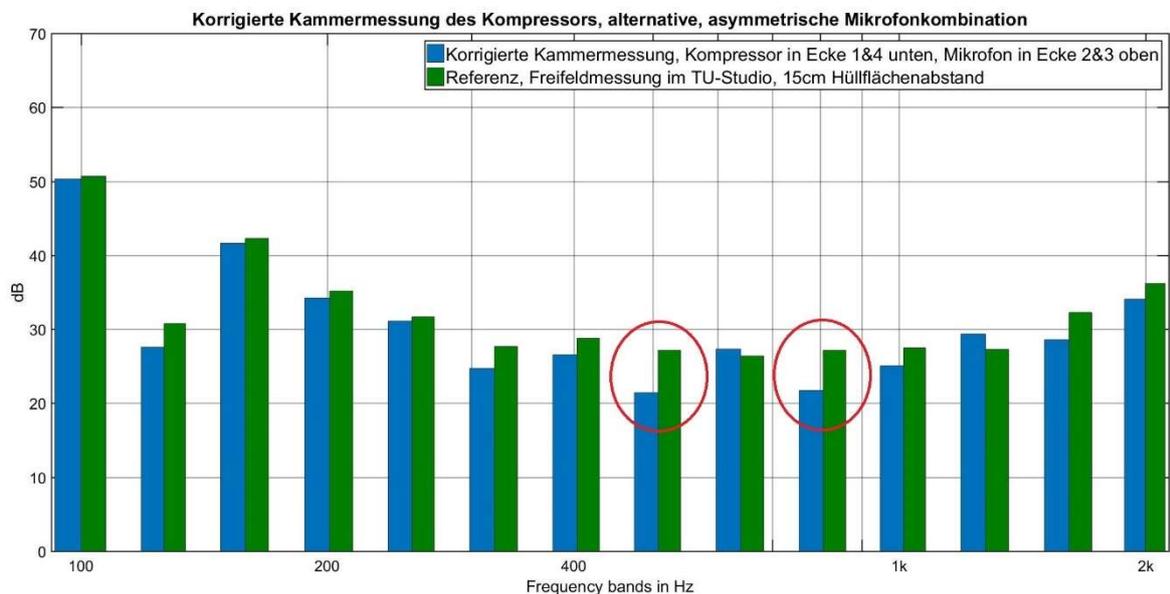


Abbildung 6-12: Pegelkorrigierte Kammermessung des Kompressors mittels asymmetrischer Korrekturkurve versus den Referenzschalleistungspegelwerten

Die resultierende Kurve weist ebenso bei 500Hz und bei 800Hz stärkere Pegelunterschiede auf als die erste und zweite Messung mit den symmetrischen Korrekturkurven, in vielen Bändern liegen die Pegel im Vergleich zu den symmetrischen Messungen jedoch näher an den Referenzwerten. Nun kann von diesem Ergebnis alleine noch nicht auf eine Verbesserung geschlossen werden. Dafür sind zumindest weitere Wiederholungen mit dem Kompressor und weiteren Testgeräten notwendig. Ließen sich mit anderen Testgeräten aber mit der asymmetrischen Korrekturkurvenmethode ebenso Ergebnisse bestimmen, die sich den Freifeldreferenzwerten gut nähern, würde sich anbieten, aus beiden Messungen eine Durchschnittswertkurve zu bilden. Im Falle der korrigierten Messungen aus Abbildung 6-9 und Abbildung 6-12 ergäben sich eventuell bessere Näherungen.

6.6 Hochtongkorrektur

Für die Hochtongkorrektur benötigt man laut der in Kapitel 5.7 aufgestellten Methode eine Messung des Kompressors in der Kammer an den Hauptmikrofonpositionen und die in Kapitel 5.7 für den jeweiligen Kompressor ermittelten Nachhallzeiten, in diesem Fall jene aus Abbildung 5-45. Für die zu korrigierenden Werte der Kammermessung des Kompressors sollten die aufgenommenen Pegel der zweiten Messreihe dienen. In Abbildung 6-13 sind die durch die Korrektur resultierenden Terzbandpegel dieser Messung den Referenzwerten des Kompressors in 15cm Abstand aus Abbildung 3-7 (rote Kurve) gegenübergestellt.

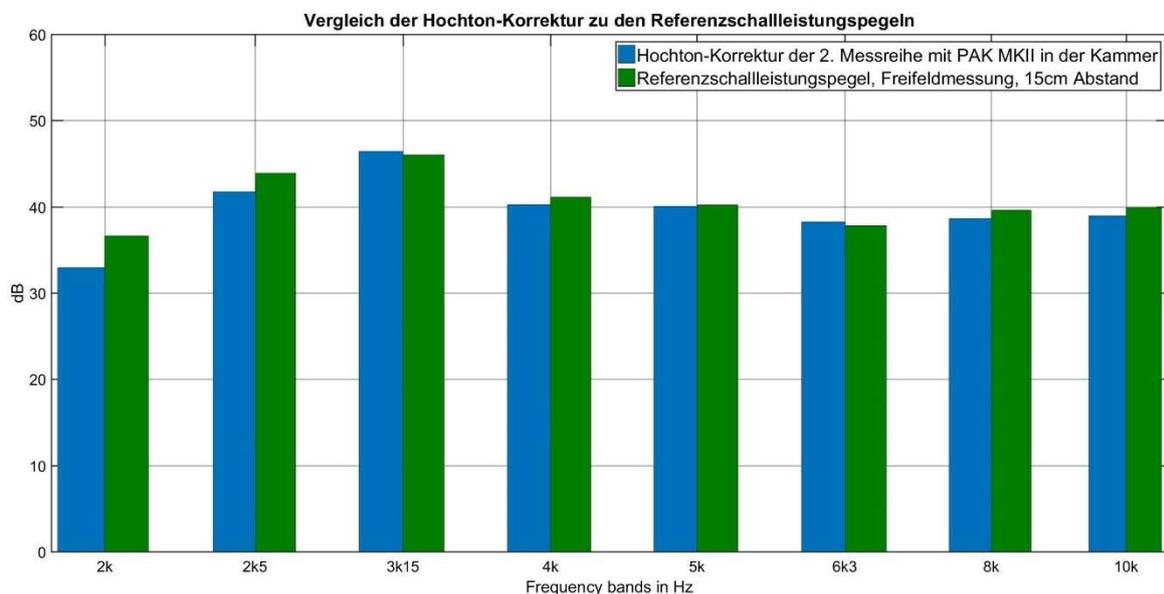


Abbildung 6-13: Hochtong-Korrektur der 2. Kammermessreihe des Kompressors

Dabei ist wieder zu beachten, dass die korrigierten Pegel der Hochtongkorrektur nach Formel 5-5 direkt einen Schalleistungspegel berechnen. Die Ergebnisse müssen daher auch mit den Schalleistungspegeln der Freifeldmessung verglichen werden. Tabelle 6-3 zeigt die Werte der Abbildung in Zahlen. Es ergeben sich oberhalb von 2kHz sehr geringe Differenzen zu den Referenzwerten der Freifeldmessung.

| Frequenz | 2. Messreihe PAK MKII, Kammer | Pegelkorrektur aus Kapitel 5.7 | Korrigierte Pegel, Kammer | Freifeldschall- leistungspegel | Differenz |
|----------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 2kHz | 51,0dB | 18,1dB | 32,9dB | 36,6dB | 3,7dB |
| 2,5kHz | 59,6dB | 17,9dB | 41,7dB | 43,9dB | 2,2dB |
| 3,15kHz | 64,4dB | 18,0dB | 46,4dB | 46,0dB | 0,4dB |
| 4kHz | 58,2dB | 18,0dB | 40,2dB | 41,1dB | 0,9dB |
| 5kHz | 58,1dB | 18,1dB | 40,0dB | 40,2dB | 0,2dB |
| 6,3kHz | 56,5dB | 18,3dB | 38,2dB | 37,8dB | 0,4dB |
| 8kHz | 56,3dB | 17,7dB | 38,6dB | 39,6dB | 1,0dB |
| 10kHz | 56,6dB | 17,7dB | 38,9dB | 39,9dB | 1,0dB |

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung der Terzbandpegel des Hochtonbereichs für den Kompressor

6.7 Zusammenfassung der Korrekturen

Für einen besseren Überblick sind die Ergebnisse der drei Korrekturmethode in folgender Abbildung 6-14 zusammengefasst dargestellt. Der Schalleistungssummenpegel der korrigierten Kammermessung ist 54,1dB, jener der Freifeldschalleistungsmessung aus Abbildung 3-7 (rote Kurve) ist 53,8dB. Die Ergebnisse liegen also nur 0,3dB auseinander.

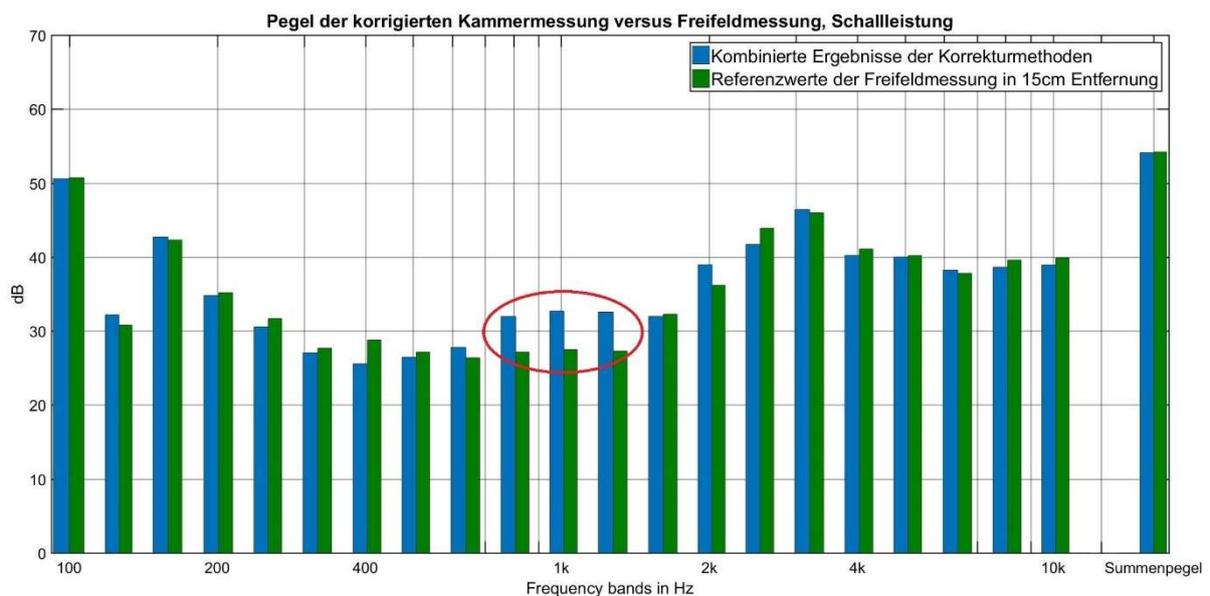


Abbildung 6-14: Vergleich der Schalleistungspegel der korrigierten Kammermessung und der Freifeldwerte des Kompressors in 15cm Entfernung

Ob diese Schalleistungsbestimmung korrekt und legitim ist, steht natürlich trotz der guten Ergebnisse zur Debatte. Nicht zuletzt deshalb, weil im Freifeld Messflächen angewandt wurden, die kleiner sind als die konventionell festgelegte Bezugsfläche von 1m^2 , bzw. mit einem Messabstand von 15cm von der Bezugsquaderfläche des Kompressors die Referenzmessung auch näher durchgeführt wurde, als es die Norm EN ISO 3744 für die Schalleistungsbestimmung in Freifeldsituationen erlaubt. Wie im Laufe der vorliegenden Arbeit schon erwähnt, wurden diese Vorgaben bewusst verletzt. Zum einen wegen der geringen Pegel des Kompressors und dem Grundrauschen der Mikrofone, da selbst bei G.R.A.S. 46AE $\frac{1}{2}$ -Zoll-Freifeldschalldruckempfängern eine Messung des Kompressors in 1m Entfernung teilweise im Rauschen untergehen würde.

Zum anderen ist die Messumgebung im Tonstudio der TU-Graz auch nicht mit einem echten reflexionsarmen Halbraum zu vergleichen und die Messung in der Kammer ohnehin rein experimentell. Auch ist seit der Analyse in Abbildung 6-2 bekannt, dass der Messbereich von 100Hz bis 10kHz einen hochenergetischen Teil des emittierten Frequenzspektrums des Kompressors unter 100Hz vollkommen ignoriert. Je nach Möglichkeit der Messungen in tatsächlichen Druckkammern, die Untersuchungen in einer Folgearbeit bedingen, könnte die Kammermessung aber unter Umständen dahingehend erweitert werden. Die Vergleichbarkeit der Endergebnisse aus dem Freifeld und der Kammer ist daher ein durchaus positiver Ausblick für weitere Untersuchungen und Experimente auf Basis der vorgestellten Korrekturstrategien.

7 Dokumentation der Kammermessung

In diesem Kapitel wird Schritt für Schritt der Messprozess mit der Messkammer durchexerziert. Dabei wird das Vorhandensein von Freifeldreferenzwerten, sowie deren Erfassung im reflexionsarmen Raum außer Acht gelassen. Die Beschreibung konzentriert sich ausschließlich auf die Durchführung der Messkammermessung mit der verwendeten Messausrüstung, die während des praktischen Teils der Arbeit zum Einsatz kam.

7.1 Messumgebung

Nach dem letzten Stand der vorliegenden Arbeit ist für die gesamte Messung sowohl die in Kapitel 3.1 bzw. 4.2 genannte Müller BBM PAK Ausrüstung, als auch jenes, in Kapitel 5.2 beschriebene Equipment, für Matlab-basierte Messungen notwendig. Der Begriff „PAK System“ umfasst das oft genannte PAK Mobile MKII in Kombination mit zwei 4-Kanal-ICP-Modulen. Auf dem zugehörigen Laptop des Institutes für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation war Version 5.9 der PAK-Software installiert. Die Verbindung zum PAK Mobile MKII wurde über ein schirmloses Ethernet-Netzwerkkabel hergestellt. Als Messmikrofone kamen fünf Stück G.R.A.S. 40PL ICP-Druckempfängermikrofone zum Einsatz, die mit SMB-Kabeln an den ICP-Modulen des PAK Mobile MKII angeschlossen waren.

Die Messungen mit Matlab umfassten die in Tabelle 5-1 aufgelistete Ausrüstung. Ein einzelnes G.R.A.S. 40PL wurde über ein SMB-zu-BNC-Adapterkabel an einen MMF Radebeul M68D1 ICP-Konverter angeschlossen. Dessen Ausgangssignal steckte über eine BNC-zu-TS-Klinke-Leitung am Kanal 5 des verwendeten RME UCX. Dieser Eingang wurde gewählt, da die Kanäle 5 bis 8 des RME UCX reine Line-Eingänge darstellen, die von keiner zusätzlichen Mikrofonvorverstärkerelektronik beeinflusst werden. Die Verbindung des RME-Geräts mit einem Laptop erfolgte über eine USB 2.0 Leitung. Auf diesem Computer war Matlab R2015a Version 8.5 sowie Revision „12766“ der ITA-Toolbox installiert.

Der Visaton FRS8 Lautsprecher wurde durch einen Parasound HCA-800II verstärkt. Der Verstärker selbst war über eine symmetrische TRS-Leitung am RME-Interface angeschlossen. Der Lautsprecher hing über eine gewöhnliche Hi-Fi-Lautsprecherleitung am Leistungsverstärker. (Siehe Abbildung 5-2)

7.2 Anleitung für den Messablauf

Der Aufwand der Kammermessungen umfasst, wie in den vergangenen Kapiteln beschrieben, mehrere Durchgänge mit unterschiedlichen Schallquellen. Eine möglichst zeitsparende und effektive Abfolge impliziert primär eine minimale Anzahl an Umstellungen des Messaufbaus im Kammerinneren. Notwendig sind folgende Schritte:

- (Die Aufnahme der Impulsantwort des Lautsprechers im Nahfeld)
- Die Erfassung der Kammerimpulsantwort durch den Deckenlautsprecher in der Eckenposition und einer raumdiagonalen Mikrofonposition mit passivem Testobjekt in einer geeigneten Kammerecke (siehe Kapitel 5.5)
- Die Messung des aktiven Testobjekts in einer Raumecke entsprechend symmetrisch zur vorherigen Messung (siehe Kapitel 6.3)
- (Die Messung des aktiven Testobjekts in der Raummitte an den als „Hauptmikrofonpositionen“ genannten Punkten in den Flächenmitten der Wandflächen)
- (Die Aufnahme einer Hochtton-Raumimpulsantwort mit passivem Testobjekt in Kammermitte für die Berechnung der Nachhallzeiten in diesem Frequenzbereich)

Für eine effiziente Abarbeitung dieser Aufgaben wäre natürlich ein einziges, hochpräzises Mess-Frontend ideal. Hypothetisch gesehen ließe sich dies z.B. durch das Integrieren eines Funktionsgenerators in das PAK-System zur Erfassung von Impulsantworten realisieren. Ebenso würden schon fix installierte Eckenpositionsmikrofone in der Messkammer den Arbeitsaufwand senken.

Kann weiters noch für einen Leistungsverstärker mit digital gesteuertem Output oder durch andere Möglichkeiten ein statischer Verstärkungsfaktor des Lautsprechers garantiert werden, erübrigt sich zudem die Erfassung der Lautsprecher-Nahfeldantwort, sofern eine solche Kurve am Computer abgelegt worden ist. Damit reduziert sich die Kammermessung exklusive Messaufbau auf 4 Arbeitsschritte und einmaligem Umstellen des Testobjekts. Könnte in Folgeexperimenten nachgewiesen werden, dass die Messungen für den Hochttonbereich ebenso durch eine Eckenaufstellung des Objekts bewerkstelligt werden können, so reduziert sich die Messung sogar auf nur 3 Schritte, da die Messwerte für den Hochttonbereich zusammen mit den anderen Werten erfasst werden könnten und das Gerät so nur einmal aufgestellt werden müsste. Ließe sich auch nachweisen, dass der Deckenlautsprecher als Quelle für den Diffusschallbereich gleichwertige Ergebnisse für die Bestimmung der Nachhallzeiten liefert wie die Hochttonlautsprecherkugel, könnte eventuell eine breitbandige Impulsantwort für die Modalbereichsentzerrung und für die Hochttonkorrektur verwendet werden. In dem Fall reduziert sich der Aufwand auf effektiv 2 Schritte.

Im Folgenden sei jedoch der Vollständigkeit halber die Messpraxis während der praktischen Phase der vorliegenden Arbeit inklusive aller 5 Arbeitsschritte beschrieben.

Die nötigen Schritte für die Messdurchführung in Matlab reduzieren sich hauptsächlich auf die Bedienung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) der ITA-Toolbox. Um eine Messung mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Aufbau zu starten, wird zunächst ein ASIO-fähiges Interface unter Windows, oder eine entsprechende *CoreAudio* Hardware unter Macintosh vorausgesetzt. Nach dem Programmstart von Matlab öffnet sich durch Eingabe des Textbefehls „*ita_preferences()*“ ein Fenster (siehe Abbildung 7-1) unter dessen Unterpunkt „IO Settings“ die installierte Soundkarte ausgewählt werden muss. Unter „Recording Device“ bzw. „Playing Device“ wird jeweils das Gerät für die Eingänge und Ausgänge definiert. Ein Betrieb mit zwei separaten Audiointerfaces ist möglich, wird aber von der ITA-Toolbox nicht empfohlen.

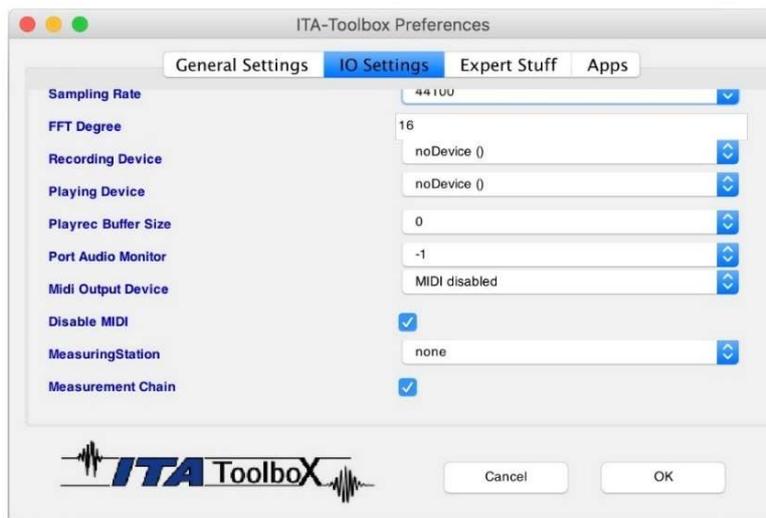


Abbildung 7-1: ITA-Eigenschaften-Fenster

Natürlich existieren für alle folgenden Schritte ebenso rein Befehlszeilen-basierte Vorgangsweisen. Für eine klarere Übersicht soll aber das ITA-GUI dienen. Mit der Eingabe des Befehls „*ita_toolbox_gui*“ öffnet sich diese Benutzeroberfläche bildschirmfüllend. Am oberen Rand finden sich einige Matlab-eigene Optionen (File, Edit...), in der gleichen Zeile rechts daneben sind die ITA-Toolbox-Optionen angehängt (ITA, Workspace...). Der letzte Punkt ist die Option „Measurement“ und enthält den Befehl „New Measurement Setup“ (siehe Abbildung 7-2).

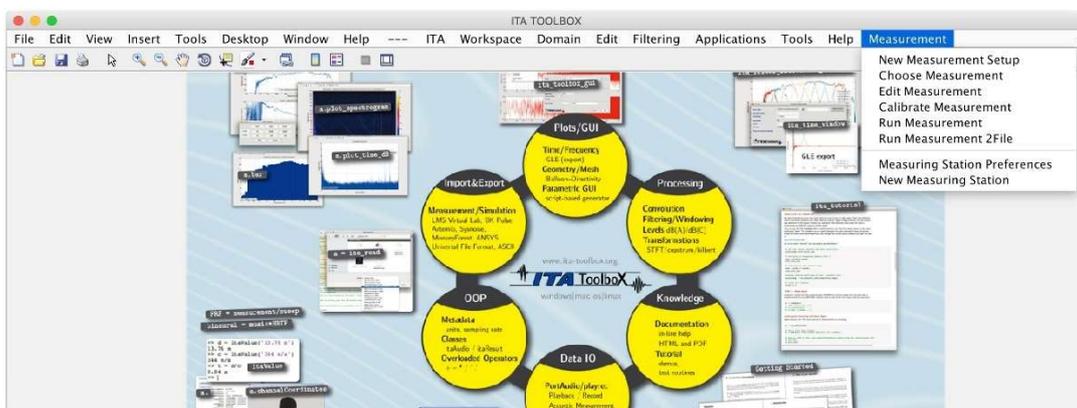


Abbildung 7-2: Übersicht des ITA Toolbox GUI Fensters

Die Auswahl dieser Option kann drei verschiedene Arten von „Messklassen“ erstellen, die nach der Konfiguration im Workspace von Matlab abgelegt werden: eine „Record“- , eine „Playback & Record“- und eine „Transferfunktion“-Klasse. Die objektorientierte Programmierung der ITA-Toolbox generiert daraus ein Objekt, das alle benötigten Methoden schon beinhaltet. Ein „itaAudio“-Objekt kann z.B. direkt mit dem Befehl „*Beispielobjekt.plot_freq*“ die entsprechende FFT-Analyse aufrufen, ohne, wie sonst in Matlab gewohnt, die Funktion „plot“ mit Angabe von oft umfassenden Details auszuführen, um die Daten graphisch anzeigen zu lassen. Wir wollen nun für die Ermittlung von Übertragungskurven dementsprechend ein Messobjekt „itaMSTF“ erstellen lassen. Dafür wählt man, wie oben beschrieben, unter „Measurement“ den Eintrag „New Measurement Setup“ aus, worauf sich folgendes Fenster aus Abbildung 7-3 öffnet. Anklicken der Schaltfläche „Transferfunktion“ schließt das Fenster und öffnet jenes aus Abbildung 7-4.

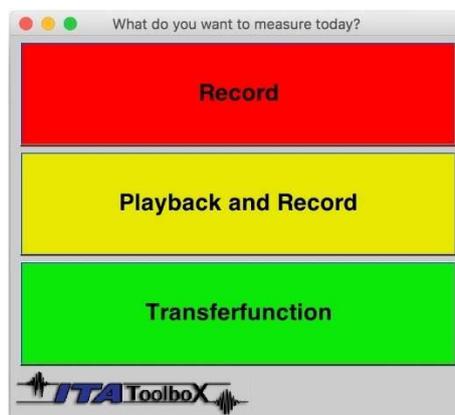


Abbildung 7-3: Auswahl der Messklasse

Im Falle der verwendeten Ausrüstung dieser Arbeit müsste in diesem Fenster beispielsweise gleich zuallererst der Eingangskanal von „1“ auf „5“ geändert werden. Der abzutastende Frequenzbereich wird unter „Frequency Limits“ definiert. Die zwei Zahlen werden durch ein Leerzeichen getrennt eingetragen. Eine Eingabe von „20k“ ist nicht zulässig. Der *Stop-Margin* gibt jenen Zeitraum zwischen aktiver Erfassung der Impulsantwort und Berechnung am Ende der Messung. Wird von 20Hz bis 20kHz gemessen, reicht ein Zeitraum von 0,1s, da die Frequenzen im Messbereich dann schon längst abgeklungen sind.

Die Ausgangsverstärkung sollte hingegen auf „0dBFS“ angehoben werden. Der Ausgang des Interfaces wird dadurch vollausgesteuert, was ohne Kontrolle der Verstärkereinstellungen zu hohen Lautstärken führen kann, die den Messlautsprecher überbeanspruchen könnten! Die Option ist dennoch nötig, da bei z.B. „-10dBFS“ Ausgangspegel im Ergebnis der Messung die Kurve leider fälschlich auch um 10dB SPL niedriger angezeigt wird. Ist eine digitale Pegelabsenkung unbedingt notwendig, kann im Falle von RME-Geräten aber mit den Reglern der „Softwarekanäle“ in der „TotalMix“-Software die Lautstärke angepasst werden. Ansonsten bleibt nur die Anpassung am externen Leistungsverstärker selbst.

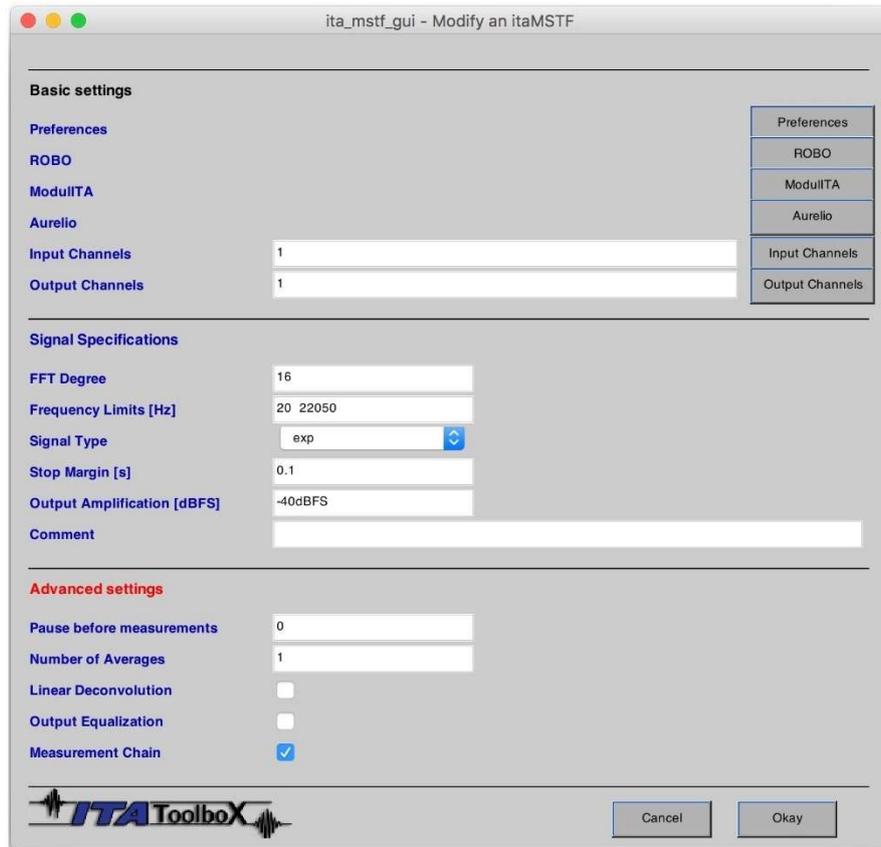


Abbildung 7-4: Messdefinition für die Erfassung von Übertragungsfunktionen

Im Feld „*Comment*“ lässt sich ein Text zur späteren Identifizierung der Messung eingegeben. Zusätzlich empfiehlt sich auch unter „*Pause before measurements*“ die Eingabe einer Haltezeit vor jeder Messung. Die Anzahl der Mittelungsdurchgänge („*Number of Averages*“) obliegt dem eigenen Ermessen. Die Punkte „*Linear Deconvolution*“ und „*Output Equalization*“ kamen bei den Messungen dieser Arbeit nicht zum Einsatz und können ausgespart bleiben. Ebenso kann die Sweep-Art auf „*exp*“ für einen exponentiellen Sweep und der Grad der FFT auf einem Standardwert von „16“ belassen werden.

Anders verhält es sich mit der Option „*Measurement Chain*“. Mit der ITA-Toolbox ist es theoretisch möglich alle Stufen der Messumgebung vom Mikrophon, über den Vorverstärker bis zur Digitalisierungsstufe zu kalibrieren. Für die Messungen mit der Messkammer ist dies zwar nicht in diesem Umfang nötig, wichtig ist jedoch die Kalibrierung des Mikrofons um am Ende ein SPL-gewichtetes Endergebnis erhalten zu können. Dafür ist natürlich zusätzlich ein geeichter Kalibrator mit einem geeigneten Adapter für das verwendete Messmikrophon von Nöten.

Klickt man auf „*Okay*“ öffnet sich bei gesetztem Häkchen beim Punkt „*Measurement Chain*“ hintereinander je ein Fenster für die Ein- und Ausgänge, wie es in Abbildung 7-5 abgebildet ist. Für die Kalibrierung ist es völlig ausreichend hierbei lediglich unter „*Sensor*“ einen beliebigen, gespeicherten Eintrag auszuwählen, oder unter „*Custom*“ den Namen des Mikrofons in

den eckigen Klammern und eine „Sensitivity“ (Übertragungsfaktor) von „1“ in den runden Klammer einzutragen. Die folgende Kalibrierung des Mikrofons überschreibt den Übertragungsfaktor ohnehin. Alle anderen Blöcke inklusive der im zweiten Fenster für die Ausgangskanäle können mit „NONE“ inaktiv belassen werden. Gleich verhält es sich mit den Einträgen „Coordinates“ und „Orientation“, für welche ebenso nur der Standardwert „zero(0,3)“ benötigt wird.



Abbildung 7-5: Fenster für die Definition der Messkette

Damit ist die Erstellung der Messklasse abgeschlossen und im Matlab-Workspace sollte nun ein Messobjekt „MS1“ aufscheinen. Die Kalibrierung dieses Objekts wird durch das Befehlszeilenkommando „MS1.calibrate“ gestartet, wobei sich dadurch das Fenster aus Abbildung 7-6 öffnet. Dabei ist schon ein Standard-Kalibrierungspegel von 94dB SPL und eine Messzeit von 2 Sekunden eingetragen. Die Optionen „Robo“, „ModulITA“ und „Aurelio“ sind für unsere Zwecke einfach zu ignorieren. Zur Kalibrierung sollte das Mikrophon nun im Kalibrator stecken und dieser schon das Testsignal emittieren. Anklicken der Schaltfläche „Calibrate“ startet den Vorgang in der Software. Im Feld „Current Sensitivity“ lässt sich nach der Erfassung hernach ein aktueller Wert des Faktors ablesen. Es ist durchaus auch möglich den Kalibrierungsvorgang mit „Calibrate“ mehrere Male hintereinander zu wiederholen, um die Varianz des Faktors zu beobachten.



Abbildung 7-6: ITA-Kalibrierungsassistent

Ist die Kalibrierung abgeschlossen, ist die Messklasse „MS1“ bereit für die Messung einer bewerteten Übertragungsfunktion. Eine Textausgabe im Matlab-Befehlsfenster wird angezeigt und fasst die Eckdaten der Messdefinition zusammen.

Vorsicht ist an diesem Punkt wegen der eingestellten Messzeit geboten! Ohne manuelle Angabe setzt die ITA-Toolbox diesen Wert auf lediglich 1,4861 Sekunden, was bei einer Abtastfrequenz von 44100Hz einer Anzahl von 65536 Samples bzw. 32768 Punkten für die FFT entspricht. Für eine höhere Auflösung der FFT und vor allem, da diese FFT später mit einer Messung des Testobjekts kombiniert werden soll, muss die Messlänge deshalb manuell auf einen entsprechenden Wert gesetzt werden. Die Messungen des Kompressors erfolgten beispielsweise stets über einen Zeitraum von 60 Sekunden. Um diesen Werte einzutragen wird der Befehl „*MS1.trackLength = 60*“ angewandt. Dabei sollte man auch auf die Groß- und Kleinschreibung achten.

Nun wird der Deckenlautsprecher z.B. wie in Abbildung 5-7 vorbereitet und verkehrt auf die Messkammer gelegt, damit die Lautsprechermembran freigelegt ist. Das Messmikrofon wird mit einem Stativ so nahe wie möglich, orientierungshalber z.B. 1cm über der Membran fixiert und der Leistungsverstärker am Lautsprecher, sowie am Interface angeschlossen und betriebsbereit gemacht.

Es folgt die Messung der Nahfeldantwort des Lautsprechers. Gestartet wird sie durch den Befehl „*MS1.run*“. Wie bei Matlab üblich führt eine Operation ohne Zielvariable dazu, dass das Ergebnis in die Standard-Variable „*ans*“ geschrieben wird. Matlab überschreibt diese Variable bei jeder weiteren gleichartigen Operation. Um dies zu verhindern und allgemein übersichtliche Variablen zu erhalten, empfiehlt sich also das Ergebnis z.B. „*LS_Nahfeld*“ zu nennen. Der Startbefehl lautet dann „*LS_Nahfeld = MS1.run*“. Wurden alle Schritte richtig befolgt, ertönt nach einigen Sekunden die Sweep-Messung aus dem Lautsprecher und am Ende der Messung gibt Matlab den maximalen bei der Messung aufgetretenen Digitalpegel des Analogeingangs der Soundkarte bekannt.

Das Audioobjekt „*LS_Nahfeld*“ zeigt nun die verfügbaren Optionen zur Darstellung der Ergebnisse. Ein kurzer Kontrollblick mittels des Befehls „*LS_Nahfeld.plot_freq*“ lässt erkennen, ob die Kurve einen glaubhaften Verlauf besitzt. Jene des Visaton FRS8 ist in Abbildung 7-7 angeführt. Um die Korrekturmethode anzuwenden muss, wie in Kapitel 6.3 erläutert, die ermittelte Lautsprecherantwort um den Entfernungsfaktor von -31dB SPL abgesenkt werden. Dies lässt sich ebenfalls durch das FFT-Fenster aus Abbildung 7-7 bewerkstelligen.

Im Punkt „*Edit*“ der Optionsleiste am oberen Rand des Fensters ist die Option „*Amplify*“ zu finden. Die Auswahl dieser Option lässt das Fenster aus Abbildung 7-8 erscheinen, in welches dieser Faktor eingetragen werden kann. Die Kurve sinkt hernach um den gewählten Faktor.

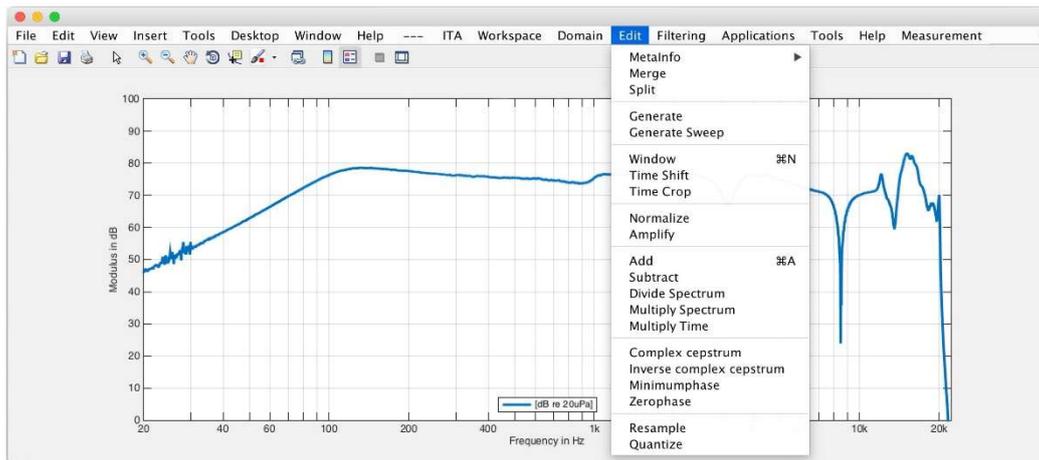


Abbildung 7-7: Übertragungsfunktion des Lautsprechers im FFT-Ansichtsfenster

Die Daten im „*LS_Nahfeld*“-Objekt im Matlab-Workspace sind jedoch davon nicht betroffen. Wird das Fenster aus Abbildung 7-7 also geschlossen, wird der Bearbeitungsschritt einfach verworfen. Um die Kurve mit Hilfe der grafischen Benutzeroberfläche zu modifizieren und abzuspeichern, muss im Punkt „*ITA*“ in der Optionsleiste die Option „*Save*“ verwendet werden. Dadurch kann die veränderte Kurve als eigenständiges ITA-Objekt in einem beliebigen Ordner abgelegt werden. Diese Vorgangsweise empfiehlt sich auch, um jeden Zwischenschritt der gesamten Messung extra abzuspeichern.

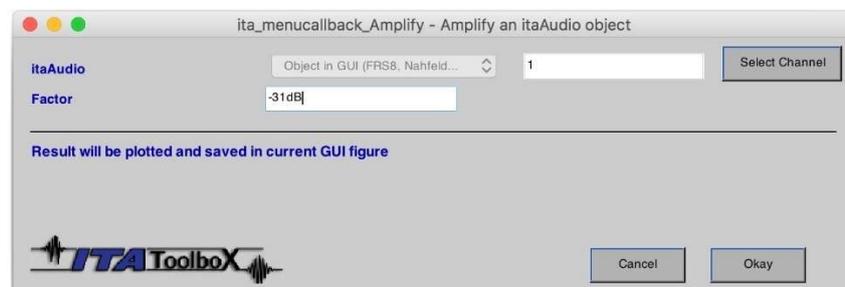


Abbildung 7-8: Pegelabsenkung durch negative Verstärkung

Als nächstes folgt die Messung der Übertragungskurve in der Messkammer. Dafür darf die Ausgangsleistung des Leistungsverstärkers nicht verändert werden! Der Deckel wird abgenommen, das Messobjekt in Ecke „1&4 unten“ so nahe es geht positioniert (siehe Abbildung 5-35) und das Mikrofon durch eine der Durchführungen in die Kammer eingefädelt und mit einem Klebeband oder einer besseren Befestigungsmethode in Ecke „1&2 unten“ angebracht (siehe Abbildung 5-20). Dem folgt das Schließen des Deckels mit dem Eckenpositionslautsprecher in Ecke „3&4 oben“. Es sollte nun überprüft werden ob alle Kabelverschraubungen, bzw. Mikrofondurchführungen entweder ein Mikrofon oder einen „Dummy“-Zylinder beherbergen, damit die Kammer keine offenen Löcher besitzt. Ist dem so, kann analog zur vorherigen Messung die Übertragungsfunktion durch Verwendung der gleichen Messklasse „*MS1*“ erfasst werden. Zum Beispiel unter dem Namen „*LS_Kammer*“.

Bevor wir aus beiden Kurven eine Entzerrungskurve bilden können, benötigen wir die pegelkorrigierte Kurve von „*LS_Nahfeld*“ im Matlab-Workspace. Dazu reicht ein „Drag-and-Drop“ der Datei per Hand mit der Maus in das Matlab-Hauptfenster, aber auch der Textbefehl „*uiopen('Datenpfad der Datei',1)*“ führt zum gleichen Ergebnis. Besitzt die, auf diese Weise geladene Variable den gleichen Namen wie eine Vorhandene im Workspace von Matlab, wird letztere ohne Warnung überschrieben.

Ist die korrigierte Nahfeld-Kurve im Workspace, kann nun die Kurve der Kammermessung mit „*LS_Kammer.plot_freq*“ aufgerufen werden. Unter dem Punkt „*Edit*“ findet sich drei Zeilen unter „*Amplify*“ die Option „*Devide Spectrum*“, wie in Abbildung 7-9 zu sehen ist. Hierbei kann ein Spektrum durch ein anderes Spektrum gleicher Auflösung dividiert werden, was durch die logarithmische Darstellung der Pegelachse einer Subtraktion entspricht.

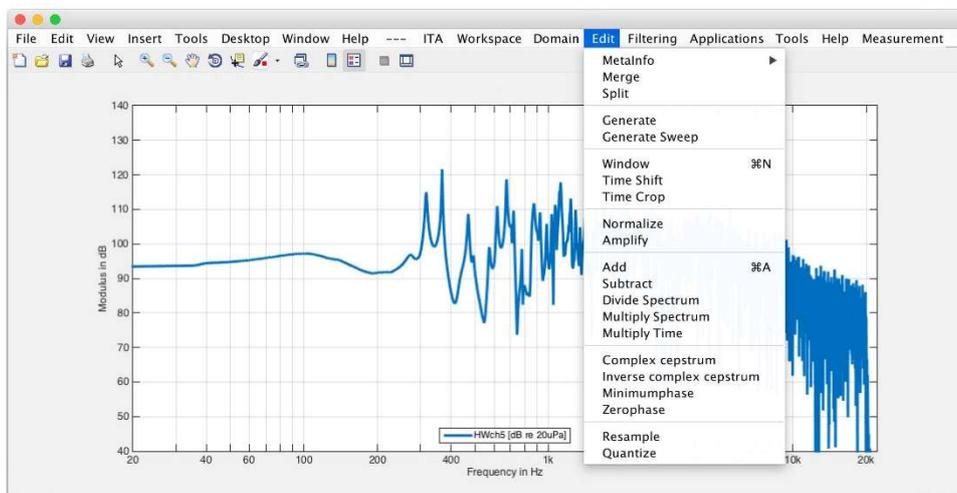


Abbildung 7-9: Übertragungsfunktion der Kammer vor der Division

Wird die Option „*Devide Spectrum*“ gewählt, erscheint wieder ein Fenster, welches in Abbildung 7-10 dargestellt ist. Der Zähler (*Numerator*) wird ohne Änderungsmöglichkeit als die Ausgangskurve gesetzt, für den Nenner (*Denominator*) kann hingegen die pegelkorrigierte Nahfeldmessung „*LS_Nahfeld*“ oder andere Variablen im Workspace ausgewählt werden.

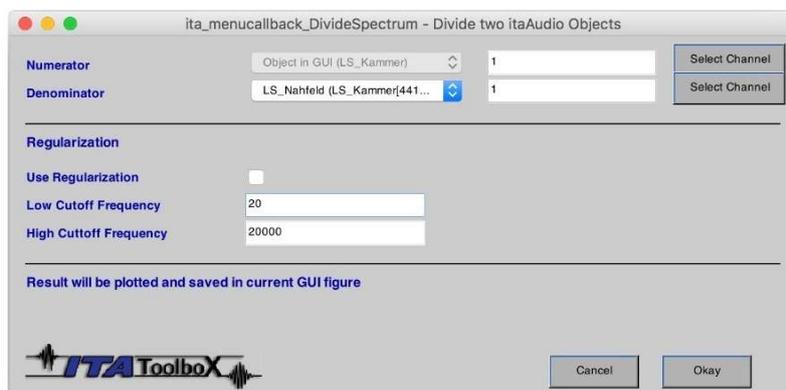


Abbildung 7-10: Fenster der „*Devide Spectrum*“-Funktion

Da der Rest der Optionen standardmäßig richtig eingestellt ist, kann man direkt auf „Okay“ klicken und erhält die rohe Form der Entzerrungskurve aus Abbildung 7-11. Wieder ist die resultierende Kurve erst mittels „Save“ zwingend extra als Datei abzuspeichern, um das Ergebnis festzuhalten. Wie zuvor bei der pegelkorrigierten Nahfeldkurve sollte die ermittelte Entzerrungskurve hernach auch manuell wieder in den Workspace von Matlab geladen werden.

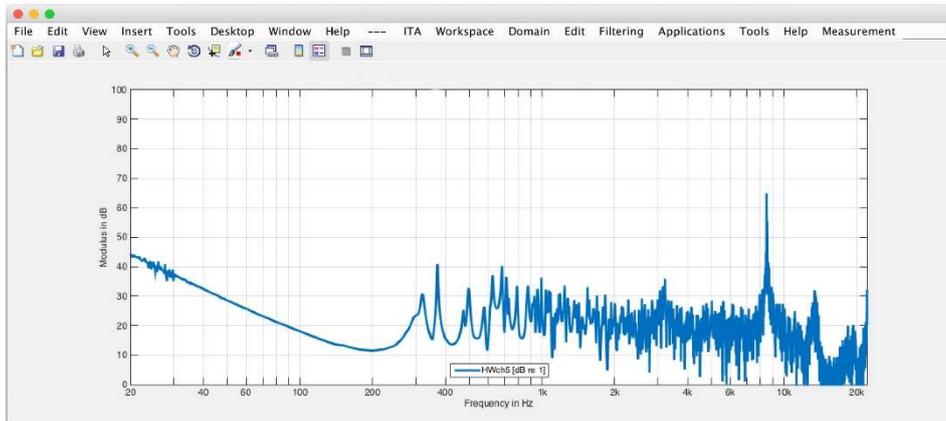


Abbildung 7-11: Aus der Lautsprechermethode gewonnene, rohe Entzerrungskurve

Der nächste Schritt ist etwas individueller Natur. Für die Ergebnisse in dieser Arbeit wurden die Entzerrungskurven hart pegellimitiert um hauptsächlich scharfe Resonanzen zu unterdrücken und nicht ungewollt im Ergebnisspektrum Bereiche fälschlich zu verstärken. Dazu wurde die Konvention aufgestellt, den tiefst-möglichen Pegel der Entzerrungskurve als jenen zu betrachten, der am tiefsten Punkt im Bereich von 200Hz auftritt. Folgender Matlab-Befehl setzt alle Werte unter dieser Schwelle gleich seinem Absolutwert.

Entzerrungskurve.freqData(abs(Entzerrungskurve.freqData) < Schwellwert) = Schwellwert

Der Schwellwertpunkt muss dabei durch eine Minimalrechnung der Frequenzdaten (*freqData*) oder händisch durch den Vergleich verschiedener Absolutwerte im Bereich des Kurvenscheitels bei 200Hz gefunden werden. Wichtig ist dabei zu wissen, dass die ITA-Toolbox für eine kalibrierte Messung die Frequenzdaten der FFT als Druckwerte abspeichert und nicht direkt als dB SPL Werte. Möchte man also einen, aus dem FFT-Plot der Kurve abgelesenen Wert verwenden, muss dieser mit dem Befehl $2e-5 \cdot 10^{(\text{Wert}/20)}$ erst umgerechnet werden, damit er erfolgreich als *Schwellwert* in den Befehl oben eingesetzt werden kann. Ein Blick in die FFT der Entzerrungskurve nach der Operation, wie in Abbildung 7-12 dargestellt, bestätigt die Modifizierung der Werte. Wieder muss die Kurve extra gespeichert und neu in den Workspace geladen werden.

Nun ist die Messung des aktiven Testobjekts an der Reihe. Dafür sollte man den Deckel mit dem Lautsprecher durch das ursprüngliche Exemplar ohne Lautsprecherdurchführung tau-

schen. Ob auch eine Messung mit vorhandenem Lautsprecher möglich ist, müsste erst experimentell nachgewiesen werden. Vorsichtshalber empfiehlt sich aber in der Tat der Austausch mit dem ersten Deckel. Auch deshalb, weil er in den letzten Schritten wegen des Deckelmikrofons ohnehin benötigt wird.

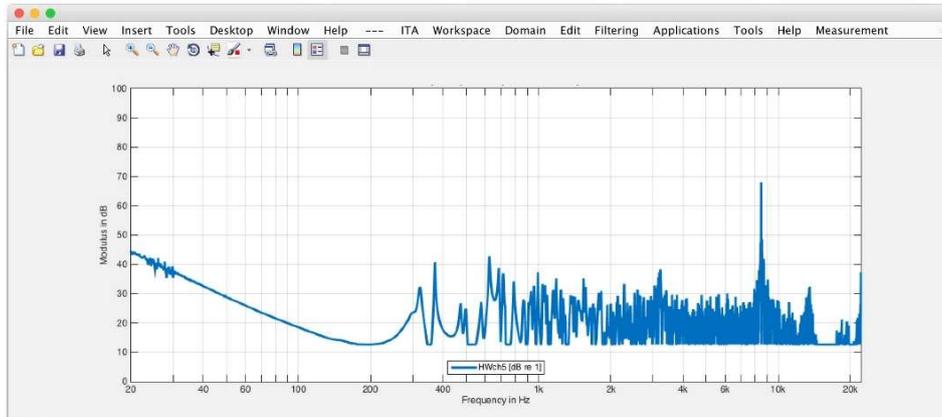


Abbildung 7-12: Pegellimitierte Entzerrungskurve

Das Testgerät wird durch Anschließen des Stromkabels messbereit gemacht und die Kammeröffnung mit dem Deckel geschlossen. Da im Gegensatz zu den vorherigen Schritten diesmal jedoch keine Übertragungsfunktion, sondern nur eine SPL-bewertete Aufnahme gemacht wird, benötigen wir zunächst noch eine weitere, entsprechende Aufnahme-Messklasse „MS2“. Analog zur Erstellung von „MS1“ muss man also wieder „ita_toolbox_gui“ starten, die Option „New Measurement Setup“ auswählen und im Fenster aus Abbildung 7-3 statt einer „Transferfunction“ die Schaltfläche „Record“ anklicken. Dies öffnet das Fenster aus Abbildung 7-13.

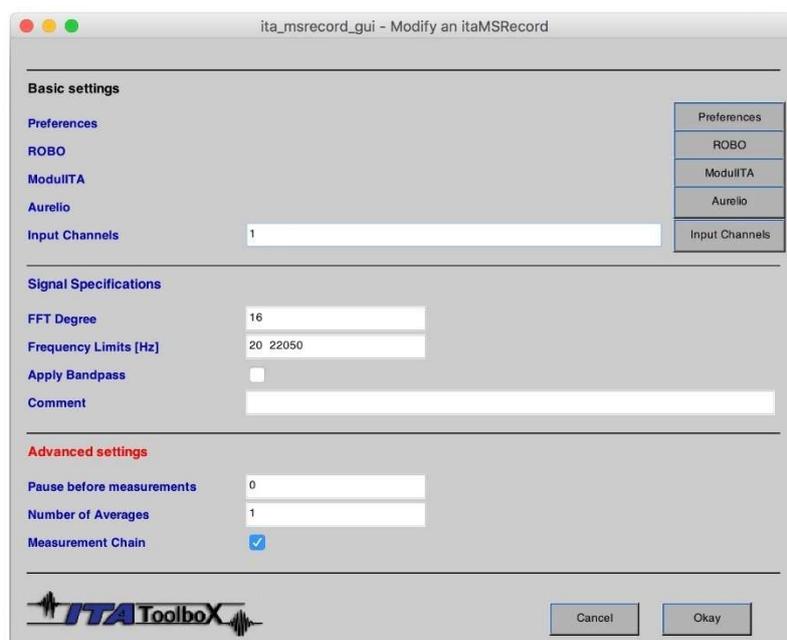


Abbildung 7-13: Fenster zur Erstellung einer Aufnahme-Messklasse

Bis auf die fehlenden Ausgänge entspricht es jenem Fenster aus Abbildung 7-4, inklusive der folgenden Sensor- und Kalibrierungsoptionen, weshalb diese hier nicht noch einmal durchbesprochen werden. Die Kalibrierung könnte theoretisch über Textbefehle von „MS1“ in die neue Messklasse kopiert werden, bei einem Mangel an Kenntnis über die Struktur der ITA-Klassen ist man jedoch sicherlich schneller, wenn man einfach das neue Messobjekt im beschriebenen Normalverfahren mit „MS2.calibrate“ kalibriert. Weiters sei wieder vor dem gewählten Standardmesszeitraum der Klasse gewarnt. Auch hier sollte wieder die einheitliche Messzeit mit folgendem Befehl z.B. auf „MS2.trackLength = 60“ angepasst werden. Voraussetzung für die Division mit der Entzerrungskurve ist eine gleichgroße FFT-Fensterlänge!

Ist die Messklasse bereit, kann das Testgerät anlaufen. Die Initialisierung der Messung erfolgt ganz nach eigenem Ermessen, bzw. nach eigens gesetzten Messablaufkriterien. Der Vorgang in Matlab wird wieder mittels der Eingabe des Befehls „DUT_Kammer = MS2.run“ eingeleitet, wobei die Namensgebung „DUT_Kammer“ natürlich wieder nur ein Vorschlag ist. Nach der Messung kann wieder die FFT der Messung betrachtet werden. Die Durchführung der Korrektur mittels der Entzerrungskurve wird analog zur Lautsprechermessung wieder über die Option „Devide Spectrum“ durchgeführt. Das resultierende Spektrum in Abbildung 7-14 muss nun wieder extern gespeichert und danach in den Workspace geladen werden.

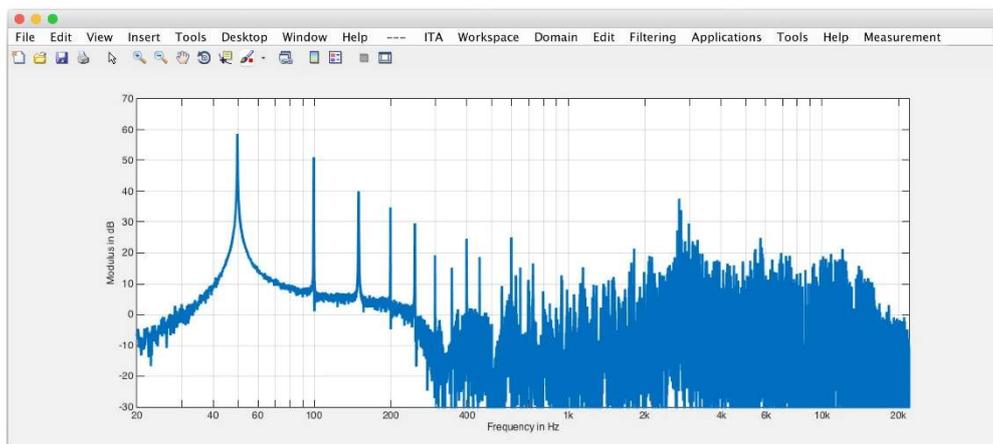


Abbildung 7-14: Korrigiertes Spektrum des Testobjekts

Als letzten Schritt für die Lautsprecher-Entzerrungsmethode wird das Ergebnis von einer FFT in eine Terzbandanalyse umgerechnet. Dafür bietet das ITA-Toolbox Softwarepaket die Funktion „ita_spk2frequencybands.m“. Folgender Befehl berechnet die Terzbandpegel von 100Hz bis 2kHz aus dem entzerrten Ergebnisdatensatz „Testobjekt_EQd“:

```
Ergebnis = ita_spk2frequencybands(Testobjekt_EQd,'freqRange',[100 2000]);
```

Das Resultat „Ergebnis“ ist zwar vom Typ „itaAudio“, es enthält jedoch nur die 14 Pegelwerte und Randinformationen. Damit sind die ersten drei Schritte der Messung abgeschlossen.

Die Hochtonkorrektur sieht vor, das Testobjekt aus der Ecke in die Mitte der Kammer zu positionieren (siehe Abbildung 5-44). Daraufhin wird der Hochtonlautsprecher aus Kapitel 5.6 an einen geeigneten Platz gestellt. Wie in Abbildung 5-44 dargestellt, entsprach dies der 8. Position der Diagonalmessreihe. Eine dritte Messdefinition für die Messung einer Übertragungsfunktion muss generiert oder die vorhandene Klasse „MS1“ modifiziert werden, um lediglich den Bereich von 1,6kHz bis 12kHz abzutasten. Letzteres lässt sich z.B. durch den Befehl „MS1.edit“ leicht durchführen. Dabei erscheint ein Fenster wie in Abbildung 7-4, in welchem man den Frequenzbereich dementsprechend ändern kann.

Nach der ordnungsgemäßen Aufstellung muss nun an allen 5 Hauptmikrofonpositionen die Übertragungsfunktion (im Beispielbefehl unten als „Mic_IR1“ bezeichnet) mittels der Hochtonquelle ermittelt werden. Aus den Einzelkurven lassen sich daraufhin mittels der Funktion „ita_roomacoustics.m“ die Nachhallzeiten pro Terzfrequenzband ausrechnen:

$$\text{Mic_RTs} = \text{ita_roomacoustics}(\text{Mic_IR1}, \text{'freqRange'}, [2000 \ 10000], \text{'T20'},)$$

Die Funktion liefert ein Matlab-„Array“. Die benötigten „itaAudio“-Daten liegen in einer Zelle, die den Namen der Nachhallzeitmethode trägt. Im oberen Fall wäre dies „T20“. Die benötigten Daten kann man in diesem Beispiel durch den Befehl „Mic_RT.T20.freqData“ abrufen. Aus den nun vorhandenen 5 Vektoren mit den Nachhallzeiten, bestimmt aus den Übertragungsfunktionen aller Hauptmikrofonpositionen, sollte nun für jedes Terzband ein Mittelwert berechnet werden. Die schlussendlich bestimmten Nachhallzeiten sind dann in Formel 5-5 einzusetzen, dessen Rechnung sich leicht händisch in Matlab durchführen lässt. Am Ende erhält man die geforderten Hochtonkorrekturpegel.

Nun wird lediglich noch eine Messung des aktiven DUT an den 5 Hauptmikrofonpositionen benötigt. Wegen der höheren Genauigkeit und der Möglichkeit einer Parallelmessung der Mikrofone sollte hier ein Umstieg auf das PAK Mobile MKII System erfolgen. Da eine Einführung in diese Messumgebung ein eigenes Kapitel erfordern würde, sei hier auf dessen Handbuch und Einführungskurse verwiesen. Die Kenntnisse für die Durchführung einfacher SPL Messungen wird vorausgesetzt. Wichtig ist lediglich, dass aus den 5 Mikrofonsignalen in einer Arithmetik eine Mittelwertkurve in Terzbandauflösung berechnet und in der Grafikdefinition angezeigt wird, aus der die Pegel von 2kHz bis 10kHz abgelesen werden können. Die Messung erfolgt abseits davon identisch zur Messung des aktiven Testobjekts mit der Matlab-Messung, wobei nach der Vorgangsweise aus Kapitel 5.7 die Bezugshüllfläche des Testobjekts in der Mitte der Kammer positioniert wird.

Das Ergebnis der PAK-Messung ist eine Pegelkurve, wie z.B. jene aus Abbildung 7-15. Für die Hochtonkorrektur werden die Werte von 2kHz bis 10kHz notiert oder auf andere Weise elektronisch abgespeichert. Die Bildung des korrigierten Ergebnisses erfolgt einfach durch Subtraktion der, aus der Hochton-Messung resultierenden Korrekturpegelwerte von der PAK-Messung. Selbes gilt auch für die Tieftonkorrektur aus Kapitel 6.2 für das 100Hz-, 125Hz- und 160Hz-Terzband.

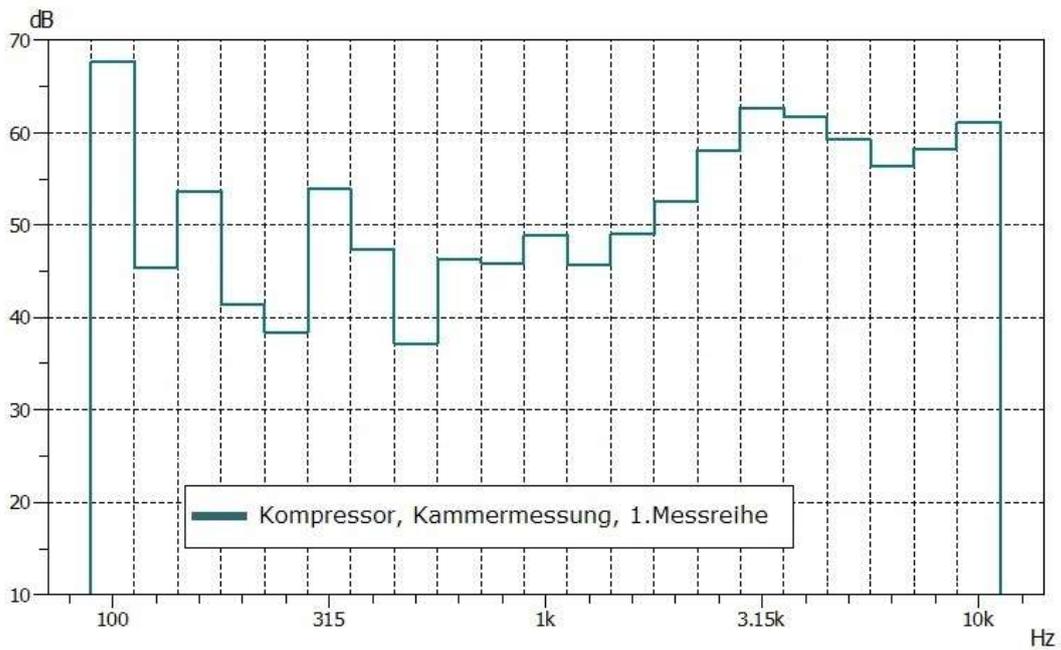


Abbildung 7-15: Messergebnis einer PAK-Messung

Zum Schluss werden die Ergebnisse aller Korrekturen zusammengesetzt. Das umfasst von 100Hz bis 160Hz die tieftonkorrigierten, 200Hz bis 2kHz die modalentzerrten und von 2,5kHz bis 10kHz die hochtonkorrigierten Ergebniswerte. Um eine einheitliche Darstellung des Gesamtergebnisses, wie in Abbildung 6-14 bzw. hier in Abbildung 7-16, zu bekommen, muss manuell ein Ergebnisvektor mit den 21 ermittelten Werten und daraus ein „bar()“-Plot erstellt werden.

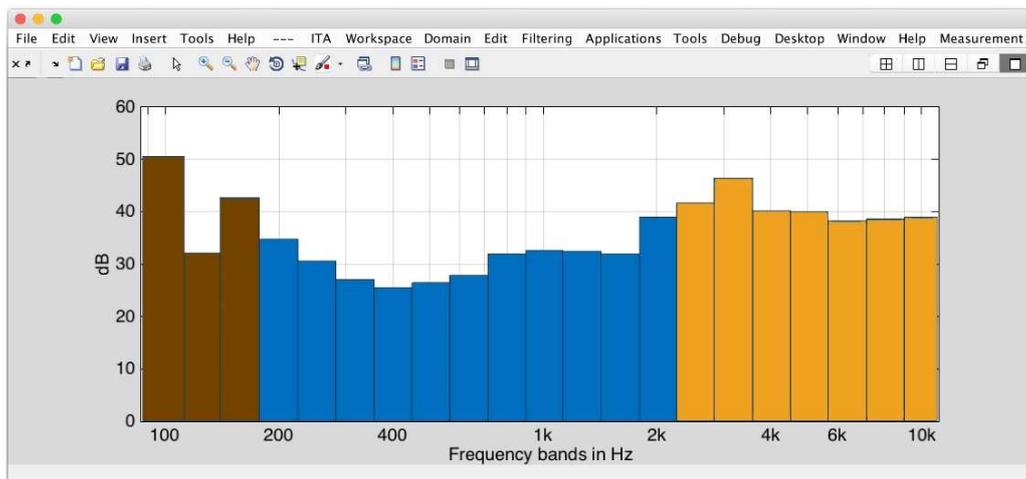


Abbildung 7-16: Zusammengesetztes Endergebnis

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde experimentell die Möglichkeit untersucht, ob sich Schallemissionsmessungen von Geräten und Maschinen in einer Messkammer mit einem Volumen von ca. 1m^3 durchführen lassen. Die Geräte dürfen hierbei bis zu 10% des Kammervolumens einnehmen. Wie gezeigt werden konnte, verlangt die Akustik der Kammer natürlich eine Korrektur der Messergebnisse. Als Vergleich diente eine selbstständig durchgeführte Schallleistungsmessung des gewählten Testobjekts nach einer Freifeld-Methode.

Für die Korrektur der Kammermessung wurde das Messspektrum in drei Teile aufgespalten, die jeweils einen eigenen Messvorgang am Objekt implizieren. Diese Teile wurden als „Druckkammerübergangs-“, „Modal-“ und „Hochton-Bereich“ betitelt. Je eine Korrekturmethode für diese Bereiche führt zu einem Endergebnis in Terzbandauflösung, welches zum Schluss zu einer korrigierten Gesamtlösung zusammengesetzt wird.

Die Methoden des „Druckkammerübergangsbereichs“ und des „Modalbereichs“ basieren beide auf Differenzbildungen aus Lautsprechermessungen. Ein Lautsprecherchassis, dessen Bandbreite beide Bereiche annähernd linear abdecken konnte, wurde durch eigens präparierte Kammerdeckel als Deckenlautsprecher in das Kammerinnere integriert. Die Messung von Impulsantworten und den daraus abgeleiteten Übertragungsfunktionen führte über die Bildung einer Entzerrungskurve zu einer korrigierten FFT-Kurve des Testobjekts, aus welcher die korrigierten Terzbandpegel abgeleitet werden konnten.

Die Bildung des „Hochton“-Teilspektrums hingegen beruft sich auf die standardisierten Messungen der Schallleistung in Hallräumen und wird entsprechend auf die viel geringeren Abmessungen der Kammer angepasst. Durch die Aufnahme von Impulsantworten mittels Sweep-Messungen, lassen sich über eine Arithmetik die Nachhallzeiten der Kammer bestimmen, welche über Formeln die Korrekturpegel pro Terzband angeben, deren Subtraktion von einer Kammermessung des Testobjekts dessen Schalleistungsspektrum berechnet.

Die Ergebnisse des Experiments zeigen zwar Unterschiede zu den Referenzwerten auf, die sich jedoch in Grenzen halten. Zudem zeigten die Messwiederholungen der Kammermessungen mit hochpräziser Messhardware, dass das ausgewählte Testobjekt durchaus auch sein abgestrahltes Spektrum variiert. Die Abweichung der Ergebnisse der korrigierten Messung von den Referenzwerten muss also nicht ausschließlich von noch nicht perfektionierten Korrekturmethode herrühren.

In Anbetracht dieser Gegebenheiten ist der Ausblick dieser Methode, den Ergebnissen nach zu urteilen, durchaus als positiv einzustufen. Neben der zukünftigen Durchführung von Rücken-an-Rücken-Messungen des gewählten Testobjekts und neuen Messreihen mit anderen Geräten zur weiteren Erprobung der Messmethode, wäre auch eine tiefere Untersuchung des „Druckkammerbereichs“, also jenem spektralen Bereich unter dem, in der Arbeit so getauften, „Druckkammerübergangsbereich“ sehr interessant. Den durchgeführten Untersuchungen und Überlegungen zufolge, wurde für den beobachteten Messbereich nie ein Druckkammerzustand erreicht. Von Interesse wäre nun, ob eine kleinere Messkammer dies möglich macht und wie Messungen bzw. die Messergebnisse in so einer Umgebung dann aussehen. Auch eine Berechnungsvorschrift, mit der sich der Druckanstieg bei sinkender Frequenz in diesem Bereich für ein bestimmtes Volumen berechnen ließe, wäre eine wichtige Ergänzung für die Theorie der Messkammer.

Umgekehrt ließe sich die Messkammer auch noch vergrößern, z.B. auf das doppelte Volumen. Dadurch würden alle Modenfrequenzen und damit auch die Diffus-schallgrenzfrequenz sinken. Auf diese Weise wäre es denkbar, die Messung an einem Testobjekt aufzuteilen und für den Tieftonbereich in einer kleineren Kammer und die Hochtonmessung in einer größeren Kammer zu implementieren. Erstere Umgebung würde den Druckkammerübergangsbereich zu hohen Frequenzen hin verschieben, während die zweite Umgebung die Hallraum-artige Messung bei tieferen Frequenzen ermöglicht. Im Endeffekt schrumpft dadurch der zu korrigierende Modalbereich, welcher sich in einer größeren Kammer, wegen der größeren, räumlichen Trennung von Schallquelle und Sensor, möglicherweise auch präziser entzerren lässt.

Abschließend betrachtet stellt die Messung in der Messkammer ein interessantes Experiment dar, dessen reale Nutzbarkeit sich weiter zu ergründen lohnt.