



institut für elektronische musik und akustik



Akustische Untersuchung von Aktoren als Lautsprecherersatz im Fahrzeughimmel

Masterarbeit

Larissa Kocher

Betreuer: DI Ph.D. Matthias Frank, M.Eng. Frank Heiberger

Gutachter: O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn. Robert Höldrich

Graz, 19. Mai 2021

VOLKE

**BMW
GROUP**



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, 19. Mai 2021



Larissa Kocher

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir im Zuge meiner Masterarbeit durchgehend vor allem fachlich, aber auch persönlich zur Seite gestanden sind und mir so die Fertigstellung dieser ermöglicht haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an DI Ph.D. Matthias Frank und O.Univ.-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Höldrich. Ihr Einsatz ermöglichte die Fertigung dieser Arbeit in Kooperation mit der Firma Volke. Zudem unterstützten sie mich mit hilfreichen Anregungen und Ratschlägen, sodass ich auf ihre Betreuung durch ihre Fachkompetenz stets zählen konnte.

Weiters möchte ich mich bei Peter Atzinger und Frank Heiberger für die Aufgabenstellung und die Unterstützung sowie Hilfeleistungen bei der Bearbeitung meiner Masterarbeit bedanken. Auch all meinen Kollegen der Firma Volke möchte ich für eine spannende und vor allem sehr lehrreiche Zeit Danke sagen.

Das größte und herzlichste Dankeschön geht an meine Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und auf deren Hilfe ich stets zählen konnte.

Abschließend möchte ich mich an meinen Freund richten. Ohne dich hätte sich diese Masterarbeit nicht ergeben, schließlich bist du der Grund, warum es mich nach München verschlagen hat. Danke dafür.

Kurzzusammenfassung

Der Drang nach Forschung und Entwicklung zum Thema mehrkanaliger Audiowiedergabe im Fahrzeug ist groß. Stellt doch Entertainment, und damit einhergehend Audio, einen immer größer werdenden Bereich im Automotivsektor dar. Der Stand der Technik liegt mittlerweile nicht mehr nur bei integrierten 5.1 Surround-Systemen, sondern schon bei der Einbeziehung zusätzlicher Lautsprecher auf unterschiedlichen Ebenen im Fahrzeug, um ein dreidimensionales Klangbild schaffen zu können.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von akustischen Aktoren im Fahrzeughimmel, welche das Klangbild zusätzlich erweitern und zur Einhüllung des Hörenden vom Gesamtklang im Fahrzeug beitragen. Die Aktoren wurden dafür akustisch auf potentielle Problemquellen sowie damit einhergehende Klangbeeinträchtigungen untersucht. Im Anschluss wurde ein Konzept für eine geeignete Anbindung der Exciter an den Dachhimmel entwickelt. Abgerundet wurde die Arbeit mit einem Hörversuch, in dem der entwickelte Lösungsansatz bewertet wurde.

Abstract

Research and development in the field of multichannel audio playback in cars is gaining more and more importance. After all, entertainment, and therefore audio, is a topic of increasing popularity in the automotive sector. State-of-the-art is no longer an integrated 5.1 Surround-system, but the integration of further loudspeakers at different levels of height for a three-dimensional sound experience.

In this thesis acoustical exciters are placed in the roof liner of the vehicle to extend the sound experience and gain a better engulfment of the overall sound. Therefore the exciters were acoustically analyzed, regarding the determination of potential sources of trouble as well as consequently appearing disturbing effects on sound. Then, a solution for a possible attachment of the exciters to the roof liner was derived and finally evaluated within a listening test.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und theoretische Grundlagen	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Physikalische Grundlagen	4
1.3.1	Biegewellengleichung	4
1.3.2	Biegeschwingungen von Platten	5
1.3.3	Plattenresonanzen	7
1.3.4	Artefakte bei gestörter Schallabstrahlung	10
1.3.5	Kammfilterartefakte	10
1.4	Psychoakustische Grundlagen	13
1.4.1	Vertikale Einhüllung - Engulfment	13
1.4.2	Höhenlokalisierbarkeit	14
2	Exciter und deren Anbindung im Fahrzeughimmel	15
2.1	Funktion	15
2.2	Verwendete Modelle	16
2.3	Positionierung	17
2.4	Akustische Integration	18
3	Akustische Messungen	20
3.1	Vergleich unterschiedlicher Modelle	20
3.2	Untersuchung von Zusatzmaterialien als Trägerplatten	23
3.3	Voruntersuchungen des Dachhimmels im reflexionsarmen Raum	27
3.4	Frequenzgang des Gesamtsystems	29
4	Hörversuch	37
4.1	Benutzeroberfläche	37

4.2	Beschreibung	37
4.3	Durchführung	39
4.4	Probanden	40
4.5	Auswertung	40
4.5.1	Kammfiltereffekte	41
4.5.2	Lokalisierbarkeit der Exciter / Konuslautsprecher	42
4.5.3	Einhüllung	43
4.5.4	Tonale Balance	44
5	Zusammenfassung und Ausblick	47

1 Einleitung und theoretische Grundlagen

1.1 Motivation

Im höchsten Audiolevel der Serienausstattung sind bereits Höhenlautsprecher im Dachhimmel verbaut, welche für eine dreidimensionale Einhüllung der Hörer*Innen sorgen. Das Ziel dieser Arbeit war es diese Konuslautsprecher durch Exciter zu ersetzen, um den Einhüllungseffekt dadurch zu verbessern. Zusätzlich sollten sie das Klangbild erweitern. Aufgrund der Biegewellenausbreitung der Exciter sollte man einen diffuseren Klangeindruck von oben erhalten, welcher das Gefühl der Einhüllung verstärken sollte. Eine punktuelle Ortung der im Dachhimmel verbauten Quellen sollte aufgrund der abgestrahlten Biegewellen vermieden werden. Stattdessen erwartete man sich ein diffuseres Klangbild von oben, was zu einer besseren Einhüllung der Hörer*Innen führen sollte. Da es sich um einen „unsichtbaren Lautsprecher“ handelt, welcher auf die Außenseite des Dachhimmels angebracht wird, fällt die optische Lokalisation dieses Klangerzeugers weg. Dies sollte vor allem aus psychologischer Sicht von Vorteil sein. So sollte der verdeckte Lautsprecher den zusätzlichen visuellen Einfluss auf die Klanglokalisierung verhindern.

Reflexionen und Interferenzen im wandnahen Betrieb können bei Excitern zu stehenden Wellen oder Kammfiltereffekten führen. Der Dachhimmel ist mit einem Abstand von ca. 10 cm zum Dach befestigt, wodurch in diesem Fall vom wandnahen Betrieb gesprochen werden kann. Daher sollte vor allem bei der Positionierung der Exciter darauf geachtet werden, dass keine zu großen Artefakte auftreten, welche sich störend auf die Klangwahrnehmung auswirken könnten. Frequenzgangmessungen sollten zeigen, wie stark Kammfiltereffekte und Resonanzen auftreten und wie groß deren Auswirkungen sind. Des Weiteren waren Komponenten, wie unter anderem das Material des Dachhimmels bereits gegeben. Aus diesem Grund wurde die Verwendung zusätzlicher Trägerplatten aus diversen Materialien untersucht, um eine bestmögliche Biegewellenausbreitung zu gewährleisten. Desweiteren wurde die akustische Auswirkung der Anzahl der Exciter untersucht. So sollte sich zeigen, wie viele Exciter tatsächlich benötigt werden, um an die Leistung der bereits verbauten Konuslautsprecher zu kommen und welche akustischen Auswirkungen eine Erweiterung der Anzahl hat.

In der Literatur gibt es bisher noch keine derartigen Anwendungsbeispiele. D. Beer behandelt in [1] ein mittlerweile bekanntes und bewährtes Konzept zur Audiowiedergabe mittels der Verwendung mehrerer Exciter, sogenannte Distributed Mode Loudspeakers (DMLs). Hierbei handelt es sich um Flachlautsprecher, welche in Wandnähe betrieben werden. Grundsätzlich werden dafür auch mehrere Exciter verwendet, jedoch sind die grundlegenden Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Zusammensetzung, Größe

und Form der Trägerplatte, deutlich verschieden von den in dieser Arbeit gegebenen. Wissen, wie etwa über potentielle Artefakte, ist somit nur bedingt auf diese Arbeit anwendbar. Auch Herstellerangaben zu geeigneten Messpositionen oder Messverfahren sind für diese Arbeit nur begrenzt hilfreich. Für Messungen werden meist eher kleine Trägerplatten (10 x 10 cm (Foster) oder 19 cm Durchmesser [13]) fest eingespannt und mit einem Mikrofonabstand von 1 m empfohlen. Im Fahrzeug sind Messpositionen bzw. Messverfahren auf derartige Weise nicht möglich, da z.B. der Dachhimmel als Trägerplatte wesentlich größer ist, und nicht mit genügend Abstand zu Dach und Boden eingespannt werden kann. Für all diese besonderen Gegebenheiten gilt es in dieser Arbeit eigene Wege und Methoden herauszufinden, um so möglicherweise besagte Lücken in der Literatur, welche momentan noch bestehen, zu schließen.

1.2 Aufgabenstellung

Erste Herangehensweise war die Untersuchung der beiden zur Verfügung stehenden Exciter-Modelle gemeinsam mit einem in anderen Fahrzeugen bereits verbauten Modell, welches als Referenz dienen sollte. Die Exciter wurden dabei auf unterschiedlichem Dachhimmelmaterial untersucht. Unter anderem auch auf jenem, welches später in dem für meine Testzwecke zur Verfügung stehenden Fahrzeug verbaut war. Dabei galt es herauszufinden, wie stark solche Variationen in der Anbringungsfläche das akustische Verhalten der Exciter beeinflussen. In erster Linie wurden dabei der Frequenzgang und das Störgeräuschverhalten bzw. Verzerrungen analysiert. Verschiedene Varianten, wie die direkte Befestigung auf dem Dachhimmelmaterial, sowie der Versuch zusätzliches Material miteinzubeziehen, sollten dabei ebenfalls betrachtet werden. Zusätzlich wurde auch untersucht, welche Auswirkung die Integration zwei weiterer Exciter auf das akustische Verhalten hat.

Nach diesen Testmessungen sollten generelle Aussagen bezüglich der einzelnen Modelle möglich sein, um schließlich einen Favoriten wählen zu können. Dieser wurde im nächsten Schritt am Fahrzeugdachhimmel nach ersten Überlegungen angebracht. Um das Verhalten der Exciter am tatsächlichen Dachhimmel besser ermitteln zu können, wurde dieser für die anfänglichen Messungen noch aus dem Fahrzeug genommen und im reflexionsarmen Messraum platziert, um die einzelnen Positionen, welche für die spätere Fixierung in Frage kamen, leichter zugänglich machen zu können.

Um die Qualität des im Laufe der Messungen überlegten Systems bewerten zu können, wurden an dem „Prototypen“, den schlussendlich im Fahrzeug fix positionierten Excitern, akustische Messungen durchgeführt, welche schließlich Aussagen bezüglich des Frequenzgangs des neu integrierten Systems ermöglichen sollten. Dies sollte unter anderem Schlussfolgerungen zu potentiellen Kammfilterartefakten ermöglichen.

Um die gewünschte Audiointegration in das Fahrzeug zu erhalten, wurde abschließend das gesamte Audiosystem, betreffend die verbauten Exciter gemeinsam mit den bereits vorhandenen Lautsprechern, abgestimmt. So sollte festgelegt werden, wie die Exciter wirken, bzw. in welchem Frequenzbereich genau sie spielen sollen. Geringe Artefakte sollten im Abstimmvorgang beseitigt werden können, sodass eine Umpositionierung der Exciter zur Reduktion von Kammfiltereffekten und Resonanzen nicht erforderlich war.

Im Anschluss wurden in Form eines Hörversuchs noch wichtige Klangqualitäten erfasst. Anhand der finalen Messungen und des Hörversuchs konnte schlussendlich bewertet werden, ob das erarbeitete Konzept Vorteile gegenüber den momentan eingebauten „3D-Lautsprechern“ im Dachhimmel bringt, und es sich diesen gegenüber durchsetzen könnte.

1.3 Physikalische Grundlagen

Wie bereits in 1.1 erwähnt, handelt es sich bei Excitern um BiegeWellenwandler, welche auf Platten befestigt werden. Aus diesem Grund werden in den folgenden Unterkapiteln die wichtigsten physikalische Grundlagen im Bezug auf BiegeWellen sowie Plattenresonanzen erläutert. Desweiteren spielen Kammfiltereffekte im wandnahen Betrieb von Excitern eine große Rolle, weshalb im Folgenden auch potentielle Artefakte bei gestörter Schallstrahlung theoretisch behandelt werden.

1.3.1 BiegeWellengleichung

In diesem Unterkapitel wird einführend die BiegeWellengleichung im 1D-Fall, also anhand von Stäben, erklärt. Im nächsten Unterkapitel wird genauer auf die Biegeschwingungen bei Platten eingegangen.

Grundsätzlich lassen sich laut [12] die Eigenschaften der BiegeWellen mit dem Wellenansatz erklären. Bei diesem gilt für die Schnelle

$$\nu = \nu_0 e^{-jk_B x}. \quad (1)$$

ν_0 entspricht dabei der Bezugsschnelle, k_B der BiegeWellenzahl und x dem Ort. Dieser Ansatz gilt für die homogene Differentialgleichung, welche außerhalb von lokalen äußeren Kräften gültig ist

$$\frac{\partial^4 \nu}{\partial x^4} - \frac{m'}{B} \omega^2 \nu = 0. \quad (2)$$

Mittels Einsetzen gelangt man zu

$$k_B^4 = \frac{m'}{B} \omega^2. \quad (3)$$

Setzt man

$$k_B = \frac{2\pi}{\lambda_B} = \frac{\omega}{c_B} \quad (4)$$

so gilt für die BiegeWellenlänge

$$\lambda_B = 2\pi \sqrt[4]{\frac{B}{m'}} \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad (5)$$

und für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der BiegeWelle

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{B}{m'}} \sqrt{\omega}. \quad (6)$$

Die daraus resultierende Biegewellenlänge λ_B besitzt also eine frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit und nimmt nur mit der Wurzel aus der anwachsenden Frequenz ab. Dies zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen Luftschallwellen und Biegewellen. Ein Effekt, der darauf hindeutet, ist die sogenannte Dispersion. Diese zeigt sich beispielsweise, wenn anstelle von reinen Tönen Zeitverläufe betrachtet, welche aus einer Zusammensetzung mehrerer spektraler Komponenten bestehen. In diesem Fall verursacht die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit ein gegenseitiges "Davonlaufen" der spektralen Komponenten, welches mit dem von ihnen zurückgelegten Weg und einem größer werdenden Frequenzabstand zunimmt. Die spektrale Zusammensetzung an zwei verschiedenen Stellen eines Stabes ist somit unterschiedlich, weshalb an unterschiedlichen Stellen unterschiedliche Zeitverläufe der Stabschnelle auftreten. Die Verzerrung des Zeitverlaufs erfolgt also längs der Biegewellenausbreitung.

1.3.2 Biegeschwingungen von Platten

Ähnlich wie beim eindimensionalen Stab kann laut [12] nun auch die etwas komplexere Biegewellengleichung für homogene Platten im zweidimensionalen Fall hergeleitet werden:

$$\frac{\partial^4 \nu}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \nu}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \nu}{\partial y^4} - \frac{m''}{B'} \omega^2 \nu = \frac{j\omega p}{B'}. \quad (7)$$

Dabei bezeichnet m die Masse und m'' die Plattenmasse auf die Fläche bezogen, was der zweiten Ableitung von m nach dem Ort entspricht und deshalb als Einheit $[\frac{kg}{m^2}]$ besitzt. p steht für eine äußere Flächenkraft (z.B. Druck), welche auf die Platte wirkt. Weiters entsprechen ρ der Dichte der Platte und h der Dicke der Platte.

$$m'' = \rho h. \quad (8)$$

Diese lässt sich ebenso wie die Platten-Biegesteife aus der Stab-Biegesteife (für rechteckigen Querschnitt) je Breitereinheit herleiten. Unter Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls E gelangt man zu:

$$B' = \frac{E}{1 - \mu^2} \frac{h^3}{12}. \quad (9)$$

Platten-Volumenelemente wirken steifer als Stab-Elemente. Diese Tatsache berücksichtigt der Faktor, welcher die Querkontraktionszahl μ enthält. Materialabhängig gilt $\mu < 0.5$, sodass $\mu^2 \ll 1$ vernachlässigbar ist. Die Querkontraktionszahlen für die in dieser Arbeit verwendeten Materialien sind Tab. 1 zu entnehmen. Sie liegen alle unter 0.5, womit $\mu^2 \ll 1$ für alle in Betracht gezogenen Materialien vernachlässigbar ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewellen ist bei Platten frequenzabhängig, Aus-

lenkungen werden dispergierend übertragen. Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional zur Wurzel der Frequenz. Die prinzipielle Wellengestalt ist bei einem von einer Punktkraft erzeugten, radial-symmetrischen Feld die gleiche wie die von ebenen Plattenwellen. Die Amplitude muss jedoch umgekehrt proportional zur Wurzel aus dem Abstand r zur Quelle abnehmen, was aus Energiegründen gefordert wird. Für ausreichend große Entfernungen von der Quelle ist also

$$\nu = \frac{A}{\sqrt{r}} e^{-jk_B r}. \quad (10)$$

Bei praktischen Berechnungen ist die Verwendung der Biegesteife etwas unhandlich. Aus diesem Grund wird der Quotient $\frac{m''}{B'}$ durch besser überschaubare Materialangaben ersetzt, gleichzeitig wird auch noch $\mu^2 \ll 1$ vernachlässigt:

$$\frac{m''}{B'} = 12 \frac{\rho h}{E h^3} = \frac{12}{c_L^2 h^2}. \quad (11)$$

Die Longitudinalwellengeschwindigkeit (bei Stäben) c_L lässt sich über den Elastizitätsmodul E und die Dichte ρ für einzelne Materialien wie folgt berechnen:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (12)$$

Die Dicke h und die Flächenmasse m'' wird meistens zur akustischen Beschreibung von Platten verwendet. Setzt man Gleichung (11) in die oberen beiden Gleichungen ein, so erhält man für die Biegewellenlänge

$$\lambda_B \approx 1.35 \sqrt{\frac{h c_L}{f}} \quad (13)$$

und für die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c_B \approx 1.35 \sqrt{h c_L f}. \quad (14)$$

In Tabelle 1 sind Parameter für die in dieser Arbeit praktisch relevanten Materialien angeführt. Die Longitudinalwellengeschwindigkeiten der verschiedenen Materialien weichen nicht allzu sehr voneinander ab. Grob wird der Bereich von 2000 m/s bis 5000 m/s überdeckt. Dünne Platten sind kurzwelliger und dicke langwelliger als Luft. Unterschiede zwischen Kurz- und Langwelligkeit von Bauteilen sind für die Luftschalldämmung der Platten von großer Wichtigkeit. Besagte Kurz- beziehungsweise Langwelligkeit kann man einem Frequenzintervall zuordnen, wobei die Wellenlängen λ_0 für Luft und λ_B für Biege-

	ρ (kg/m ³)	μ	c_L (m/s)	η	f_{cr} (Hz)
Aluminium	2700	0.34	5200	$\approx 10^{-4}$	$\approx 3107/6216$
Plexiglas	1180	0.43	2200	$3 \cdot 10^{-2}$	≈ 9794
Polystyrol	1050	0.33	2700	10^{-2}	≈ 7981
Carbon	1800	0.2	$\approx 11303 - 14814$	10^{-2}	$\approx 1454 - 1906$

Tabelle 1 – Materialdaten verwendeter Stoffe [12]. Dichte ρ , Querkontraktionszahl μ , Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L , Verlustfaktor η , Koinzidenzfrequenz f_{cr} .

wellen

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (15)$$

und bei einer bestimmten "kritischen" Frequenz, der sogenannten *Grenzfrequenz* oder *Koinzidenzgrenzfrequenz* f_{cr} gleich groß werden. Mittels Quadrieren der Wellenlängen und anschließendem Gleichsetzen kann man für f_{cr} zeigen, dass

$$f_{cr} = \frac{c^2}{1.82hc_L} \quad (16)$$

gilt.

Dabei ist folgendes zu beachten:

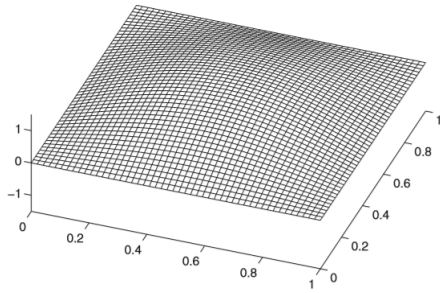
- $f < f_{cr}$: unterhalb der Grenzfrequenz sind Biegewellen kürzer als Luftschallwellen
- $f > f_{cr}$: oberhalb der Grenzfrequenz sind Biegewellen länger als Luftschallwellen

Die kritischen Frequenzen der hier verwendeten Materialien liegen im interessierenden Frequenzbereich zwischen 1.4 kHz und 9.7 kHz.

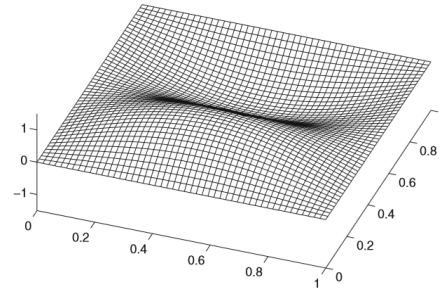
1.3.3 Plattenresonanzen

Auch bei Platten hängen Resonanzen und Modenformen von der Beschaffenheit der Lagerung an den Plattenrändern ab [12]. Resonanzen treten auf, wenn über die Ränder der Platte nur wenig Schwingenergie abfließen kann. Die Behandlung des Resonanzproblems ist dabei recht komplex und bedarf komplizierter und langwieriger Betrachtungen. Eine Ausnahme bildet das im Folgenden geschilderte und in Abb. 1(a) dargestellte Beispiel, bei dem die Platte umlaufend auf einem Lager aufgestützt ruht. Für diesen Fall ($x = 0, y = 0, x = l_x, y = l_y$) bestehen die Modenformen in

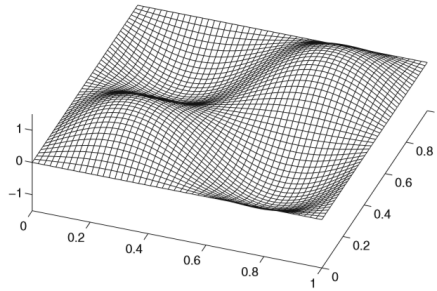
$$\nu = \sin\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right). \quad (17)$$



(a) Schwingungsmoden $n_x = 1$ und $n_y = 1$



(b) Schwingungsmoden $n_x = 1$ und $n_y = 2$



(c) Schwingungsmoden $n_x = 2$ und $n_y = 2$

Abbildung 1 – Plattenmoden (1,1), (1,2) und (2,2) [12].

In Abb. 1 sind die Plattenmoden (1,1) (a), (1,2) (b) und (2,2) (c) dargestellt. n_x und n_y bezeichnen dabei die Schwingungsknoten in die x- und y-Richtung.

Setzt man die Modenformen in die Biegewellengleichung (7) (homogen, da $p = 0$) ein, erhält man die Resonanzfrequenzen:

$$k_B^4 = \frac{m''}{B'} \omega^2 = \left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^4 + 2\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^4 = \left[\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2\right]^2, \quad (18)$$

weshalb

$$f = \frac{\pi}{2} \left[\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2\right] \sqrt{\frac{B'}{m''}} \quad (19)$$

gilt.

Zieht man aus der letzten Gleichung noch die Wurzel, lassen sich die daraus resultierenden Resonanzfrequenzen einfach grafisch darstellen. Dabei erhält man für die Wurzel aus der Frequenz je einen Gitterpunkt in einem regelmäßigen Eigenfrequenz-Gitter mit einer Gitter-Kantenlänge von

$$l_{Gkx} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{B'}{m''}} \frac{1}{l_x} \quad (20)$$

und

$$l_{Gky} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{B'}{m''}} \frac{1}{l_y}. \quad (21)$$

Jeder Gitterknoten entspricht also der Wurzel aus der Resonanzfrequenz. Daraus lässt sich nun die Anzahl ΔN der Moden in einem Frequenzband Δf vorhandenen Resonanzfrequenzen abschätzen. Hierfür wird die Anzahl N der Resonanzen bestimmt, welche im Intervall 0 bis f liegen. Diese Anzahl entspricht ca. dem Verhältnis eines Viertelkreises (siehe $\frac{\pi}{2}$ in Gl. (20) und (21)) mit dem Radius \sqrt{f} und der Fläche eines Gitterelements. Daher gilt:

$$N = \frac{\frac{\pi}{4} f}{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B'}{m''}} \frac{1}{l_x l_y}} = \frac{1}{2} f S \sqrt{\frac{m''}{B'}}. \quad (22)$$

Der Differenzenquotient lässt sich näherungsweise durch den Differentialquotienten ersetzen

$$\frac{\Delta N}{\Delta f} \approx \frac{dN}{df} = \frac{1}{2} S \sqrt{\frac{m''}{B'}} \quad (23)$$

und damit erhält man

$$\Delta N = \frac{1}{2} S \sqrt{\frac{m''}{B'}} \Delta f. \quad (24)$$

Wenn man auch hier wieder das Verhältnis aus m'' und B' durch die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L und die Plattendicke h nach Gl. (11) ausdrückt, folgt daraus

$$\Delta N = \frac{1.73S}{hc_L} \Delta f. \quad (25)$$

Die Resonanzdichte bei Platten ist dementsprechend eine frequenzunabhängige Konstante.

Es verstimmen sich zwar bei anderen Lagerungen am Rande (z.B. frei beweglich aufgehängt statt am Rande aufliegend) die einzelnen Resonanzfrequenzen, dies beeinflusst jedoch die Anzahl der Resonanzen ΔN in einem Frequenzband Δf weitgehend nicht. Deshalb eignet sich Gl. (25) auch unabhängig von den genauen Lagerungsbedingungen für Abschätzungen.

Für die hier verwendeten Materialien gelten folgende Abschätzungen:

Die Plattenfläche der zusätzlichen Trägerplatten lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$S = l_x \cdot l_y = 0.098 \text{ m} \cdot 0.078 \text{ m} = 0.007644 \text{ m}^2 \quad (26)$$

Für die Plexiglasplatte ($c_L = 2200 \text{ m/s}$) mit 3 mm Dicke und einer Fläche von 0.007644 m^2

erhält man beispielsweise

$$\Delta N = \frac{1.73 \cdot 0.007644 \text{ m}^2}{0.003 \text{ m} \cdot 2200 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \Delta f = 0.002 \Delta f. \quad (27)$$

Unabhängig von der Mittenfrequenz liegen auf der Plexiglasplatte also bei einer Bandbreite von $\Delta f = 10$ kHz etwa $\Delta N = 20$ Resonanzen. Es tritt also ungefähr alle 500 Hz eine Resonanz auf. Für Aluminium ergibt sich in diesem Frequenzbereich ein ΔN von 12 Resonanzen für eine 2 mm dicke Platte und $\Delta N = 6$ Resonanzen für eine 4 mm dicke Platte. Für Polystyrol kann man $\Delta N = 16$ Resonanzen abschätzen und für Carbon lassen sich Werte im Bereich $\Delta N = 3 - 4$ Resonanzen berechnen.

1.3.4 Artefakte bei gestörter Schallabstrahlung

Wenn Schall auf ein Hindernis trifft, kann es, abhängig von der Differenz zwischen der Schallfeldimpedanz in Luft und im Hindernis, zu Reflexion oder Absorption bzw. Transmission kommen. Je größer die Differenz, desto größer der Reflexionsgrad. Für die Größe der Reflexion entscheidend ist dabei das Größenverhältnis zwischen der Wellenlänge und den Abmessungen des Hindernisses. Bei sehr viel kleineren Abmessungen gegenüber der abgestrahlten Wellenlänge beugt sich der Schall um das Hindernis herum und breitet sich dahinter weiter aus (Abb. 2a) [1]. Die geringen Abmessungen sind dafür verantwortlich, dass unabhängig vom Impedanzunterschied so gut wie keine Energie reflektiert wird. Abmessungen, die sehr viel größer als die Wellenlänge sind, rufen, je nach Impedanzdifferenz an der Hindernisoberfläche, deutliche Reflexionen der Schallwelle hervor (Abb. 2b) [1]. In diesem Fall tritt hinter dem Hindernis die sogenannte *Schattenzone* auf, ein Bereich, in dem nahezu keine Schallausbreitung stattfindet. Schallreflexionen treten nicht nur an Oberflächen, sondern auch an Kanten von Hindernissen, auf. Die Ursache für Reflexionen ist in solchen Fällen die sprunghafte Änderung der Geometrie des Raumes, welche eine sprunghafte Impedanzänderung mit sich führt.

Auch das Übertragungsverhalten eines Lautsprechers, bzw. in diesem Fall eines Exciters, wird vom Auftreten von genau diesen Reflexionen und Beugungen beeinflusst. Hierbei spielen *Kammfilterartefakte* eine bedeutende Rolle. Dieser Effekt wird im Folgenden nun etwas genauer erläutert.

1.3.5 Kammfilterartefakte

Entlang der Schallwand eines Lautsprechergehäuses bzw. in diesem Fall des Exciters kann es an den Schallwandkanten bei Schallausbreitung der Primärwelle zu sprunghaften Än-

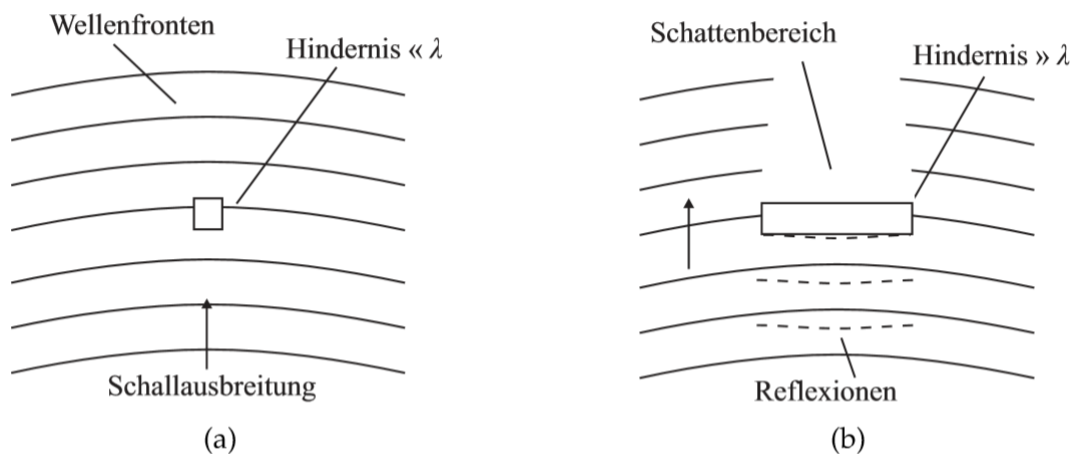


Abbildung 2 – Schallbeugung und -reflexion abhängig von der Größe des Hindernisses [1].

derungen der Schallfeldimpedanz kommen. Dabei ist die Schallschnelle unmittelbar an der Kante der Exciteroberfläche gleich Null. Die Schnelle ändert sich dann sprunghaft, da hinter der Exciterkante die Oberfläche abrupt eine andere Ausrichtung bekommt. Die Schallschnelle der Moleküle nimmt nach der Kante zu, somit verkleinert sich die Schallimpedanz. Die reflektierten Schallanteile werden um 180° phasengedreht. Um sich den Vorgang modellhaft vorzustellen, bietet sich an die primäre Wellenfront nach dem Huygensschen Prinzip¹ in ihre einzelnen Elementarwellen zu zerlegen. Durch Überlagerung dieser werden neue Wellenfronten für den gebeugten sowie den reflektierten Anteil gebildet. Durch Reflexion und Beugung können mehrere Wellenfronten entstehen, abhängig von der Kantenvielzahl der Lautsprecher- bzw. Exciteroberfläche. Deshalb trifft am Hörort zusätzlich zum Direktschall auch der an den Kanten gebeugte und reflektierte Schall auf. Eine erneut gebeugte Welle bezeichnet man als Beugungswelle höherer Ordnung, welche mit zunehmender Ordnung an Einfluss verliert, da ihre Energie immer geringer wird (Abb. 3(a)). Bei der Schallwand können auch Beugungswellen auftreten, die von der rückwärtigen Schallabstrahlung erzeugt werden. Abhängig vom zeitlichen Versatz von Direkt- und Reflexions- bzw. Beugungsschall entstehen konstruktive und destruktive Interferenzen, welche in sogenannten Kammfilterartefakten, also Klangverfärbungen mit ± 5 dB Pegelschwankungen im Mittel- und Hochtonbereich resultieren [1]. Auch Veränderungen im räumlichen Abstrahlverhalten sind eine Folgeerscheinung.

Zur einfachen Abschätzung des zu erwartenden Kammfilters betrachtet Wright den zeitlichen Versatz und die Anfangsphasenlage zwischen primärer und reflektierter Wellenfront

1. In [18] empfiehlt Wright allerdings die Kombination aus Huygensschem- und Fresnelschem Prinzip, sowie die Betrachtungen Kirchhoffs zur Beugung der elektromagnetischen Welle, um den gesamten Beugungsvorgang ausreichend bzw. noch genauer zu beschreiben.

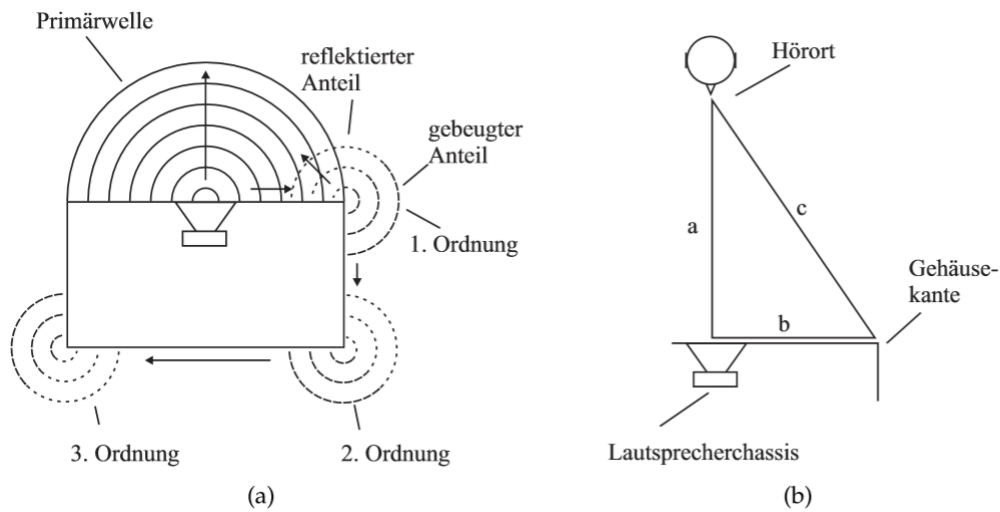


Abbildung 3 – Modell zur Veranschaulichung der Beugungsvorgänge an den Kanten eines Lautsprechergehäuses nach [9] (a) und Gedankenmodell zur Abschätzung des Kammfiltereffekts nach [18] (b) [1].

(Abb. 3(b)). Konstruktive Interferenzen entstehen demnach bei einer Wegdifferenz

$$\Delta s = \frac{(2n - 1)\lambda_0}{2}, (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (28)$$

und destruktive Interferenzen bei

$$\Delta s = n\lambda_0. \quad (29)$$

Die Frequenzen der Überhöhungen und Auslöschungen im Amplitudenfrequenzgang lassen sich bestimmen, indem die Wellenlänge durch die Schallgeschwindigkeit und die Frequenz ersetzt wird:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (30)$$

Eine Auslöschung tritt also für alle $f = \frac{nc_0}{\Delta s}$ auf, und eine Überhöhung für alle $f = \frac{(2n-1)c_0}{2\Delta s}$. Kammfilterartefakte treten besonders ausgeprägt auf, wenn der Lautsprecher bzw. der Exciter genau mittig in eine kreisförmige Schallwand eingebaut wird, da der Abstand zu allen Kanten gleich groß ist, was auch bedeutet, dass die Laufzeitunterschiede zwischen Direkt- und Reflexionsschallanteilen auf der 0° - Abstrahlachse für alle Kanten gleich groß sind. Je größer die Abweichung zur 0° - Achse ist, desto größer die Änderungen der Laufzeiten zwischen Kanten und Hörort. Reflexions- bzw. Beugungsartefakte lassen sich dementsprechend anhand von Einbrüchen und Überhöhungen im Amplitudenfrequenzgang, welche allein auf der 0° - Achse auftreten, feststellen.

Anhand dieser Formeln lassen sich für die Abstände $\Delta s = 1.6$ m, $\Delta s = 1.8$ m und $\Delta s = 2$ m der Exciter am Dachhimmel zueinander destruktive Interferenzen für die Fre-

quenzen $f = n \cdot 171.5$ Hz, $f = n \cdot 190$ Hz und $f = n \cdot 214$ Hz abschätzen. Konstruktive Interferenzen werden näherungsweise für $f = \frac{(2n-1) \cdot 343}{3.2}$ Hz, $f = \frac{(2n-1) \cdot 343}{3.6}$ Hz und $f = \frac{(2n-1) \cdot 343}{4}$ Hz geschätzt.

Im Bezug auf den Abstand des Dachhimmels zum Dach, welcher ca. 10 cm beträgt, können für $\Delta s = 0.1$ m Interferenzen für $f = n \cdot 3430$ Hz und $f = \frac{(2n-1) \cdot 343}{0.2}$ Hz erwartet werden.

1.4 Psychoakustische Grundlagen

Durch ihre Positionierung im Dachhimmel sollten die Exciter das Hauptschallfeld erweitern und somit auch die Einhüllung verstärken. Ein weiterer Grund, der für die Exciter sprechen sollte, war eine potentielle Verbesserung der Höhenlokalisation im höherfrequenten Bereich. Diese beiden Themen und wie genau sie sich gegenseitig beeinflussen, wird in den folgenden beiden Unterkapiteln erklärt.

1.4.1 Vertikale Einhüllung - Engulfment

Wird man als Hörer*In von einem akustischen Ereignis umgeben, so spricht man vom Effekt der Einhüllung. Im Gegensatz zum deutschen Sprachgebrauch, der bislang nur ein Wort dafür kennt, unterscheidet man im Englischen zwischen *envelopment*, der horizontalen Einhüllung, und *engulfment*, der vertikalen Einhüllung.

Die horizontale Einhüllung spielt vor allem im zweidimensionalen Hörbereich eine große Rolle und wird zur Definition der Immersion in einer Umgebung mit Raumreflexionen, wie beispielsweise eines Konzertsaals, in der Schall aus allen Richtungen bei den Hörenden ankommt, herangezogen [2]. Aus diesem Grund gilt die horizontale Einhüllung als einer der wichtigsten psychoakustischen Größen im 2D-Bereich [3], [11].

Die vertikale Einhüllung hingegen, wird vor allem im dreidimensionalen Bereich, durch beispielsweise Lautsprecheranordnungen auch über dem Hörenden, hervorgerufen. Szadov et al. weist in [15] darauf hin, dass diese Art von Einhüllung durchaus als eigenständige Größe betrachtet werden soll. Hörversuche haben gezeigt, dass die vertikale Einhüllung vor allem im Kontext mit 3D-Sound von größerer Bedeutung als der aus der Raumakustik herkömmliche Begriff der Einhüllung ist. Beschreiben lässt sich die Art von vertikaler Einhüllung als Eindruck von „zugedeckt“ sein. Im Vergleich dazu fühlt man sich bei horizontaler Einhüllung eher vom Schall „umgeben“. Szadov et al. stellt in [15] eine Analogie zum Meer her. Die Welle bäumt sich langsam auf und wird immer höher, macht den Eindruck den Surfer zu „überstürzen“ und „umhüllt“ ihn, bis ihn schließlich die ganze Welle mit ihrer Bewegung schluckt, den Surfer somit „eingehüllt“ hat.

Da in dieser Arbeit Exciter im Dachhimmel verbaut werden, um so das bereits vorhandene zweidimensionale Surround-System (2D) zu einem dreidimensionalen System (3D) zu erweitern, ist der Begriff der vertikalen Einhüllung von großer Bedeutung. Er ist somit auch jene Zielgröße, welche den Höreindruck der horizontalen Einhüllung, nun erweitert um die vertikale Einhüllung, beschreiben und auch bewerten soll. Die vertikale Einhüllung wird aus diesem Grund im später anberaumten Hörversuch auch die zentrale Kenngröße zur Bewertung der Exciter und ihrer Funktion im Fahrzeug sein.

1.4.2 Höhenlokalisierbarkeit

Bereits Roffler und Butler haben in [14] gezeigt, dass die Höhenlokalisierbarkeit mit steigender Frequenz zunimmt, was in der Literatur als *Pitch-Height-Effekt* bezeichnet wird. Cabrera und Tilley [4] befassten sich ebenfalls in einer Studie mit Lokalisation. Sie zeigten, dass Frequenzen ab ca. 2 kHz ungefähr um 5° angehoben geortet werden, egal auf welcher Höhe sich die Quelle auf der Medianebene befindet. Weiters zeigten Mironovs und Lee in [10], dass die Höhenlokalisierbarkeit stark abhängig vom Frequenzbereich der zu ortenden Quelle ist. Für ihren Versuch wählten sie zwei Signale, welche herkömmlicherweise von oben wahrgenommen werden. Dabei handelte es sich zum einen um Vogelgezwitscher, welches ein schmalbandiges Spektrum und komplexe Verläufe über die Zeit aufweist. Zum anderen wurde die Aufnahme eines abhebenden Flugzeuges verwendet, welches den tieffrequenten Bereich repräsentieren sollte. Ergebnisse zeigten, dass sich die Höhenwahrnehmung von Vogelgezwitscher auf den *Pitch-Height-Effekt* zurückführen lässt. Weiters konnte festgestellt werden, dass Fehler in der Lokalisation mit zunehmender Höhe kleiner werden. So konnten für jene Testsignale, welche aus dem Lautsprecher mit 90° Elevation abgespielt wurden, die geringsten Abweichungen in der Höhenlokalisation gemessen werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen sollten die Exciter vor allem im hochfrequenten Bereich ab etwa 2 kHz bespielt werden. Der genaue Frequenzbereich sollte zu einem späteren Zeitpunkt unter Einbeziehung von Messergebnissen und ersten Höreindrücken evaluiert werden. Eine mögliche Positionierung mit 90° Elevation war gegeben. So sollten die Exciter für eine stärkere Klangwahrnehmung von oben und Folge dessen eine verbesserte vertikale Einhüllung sorgen.

2 Exciter und deren Anbindung im Fahrzeughimmel

Für eine möglichst gute Anbindung der Exciter an den Fahrzeughimmel waren einige Punkte zu beachten. Informationen zu ihrer Funktion als Biegewellenwandler (Kap. 2.1) waren dabei hilfreich. Genauere Kenntnisse zu den einzelnen Modellen (Kap. 2.2) dienten ebenfalls zur Einschätzung, wie diese am geeignetsten positioniert werden sollten (Kap. 2.3). Den abschließenden Teil der akustischen Integration bildete der Abstimmvorgang, auf den in Kap. 2.4 noch näher eingegangen wird.

2.1 Funktion

Exciter funktionieren nach dem Prinzip der Biegewellenschwinger, auch Biegewellenwandler genannt [17]. Solche Biegewellenschwinger beruhen auf dem Ansatz, eine Platte so anzuregen, dass sich auf ihr Biegewellen ausbreiten und die Platte auf diese Weise Schall abstrahlt. Man spricht genau dann von einem Biegeschwinger, wenn die Biegewellenlänge der wiederzugebenden Frequenzen kleiner der größten geometrischen Abmessung der Membran ist. Ist diese Bedingung nicht gegeben, ähnelt das Schwingungsverhalten einem Kolbenschwinger.

Der Exciter muss auf einer Platte, welche je nach Bedarf aus diversen Materialien bestehen kann, so angebracht werden, dass diese mit seiner integrierten Schwingspuleneinheit angeregt werden kann. Von diesem Anregungspunkt aus kann sich nun eine Biegewelle auf der Platte ausbreiten. Je tiefer die Frequenz, desto weiter breitet sich die Welle auf der Platte nach außen hin aus. Hohe Frequenzen hingegen strahlen nur in der Nähe der Anregung ab, da sie sich aufgrund der verhältnismäßig hohen inneren Dämpfung des Plattenmaterials nicht weiter nach außen ausbreiten können. Dies ist der Grund für eine eher frequenzunabhängige Bündelung. Bei Konuslautsprecher steigt die Bündelung hingegen mit der Frequenz. Typischerweise wird dies durch Mehrwegesysteme kompensiert, weil deren Treiber zu hohen Frequenzen immer kleiner werden und deshalb immer weniger bündeln. Ein Nachteil von solchen Mehrwegesystemen ist aber die Gruppenlaufzeit zwischen den Treibern, also die nicht gleichzeitige Abstrahlung aller Frequenzen. Exciter können hingegen beides. Sie strahlen alle Frequenzen gleichzeitig und gleichmäßig ab. Da ihr Abstrahlverhalten also weniger frequenzabhängig als bei Konuslautsprechern ist, eignen sie sich bei geeigneter Anbringung besonders gut für eine breitbandige Wiedergabe.

Mittlerweile werden Neodym-Magneten als Antriebseinheiten verwendet, womit eine Empfindlichkeit von bis zu 91 dB 1W/1m erreicht werden kann. Abhängig von Material

und Einsatzbereich reicht der Frequenzgang durchaus für Vollbereichsanwendungen und kann, falls benötigt, mittels eines tief angekoppelten Subwoofers erweitert beziehungsweise ergänzt werden. Die Empfindlichkeit von Excitern ist somit also ähnlich zu der von Konuslautsprechern.

Sollen mehrere Exciter auf einer Fläche eingesetzt werden, kann man sich an den Eigenschaften von Distributed Mode Lautsprechern (DMLs) [17] orientieren. Diese arbeiten ebenfalls mit Biegewellenschwingungen. Mehrere Exciter dienen hierfür als Antriebseinheiten für Schwingungen, welche die Platte, auf der sie befestigt sind, Schall abstrahlen lassen. Dies führt zu vielfältigen Schwingungsverteilungen auf der Fläche, welche somit nicht wie bei herkömmlichen Lautsprechern als Ganzes schingt. Breiten sich möglichst viele Biegewellen auf der angeregten Platte aus, erhält man eine geeignete Verteilung der Moden bzw. Eigenfrequenzen der Platte. Ziel ist eine möglichst gleichmäßige und hohe Dichte der Eigenfrequenzen, denn dies führt zu einer gleichmäßigen Abstrahlung des angestrebten Frequenzbereichs. Maßgebend dafür sind die Größe und Form der Platte, auf der die Exciter angebracht werden. Weitere wichtige Faktoren sind dabei die Position der Exciter, sowie Steifigkeit, Dichte und Dämpfung des Plattenmaterials. Der Forderung, dass jeder Bereich der Platte unabhängig von seiner Umgebung zur Abstrahlung beiträgt, kommt die dispersive Eigenschaft von Biegewellen zusätzlich zugute. Der Vorteil dieser quasi zufälligen Schwingungsmuster von DMLs ist eine breitbandige akustische Abstrahlung.

2.2 Verwendete Modelle

Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Modelle in Betracht gezogen. Beim ersten, welches bereits in einem Referenzfahrzeug verbaut ist und als Referenz dienen sollte, handelte es sich um einen Exciter des Herstellers *LPG*. Bei den beiden Modellen, welche schließlich für das später in dieser Arbeit entwickelte Konzept zur Verfügung standen, handelte es sich um den *DAEX19SL-4 Slimline Coin-Type 19 mm*-Exciter der Firma *Dayton* (Gesamtdurchmesser = $33 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$; Höhe = $6.5 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$), sowie den *B33 Actuator* der Firma *Foster* (Seitenlänge = 40 mm ; Höhe = 12.8 mm). Der Grund für diese beiden Modelle waren die geringeren Kosten sowie die geringeren Maße, welche sie gegenüber dem Referenzmodell aufweisen. Da im Fahrzeugdachhimmel nur begrenzt Platz zum Einbau der Exciter zur Verfügung steht, sind jene Modelle mit geringeren Abmessungen plötzlich besser geeignet. Datenblätter für detailliertere Informationen sind dem Appendix zu entnehmen.



Abbildung 4 – DAEX19SL-4: Oberseite (l), Unterseite (r).



Abbildung 5 – B33: Oberseite (l), Unterseite (r).

2.3 Positionierung

Grundsätzlich führt die Anbringung der Exciter über eine zusätzliche Befestigung mittels Brücke, z.B. durch Verschrauben in den Ecken, zu einem schmalbandigeren Verhalten. Die Schwingspule des Exciters wird so in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Dadurch kann sie das Material, auf dem sie befestigt ist, nur mehr mit einer geringeren Auslenkung und somit schwächer anregen. Deshalb wurden in diesem Fall die Modelle so befestigt, dass die Exciter-Masse über eine Klebung mit der BiegeWellenmembran, also dem Dachhimmel, gehalten wird. Wie schon in Kap. 1.3 erwähnt, ist die Positionierung maßgebend für die Anregung der Membranresonanzen, was bedeutet, dass unterschiedliche Positionen unterschiedliche Resonanzanregung und Resonanzfrequenzverteilungen bewirken. Das Ziel ist alle Biegeresonanzfrequenzen des Dachhimmels möglichst gleichmäßig anzuregen, um somit eine möglichst breitbandige Schallwiedergabe zu erreichen. Um das Verhalten der Exciter am Dachhimmel besser ermitteln zu können, wurde dieser für die anfänglichen Messungen noch aus dem Fahrzeug genommen und im reflexionsarmen Messraum gehängt. So wurden die einzelnen Positionen, welche für die spätere Fixierung in Frage kamen, leichter zugänglich gemacht. Durch den erleichterten Zugang

konnten verschiedene Möglichkeiten evaluiert werden. Wie die Exciter schließlich positioniert wurden ist in Abb. 6 abgebildet.

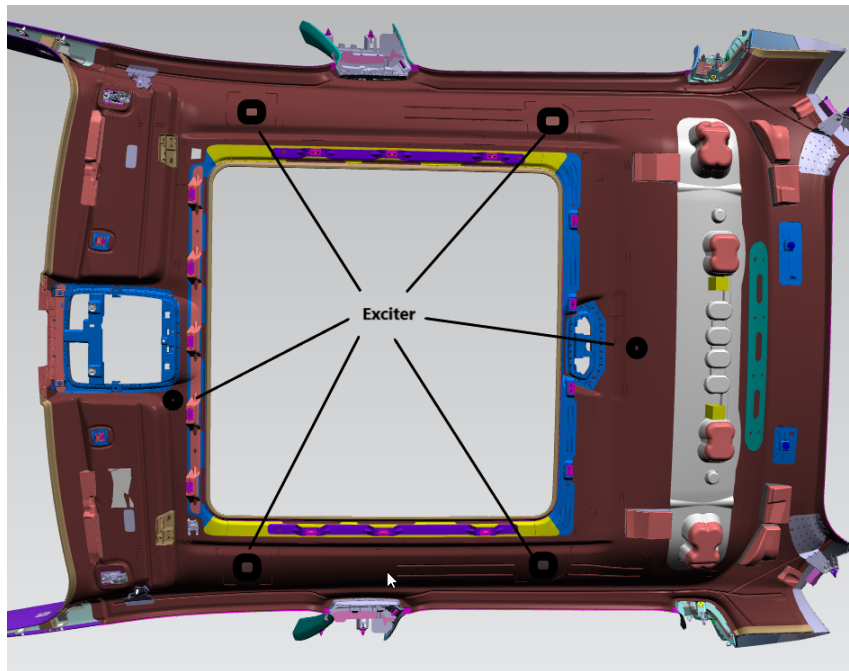


Abbildung 6 – Positionierung der Exciter auf dem Dachhimmel.

2.4 Akustische Integration

Um die gewünschte akustische Integration in das Fahrzeug zu erhalten, wurde abschließend das gesamte Audiosystem, also die verbauten Exciter gemeinsam mit dem bereits vorhandenen Lautsprechersystem, abgestimmt. So sollte festgelegt werden, wie die Exciter wirken sollen, bzw. was genau sie spielen sollen. Grundsätzlich wird eine Monosumme jeweils an die Front-Lautsprecher sowie die Rear-Lautsprecher gesendet. Der Center-Lautsprecher wird mit einer Stereo-Summe bespielt. Für die Exciter im Dachhimmel gilt das gleiche, auch sie bekommen sowohl vorne als auch hinten jeweils eine Monosumme zugespielt.

Beim Abstimmvorgang wurden die einzelnen Lautsprecher mittels IIR-Filter bandbegrenzt und entzerrt. Zur Verfügung standen dafür 13 Filterbänder. Die Filterparameter waren dabei händisch zu setzen. Das Abstimmprogramm verfügte über folgende Filtertypen:

- Hochpass
- Tiefpass
- Allpass
- Shelving

- Peaking
- Notch

Zusätzlich wurden die einzelnen Lautsprecher mittels geeigneter Wahl von Delayzeiten entsprechend zueinander verzögert, sowie pegelmäßig zueinander abgestimmt. Das Setzen von Kompressor- und Limiterwerten und die Bestimmung von Lautheitskurven rundeten den Vorgang ab. Die Bandbreite sowie Pegel der Exciter wurden im Zuge des Abstimmvorganges mittels Konsensbildung einer Expertengruppe von drei Personen festgelegt.

Ein 3D-Algorithmus sollte ein dreidimensionaleres Klangbild schaffen, den Gesamtklang im Fahrzeug also stärker verräumlichen. Welche Art von Nachhall dafür verwendet wird bzw. wie genau dieser generiert wird, ist unklar. Der Nachhall wird allerdings auf den gesamten Frequenzbereich gelegt, sodass alle Frequenzen mit dem gleichen Hallanteil versehen werden. Weitere Informationen zum Algorithmus sind nicht bekannt. Um den Algorithmus besser an die neu verbauten Exciter anzupassen, wurde einer der 3D-Modi abgestimmt. Aus technischen Gründen war es nicht möglich tiefergehend in den 3D-Algorithmus einzugreifen. Deshalb wurde dieser, soweit es möglich war, angepasst. Es wurden unterschiedliche Delayzeiten gesetzt, sowie der *Wrap-Amount* festgelegt, welcher der Intensität des Nachhalls entspricht.

3 Akustische Messungen

In diesem Kapitel sind sämtliche Messungen angeführt, die die einzelnen Schritte von den ersten Voruntersuchungen bis zu den eingebauten Excitern im Fahrzeug beschreiben. Beginnend wurde mit dem Vergleich unterschiedlicher zur Verfügung stehender Modelle mit einem Referenzmodell (Kapitel 3.1). Als nächstes wurden diverse Materialien als zusätzliche Trägerplatte untersucht (Kapitel 3.2). Da diese Messungen nur auf einem rechteckigen Ausschnitt des Dachhimmelmaterials erfolgten, wurden anschließend Voruntersuchungen des ganzen Dachhimmels im reflexionsarmen Messraum durchgeführt (Kapitel 3.3). In Kapitel 3.4 zeigen die abschließenden Messungen im Fahrzeug, wie sich die Exciter am Dachhimmel vor bzw. nach dem erforderlichen Abstimmvorgang (siehe Kapitel 2.4) und somit im finalen eingebauten Zustand verhalten.

3.1 Vergleich unterschiedlicher Modelle

Erste Herangehensweise war die Untersuchung der beiden zur Verfügung stehenden Exciter-Modelle gemeinsam mit einem in anderen Fahrzeugen bereits verbauten Modell, welches aufgrund von Kosten und Maßen lediglich als Referenz dienen sollte. Die Exciter wurden dabei auf einem rechteckigen Ausschnitt vom Dachhimmelmateriale des Testfahrzeuges der Maße 29 cm x 39 cm untersucht. Die genaue Materialzusammensetzung des Dachhimmels ist im Geräte- und Materialverzeichnis angeführt. Hinsichtlich der Kenntnisse zur Biegewellenausbreitung wurden die Platten auf die Größen mit den Seitenverhältnissen $L \times \frac{4}{5}L$ zugeschnitten. Positioniert wurde der Exciter laut Herstellerangaben in einem Seitenverhältnis von $\frac{3}{5}L : \frac{2}{5}L$ [5]. Folgende Grafik zeigt das für diese Messungen herangezogene und vom Hersteller Dayton Audio empfohlene Setup. Die Messungen

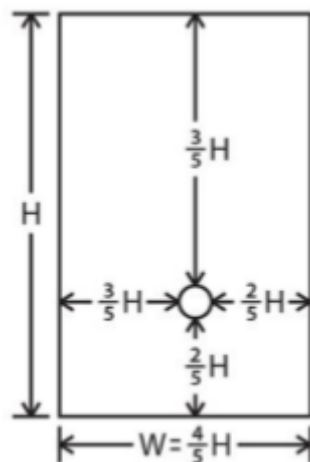


Abbildung 7 – Positionierung des Exciters [5].

wurden im Bodentank (Baffle-Wall) im reflexionsarmen Raum¹ durchgeführt. Als Messmikrofon diente ein Microtech Gefell MV 220, welches im Abstand von 1 m senkrecht von oben auf das Zentrum des Messobjekts gerichtet wurde. Um einen Eindruck vom Verhalten der Exciter bei unterschiedlicher Belastung zu gewinnen, wurden diese mit einer Spannung von 0.5 V - 3.5 V in 0.5 V-Schritten mit einem Sinussweep von 20 Hz - 20 kHz mit einer Dauer von 2.7 s für Frequenzgangmessungen bzw. 5.5 s für Total Harmonic Distortion (THD) - Messungen angeregt. Ausgegeben wurden die Messdaten mit einer Zwölftel-Oktav-Bandauflösung. Einen ersten Eindruck vom Verhalten der Exciter sollte vorerst der Frequenzgang der Exciter liefern.

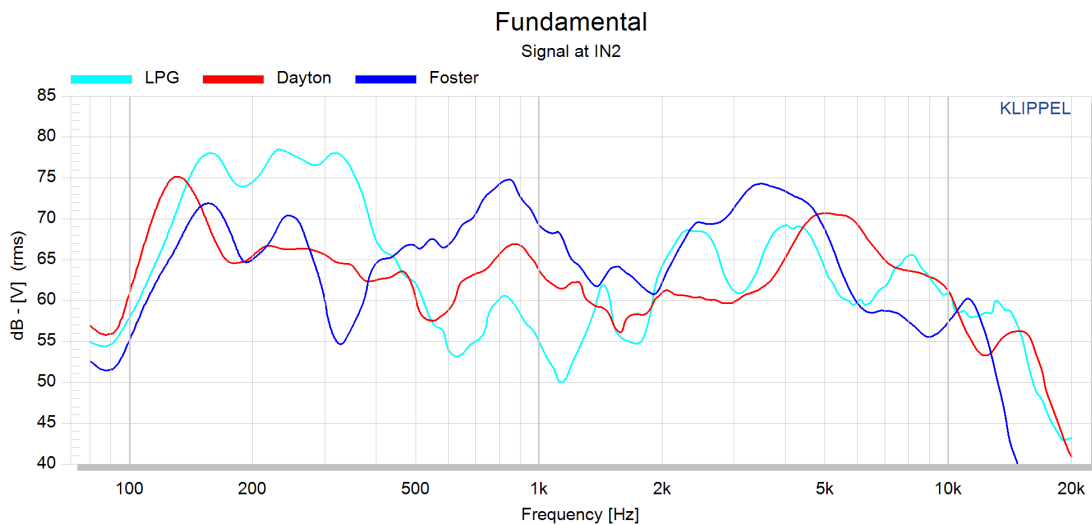


Abbildung 8 – Frequenzgänge der drei Exciter-Modelle (LPG, Dayton, Foster) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Wie in Abb. 8 zu sehen ist, weist der LPG-Exciter im Vergleich zu den anderen beiden Excitern zwar ein starkes Tieftonverhalten auf, im Mitteltonbereich ist er jedoch mit einem Abfall von ca. 20 dB am schwächsten. Zu den hohen Frequenzen hin steigt seine Leistung wieder um etwa 10 dB an. Der Exciter von Dayton besitzt den ausgewogensten Frequenzgang von den drei Messobjekten, liefert jedoch vor allem im Mitteltonbereich teilweise um bis zu 10 dB weniger Pegel als das Modell von Foster. Dieses überzeugt mit einem verhältnismäßig leistungsstarken Verhalten im Mitteltonbereich, sowie tieferen Hochtonbereich. Die genaue Bandbreite, mit welcher die Exciter im Dachhimmel schließlich spielen sollen, wird später erst definiert. Jedoch werden diese auf keinen Fall unter 500 Hz spielen. Da auch alle drei Modelle oberhalb von 12 kHz keine brauchbare Leistung mehr liefern können, lässt sich somit deren Einsatzbereich vorerst auf 500Hz bis 12 kHz festlegen. Wie in den ersten Frequenzgangmessungen ersichtlich, weist der Exciter vom

1. VOLKE Audiolabor

Hersteller Foster das leistungsstärkste Verhalten auf und kann somit auch gegenüber dem Referenzmodell klar überzeugen.

Im nächsten Schritt wurde die Total Harmonic Distortion (THD) der drei Modelle gemessen. Diese liegt beim LPG Exciter bis auf den Bereich zwischen 700 Hz und 1.9 kHz im Sollbereich. Beim Dayton Exciter ließen sich starke Verzerrungen vor allem im tieffrequenten Bereich bis zu 1 kHz feststellen. Von 1 kHz bis 2 kHz konnte ein THD zwischen 2 % und 4 % gemessen werden. Erst oberhalb von 1.9 kHz spielt der Exciter verzerrungsfrei.

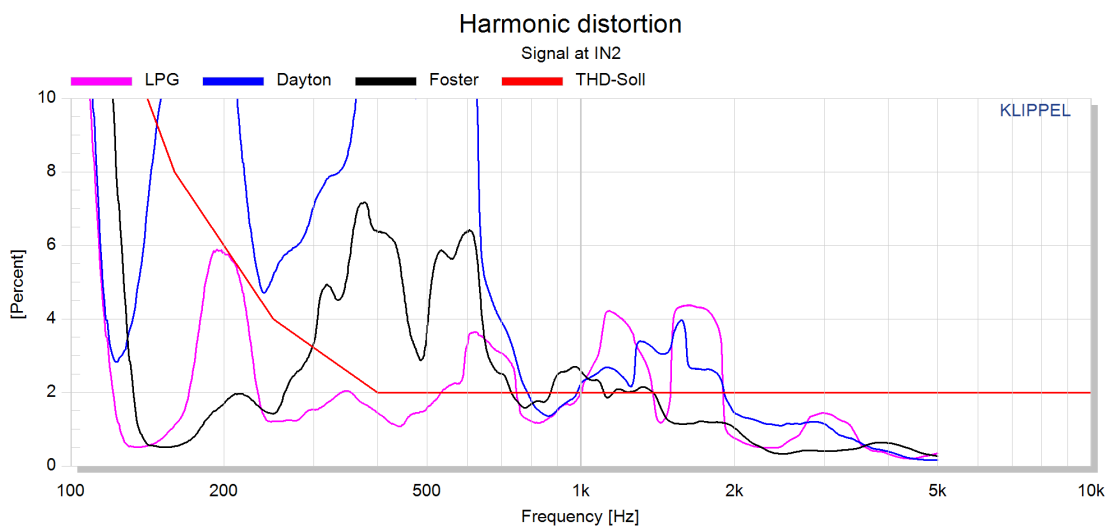


Abbildung 9 – THD der drei Exciter-Modelle (LPG, Dayton, Foster) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Beim Exciter der Firma Foster konnten Verzerrungen von 300 Hz bis ca. 750 Hz oberhalb des Sollwertes gemessen werden, jedoch deutlich schwächer als beim Dayton-Exciter. Um 1 kHz befand sich der THD etwa 0.5 % über dem Sollwert, für Frequenzen über 1 kHz konnten Verzerrungen innerhalb des Sollwerts gemessen werden.

Die THD-Messungen zeigten, dass der Exciter vom Hersteller LPG am geringsten zerrt, gefolgt von Foster. Am meisten Verzerrungen konnten bei Dayton festgestellt werden. Da sich die Bandbreite für die später im Dachhimmel verbauten Exciter aus psychoakustischen Gründen auf ca. 2 kHz bis 12 kHz begrenzte, hatten die gemessenen Verzerrungen über dem Sollwert keinen relevanten Einfluss auf den Spielbereich der Exciter. Bei Foster konnten jedoch auch oberhalb von 1.5 kHz die geringsten Verzerrungen im Sollbereich gemessen werden. So konnte anhand der ersten Messungen auf einem Ausschnitt des Dachhimmelmaterials vorab schon der Exciter von Foster als Favorit definiert werden.

3.2 Untersuchung von Zusatzmaterialien als Trägerplatten

Im nächsten Schritt wurden verschiedene Varianten von Trägerplatten untersucht. Dafür wurden die direkte Befestigung auf dem Dachhimmelmateriale, sowie der Versuch zusätzliches Material miteinzubeziehen, betrachtet. In [5] wird auf geeignete Materialien hingewiesen, weshalb die für diese Zwecke untersuchten Trägerplatten großteils nach den Herstellerempfehlungen ausgewählt wurden. Die untersuchten Materialien mit ihren relevanten Kenngrößen sind im Geräte- und Materialverzeichnis nachzulesen. Die Größe der Platten wurde so gewählt, dass sie später selbst an den gewölbten Stellen im Dachhimmel noch flächig angebracht werden konnten, ohne die Kanten überstehen zu lassen. Das Zusatzmaterial wurde wiederum im selben Seitenverhältnis zum Dachhimmelausschnitt platziert, wie in der vorigen Messreihe der Exciter auf dem Dachhimmelausschnitt. Die zusätzliche Trägerplatte wurde mittels Terostat den Kanten entlang fixiert. Abbildung 10 zeigt das für diese Messungen herangezogene und vom Hersteller Dayton Audio empfohlene Setup.

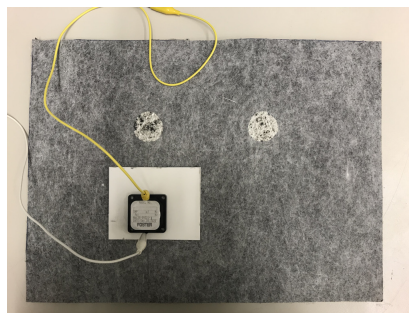


Abbildung 10 – Positionierung des Exciters mit einer zusätzlichen Materialkomponente.

Die Messungen wurden im reflexionsarmen Raum durchgeführt. Das Messmikrofon wurde im Abstand von 1 m senkrecht von oben auf das Zentrum des Messobjekts gerichtet. Um sich wieder das Verhalten des Exciters bei unterschiedlicher Belastung anzusehen, wurde dieser erneut mit einer Spannung von 0.5 V - 3.5 V in 0.5 V-Schritten mit einem Sinussweep von 20 Hz - 20 kHz gespeist. Einen ersten Eindruck vom Verhalten des Exciters unter Einbeziehung einer zusätzlichen Platte sollte vorerst der Frequenzgang des Exciters liefern. Dafür wurden sechs Fälle untersucht:

1. Exciter direkt auf Dachhimmel
2. Exciter auf 3 mm dickem Plexiglas auf Dachhimmel
3. Exciter auf 2 mm dickem Alu auf Dachhimmel
4. Exciter auf 4 mm dickem Alu auf Dachhimmel

5. Exciter auf 3 mm Polysterol auf Dachhimmel
6. Exciter auf 3 mm Carbon auf Dachhimmel

In folgender Abb. 11 ist der Frequenzgang des Foster-Exciters in sechs verschiedenen Verläufen zu sehen. Mithilfe eines jeden Frequenzganges der sechs unterschiedlichen Fälle sollte es möglich sein vorab Entscheidungen bezüglich der etwaigen Zusatzmaterialwahl zu treffen.

Vergleicht man die Messung ohne verwendetes Zusatzmaterial mit der Messkurve des Foster-Exciters in Abb. 8, war die gemessene Leistung des Exciters bei dieser Messung durchgehend schwächer. Oberhalb von 2 kHz hatte dies eine Reduktion von bis zu 5 dB SPL zur Folge. Der Grund dafür war eine andere Verklebung, welche zur Befestigung des Exciters verwendet wurde. Als Befestigungsmaterial diente ein zweiseitiges Klebeband, welches nach einmaligem Entfernen des Exciters vom Dachhimmel abgenützt war. Die Exciter sind nicht für mehrmaliges Befestigen und wieder Lösen konzipiert, weshalb das Klebeband dementsprechend ersetzt werden musste. Als Alternative wurde für diese Messung ein vom Hersteller empfohlenes Klebeband (Details sind dem Geräte- und Materialverzeichnis zu entnehmen) eingesetzt, welches nach jedem Messdurchlauf durch ein neues ersetzt wurde. Das neue Befestigungsmaterial verursachte einen schwächeren Pegelverlauf, da durch die schwächere Klebung die Schwingspule des Exciters die Dachhimmelplatte nicht mehr so stark anregen konnte wie zuvor. Um konsistente Messergebnisse zu erhalten, wurde auch für alle zukünftigen Anbringungen ausschließlich dieses Klebeband verwendet.

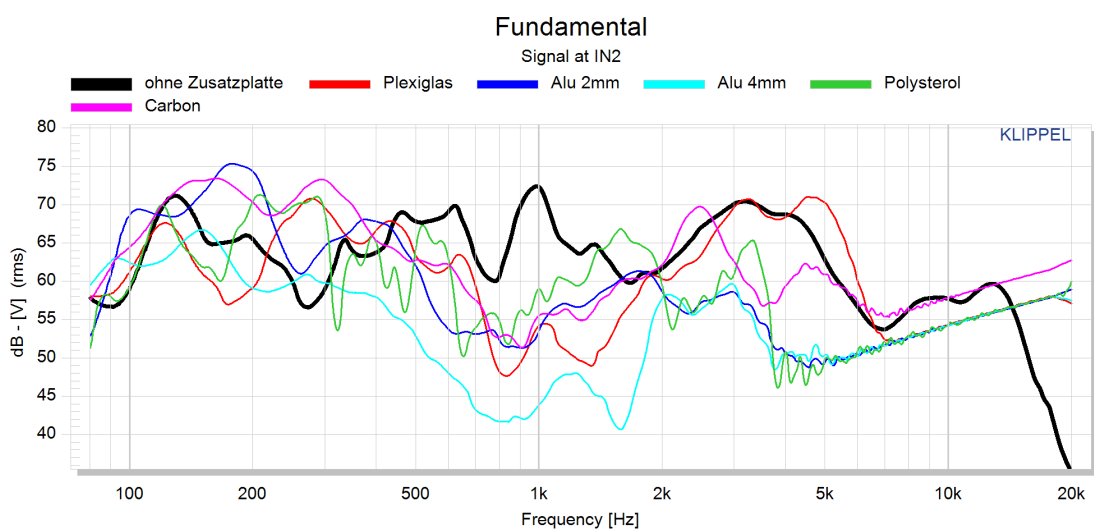


Abbildung 11 – Frequenzgänge des Foster-Exciters bei Anbringung verschiedener Zusatz-Platten in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Die Messkurve ohne Zusatzmaterial zeigt, dass bei 1 kHz eine Resonanz auftritt. Diese Resonanz ist auf die Größe der Dachhimmelplatte zurückzuführen. Wird jedoch zwischen Exciter und Dachhimmel eine zusätzliche Materialkomponente miteinbezogen, verschwindet diese Resonanz und es macht sich ein deutlicher Einbruch um 1 kHz bemerkbar. Der unstetigste Verlauf wurde unter Verwendung der beiden Aluplatten erzielt, weshalb diese für weitere Untersuchungen nicht mehr infrage kamen. Auch Polyesterol verursacht einen sehr unstetigen Verlauf mit großen Pegeldifferenzen, sodass dieses Material ebenfalls nicht weiter geeignet war. Das ausgewogenste Ergebnis unter den zusätzlichen Trägerplatten konnte mit Plexiglas erzielt werden. Die geringsten Pegeldifferenzen weist der Frequenzgang vom Exciter direkt auf dem Dachhimmel angebracht auf. Da aus psychoakustischen Gründen die Exciter erst ab ca. 2 kHz spielen sollten, sprechen Ergebnisse der ersten Frequenzgangmessungen für die Variante mit dem Exciter direkt auf dem Dachhimmel oder eventuell auf einer Trägerplatte Plexiglas. Wie in Abb. 11 zu sehen ist, konnte auch bei Plexiglas ein verhältnismäßig starker Pegelverlauf zwischen 2 kHz und 7 kHz gemessen werden. Dieser hatte jedoch einen kleinen Einbruch bei 4 kHz. Außerdem konnte direkt auf dem Dachhimmel im Bereich von 2 kHz bis 3 kHz ca. 2 dB mehr Pegel gemessen werden.

Zusätzliche THD-Messungen wurden mit jenen beiden Materialien durchgeführt, mittels welchen die für spätere Einbauzwecke geeignetsten Frequenzgangverläufe gemessen wurden. In Abb. 12 ist der THD des Foster- und Dayton-Exciters auf Plexiglas bei einer Spannungszufuhr von 1 V dargestellt. Im Gegensatz zu Dayton, liegt Foster nur im Bereich zwischen 600 Hz und 1 kHz ca. 1% über dem Sollwert. Ab knapp unter 4 kHz konnte ein weiterer Anstieg auf etwa 2.5% über den Sollwert gemessen werden. Beim Exciter von Dayton wurden fast durchgehend Verzerrungen deutlich über dem Sollwert gemessen, nur im Bereich unter 150 Hz und zwischen 200 Hz und 250 Hz lag der THD im Sollbereich. Insgesamt konnten auf Plexiglas mehr Verzerrungen als direkt auf dem Dachhimmel ohne Zusatzmaterial gemessen werden.

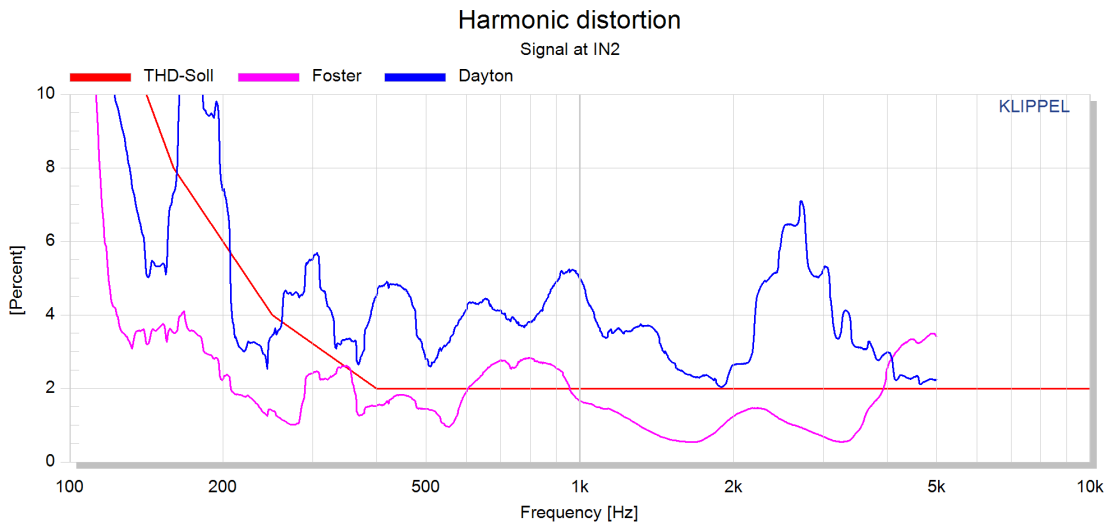


Abbildung 12 – THD des Foster- und Dayton-Exciters auf Plexiglas in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Im Gegensatz zu Plexiglas konnten auf Carbon auch bei Foster über den gesamten gemessenen Frequenzbereich starke Verzerrungen ermittelt werden. Der THD überstieg unterhalb von 1 kHz sogar 10%. Auch Dayton wies auf Carbon deutlich stärkere Verzerrungen auf als auf Plexiglas. Da die Verzerrungen von keinem der beiden Exciter annähernd an die Sollwerte grenzten, kam auch Carbon als Trägerplatte nicht länger in Frage.

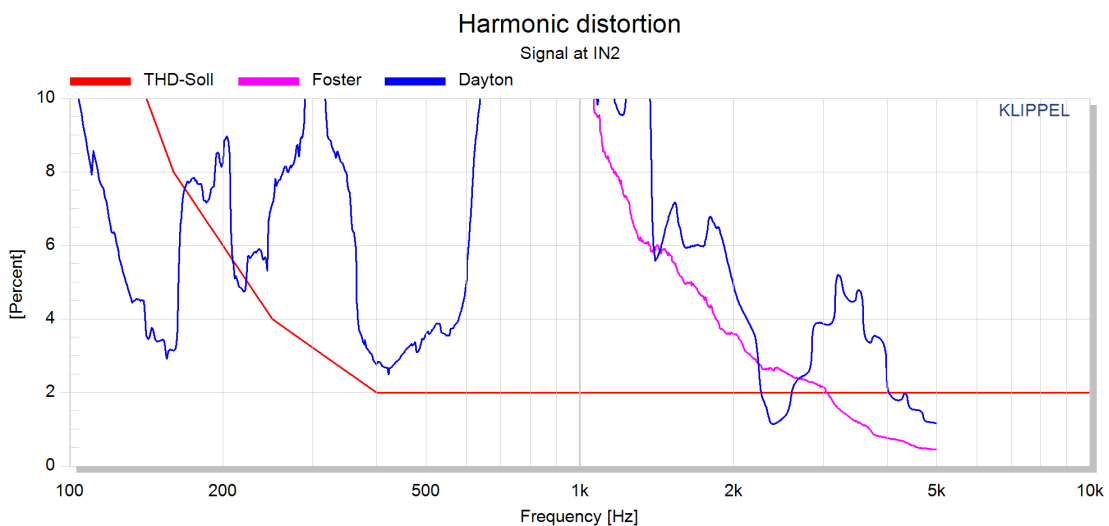


Abbildung 13 – THD des Foster- und Dayton-Exciters auf Carbon in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Der Frequenzgang der beiden Exciter zeigte bessere Ergebnisse, wenn die Exciter direkt auf dem Dachhimmel befestigt wurden. Beim THD hingegen konnten zumindest für den Foster-Exciter gute Ergebnisse auf der Trägerplatte aus Plexiglas erzielt werden. Diese lie-

gen bis auf den Bereich zwischen 600 Hz und 950 Hz im Sollbereich. Ab 4 kHz steigt der THD auf der Plexiglas-Platte jedoch wieder auf 1.5% über den Sollwert an, was direkt auf dem Dachhimmel nicht der Fall war. Da ein möglichst ausgewogener Frequenzgang und ein möglichst verzerrungsfreies Verhalten der Exciter angestrebt wurde, sollten für weitere Schritte die Exciter ohne jegliche in Erwägung gezogenen Zusatzmaterialien direkt auf dem Dachhimmel befestigt werden. Dies betraf sowohl noch folgende Voruntersuchungen, als auch die später folgende Integration ins Fahrzeug, was gleichzeitig auch einen mechanischen Vorteil hatte.

Für die endgültige Auswahl eines geeigneten Exciter-Modells wurden nochmals die Frequenzgänge sowie der THD von den ersten Messungen gegenübergestellt. Diese wurden bereits in Kap. 3.1 und 3.2 näher beschrieben. Betrachtet man den THD, so traten die gesamten harmonischen Verzerrungen bei Foster in einem deutlich geringeren Ausmaß auf, als bei Dayton. Zusätzlich erwies sich der Exciter von Foster als leistungsstärker, wie bereits in Abb. 8 ersichtlich war.

Ein weiterer Grund war der direkte Kontakt zum Hersteller Foster. Da der Exciter noch als Prototyp entwickelt wird, konnte so laufend Feedback an den Hersteller weitergeleitet werden. Dies ermöglichte es gegebenenfalls den Exciter im Bezug auf unterschiedliche Faktoren, wie z.B. Anbindung an das Trägermaterial, zu optimieren. Das Modell von Dayton blieb trotzdem als Ersatz vorbehalten. Sollten weitere zusätzliche Exemplare benötigt werden, die von Foster nicht zur Verfügung stehen, könnten die Exemplare von Dayton immer noch als Alternative eingesetzt werden.

3.3 Voruntersuchungen des Dachhimmels im reflexionsarmen Raum

Im nächsten Schritt wurden vier Foster-Exciter am Fahrzeugdachhimmel nach ersten Überlegungen angebracht. Um das Verhalten der Exciter am tatsächlichen Dachhimmel besser ermitteln zu können, wurde dieser für die anfänglichen Messungen noch aus dem Fahrzeug genommen und im reflexionsarmen Messraum platziert. So konnten die einzelnen Positionen, welche für die spätere Fixierung in Frage kamen, leichter zugänglich gemacht werden. Der Dachhimmel wurde dafür auf einer Höhe von 1 m über dem Boden gehängt. Ein Messmikrofon wurde 30 cm unter dem Dachhimmel auf einem Stativ mit einem Abstand von 30 cm zur Seite platziert. Der Seitenabstand entsprach dem Mittelpunkt des Mikrofonarrays (siehe Abb. 16), welches für spätere Messungen im Fahrzeug eingesetzt wurde. So sollten die Voruntersuchungen im reflexionsarmen Raum mit den späteren Messungen im Fahrzeug vergleichbar sein.

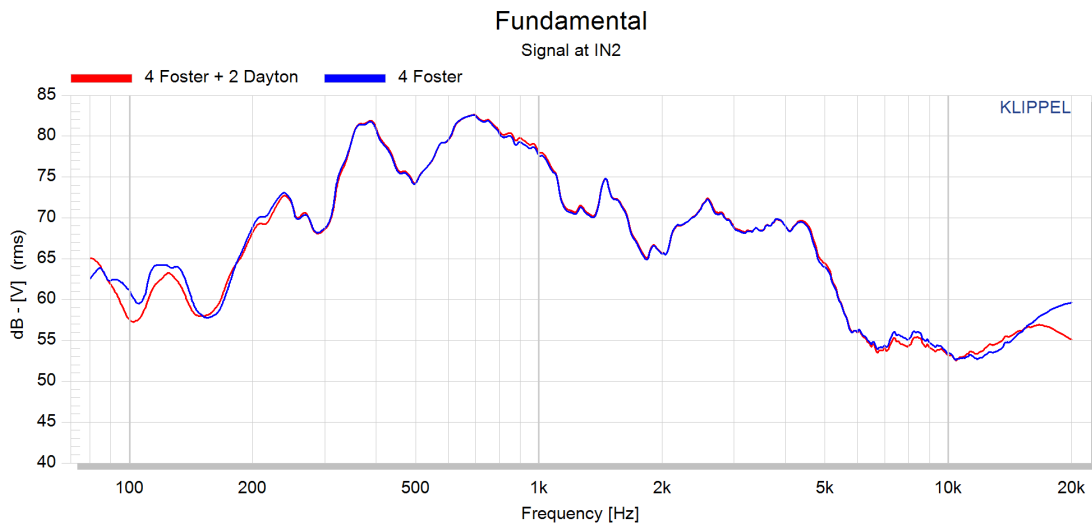


Abbildung 14 – Frequenzgang der vier Foster-Exciter allein und mit zwei weiteren Dayton-Excitern auf dem Dachhimmel (siehe Abb. 6) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Grundsätzlich sollten die Exciter die Konuslautsprecher ersetzen, weshalb der erste Ansatz auch jener war, die Exciter auf die Position der Konuslautsprecher zu setzen. Zusätzlich wurde überlegt, noch zwei weitere Exciter anzubringen, um ein potentiell „Klangloch“ in der Fahrzeugmitte zu vermeiden. Da nur vier Exciter von Foster zur Verfügung standen, wurden als Zusatz zwei weitere Exemplare von Dayton gewählt.

In den Frequenzgangmessungen in Abb. 14 ist zu sehen, dass das Hinzufügen von zwei zusätzlichen Excitern kaum Unterschiede ergab, der Verlauf ist nahezu über den gesamten gemessenen Frequenzbereich deckungsgleich. Nur in den Bereichen unter 150 Hz und oberhalb von 17 kHz konnten Pegelabweichungen von mehr als 1 dB gemessen werden. Die Schaltung war so aufgebaut, dass jeweils auf der linken und rechten Fahrzeugseite zwei Foster-Exciter in Serie geschaltet wurden. Diese wurden dann wiederum parallel geschaltet. Jeweils einer der beiden Dayton-Exciter wurde wieder seriell zur linken bzw. rechten Serienschaltung geschaltet. Durch diese Serien-Parallelschaltung war die Impedanz aller Exciter gemeinsam gleich der eines einzelnen Exciters bzw. die Impedanz der vier Foster-Exciter alleine gleich der von allen sechs Excitern gemeinsam. Daher konnte durch Zuschalten der beiden Dayton-Exciter keine Pegelzunahme gemessen werden.

Betrachtet man die THD-Messungen, so fällt auf, dass in jenem Fall mit den vier Foster-Excitern allein im Mitteltonbereich ein bis zu 1 % größerer THD gemessen werden konnte, als in jenem Fall mit zwei zusätzlichen Dayton-Excitern. Der Grund dafür ist die im letzten Absatz bereits erwähnte Serien-Parallelschaltung der Exciter. Erst um 1.5 kHz

zerzten die sechs Exciter ca. 1 % mehr, als die vier Exciter. Um 3 kHz konnten bei den vier Excitern nochmals Werte knapp über dem Sollwert gemessen werden, jedoch handelte es sich hier um nur maximal 0.5 %. Da vor allem im Bereich oberhalb von 1.5 kHz, ab welchem die Exciter später im Fahrzeug spielen sollten, keine störenden Verzerrungen gemessen werden konnten, wurde der Dachhimmel mit diesem Setup in das Fahrzeug eingebaut.

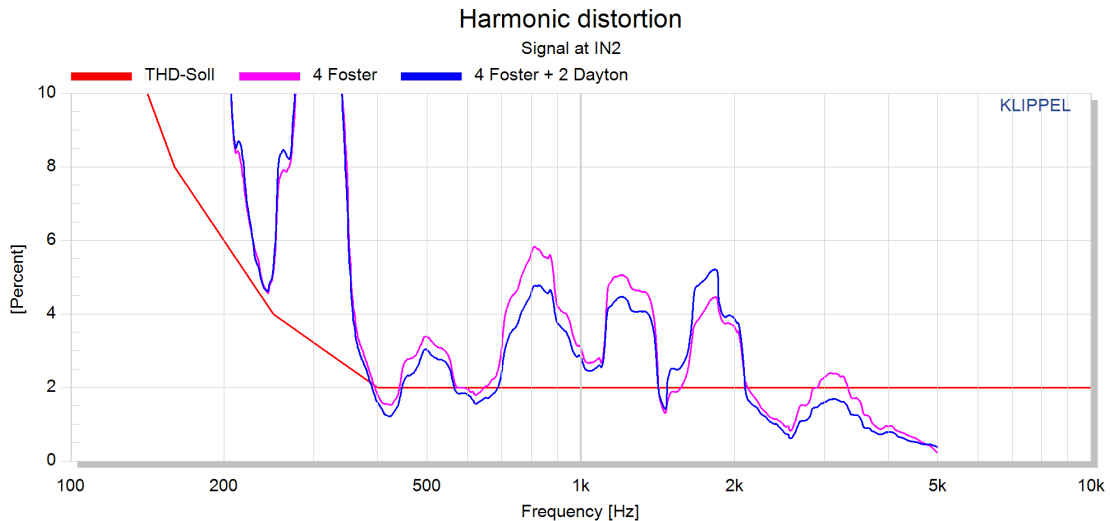


Abbildung 15 – THD der vier Foster-Exciter und zwei weiterer Dayton-Exciter auf dem Dachhimmel (siehe Abb. 6) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.

Aufgrund nicht ausreichend freier Kanäle im Fahrzeug wurde in den weiteren Schritten nur mit den vier Foster-Excitern gearbeitet. Die beiden anderen blieben aber vorerst verbaut, um später, wenn möglich, diese doch noch miteinbeziehen zu können.

3.4 Frequenzgang des Gesamtsystems

Nachdem der Dachhimmel mit den darauf angebrachten Excitern (siehe Abb. 6) in das Fahrzeug eingebaut wurde, konnte anhand von ersten Flat²-Messungen das Verhalten der Exciter im eingebauten Zustand untersucht werden.

2. Flat bedeutet in dem Zusammenhang, dass die Komponenten noch nicht entzerrt wurden. Die einzige Maßnahme, welche zu diesem Zeitpunkt ergriffen wurde, ist ein Hochpass bei den Hochtönern bei 4 kHz



Abbildung 16 – Achtkanaliges Mikrofonarray.

Die Messungen im Fahrzeug wurden mit der Messsoftware PAK von Müller-BBM durchgeführt. Die Messdauer der einzelnen Messungen betrug 30 Sekunden, als Messsignal diente ein links-rechts-korreliertes rosa Rauschen. Zur Aufnahme der Messsignale wurde ein achtkanaliges Mikrofonarray verwendet. Dieses wurde, wie in Abb. 16 zu sehen ist, über die Kopfstütze des Fahrersitzes gehängt. Die Signale der einzelnen Kanäle wurden anschließend gemittelt und als eine Messkurve mit Zwölfstel-Oktav-Auflösung ausgegeben.

Betrachtet man den in Abb. 17 den Frequenzgang der Exciter und vergleicht ihn mit jenem aus Abb. 14, so lässt sich feststellen, dass der Verlauf bis 2 kHz sowohl im reflexionsarmen Messraum, als auch im Fahrzeug ähnliches Verhalten der Exciter aufweist. So sind in beiden Messungen eine Resonanz um 250 Hz, sowie zwei stärkere Resonanzen um 400 Hz und 700 Hz zu sehen. Die Resonanz bei 80 Hz ist vernachlässigbar. Diese stammt von Störgeräuschen im Außenbereich des Fahrzeugs, wie beispielsweise das Schließen einer Fahrzeugtür.

Da als Referenz für diese Arbeit ein G06 (BMW X6) mit integrierten Konuslautsprechern im Dachhimmel dienen sollte, wurde das entzerrte Gesamtsystem und im speziellen auch die entzerrten Konuslautsprecher gemessen. In Abb. 17 ist der Frequenzgang der entzerrten Konuslautsprecher im direkten Vergleich mit den noch nicht entzerrten Excitern dargestellt. So war es leichter ersichtlich, welche Maßnahmen getroffen werden mussten, um

in etwa einen ähnlichen Frequenzgang, wie den der Konuslautsprecher, zu erhalten.

Durch den Einbau des Dachhimmels in das Fahrzeug konnten höhere Pegel der Exciter oberhalb von 2 kHz erreicht werden. Die zwei kleinen Resonanzen bei 2.7 kHz und zwischen 4 kHz und 5 kHz traten auch im Fahrzeug auf. Grundsätzlich konnten aber deutlich weniger Artefakte gemessen werden als zuvor geschätzt wurden. Die Verstärkung im Hochtonbereich ist auf die veränderte Anbringung des Dachhimmels zurückzuführen. Im Messraum wurde er noch frei hängend gemessen, im Fahrzeug war er nun fest eingebaut. Er hatte somit eine höhere Steifigkeit, wodurch eine bessere BiegeWellenausbreitung gewährleistet war. Sie konnten genau in diesem Bereich eine starke Leistung erbringen als zuvor im Messraum. Dieser Effekt der Verstärkung im höherfrequenten Bereich wirkte sich sehr positiv auf den Einsatz der Exciter aus, da diese, wie bereits erwähnt, zwischen ca. 2 kHz und 12 kHz spielen sollten. Im Bereich von 10 kHz konnte eine Resonanz gemessen werden. Diese sollte später im Abstimmvorgang durch entsprechendes Entzerren reduziert werden.

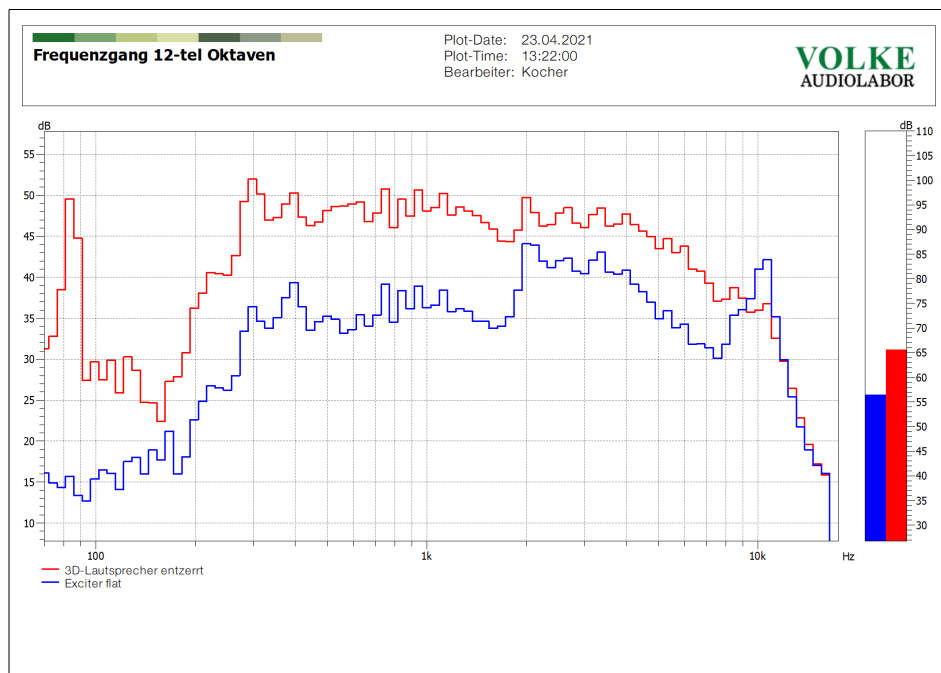


Abbildung 17 – Frequenzgang der entzerrten 3D-Konuslautsprecher und der flat-gemessenen Exciter auf dem im Fahrzeug integrierten Dachhimmel.

Mit einer Verstärkung um ca. 10 dB, sowie einer Filterung der beiden Resonanzen bei 2 kHz und 10 kHz, sollte der Frequenzgang der Exciter dem der Konuslautsprecher nahe kommen. Die Bandbreite von 1.5 kHz bis 12 kHz sowie Pegelanhebung von 23 dB der Exciter wurden vorab im Zuge des Abstimmvorganges mittels Konsensbildung einer Ex-

pertengruppe von drei Personen festgelegt.

Nach vollständiger akustischer Integration sollte mittels abschließenden EQ³-Messungen die Funktion der entzerrten Exciter des Projektfahrzeuges verifiziert werden. Dazu wurden die gemessenen Frequenzgänge mit jenen des Referenzfahrzeugs verglichen. Mittels der Frequenzgänge der Konuslautsprecher und des Gesamtsystems des Referenzfahrzeuges, sowie der Frequenzgänge der Exciter und des Gesamtsystems im Projektfahrzeug, sollten Vergleiche aufgestellt werden.

Abb.18 zeigt den Vergleich der flat gemessenen Exciter zu den entzerrten Excitern. Die beiden Resonanzen um 2 kHz und 10 kHz konnten erfolgreich gefiltert werden. Zwar konnte bei 4.5 kHz noch eine Resonanz gemessen werden, diese war aber im Fahrzeug nicht störend, und wurde aus diesem Grund auch nicht gefiltert.

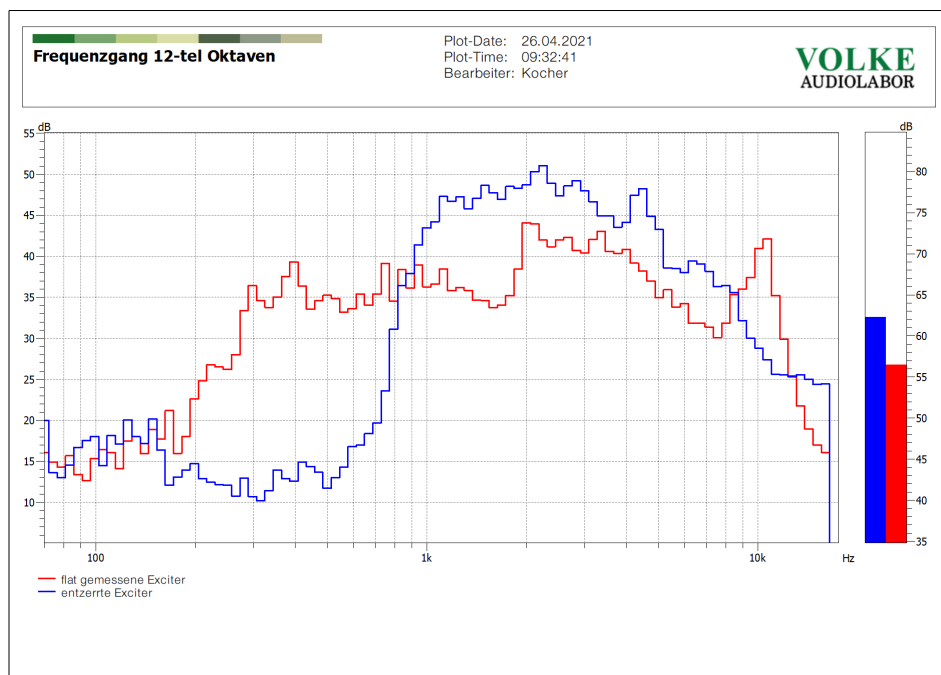


Abbildung 18 – Frequenzgang der Exciter auf dem im Fahrzeug integrierten Dachhimmel.

Vergleicht man die Frequenzgänge der Konuslautsprecher mit jenen der Exciter (Abb. 19), so fällt als erstes auf, dass die Exciter im Vergleich zu den Konuslautsprechern viel schmalbandiger spielten. Aus psychoakustischen Gründen (siehe Kap. 1.4.2) war eine Bandbegrenzung der Exciter von 1.5 kHz bis 12 kHz vorgesehen. Die Konuslautsprecher

3. Abstimmvorgang, wie in Kap. 2.4 beschrieben

hingegen wurden von 300 Hz bis 11.3 kHz eingesetzt. Weiters konnte bei den Konuslautsprechern zwischen 10 und 20 kHz ein stärkerer Abfall als bei den Excitern gemessen werden, was daran liegt, dass die Konuslautsprecher bereits 700 Hz unter den Excitern bandbegrenzt wurden. Die Resonanz bei 70 Hz ist in dieser Messkurve vernachlässigbar. Es handelt sich hier um Störgeräusche von außen, wie beispielsweise das Schließen einer Tür eines anderen Fahrzeugs.

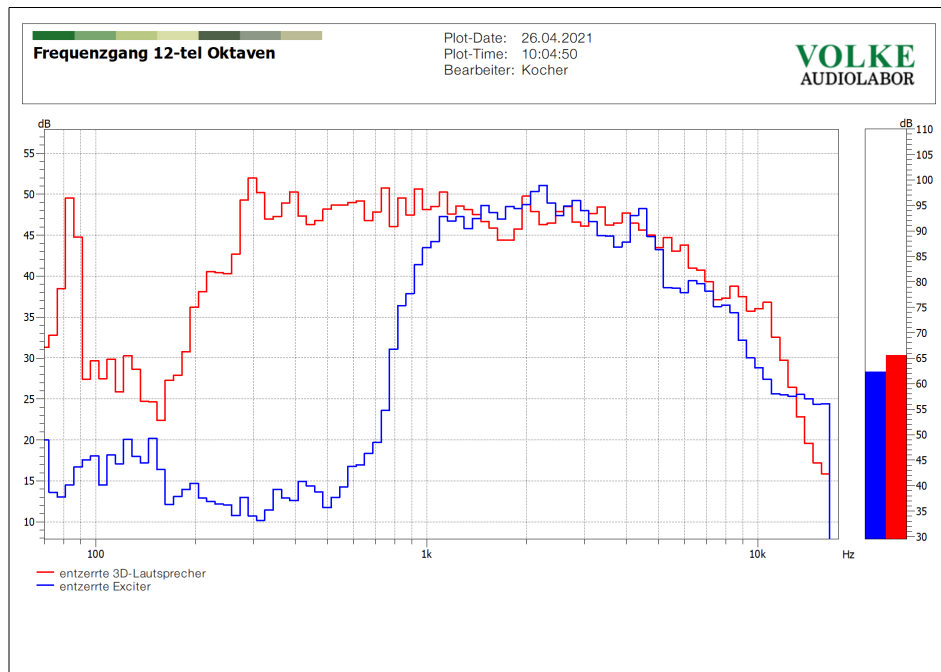


Abbildung 19 – Frequenzgänge der entzerrten Konuslautsprecher im Referenzfahrzeug und Exciter im Projektfahrzeug.

Um sicherzugehen, dass die Gesamtsysteme der beiden Fahrzeuge möglichst gleich abgestimmt waren, wurden noch die Frequenzgänge der Gesamtsysteme im Referenzfahrzeug und im Projektfahrzeug miteinander verglichen, wie in Abb. 20 dargestellt. Ziel war es, das Gesamtsystem so zu bearbeiten, dass der Frequenzgang im vordefinierten Zielschlauch liegt. Wie die Messergebnisse zeigen, wurde der Übergang vom Tiefton- zum Mitteltonbereich im Gegensatz zum Referenzfahrzeug mit einem geringeren Pegelabfall zwischen 100 Hz und 200 Hz gelöst, wodurch eine zu schwache Wahrnehmung dieser Frequenzen vermieden werden konnte. Im Hochtonbereich zwischen 2 kHz und 9 kHz spielt das Gesamtsystem des Projektfahrzeuges um bis zu 5 dB leiser, was an den nötigen Filterungen der Resonanzen in diesem Bereich liegt. Wie stark sich dies auf die Wahrnehmung der tonalen Balance des Gesamtsystems im Fahrzeug auswirkt, sollte später im Rahmen eines Hörversuchs evaluiert werden.

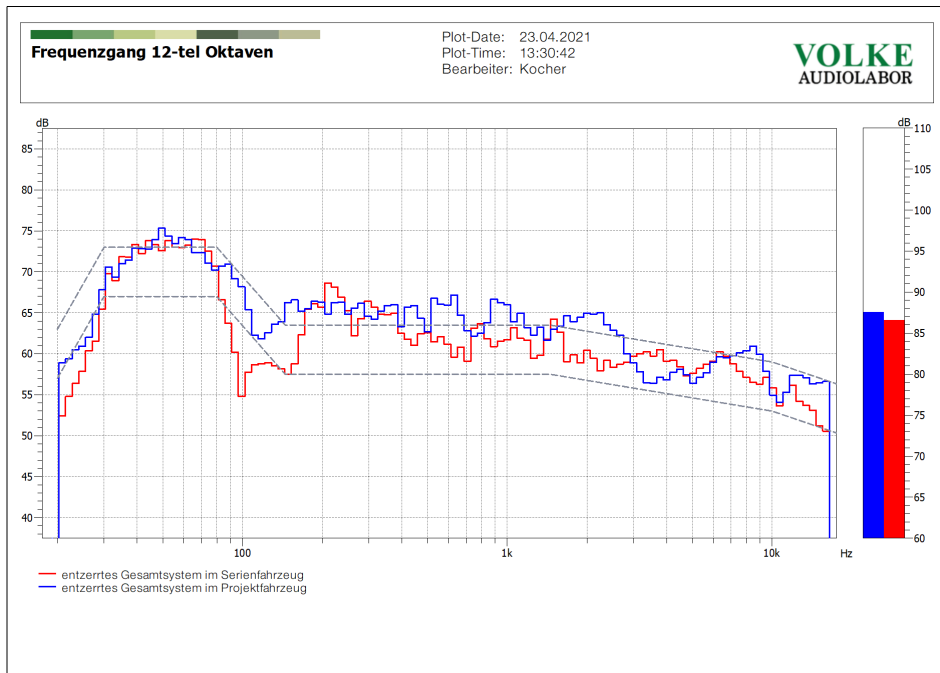


Abbildung 20 – Frequenzgänge des entzerrten Gesamtsystems im Referenzfahrzeug und im Projektfahrzeug.

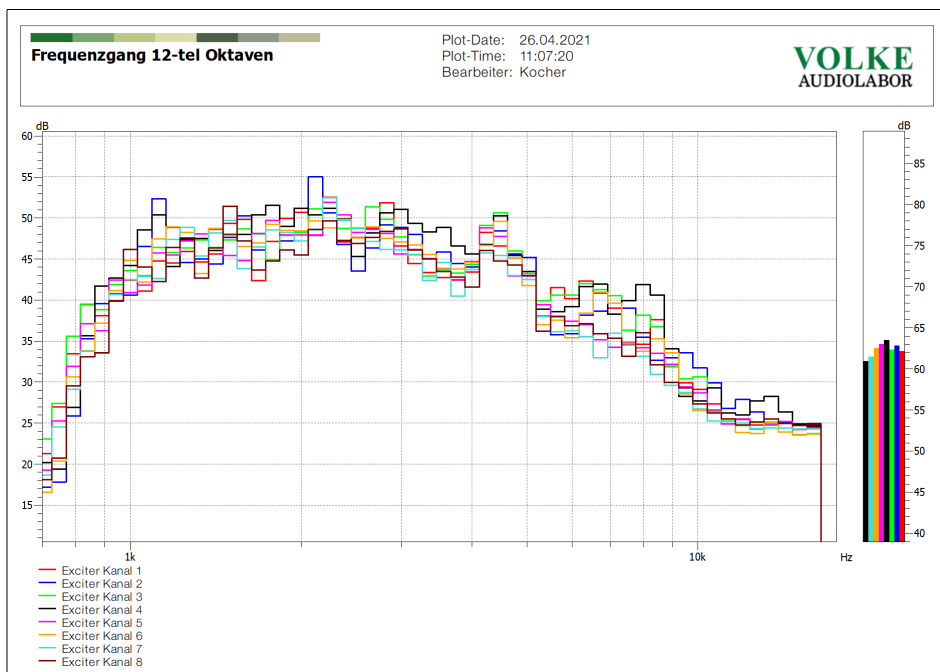


Abbildung 21 – Frequenzgang der Exciter auf dem im Fahrzeug integrierten Dachhimmel.

Um zu sehen, in welchem Ausmaß potentielle Kammfiltereffekte der Exciter auftraten, wurden für die Messung der entzerrten Exciter die acht Kanäle des Mikrofonarrays ein-

zeln dargestellt (Abb. 21). Die stärksten Auswirkungen zeigten sich im Bereich zwischen 1 kHz und 10 kHz. In diesem Bereich konnten Pegeldifferenzen von bis zu 5 dB zwischen den einzelnen Kanälen gemessen werden.

Wie in Abb. 21 zu sehen ist, sorgten die Exciter für Kammfiltereffekte. Wie stark sich diese Kammfiltereffekte auf das Gesamtsystem auswirkten, sollten Frequenzgangmessungen des Gesamtsystems einmal ohne (Abb. 22) und einmal mit Excitern (Abb. 23) zeigen, wobei auch hierfür die acht Kanäle des Mikrofonarrays wieder einzeln dargestellt wurden. Im tieffrequenten Bereich bis zu 150 Hz konnten in beiden Fällen nahezu keine Kammfiltereffekte gemessen werden. Ab 150 Hz waren jedoch sowohl ohne als auch mit Excitern Kammfilterartefakte messbar. Auffällig ist, dass die Messung mit Excitern ab 2 kHz weniger Kammfiltereinflüsse zeigt, als jene ohne. Dies ist auf die unterschiedlichen Tunings der beiden Klangprofile, von welchen eines ohne und eines mit Excitern konfiguriert ist, zurückzuführen. Anhand der Messungen konnte aber gezeigt werden, dass die Exciter keinen signifikanten Einfluss auf Kammfiltereffekte im Fahrzeug hatten. Wie stark bzw. in welchem Ausmaß Kammfilterartefakte schließlich tatsächlich wahrnehmbar waren, sollte später im Rahmen eines Hörversuchs evaluiert werden.

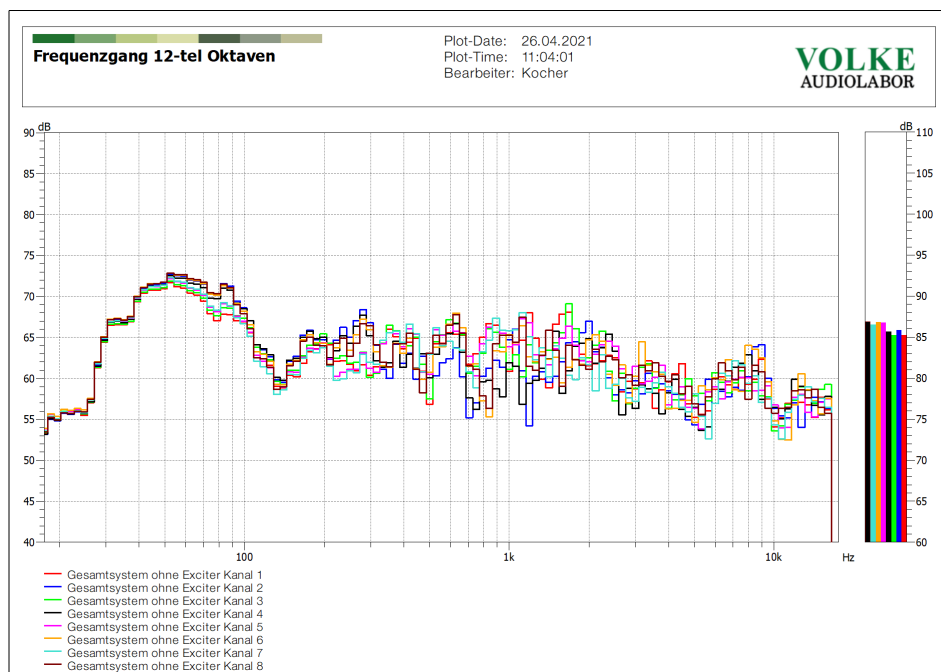


Abbildung 22 – Frequenzgänge des entzerrten Gesamtsystems im Projektfahrzeug ohne Exciter.

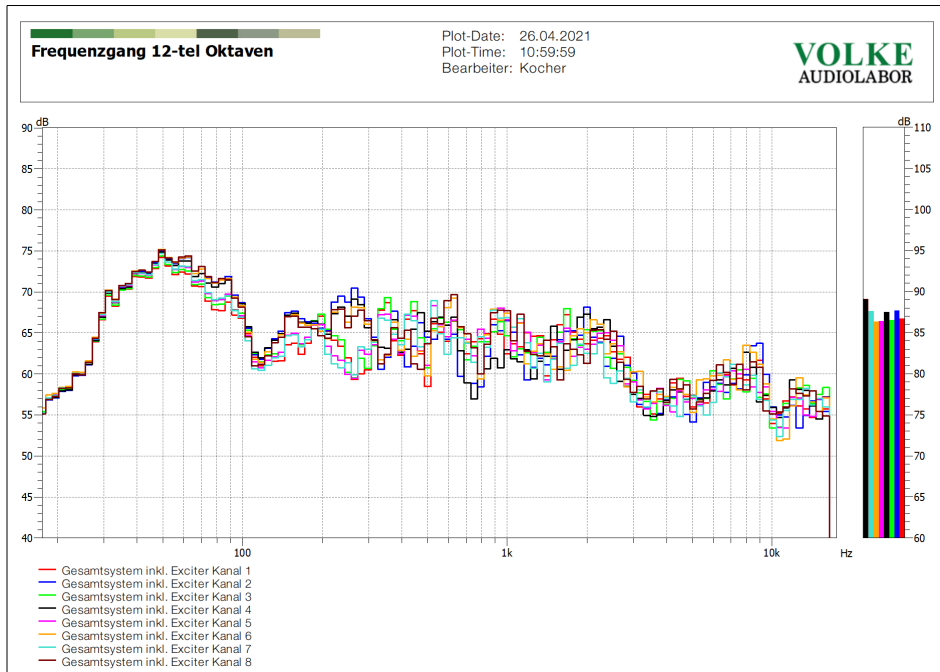


Abbildung 23 – Frequenzgänge des entzerrten Gesamtsystems im Projektfahrzeug mit Exciter.

4 Hörversuch

Schließlich wurde ein Hörversuch durchgeführt, mittels welchem nach abgeschlossener Integration der Exciter noch wichtige Klangqualitäten erfasst werden sollten. Der Hörversuch orientiert sich an folgenden Punkten:

1. Kammfiltereffekte bei Bewegung
2. Lokalisierbarkeit der Exciter/Konuslautsprecher
3. Einhüllung
4. Tonale Balance

Beim Hörerlebnis kommt es nicht nur auf rein physikalische Messwerte, sondern auch auf das psychoakustische Empfinden an. Aus diesem Grund sollte zusätzlich zu den finalen Messungen der Hörversuch eine subjektive Bewertung des erarbeiteten Konzepts liefern. Die Ergebnisse sollten zeigen, ob die Exciter mindestens so gut funktionieren, wie die Konuslautsprecher im Referenzfahrzeug. Sollte dies der Fall sein, war das Ziel dieser Arbeit erreicht.

Dieses Kapitel beinhaltet alle wichtigen Informationen zum Hörversuch. Eine Beschreibung der Benutzeroberfläche in Kap. 4.1, sowie des genaueren Versuchaufbaus in Kap. 4.2, der Durchführung in Kap. 4.3 und der Probanden in Kap. 4.4 soll einen Eindruck des Hörversuchs verschaffen. Kap. 4.5 befasst sich schließlich mit der Auswertung und Diskussion der Ergebnisse.

4.1 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche (graphical user interface, GUI) für den Hörversuch wurde mit dem MATLAB *App Designer* erstellt. Sie beinhaltet eine kurze Beschreibung des Versuchsaufbaus, sowie die einzelnen zu bewertenden Eigenschaften inkl. deren Definitionen. Bilder zur grafischen Benutzeroberfläche sind dem Appendix zu entnehmen.

4.2 Beschreibung

Es sollte einmal das Referenzfahrzeug, in welchem die 3D-Lautsprecher⁴ verbaut sind, bewertet werden, und ein weiteres Mal im direkten Vergleich das Projektfahrzeug mit

4. Lautsprecher am Dachhimmel für den 3D-Effekt, welche in diesem Fall Konuslautsprecher sind

den Excitern am Dachhimmel. Bei beiden Fahrzeugen handelte es sich um einen BMW X6 mit ALEV-4-Ausstattung (höchstes Audiolevel). Beide Fahrzeuge waren bis auf den Dachhimmel mit der gleichen Hardware ausgestattet. Der Algorithmus war ebenfalls in beiden Fahrzeugen gleich, jedoch im Projektfahrzeug aufgrund der Exciter anders abgestimmt als im Referenzfahrzeug.

Es standen in beiden Fahrzeugen zwei Audio-Modi zur Auswahl. Diese wurden in der GUI mit Modus A und Modus B bezeichnet. Da es technisch nicht möglich war soweit in die Einstellungen einzugreifen, um die Reihenfolge der Modi beliebig zu wählen, wurde für den kompletten Hörversuch durchgehend im Modus A das Gesamtsystem ohne 3D-Treiber und im Modus B das Gesamtsystem mit 3D-Treibern bespielt. Den Versuchspersonen wurde aber gesagt, dass die Reihenfolge der Modi randomisiert wurde. So sollten alle der folgenden vier Fragestellungen für beide Modi beantwortet werden.

Aussagen über potenzielle Kammfilterartefakte sollten getroffen werden können, indem die Versuchspersonen dazu aufgefordert wurden, ihren Kopf in sämtliche, während der Fahrt relevante, Hörpositionen zu begeben, um so feststellen zu können, ob Kammfiltereffekte bei Bewegung auftreten oder nicht.

Da für eine optimale Einhüllung der Hörende möglichst nicht in der Lage sein soll, die einzelnen Quellen zu lokalisieren, wurde weiters evaluiert, ob bzw. wie gut die Exciter/3D-Lautsprecher zu lokalisieren sind.

Als nächstes sollte die Einhüllung, welche durch die Exciter/Konuslautsprecher geschaffen bzw. verstärkt wird, beurteilt werden. Die Bandbreite sowie Pegel der Exciter wurden vorab im Zuge des Abstimmvorganges mittels Konsensbildung einer Expertengruppe von drei Personen festgelegt. Um die gewählte Bandbreite und Pegel der Exciter/3D-Lautsprecher bewerten zu können, wurden die Probanden dazu angehalten, den Gesamtklang im Fahrzeug auf seine tonale Balance zu beurteilen.

Für den Hörversuch wurden fünf Audiosequenzen mit einer Länge von 30 Sekunden zur Verfügung gestellt. Je nach Genre werden einzelne Frequenzbereiche unterschiedlich angeregt. Dementsprechend sollte die Auswahl der Audiosequenzen ein möglichst breites Spektrum an Genres abdecken. So sollten die Probanden auf eine möglichst große Vielfalt an Klangmerkmalen aufmerksam gemacht werden. Die Versuchsteilnehmer konnten die Audiosequenzen in beliebiger Reihenfolge und so oft wie möglich direkt über das Fahrzeug abspielen bzw. anhören. Zur Auswahl standen:

1. weibliches Sprachsignal⁵
2. Frankies Tune von Bob Mintzer⁶ (Jazz / Fusion)
3. The Wheel von SOHN⁷ (Electronica / Post-Dubstep)
4. Polyphobia von Deadmau5⁸ (Progressive House)
5. Hotel California von The Eagles (Liveaufnahme)⁹ (Country-Rock).

4.3 Durchführung

Nach einer kurzen Einführung durch einen vorgefertigten Handzettel, welcher dem Appendix zu entnehmen ist, nahmen die Probanden am Fahrersitz des jeweiligen Fahrzeuges Platz, der Sitz konnte dabei individuell eingestellt werden, um einer realen Fahrerposition möglichst nahe zu kommen. Über das Musikmenü konnte zwischen den bereitgestellten Titeln gewählt werden. Die GUI zur Durchführung des Hörversuchs wurde auf einem mobilen Arbeitsrechner zur Verfügung gestellt. Einmal wurde der Hörversuch im Referenzfahrzeug mit den Konuslautsprechern durchgeführt, ein zweites Mal direkt im Anschluss im Projektfahrzeug mit den Excitern. Da für die Probanden nicht verdeckt blieb, in welchem Fahrzeug welche Konus-Treiber verbaut waren, wurde die Reihenfolge der beiden Fahrzeuge randomisiert, wobei jedes der beiden Fahrzeuge gleich oft als erstes Hörobjekt genutzt wurde. Dadurch sollte ein damit einhergehender potentieller Bias aufgrund der Reihenfolge vermieden werden. Die für den Hörversuch vorgesehene Zeit war auf ca. 15 Minuten für jedes Fahrzeug, insgesamt 30 Minuten Testzeit, beschränkt.

In Abb. 24 ist eine Seite der GUI des Hörversuchs abgebildet. Wie in dieser Grafik zu sehen ist, wurden für jede der vier Fragestellungen beide Modi auf der gleichen Seite gezeigt. Die Skalen waren quasi-kontinuierlich und von der Fragestellung abhängig unterschiedlich beschriftet. Zur Bewertung der Kammfiltereffekte sollte angegeben werden, wie groß der Toleranzbereich ist, bis Kammfilterartefakte wahrnehmbar waren. Die fünfstelligen Skala reichte dabei von ± 0 cm bis ± 30 cm, wie in Abb. 24 zu sehen ist. Die Lokalisierbarkeit der Schallquellen war in einer siebenstelligen Skala von *nicht lokalisierbar* bis *sehr gut lokalisierbar* zu definieren. Wie stark der Einhüllungseffekt war, sollte anhand einer fünfstelligen Skala von *wenig Einhüllung* bis *vollständige Einhüllung* bewertet werden. Angaben zur tonalen Balance sollten anhand einer siebenstelligen Skala

5. Track 53 der EBU SQAM CD <https://tech.ebu.ch/publications/sqamcd> EBU Tech 3253

6. https://www.youtube.com/watch?v=41VZ_-zca-o&list=OLAK5uy_mZB0UKS1f3KHax1t6v_9DurQPc918TJ90&index=7

7. https://www.youtube.com/watch?v=V1_pIZTVs08&list=OLAK5uy_k7jhPd5z9_5wXSPKXp_YeTcHTtaaJVrYg&index=2

8. <https://www.youtube.com/watch?v=SwE612H1WLS>

9. <https://www.youtube.com/watch?v=9UusqroAfUU>

von *sehr basslastig* über *ausgewogen* bis *sehr höhenlastig* gemacht werden. Die Layouts zu allen weiteren Fragen, welche in Abb. 24 nicht abgebildet sind, können dem Appendix B entnommen werden.



Abbildung 24 – Seitenlayout der GUI zum Hörversuch.

4.4 Probanden

Insgesamt nahmen 18 Probanden, ausschließlich männlich, am Hörversuch teil. Die Teilnehmer waren Kollegen vom Audiolabor bzw. aus anderen VOLKE und BMW Audioabteilungen, alle im Audibereich tätig. Alle berichteten frei von Höreinschränkungen zu sein und Grunderfahrung bis Expertise in Hörversuchen aufzuweisen. Für die spätere Auswertung wurde die gesamte Probandengruppe betrachtet, sowie die Gruppe geteilt in jede Teilnehmer mit Grunderfahrung (12 Personen) und jene mit Expertise (8 Personen).

4.5 Auswertung

Für die Auswertung des Hörversuchs wurden sowohl alle 18 Probanden gemeinsam betrachtet, als auch getrennt in den beiden Gruppen „Expertise“ und „Grunderfahrung“. Zur Berechnung der Signifikanz wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test¹⁰ herangezogen.

10. Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test liefert das Signifikanzniveau für die Hypothese, dass die Grundgesamtheiten der Stichproben denselben Median besitzen. Für weitere Details zum Verfahren bzw. der Implementierung in MATLAB sei auf den Appendix verwiesen.

Visualisiert wurden die Daten mittels Boxplots in MATLAB. Die einzelnen Graphen zeigen die Bewertungen für Setup A (ohne Konuslautsprecher / Exciter) und Setup B (mit Konuslautsprecher / Exciter) im Projektfahrzeug und im Referenzfahrzeug.

4.5.1 Kammfiltereffekte

Bei der Untersuchung auf Kammfilterartefakte konnte festgestellt werden, dass in beiden Fahrzeugen sowohl im Modus B mit Dachhimmellautsprechern, als auch im Modus A, leichte Kammfilterartefakte gehört werden konnten. Wie in Abb. 25 zu sehen ist, konnte das Projektfahrzeug dabei in beiden Modi mit geringeren Kammfiltereffekten überzeugen. Die Differenz an Bewegungsfreiheit für die Kopfposition bis Kammfiltereffekte wahrgenommen werden konnten liegt zwischen den beiden Fahrzeugen in Modus A im Bereich von ca. 10 cm. Auffällig ist, dass die Tendenzen in der Expertengruppe genau umgekehrt zu jenen in der Gesamtgruppe, sowie der Gruppe mit Grunderfahrung ausfallen. So liegt der Median von Modus B im Referenzfahrzeug über jenem von Modus A, was bedeutet, dass durch Zuschalten der Konuslautsprecher sogar mehr Bewegungsfreiheit gegeben war, bis Kammfiltereffekte gehört werden konnten. Im Projektfahrzeug wurde, wie erwartet der gegenteilige Effekt wahrgenommen, so liegt der Median in Modus A knapp über dem Median in Modus B, was bedeutet, dass durch Zuschalten der Exciter bereits bei geringeren Kopfbewegungen Kammfiltereffekte wahrgenommen werden konnten. Im Referenzfahrzeug ergab der Vorzeichen-Rang-Test, dass sowohl in der Expertengruppe, als auch in der Gruppe mit allen Probanden, die beiden Modi A und B statistisch nicht signifikant sind. Es macht im Bezug auf Kammfilter also keinen signifikanten Unterschied, ob die Konuslautsprecher dazukommen oder nicht. Der Grund, warum der Test einen p-Wert von genau 1 ergab, liegt an der geringen Anzahl an Probanden.

Allgemein zeigen die p-Werte pro Fahrzeug an, ob die beiden Modi signifikant unterschiedlich gehört wurden oder nicht. Sie sind in den jeweiligen Auswertungen (Abb. 25 - 28) über den Boxplots im Titel der Grafiken enthalten.

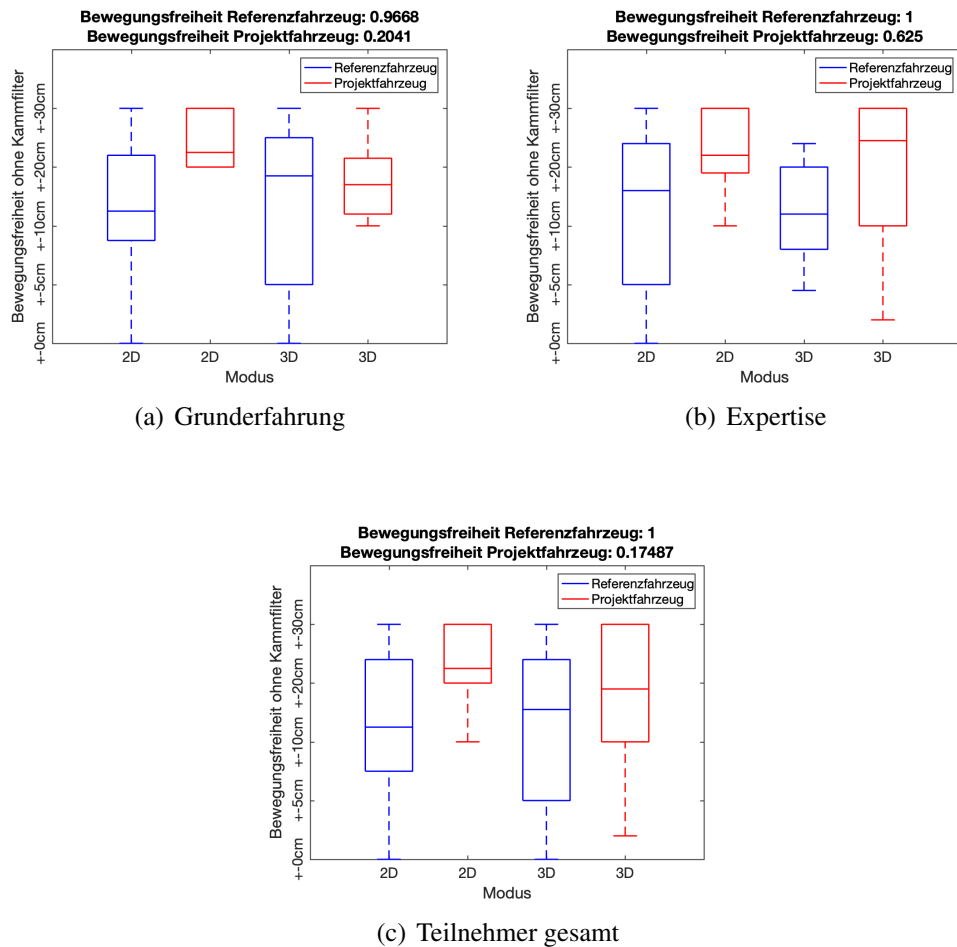


Abbildung 25 – Bewertete Kammfiltereffekte in den beiden Fahrzeugen.

4.5.2 Lokalisierbarkeit der Exciter / Konuslautsprecher

Laut Abb. 26 konnten die Exciter kaum geortet werden, wie es die Auswertung der Expertengruppe zeigt, bzw. nur schwach, betrachtet man die Meinung der gesamten Teilnehmergruppe. Die Expertengruppe konnte einen deutlichen Unterschied der Lokalisierbarkeit zwischen den Excitern und den Konuslautsprechern feststellen. Im Gegensatz zu jenen Probanden mit Grunderfahrung wurden von den Experten weder im Referenzfahrzeug, noch im Projektfahrzeug, im Modus A die Dachhimmellautsprecher gehört, was auch der Realität entsprach, da diese in Modus A deaktiviert waren. Interessant ist das Ergebnis für den p-Wert im Referenzfahrzeug für die Gruppe mit Grunderfahrung. Dieser ist deutlich größer als in der Expertengruppe und auch der Gesamtgruppe, was bedeutet, dass jene Probanden mit Grunderfahrung bezüglich der Lokalisierbarkeit der Konuslautsprecher im Referenzfahrzeug verhältnismäßig wenig Unterschied zwischen Modus A und Modus B wahrnehmen konnten. Betrachtet man die Differenz zwischen Modus A und Modus B in den jeweiligen Fahrzeugen, so fällt auf, dass diese in der Expertengruppe ge-

nau umgekehrt zu jener in der Gruppe mit Grunderfahrung ausfällt. Dieser Effekt könnte eventuell im Zusammenhang mit einem unterschiedlich ausgeprägten Einhüllungseffekt in den beiden Fahrzeugen stehen.

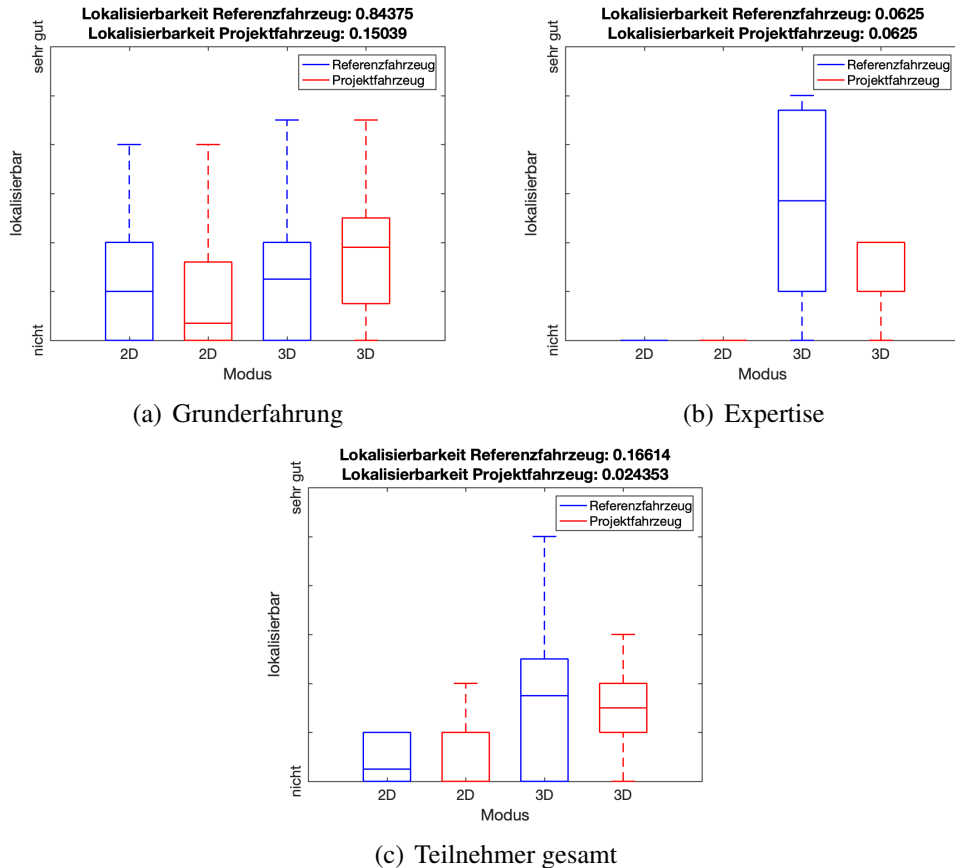


Abbildung 26 – Bewertete Lokalisierbarkeit der Exciter / Konuslautsprecher in den beiden Fahrzeugen.

4.5.3 Einhüllung

Wie in Abb. 27 zu sehen ist, wurde die Einhüllung im Projektfahrzeug als deutlich besser bewertet. Im Gegensatz zu den bereits diskutierten Punkten liegen hier die Mediane in allen drei Auswertungen bei sehr ähnlichen Werten, was bedeutet, dass im Bezug auf den Einhüllungseffekt die Differenz zwischen Probanden mit Expertise und jenen mit Grunderfahrung sehr gering war. Weiters wurde der Einhüllungszuwachs im Gegensatz zum Referenzfahrzeug im Projektfahrzeug als größer empfunden. So wurde im Projektfahrzeug Modus A deutlich mehr Einhüllungseffekt zugesprochen als im Referenzfahrzeug. Diese unterschiedliche Bewertung ist auf die unterschiedliche akustische Abstimmung des Audiosystems der beiden Fahrzeuge zurückzuführen. Auch der Vorzeichen-Rang-Test ergab, dass die Differenz von Modus A zu Modus B im Projektfahrzeug größer

als im Referenzfahrzeug ist. Es konnte demnach mit Hilfe der Exciter eine bessere Einhüllung als mittels der Konuslautsprecher im Dachhimmel erzielt werden.

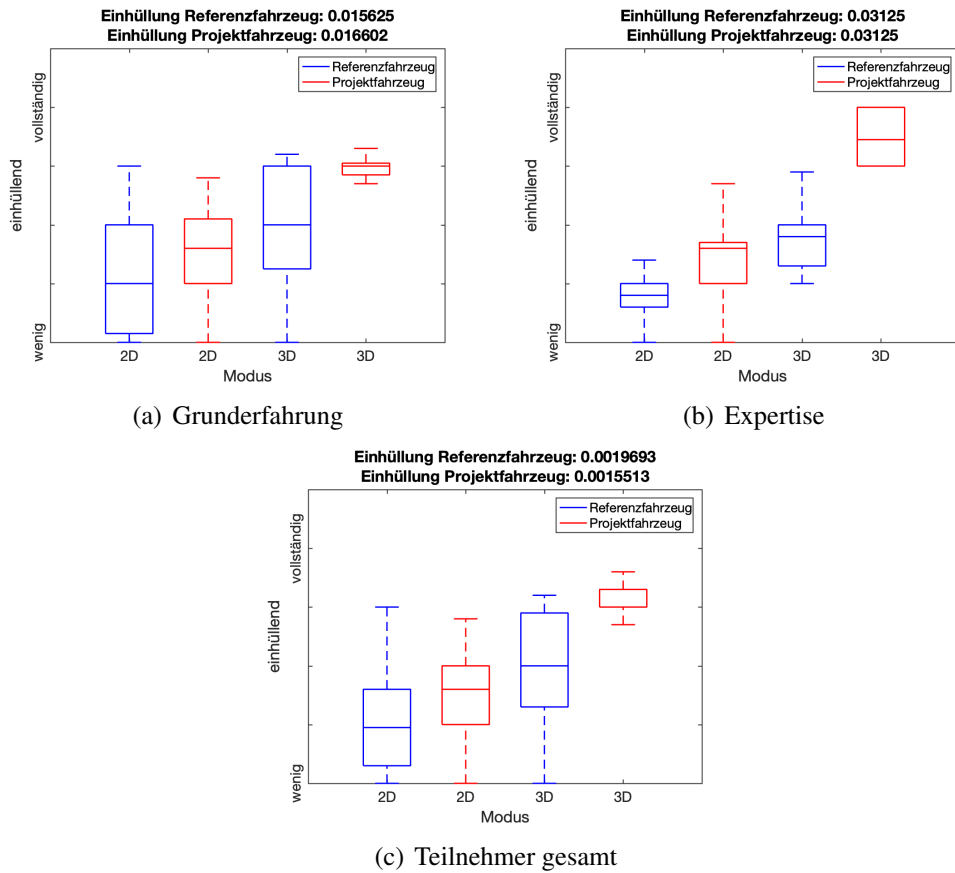


Abbildung 27 – Bewertete Einhüllung in den beiden Fahrzeugen.

4.5.4 Tonale Balance

Die Bewertung der tonalen Balance in den beiden Fahrzeugen zeigte, wie in Abb. 28 abgebildet, dass Modus A leicht höhenlastig und Modus B leicht tiefenlastig empfunden wurde. Interessant ist hier wieder der Unterschied zur Expertengruppe. Diese beurteilte im Projektfahrzeug Modus B mit den Excitern ausgewogener als Modus A ohne Exciter. Beide Gruppen empfanden den Klang basslastiger, wenn die Exciter bzw. Konuslautsprecher aktiv waren. Dies scheint auf den ersten Blick überraschend zu wirken, da die Exciter bandbegrenzt von 1.5 kHz - 12 kHz spielen und somit den hochfrequenten Bereich verstärken sollten. Der Effekt der zunehmenden Basswahrnehmung ist allerdings auf den Algorithmus (siehe Kapitel 2.4), welcher in Modus B zum Einsatz kommt, zurückzuführen. Betrachtet man die mittels des Vorzeichen-Rang-Tests berechneten p-Werte, so lässt sich feststellen, dass der Umschalteffekt von Modus A auf Modus B im Projektfahrzeug geringer wahrgenommen wurde, als im Referenzfahrzeug. Dementsprechend hatten die

Exciter die tonale Balance des Gesamtsystems weniger stark beeinflusst, als die Konuslautsprecher im Dachhimmel des Referenzfahrzeugs.

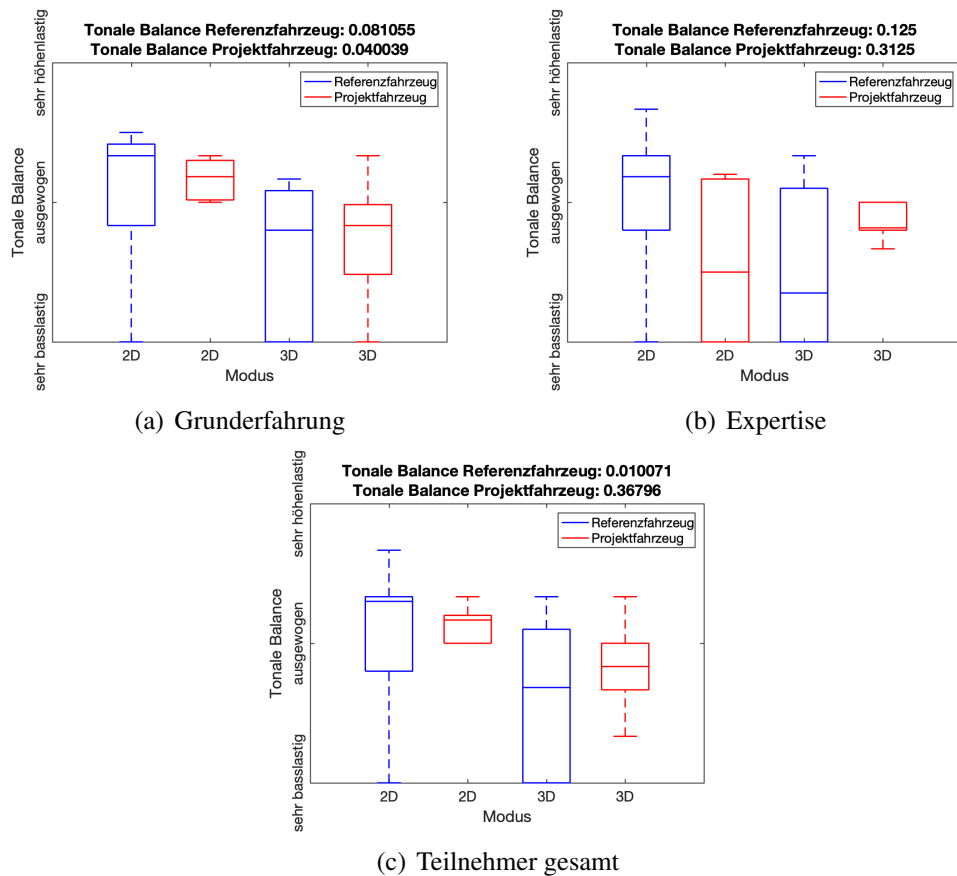


Abbildung 28 – Bewertete tonale Balance in den beiden Fahrzeugen.

Der Hörversuch zeigte, dass das Projektfahrzeug in den evaluierten Punkten Kammfilterartefakte, Lokalisierbarkeit der Dachhimmellautsprecher, Einhüllungszuwachs durch die Dachhimmellautsprecher, sowie tonale Balance im Fahrzeug mit dem Referenzfahrzeug mithalten bzw. dieses teilweise sogar übertreffen konnte. Vor allem die Kammfiltereffekte, welche anfangs als potentielle Schwierigkeiten erwartet wurden, scheinen gut verhindert worden zu sein und stellen keine Probleme dar, wurden sie schließlich doch weniger stark wahrgenommen als im Referenzfahrzeug. Aufgrund ihrer akustischen Eigenschaften wurde von den Excitern erwartet, dass sie weniger lokalisierbar sind als die Konuslautsprecher im Dachhimmel. Die diffusere Wahrnehmung der Quellen sollte eine verbesserte Einhüllung schaffen. Auch dies konnte im Hörversuch bestätigt werden. Die Exciter waren weniger leicht zu lokalisieren und der Einhüllungszuwachs vom Modus ohne zum Modus mit den Dachhimmellautsprechern war im Projektfahrzeug deutlicher wahrnehmbar. Was die tonale Balance betrifft, wurde keines der Fahrzeuge in keinem der Modi als komplett ausgewogen bewertet. Es gab in beiden Fahrzeugen immer leichte Tendenzen zu

den tieferen bzw. höheren Frequenzen, jedoch wurden im Projektfahrzeug weniger starke Abweichungen wahrgenommen, weshalb auch in diesem Punkt das Projektfahrzeug das Referenzfahrzeug tendenziell übertreffen konnte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, neben herkömmlichen Konuslautsprechern Exciter im Dachhimmel zu verbauen, um so das Klangbild zusätzlich zu erweitern. Dies sollte die Einhüllung der Hörer*innen vom Gesamtklang im Fahrzeug verstärken. Da es sich bei Excitern um einen „unsichtbaren Lautsprecher“ handelt, welcher auf die Außenseite des Dachhimmels angebracht wurde, fällt die optische Lokalisation dieses Klangerzeugers weg. Vor allem aus psychologischer Sicht war dies von Vorteil. So konnte der verdeckte Lautsprecher den visuellen Einfluss auf die Klanglokalisierung verhindern.

Probleme, wofür Lösungswege zu finden waren, stellen beispielsweise Reflexionen und Interferenzen im wandnahen Betrieb dar. Diese können bei Excitern zu stehenden Wellen oder Kammfiltereffekten führen. Daher spielte vor allem die Positionierung der Exciter eine bedeutende Rolle und war maßgebend für die resultierende Klangqualität. Des Weiteren waren Komponenten, wie unter anderem das Material des Dachhimmels, oder mögliche Positionen zur Anbringung bereits vorgegeben, beziehungsweise stark eingeschränkt, was den Einsatzbereich der Aktoren im Fahrzeug deutlich einschränkte.

In der Literatur gibt es bisher noch keine derartigen Anwendungsbeispiele. Auch Herstellerangaben zu geeigneten Messpositionen oder Messverfahren waren für diese Arbeit nur begrenzt hilfreich. Daher galt es für all diese Abweichungen und besonderen Gegebenheiten in dieser Arbeit eigene Wege und Methoden herauszufinden.

Erste Herangehensweise war die Untersuchung verschiedener zur Verfügung stehender Exciter-Modelle gemeinsam mit einem Referenzmodell. Die Exciter wurden dabei unter anderem auf jenem Dachhimmelmaterial untersucht, welches später in dem für die Testzwecke dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Fahrzeug verbaut war. Dabei galt es herauszufinden, wie stark solche Variationen in der Anbringungsfläche das akustische Verhalten der Exciter beeinflussen. In erster Linie wurden dabei der Frequenzgang und das Störgeräuschverhalten analysiert. Verschiedene Varianten, wie die direkte Befestigung auf dem Dachhimmelmaterial, sowie der Versuch zusätzliches Material miteinzubeziehen, wurden dabei betrachtet werden. Als zusätzliche Trägerplatten zwischen Exciter und Dachhimmel standen fünf verschiedene Materialien zur Verfügung, welche zu kleinen rechteckigen Platten zugeschnitten wurden. Es stellte sich jedoch heraus, dass ohne Zusatzmaterial der Frequenzgang flacher verläuft und auch geringere Verzerrungen auftreten, weshalb die Anbindung der Exciter an den Dachhimmel ohne zusätzliche Trägerplatte, also direkt auf das Dachhimmelmaterial, erfolgte.

Nach den Testmessungen waren außerdem generelle Aussagen bezüglich der einzelnen Modelle möglich, um schließlich einen Favoriten wählen zu können. Dieser wurde im

nächsten Schritt am Fahrzeugdachhimmel nach ersten Überlegungen angebracht. Um das Verhalten der Exciter am tatsächlichen Dachhimmel besser ermitteln zu können, wurde dieser für die anfänglichen Messungen noch aus dem Fahrzeug genommen und im reflexionsarmen Messraum platziert, um die einzelnen Positionen, welche für die spätere Fixierung in Frage kamen, leichter zugänglich machen zu können.

Um die Qualität des im Laufe der Messungen überlegten Systems bewerten zu können, wurden an den schlussendlich im Fahrzeug positionierten Excitern akustische Messungen durchgeführt. Diese ermöglichten Aussagen bezüglich des Frequenzgangs des neu integrierten Systems, um so Schlussfolgerungen zu potentiellen Artefakten, wie Resonanzen oder Kammfiltereffekten, ziehen zu können.

Die gewünschte Audiointegration in das Fahrzeug wurde abschließend im Rahmen des Abstimmvorgangs erreicht. Das gesamte Audiosystem, betreffend die verbauten Exciter gemeinsam mit den bereits vorhandenen Lautsprechern, wurde entsprechend entzerrt, um eventuelle Störfaktoren zu unterdrücken.

Abschließend wurden in Form eines Hörversuchs noch wichtige Klangqualitäten erfasst. Anhand der finalen Messungen und des Hörversuchs konnte schlussendlich gezeigt werden, dass das erarbeitete Konzept Vorteile gegenüber den momentan eingebauten Konuslautsprechern im Dachhimmel bringt, und es sich diesen gegenüber durchsetzen könnte.

Die anfangs vermuteten Kammfiltereffekte konnten so weit reduziert werden, dass sowohl in den Abschlussmessungen, als auch im Hörversuch im Referenzfahrzeug stärkere Kammfiltereffekte auftraten als im Projektfahrzeug. Die Exciter erwiesen sich dahingehend weniger problematisch, als die bereits verbauten Konuslautsprecher.

Wie zu Beginn erwartet, waren die Exciter schwieriger zu orten als die Konuslautsprecher. Die Ergebnisse des Hörversuchs zeigten auch in diesem Punkt einen Unterschied, wodurch die Erwartungen im Bezug auf Lokalisierbarkeit bestätigt wurden. In der Experimentengruppe ist der Unterschied zwar deutlich größer ausgefallen, sie wurden aber auch in der gesamten Teilnehmergruppe als schwieriger lokalisierbar bewertet. Die abgestrahlten BiegeWellen der Exciter waren dafür verantwortlich, dass die im Dachhimmel verbauten Quellen schwieriger zu lokalisieren sind, was zu einer besseren Einhüllung der Hörer*innen führte. Dies kann auch der Grund dafür sein, dass in der Gruppe mit Grunderfahrung die Exciter eher lokalisiert wurden, als die Konuslautsprecher. Die Probanden glaubten aufgrund der Einhüllung die Exciter besser lokalisieren zu können.

Wie die Auswertung ergaben, wurde die Einhüllung im Projektfahrzeug bereits ohne Exciter als deutlich besser bewertet als im Referenzfahrzeug. Durch Zuschalten der Exciter konnte jedoch ein noch größerer Umschalteffekt, als mit den Konuslautsprechern erreicht werden. Auch in diesem Aspekt scheinen die Exciter die anfänglichen Erwartungen er-

füllt zu haben.

Ein weiteres Ziel war es, die Exciter klanglich so zu integrieren, dass sie zwar die Klangwahrnehmung von oben verstärkten, dies aber eher unauffällig tun, sodass sie nicht als einzelne Quellen auffallen, sondern eher als diffuser Schall das Gesamtsystem erweitern. Auch diese Eigenschaft konnte erfolgreich umgesetzt werden, wie Ergebnisse im Hörversuch zeigten, da die tonale Balance im Projektfahrzeug als ausgewogener bewertet wurde als jene im Referenzfahrzeug.

Abschließend lässt sich feststellen, dass im Rahmen dieser Arbeit ein Grundkonzept zur Integration von Excitern im Fahrzeugdachhimmel erfolgreich entwickelt wurde. Es konnten einige Vorteile gegenüber dem bereits bestehenden Referenzkonzept gezeigt werden. Das vorliegende Konzept dient als Grundlage und bietet Potenzial für weiterführende Überlegungen.

Für weitere Untersuchungen würde sich eine Weiterentwicklung der Anbindung an den Dachhimmel anbieten. Mit derzeitigem Stand werden die Exciter auf den Dachhimmel geklebt. Diese Form der Anbringung ist noch nicht serientauglich. Es müsste somit in den nächsten Schritten ein geeigneteres Konzept zur Anbringung entwickelt werden. Es sollten dadurch keine klanglichen Beeinträchtigungen geschaffen werden, trotzdem sollten die Exciter aber leicht austauschbar sein und vor allem reproduzierbar fixiert werden können.

Desweiteren könnte ein neuer Algorithmus zur Audiosignalverarbeitung in dem Fahrzeugaudiosystem entwickelt werden. Momentan werden die Exciter mit denselben Mono-Summen bespielt, wie auch alle anderen Lautsprecher. Weitere Informationen über den Algorithmus, welcher hinter dem „3D-Effekt“ steckt, sind nicht bekannt. Diese Problemstellung könnte beginnend mit einem Rückkoppelnetzwerk für den Nachhall (FDN) [16], [8] bearbeitet werden. Zudem könnte man beispielsweise mittels Ambisonics-Ansatz [19] den Algorithmus noch verbessern. Durch die Anbringung zusätzlicher Exciter über den gesamten Dachhimmel verteilt könnte ein noch stabileres Klangfeld erschaffen werden. Würde man die Exciter mit anderen Signalen, als das Hauptschallfeld bespielen könnte ein noch räumlicherer bzw. atmosphärischerer Klangeindruck erreicht werden und somit das „3D-Hörerlebnis“ im Fahrzeug noch erweitert und verbessert werden.

Appendix A - MATLAB Funktionen

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ist ein nicht parametrischer Test für zwei gepaarte Beobachtungen aus verschiedenen Grundgesamtheiten. Hierfür ist die Teststatistik W die Summe der Ränge der positiven Differenzen zwischen den Beobachtungen in zwei Stichproben ($x - y$).

$p = \text{signrank}(x, y)$ gibt den p-Wert eines gepaarten, zweiseitigen Tests für die Nullhypothese zurück, sodass $x - y$ einer Verteilung mit dem Median 0 entspricht.

Box Plot

Die `boxplot`-Funktion in MATLAB dient als Visualisierung von statistischen Daten und beinhaltet folgende Punkte:

- Die Linie in der Mitte jeder Box ist der Median. Befindet sich dieser nicht in der Mitte, so liegt das an einseitigen Stichproben.
- Das untere und obere Ende jeder Box sind das 25. bzw. 75. Perzentil der Stichproben. Die Distanz zwischen den beiden Enden ist der sogenannte Quartilsabstand.
- Die Linien, welche unterhalb bzw. oberhalb der Box ansetzen, werden Whisker genannt. Diese reichen vom Ende des Quartilsabstands bis zum weitest entfernten Ergebnis innerhalb der Whiskerlänge.
- Ergebnisse außerhalb der Whiskerlänge werden als Ausreißer markiert. Standardgemäß wird ein Wert als Ausreißer bezeichnet, wenn er mehr als 1.5 Mal die Länge des Quartilsabstands vom unteren oder oberen Ende der Box entfernt ist.

Appendix B - Hörversuch

Hörversuch

Einführung 1 2 3 4 Ende

Beschreibung

Dieser Hörversuch dient zur Erfassung wichtiger Klangqualitäten der im Dachhimmel neu verbauten Exciter. Er unterteilt sich in vier Unterpunkte, welche folgende Kriterien umfassen:

- 1) Kammfiltereffekte bei Bewegung
- 2) Lokalisierbarkeit der Exciter/3D-Lautsprecher
- 3) Einhüllung
- 4) Tonale Balance

Jeder dieser Punkte soll anhand der zur Verfügung gestellten Musikstücke bewertet werden. Die Titel können in beliebiger Reihenfolge und so lange bzw. so oft wie gewollt abgespielt werden.

WICHTIG: In diesem Hörversuch geht es NICHT um die Bewertung des Gesamtklanges im Fahrzeug, sondern es soll die Funktion und Integration der Exciter beurteilt werden.

Der Hörversuch dauert ca. 15 Minuten.

Versuchsperson

Geschlecht weiblich
Alter 0
Audioexperte nein

Setup

G06 ALEV4 3D Lautsprecher
0

Zurück Nächste Seite Speichern & Schließen

Hörversuch

Einführung 1 2 3 4 Ende

Kammfiltereffekte

Zur Bewertung der Kammfiltereffekte, soll während des Musikhörens der Kopf bewegt werden. Es sollen dabei sämtliche Positionen, welche beim Fahren eingenommen werden können, in Betracht gezogen werden. In der Ausgangsposition befindet sich der Kopf an die Kopfstütze gelehnt. Es soll beurteilt werden, wie groß der Bereich ist, bis störende Klangveränderungen wahrgenommen werden können.

sehr stark wahrnehmbare Kammfiltereffekte (+0cm): es treten sehr stark wahrnehmbare Kammfiltereffekte bereits in der Ausgangsposition auf
keine wahrnehmbaren Kammfiltereffekte (+30cm): es werden selbst bei starker Bewegung keine Artefakte wahrgenommen

Modus A

kein Toleranzbereich | großer Toleranzbereich

+0 cm | +5 cm | +10 cm | +20 cm | +30 cm

Modus B

kein Toleranzbereich | großer Toleranzbereich

+0 cm | +5 cm | +10 cm | +20 cm | +30 cm

Zurück Nächste Seite Speichern & Schließen

Hörversuch

Einführung 1 2 3 4 Ende

Lokalisierbarkeit

Für eine optimale Einhüllung soll der Hörer möglichst nicht in der Lage sein, die einzelnen Quellen zu identifizieren. Es gilt daher zu bewerten, wie gut die Exciter/3D-Lautsprecher an Ihrer Position am Dachhimmel lokalisierbar sind.

nicht lokalisierbar (-3): die Exciter/3D-Lautsprecher können nicht konkret geortet werden
 sehr gut lokalisierbar (3): die exakte Position der Exciter/3D-Lautsprecher ist deutlich wahrnehmbar

Modus A

nicht lokalisierbar | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | sehr gut lokalisierbar

Modus B

nicht lokalisierbar | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | sehr gut lokalisierbar

Zurück | Nächste Seite | Speichern

Hörversuch

Einführung 1 2 3 4 Ende

Einhüllung

Im Studio-Modus erzeugt ein klassisches ALEV4 Surround-Setup bereits eine horizontale Einhüllung (Gefühl vom Schall "umgeben" zu sein). Im 3D-Concert-Modus werden zudem Exciter im Dachhimmel bespielt, welche die horizontale Einhüllung erweitern sollen, indem zusätzlich eine vertikale Einhüllung (das Klangfeld weitet sich nach oben hin auf, man hat das Gefühl vom Schall "zudeckt" zu werden) geschaffen wird.

Es soll bewertet werden, ob bzw. in welchem Modus ein Einhüllungszuwachs bemerkbar ist.

wenig Einhüllung (0): man fühlt sich nur sehr wenig vom Schall eingehüllt
 vollständige Einhüllung (4): es ist eine vollständige Einhüllung vom Schall wahrnehmbar

Modus A

wenig Einhüllung | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | vollständige Einhüllung

Modus B

wenig Einhüllung | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | vollständige Einhüllung

Zurück | Nächste Seite | Speichern & Schließen

Hörversuch

Einführung 1 2 3 4 Ende

Tonale Balance

sehr basslastig (-3): entweder sehr starker Bass, oder sehr schwache Höhen
ausgewogen (0): Bässe und Höhen werden als gleich laut wahrgenommen
sehr höhenlastig (3): entweder sehr starke Höhen, oder sehr schwacher Bass

Modus A

sehr basslastig | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | sehr höhenlastig

Modus B

sehr basslastig | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | sehr höhenlastig

Zurück Nächste Seite Speichern & Schließen

Hörversuch

Einführung 1 2 3 4 Ende

Bewertung des Klangerlebnisses (optional):

Zurück Nächste Seite Speichern & Schließen

Dieser Hörversuch dient zur Erfassung wichtiger Klangqualitäten der im Dachhimmel neu verbauten Exciter. Er unterteilt sich in vier Unterpunkte, welche folgende Kriterien umfassen:

1) Kammfiltereffekte bei Bewegung

- Zur Bewertung der Kammfiltereffekte soll während des Musikhörens der Kopf bewegt werden. Es sollen dabei sämtliche Positionen, welche beim Fahren eingenommen werden können, in Betracht gezogen werden. In der Ausgangsposition befindet sich der Kopf an die Kopfstütze gelehnt.
- Es soll beurteilt werden, wie groß der Bereich ist, bis störende Klangveränderungen wahrgenommen werden können.

2) Lokalisierbarkeit der Exciter/3D-Lautsprecher

- Für eine optimale Einhüllung soll der Hörer möglichst nicht in der Lage sein, die einzelnen Quellen zu identifizieren.
- Es gilt daher zu bewerten, wie gut die Exciter/3D-Lautsprecher an ihrer Position am Dachhimmel lokalisierbar sind.

3) Einhüllung

- Im *Studio-Modus* erzeugt ein klassisches ALEV4-Surround-Setup bereits eine horizontale Einhüllung (Gefühl vom Schall „umgeben“ zu sein). Im *3D-Concert-Modus* werden zudem Exciter im Dachhimmel bespielt, welche die horizontale Einhüllung erweitern sollen, indem zusätzlich eine vertikale Einhüllung (das Klangfeld weitet sich nach oben hin auf, man hat das Gefühl vom Schall „zugedeckt“ zu werden) geschaffen wird.
- Es soll bewertet werden, wie stark ein Einhüllungszuwachs im jeweiligen Modus bemerkbar ist.

4) Tonale Balance

- Es soll die Ausgewogenheit des Gesamtsystems bewertet werden.

Die Bezeichnungen für die einzelnen Musikprofile sind randomisiert, sie können also, müssen aber nicht mit den tatsächlich hörbaren Profilen übereinstimmen, deshalb soll nicht auf die Betitelung geachtet werden. Es gelten für den gesamten Hörversuch die links stehenden Bezeichnungen A und B.

Weiters wurden die unterschiedlichen Intensitätsinkremente zurückgesetzt, es soll daher nicht am Intensitätsregler gedreht werden, dieser soll für den gesamten Hörversuch auf seiner Defaultposition bleiben.

Jeder der oben angeführten Punkte soll anhand der zur Verfügung gestellten Musikstücke bewertet werden. Die Titel können in beliebiger Reihenfolge und so lange bzw. so oft wie gewollt abgespielt werden.

Der Hörversuch dauert ca. 15 Minuten. Nach erfolgreichem Abschluss soll möglichst ohne Pause in das zweite Fahrzeug gewechselt werden, in dem der Versuch erneut durchzuführen ist. Im zweiten Fahrzeug gelten wieder dieselben Bedingungen wie schon im ersten.

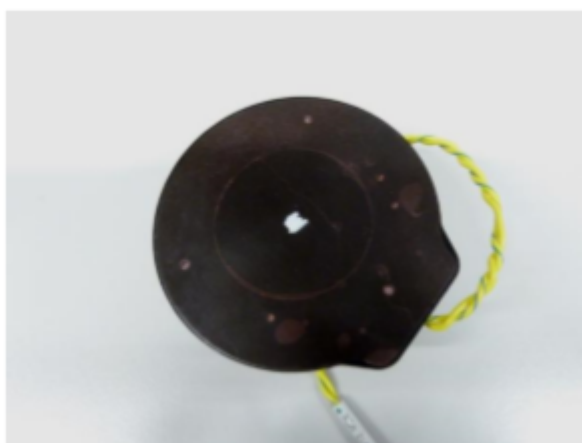
Geräte- und Materialverzeichnis

Messmikrofone	Microtech Gefell MV 220 P48 Mikrofonvorverstärker und Kapsel MK250
Kalibrator	Brüel & Kjær Sound Calibrator Type 4231
Messsoftware	Klippel Smaart PAK
Exciter	Foster B33 Actuator Dayton DAEX19SL-4 Slimline LPG
Dachhimmel	(Details siehe Abb. 29)
Plexiglas 98 mm x 78 mm x 3 mm	
Alu 98 mm x 78 mm x 2 mm	
Alu 98 mm x 78 mm x 4 mm	
Polysterol 98 mm x 78 mm x 3 mm	
Carbon-Platte Carbontec 98 mm x 78 mm x 3 mm	
Doppelseitiges Urethanschaum-Klebeband 4026	3M

Hersteller: LPG
Bezeichnung: Ref: 070 E 019 KW12/13
Entwicklungsstand: Muster D01.01 Off Tool, off Process
BMW Sach-Nr.: 9 306 418-02

Lautsprechertyp: 68mm Exciter, Kunststoffmembrane, Neodym
Topfmagnetsystem, 37mm Schwingspule,
z = 8 Ohm, P = 15W

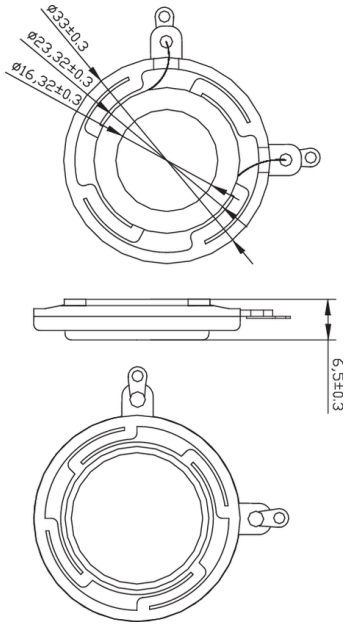
Korbmaterial/Gewicht: PC+GF / 160g





DAEX19SL-4 Slimline Coin Type 19mm Exciter 4W 4 Ohm

DAEX19SL-4



PARAMETERS

Impedance	4 ohms
Re	2.94 ohms
Le	0.01 mH
Fs	630 Hz
Qms	N/A
Qes	N/A
Qts	N/A
Mms	N/A
Cms	N/A
Sd	N/A
Vd	N/A
BL	N/A
Vas	N/A
Xmax	N/A
VC Diameter	19 mm
SPL	N/A
RMS Power Handling	4 watts
Usable Frequency Range (Hz)	N/A

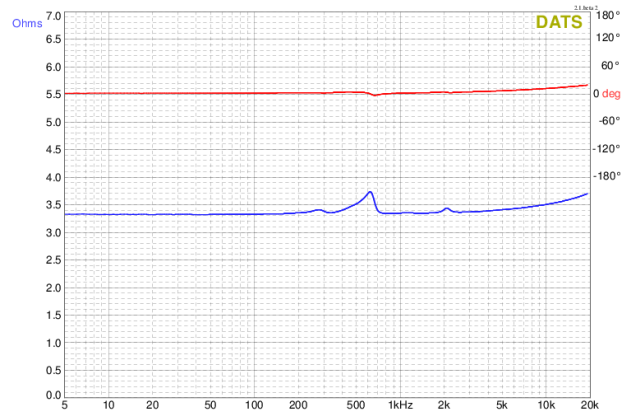
FEATURES

- Only 1.3" diameter by 0.26" high, can be installed almost anywhere
- Dual suspension for linear operation and lower distortion
- 4 ohms impedance for use with small, Class D amplifiers
- Pre-applied 3M™ VHB™ adhesive for quick, durable installation

APPLICATIONS

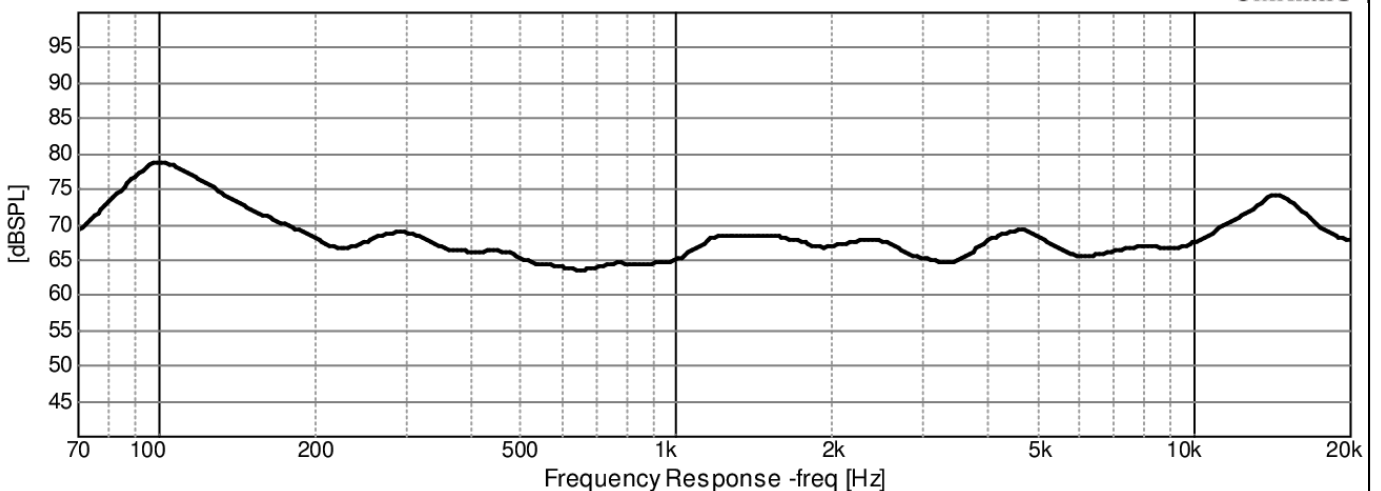
- Invisible home theater and multi-room audio
- Electronic gaming machines
- Advertising signage
- Point-of-purchase displays
- Multimedia exhibits
- Commercial distributed audio
- Kiosks
- Automotive audio
- Bathroom tubs and showers

IMPEDANCE/PHASE



Measurement taken with transducer uncoupled facing upward.

FREQUENCY RESPONSE

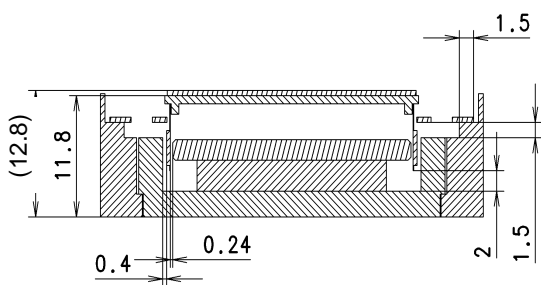
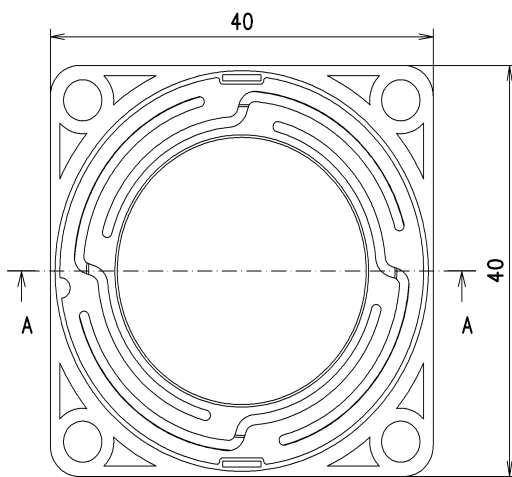


OmniMic

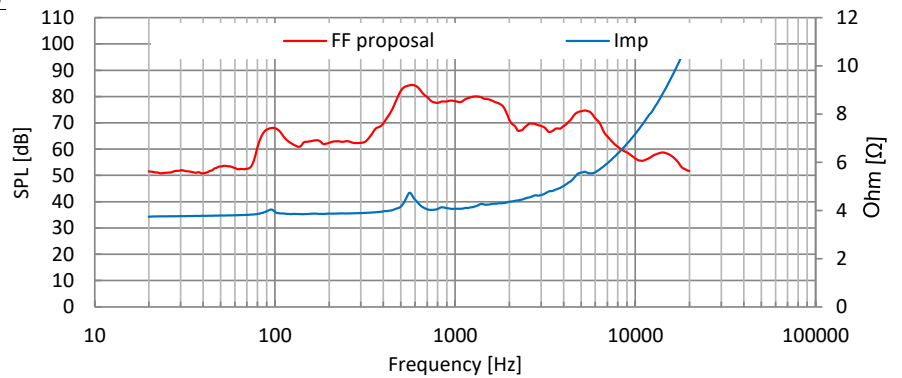
1/3rd octave smoothing - measurement taken with transducer adhered off-center on a 12" x 12" x 1/2" foam core board in an infinite baffle setup.

Note: This information is for comparison purposes only, the actual frequency response will depend on many factors of which the diaphragm being the greatest contributor.

B33 Actuator 1st Proposal



	RFQ	Proporsal
MECHANICAL REQUIREMENT		
VC Diameter(mm)	-	25dia
Height(mm)	10~12	11.8 (from yoke to top of the cap)
Plate Thickness(mm)	-	2
Width (mm)	40	□40
ELECTRIC REQUIREMENT		
Nominal Impedance(ohm)	-	4
RDC(ohm)	-	3.6
Fs(Hz) at LPM	-	800~900
SPL(dB) : Lnom	-	75dB
BL(N/A)	-	>1.0
Qts	-	4
MATERIAL		
Magnet	-	Neodymium
Magnet size	-	Φ19.8x3



※ 1W with attached ABS board (100mm x 100mm x t2)

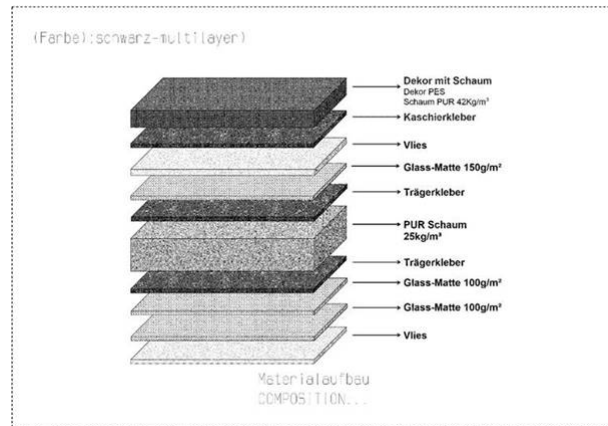


Abbildung 29 – Materialaufbau Dachhimmel

Abbildungsverzeichnis

1	Plattenmoden (1,1), (1,2) und (2,2) [12].	8
2	Schallbeugung und -reflexion abhängig von der Größe des Hindernisses [1].	11
3	Modell zur Veranschaulichung der Beugungsvorgänge an den Kanten eines Lautsprechergehäuses nach [9] (a) und Gedankenmodell zur Abschätzung des Kammfiltereffekts nach [18] (b) [1].	12
4	DAEX19SL-4: Oberseite (l), Unterseite (r).	17
5	B33: Oberseite (l), Unterseite (r).	17
6	Positionierung der Exciter auf dem Dachhimmel.	18
7	Positionierung des Exciters [5].	20
8	Frequenzgänge der drei Exciter-Modelle (LPG, Dayton, Foster) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	21
9	THD der drei Exciter-Modelle (LPG, Dayton, Foster) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	22
10	Positionierung des Exciters mit einer zusätzlichen Materialkomponente. .	23
11	Frequenzgänge des Foster-Exciters bei Anbringung verschiedener Zusatzplatten in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	24
12	THD des Foster- und Dayton-Exciters auf Plexiglas in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	26
13	THD des Foster- und Dayton-Exciters auf Carbon in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	26
14	Frequenzgang der vier Foster-Exciter allein und mit zwei weiteren Dayton-Excitern auf dem Dachhimmel (siehe Abb. 6) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	28
15	THD der vier Foster-Exciter und zwei weiterer Dayton-Exciter auf dem Dachhimmel (siehe Abb. 6) in dB SPL bei einer Spannungszufuhr von 1 V.	29
16	Achtkanaliges Mikrofonarray.	30
17	Frequenzgang der entzerrten 3D-Konuslautsprecher und der flat-gemessenen Exciter auf dem im Fahrzeug integrierten Dachhimmel.	31
18	Frequenzgang der Exciter auf dem im Fahrzeug integrierten Dachhimmel.	32

19	Frequenzgänge der entzerrten Konuslautsprecher im Referenzfahrzeug und Exciter im Projektfahrzeug.	33
20	Frequenzgänge des entzerrten Gesamtsystems im Referenzfahrzeug und im Projektfahrzeug.	34
21	Frequenzgang der Exciter auf dem im Fahrzeug integrierten Dachhimmel.	34
22	Frequenzgänge des entzerrten Gesamtsystems im Projektfahrzeug ohne Exciter.	35
23	Frequenzgänge des entzerrten Gesamtsystems im Projektfahrzeug mit Exciter.	36
24	Seitenlayout der GUI zum Hörversuch.	40
25	Bewertete Kammfiltereffekte in den beiden Fahrzeugen.	42
26	Bewertete Lokalisierbarkeit der Exciter / Konuslautsprecher in den beiden Fahrzeugen.	43
27	Bewertete Einhüllung in den beiden Fahrzeugen.	44
28	Bewertete tonale Balance in den beiden Fahrzeugen.	45
29	Materialaufbau Dachhimmel	59

Tabellenverzeichnis

1	Materialdaten verwendeter Stoffe [12]. Dichte ρ , Querkontraktionszahl μ , Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L , Verlustfaktor η , Koinzidenzfrequenz f_{cr}	7
---	--	---

Literatur

- [1] D. Beer. *Untersuchungen zum Einsatz von Flachlautsprechern an schallreflektierenden Grenzflächen*.
https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00024492/ilm1-2011000359.pdf.
- [2] J. Berg, and F. Rumsey. *Verification and Correlation of Attributes Used for Describing the Spatial Quality of Reproduced Sound*. Proceedings of the 19th Audio Engineering Society Conference. Surround Sound: Techniques, Technology and Perception, 2001, 234-251.
- [3] J.S. Bradley, and G. A. Soulodre. *Objective measures of listener envelopment*. Journal of the Acoustical Society of America, Volume 98, No. 5, 1995, 2590-2597.
- [4] D. Cabrera, and S. Tilley. *Vertical Localization and Image Size Effects in Loudspeaker Reproduction*. AES 24th International Conference on Multichannel Audio, The New Reality (2003 June), Conference Paper 46.
- [5] Dayton Audio. *EXCITERS TACTILE TRANSDUCERS 101 An Introduction*.
<https://www.daytonaudio.com/topic/excitersbuyerguide>.
- [6] International Telecommunication Union; Radiocommunication Sector. *Methods for selecting and describing attributes and terms, in the preparation of subjective tests*. Report ITU-R BS.2399-0 , Mar. 2017.
- [7] International Telecommunication Union; Radiocommunication Sector. *General methods for the subjective assessment of sound quality*. Recommendation ITU-R BS.1284-2, Jan. 2019.
- [8] J.-M. Jot, and A. Chaigne *Digital delay networks for designing artificial reverberators*. 90th AES Convention, Prepr. 3030, Paris, Feb. 1991.
- [9] LinearX. *Reference Manual - Enclosure Shop, LEAP*. 5. Auflage, Feb. 2003.
- [10] M. Mironovs, and H. Lee. *Localization of Natural Sound Sources at Various Azimuth and Elevation Angles*. 146th AES Convention, Dublin, IR, 2019, Paper 10165.
- [11] M. Morimoto, K. Iida, and K. Sakagami. *The role of reflections from behind the listener in spatial impression*. Applied Acoustics, Volume 62, 2001, 109-124.
- [12] M. Möser. *Technische Akustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, 129-130, 138-146.
- [13] PUI Audio. *The Invisible Speaker - PUI Audio eXciters*.
https://www.puiaudio.com/media/SpecSheet/Exciter_White_Paper.pdf.

- [14] S. Roffler, and R. Butler. *Factors that Influence the Localization of Sound in the Vertical Plane*. Journal of the Acoustical Society of America, Volume 43, No. 6, 1255-1259.
- [15] R. Sazdov, G. Paine, and K. Stevens. *Perceptual Investigation into Envelopment, Spatial Clarity, and Engulfment in Reproduced Multi-Channel Audio*. 31st AES International Conference, London, UK, 2007.
- [16] J. Stautner, and M. Puckette. *Designing multichannel reverberators*. Computer Music Journal, Volume 6, No. 1, 1982, 52-65.
- [17] St. Weinzierl. *Handbuch der Audiotechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 429-430.
- [18] J. Wright. *Fundamentals of Diffraction*. 100th AES Convention, Copenhagen, 1996.
- [19] F. Zotter, and M. Frank. *Ambisonics - a practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement, virtual reality*. Springer Nature, 2019.