

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

Weiterentwicklung eines Soundgenerators für Elektrofahrzeuge

Konzeption und hardwaretechnische Umsetzung eines
neuen Systems

Vorgelegt am 13. Januar 2017
an der Hochschule der Medien in Stuttgart
zur Erlangung des akademischen Grades
„Bachelor of Engineering“

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Jochen Lüling
Autor: Lukas Müller
Matrikelnummer 27208

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich, Lukas Müller, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

„Weiterentwicklung eines Soundgenerators für Elektrofahrzeuge – Konzeption und hardwaretechnische Umsetzung eines neuen Systems“, selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Stuttgart, den 13.01.2017

Ort, Datum

Lukas Müller

Kurzfassung

Die Automobilindustrie entwickelt sich kontinuierlich weiter. Für viele Menschen spielt beim Kauf eines Konsumgutes die Emotionalität eine entscheidende Rolle, so auch beim Automobil. Eine entscheidende Komponente beim Vermitteln einer bestimmten Emotion ist, neben Gesamtqualität oder Haptik, der Klang bzw. die Akustik. Mit voranschreitender Entwicklung des Automobils, entwickelte sich das Klangbild eines Fahrzeugs immer weiter und spielt vor allem in Zeiten von Hybrid- und Elektromotoren eine immer größere Rolle.

In der vorliegenden Arbeit wird, in Kooperation mit der Firma GIGATRONIK Stuttgart GmbH, ein Soundgenerator für Fahrzeuge mit Elektromotor konzeptioniert und umgesetzt. Die Basis bildet dabei ein bereits bestehender Soundgenerator. Als Versuchsträger dient ein von der Firma GIGATRONIK entwickeltes Fahrzeug mit Elektromotor. Kernbestand der Arbeit ist es bisherige Schwächen des bestehenden Soundgenerators im Hinblick auf die klangliche Dynamikentwicklung eines Verbrennerfahrzeugs in verschiedenen Lastzuständen aufzuzeigen. Zudem wird untersucht, wie ein homogenes Klangbild eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor durch den gezielten Einsatz von Lautsprechern reproduziert werden kann. Durch Neukonzeption wird der Soundgenerator gezielt weiterentwickelt. Im Rahmen der Abschlussarbeit werden zum bereits bestehenden Repertoire an Fahrzeugsounds zudem weitere Sounds verschiedener Verbrennerfahrzeuge hinzugefügt.

Schlüsselworte: Soundgenerator, Elektrofahrzeug, Soundgestaltung, Sounddesign

Abstract

The automobile industry continuously develops. For many people the emotionality plays a decisive role by the purchase of consumer goods, so concerning automobiles too. A decisive component of mediation of certain emotion lies - beside quality and haptics - in the sound or the acoustics. Featuring the advancing development of the automobile the sound pattern of vehicles continued to develop. In times of hybrid engines and electronic motors, the vehicle acoustic plays a major role.

In the present study, a sound generator for vehicles with electric engine is conceived and implemented in cooperation with GIGATRONIK Stuttgart GmbH. The concept is based on an already existing sound generator. A vehicle with electric motor developed by GIGATRONIK serves as experimental vehicle. The core element of this study is the revealing of weaknesses of the already existing sound generator with regard to tonal dynamism development of a combustion vehicle in different load conditions. In addition to that, it is examined how the homogeneous sound of a vehicle with combustion engine can be reproduced with targeted use of loudspeakers. The sound generator is specifically advanced by a new concept. Within this thesis other sounds of different combustion vehicle are added to the already existing repertoire of vehicle sounds.

keywords: sound generator, electric vehicle, sound design,

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Versicherung	3
Kurzfassung	4
Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangspunkt der Arbeit.....	10
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	11
1.3 Vorgehensweise.....	12
2 Grundlagen	14
2.1 Grundlagen des Hörens.....	14
2.2 Psychoakustik.....	18
2.3 Soundgestaltung im Automobilbereich.....	23
2.3.1 Passive Maßnahmen.....	23
2.3.2 Aktive Maßnahmen.....	26
2.3.3 Aktiv erzeugtes Fahrzeugaußengeräusch bei Elektrofahrzeugen.....	30
2.4 Wesentliche Geräuschquellen eines Fahrzeugs.....	31
2.5 Der CAN-Bus (Controller Area Network).....	33
3 Konzeption des neuen Soundgenerators	35
3.1 Beschreibung des Versuchsfahrzeugs.....	35
3.2 Beschreibung und Funktionsweise des alten Soundgenerators.....	36
3.3 Aufzeigen und Bewertung der Schwachstellen des Soundgenerators.....	38
3.4 Neukonzeption des Soundgenerators.....	40
3.4.1 FMOD Studio.....	45
3.4.2 Datenverarbeitung und Ansteuerung der Sound Engine FMOD Studio.....	47
3.4.3 Lautsprecherbau.....	49
3.4.4 Verkabelung und Einbau der Komponenten.....	54
4 Tonaufnahmen der Samples	57
4.1 Allgemeines.....	57
4.2 Fahrzeugauswahl.....	59
4.2.1 Audi A6 Avant 3.0 TDI.....	59
4.2.2 Porsche Panamera GTS.....	60

4.3	Planung/Organisation/Umsetzung der Aufnahmen	61
4.3.1	Anforderungen an die Aufnahmeumgebung und Auswahl der Teststrecke.....	61
4.3.2	Mikrofonierung	63
4.3.3	Aufnahmeequipment	67
4.3.4	Ablauf der Aufnahmen	69
4.4	Nachbearbeitung, Schnitt und Implementierung der Samples	71
5	Zusammenfassung und Abschlussbewertung	75
6	Ausblick.....	78
	Danksagung	80
	Literaturverzeichnis.....	81
	Anhang.....	84
	Schaltplan aller verbauten Komponenten	84
	Rundumsicht des Quads mit allen verbauten Lautsprechern	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema des Mittelohrs und der Cochlea	16
Abbildung 2: Räumliche Darstellung der Wanderwelle auf der Basilarmembran	17
Abbildung 3: Mittelwert (sowie 10% - und 90% -Wert) der Ruhehörschwelle L_T von Versuchspersonen unter 25 Jahren in Abhängigkeit der Frequenz f_T	19
Abbildung 4: Hörfläche eines normalhörenden Menschen.....	20
Abbildung 5: Kurven gleicher Lautstärke (schraffierter Bereich: menschliche Sprache)....	21
Abbildung 6: A-, B-, C-, D-Filterkurven (D-Bewertung nicht relevant).....	22
Abbildung 7: Prinzip Absorption (L) und thermoakustische Motorkapselung (R).....	25
Abbildung 8: Dämmungsverlauf Doppelwand (L) und Stirnwandisolation (R).....	26
Abbildung 9: Aufbau eines Active-Sound-Systems mit seinen Komponenten	27
Abbildung 10: Schalldruckpegel an der Abgasmündung (L) und Innenraum (R)	28
Abbildung 11: Systemlayout des ASM-Systems von BOSE	30
Abbildung 12: Pegelverhalten im Lastmoment	39
Abbildung 13: Anordnung der Samples im rpm-Parameter in FMOD-Studio	42
Abbildung 14: Lautstärkeverhältnisse der Samples je nach Betriebszustand.....	43
Abbildung 15: Signalflussdiagramm des neuen Soundgenerators.....	45
Abbildung 16: Überblick FMOD Studio Edit-Fenster	47
Abbildung 17: Flussdiagramm Datenverarbeitung.....	48
Abbildung 18: 3d-Modell (L) und fertiges Lautsprechergehäuse (R).....	52
Abbildung 19: Hardcase vorher (L) und mit eingesetztem Lautsprecher (R).....	53
Abbildung 20: Frequenzgang des Rücklautsprechers.....	54
Abbildung 21: Kompaktstecker unter dem Hardcase.....	55
Abbildung 22: Superseal-Steckverbindung 2-polig.....	55
Abbildung 23: Konstruktion des Trägers (oben links) und Einbau der Komponenten (oben rechts/unten).....	56
Abbildung 24: Loop-Durchgänge bei Samples.....	58
Abbildung 25: Audi A6 Avant 3.0 TDI.....	60
Abbildung 26: Porsche Panamera GTS.....	61
Abbildung 27: Lage der Teststrecke (rote Pfeile) und des Parkplatzes (Quelle: Google Maps)	62
Abbildung 29: Aufsicht auf Kfz mit allen Mikrofonpositionen.....	66
Abbildung 28: Rückseitige Mikrofonierung.....	66
Abbildung 30: Mikrofonierung im Motorraum.....	67
Abbildung 31: Sound Devices 788T-SSD (L) und Rycote Kit (R).....	69
Abbildung 32: Countryman B6 (L) und Sennheiser MKH416P48 (R).....	69
Abbildung 33: Abstrahlverhalten der Lautsprecher am Quad (L) und FMOD-Surround-Panner (R).....	74

Abkürzungsverzeichnis

API	engl. application programming interface = Programmierschnittstelle
ANC	engl. active noise control
ASD	engl. active sound design
CAN	engl. controller area network
dB	Dezibel
dB SPL	engl. sound pressure level = Schalldruck- pegel
ECU	engl. electronic control unit = Steuergerät
EU	Europäische Union
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Hz	Hertz = abgeleitete SI-Einheit für die Fre- quenz
kHz	Kilohertz
MIDI	engl. musical instrument digital interface = digitale Schnittstelle für Musikinstrumente
MQTT	engl. message queue telemetry transport = Nachrichtenprotokoll zur Übertragung von Telemetriedaten
NVH	engl. NoiseVibrationHarshness = Geräusch, Vibration, Rauheit
XLR	Steckverbindung für analoge Mikrofon-und Lautsprechersignale

1 Einleitung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Konzeption sowie der zugehörigen hardware-spezifischen Umsetzung eines Soundgenerators für ein Elektrofahrzeug. Die softwareseitige Umsetzung wird hierbei nur in ihrer Theorie erklärt. Eine vollständige Beschreibung der softwaretechnischen Umsetzung des Soundgenerators inklusive der Implementierung der hierbei verwendeten Audio-Engine *FMOD Studio* erfolgt in einer parallel durchgeführten Bachelorarbeit (vgl. Kersten, 2017). Um ein volles Verständnis des entwickelten Systems, hardware- und softwareseitig, zu garantieren, ist es dringend erforderlich die oben genannte Bachelorarbeit im Anschluss an diese Arbeit zu lesen.

1.1 Ausgangspunkt der Arbeit

Neue Technologien prägen die Welt unserer Handels- und Konsumgüter stetig. Auch das Automobil durchschreitet in den letzten 100 Jahren einen rasanten Entwicklungsprozess. Nicht nur das Aussehen, sondern vor allem die technische Funktionsweise durchlebt einen ständigen Wandel und eine fortlaufende Veränderung. Getreu dem Motto „höher, schneller, weiter“ werden die verwendeten Materialien immer leichter, Motoren und Antriebskonzepte immer effizienter und der Kraftstoffverbrauch stetig weniger. In Zeiten von immer leiser und effizienter arbeitenden Motoren gewinnt der Entwicklungsbereich der Fahrzeugakustik immer mehr an Bedeutung. Der Eigengeräuschanteil der besagten Motoren und der im Auto verbauten Aggregate wird immer geringer. Der eigentliche nach außen und im Fahrzeuginnen hörbare Fahrzeugklang soll - im Hinblick auf Fahrkomfort und Emotionalität des Fahrers sowie in puncto Sicherheit - für andere Verkehrsteilnehmer jedoch erhalten bleiben. Aufgrund dessen sind die Entwicklungsabteilungen der Fahrzeughersteller gezwungen, sich mit der Bedeutung der hör- und fühlbaren Schwingungen auseinanderzusetzen. In der Fahrzeugakustik geht es nicht nur allein um Geräusche, sondern auch um kleinste spürbare Schwingungen, deren Zusammenspiel und die damit verbundenen Gefühle und Emotionen des Fahrers. Die Lösung von so genannten NoiseVibrationHarshness-Problemen (dt. Geräusch, Vibration, Rauheit) erlangt nicht nur im Bereich der Fahrzeugtechnik, sondern auch in den Bereichen der Haushaltsgeräte oder Großmaschinen immer größere Bedeutung. Aufgabe der NVH-Ingenieure ist die Auseinandersetzung mit fühl- und hörbaren Schwingungen, die im Fahrzeug ein bestimmtes Gefühl beim Fahrer erzeugen, bewusst sowie unbewusst. Die Geräusche bzw. das Klangbild können vom Konsumenten sowohl positiv (passend) als auch negativ (störend) interpretiert werden. Um negative Geräuscheinflüsse zu beseitigen oder einen

zum Produkt passenden und adäquaten Klangcharakter zu erzeugen, wird im Bereich der NVH-Entwicklung viel Engagement und Kapital investiert.

Im Zuge dessen sehen sich viele Fahrzeughersteller mit der Frage konfrontiert, inwieweit sich die eigenen Produkte, von den Konkurrenzprodukten abheben können. Vor allem im Zeitalter von extrem leisen und effizienten Hybrid- oder Elektromotoren liegt die Lösung in der gezielten Beeinflussung des zum Fahrzeug passenden Klangs. Ein gänzlich stiller Sportwagen auf Basis eines Elektromotors vermittelt eben nicht die gewünschte Emotion und stellt zudem ein immenses sicherheitstechnisches Risiko für andere Verkehrsteilnehmer dar, da das Fahrzeug zumeist erst viel zu spät bemerkt bzw. lokalisiert werden kann. Heutzutage sind bereits vielerlei Möglichkeiten auf dem Markt vertreten, um den „Sound“ eines solchen Fahrzeugs aktiv zu beeinflussen. Vor allem werden dabei aktive Soundaktoren, Lautsprecher mit Metallmembranen, die je nach Fahrsituation passende Schallwellen erzeugen, eingesetzt. Im Bereich der Elektromotoren hat sich jedoch noch kein Standard entscheidend etabliert. Vor dem Hintergrund, dass in der EU per Gesetz ab dem Jahr 2019, aus sicherheitstechnischen Gründen, alle neu zugelassenen Fahrzeuge mit Elektroantrieb einen deutlich wahrnehmbaren Klang erzeugen müssen, bietet der Bereich der synthetischen Klangerzeugung für Elektrofahrzeuge entscheidendes Entwicklungspotential¹.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, in Kooperation mit der Firma GIGATRONIK Stuttgart GmbH, einen Soundgenerator für ein Fahrzeug mit Elektroantrieb zu entwickeln. Die Basis bildet dabei ein Soundgenerator, der im Rahmen einer bereits fertiggestellten Abschlussarbeit entstand. Als Versuchsfahrzeug dient ein ehemaliges Verbrenner-Quad, welches in ein Elektro-Quad umgebaut wurde. Das zu entwickelnde System soll Schwachstellen des bestehenden Systems beheben. Primär gilt es, die klangliche Dynamik eines Verbrennungsmotors bei verschiedenen Lastzuständen zu erzeugen. Weiterhin soll über den Einsatz von Lautsprechern am Versuchsfahrzeug ein authentisches Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs reproduziert werden. Wichtig ist, dass das System ressourcensparend arbeitet und zudem hardwareseitig kompakt und platzsparend am Versuchsfahrzeug verbaut wird. Außerdem soll das System einfach zu bedienen sein, um den Alltagsgebrauch störungsfrei zu gewährleisten.

¹ vgl. Schönherr, 2015

Um die Auswahlmöglichkeiten der bereits bestehenden Soundpakete noch zu erweitern, werden im Rahmen der Arbeit weitere Soundpakete von Fahrzeugen mit charakteristischem Motorenklang entstehen. Hierbei stellt die Mikrofonierung der verschiedenen Fahrzeuge in den benötigten Fahrsituationen eine erhebliche Herausforderung dar. Zunächst müssen entsprechende Geräuschquellen am Fahrzeug, die erheblich zum Gesamtklang des Motors beitragen, lokalisiert und mikrofoniert werden. Um die entsprechenden Geräuschquellen problemlos zu erreichen, muss im Planungsprozess der Aufnahmen bereits die entsprechende Mikrofonauswahl getroffen werden. Da die Aufnahmen teilweise im Fahren entstehen sollen, muss das komplette Aufnahmeequipment mobil sein und ohne Spannungsversorgung funktionieren. Die für den Gesamtklang des Motors benötigten Aufnahmen müssen qualitativ hochwertig sein. Der für den Motorenklang wichtige Klang der einzelnen Mikrofone darf nicht durch Störeinflüsse wie Wind oder den Eigenklang bestimmter Aggregate beeinflusst oder verfälscht werden.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst wird in einem Grundlagenkapitel das für die Bachelorarbeit benötigte Grundwissen vermittelt. Da der Klang von Fahrzeugen stets subjektiv beurteilt wird, werden zunächst die Grundlagen des Hörens und die damit verbundene Wahrnehmung des Menschen beschrieben. Auch auf die damit verbundenen Grundlagen der Psychoakustik wird kurz eingegangen. Anschließend werden kurz die Möglichkeiten der aktiven und passiven Soundgestaltung im Automobilbereich beschrieben. Zudem wird in gekürzter Fassung die Funktionsweise des CAN-Bus erklärt. Das Grundlagenkapitel wird mit einer Beschreibung der Geräuschquellen eines Automobils, welche den Klangcharakter eines Fahrzeugs prägen, abgeschlossen.

Im weiteren Verlauf wird die Konzeption und Planung des neuen Soundgenerators näher beschrieben. Hierfür wird zunächst die Funktionsweise des bereits bestehenden Systems kurz erläutert und dessen Schwachstellen in Hinblick auf realistisches Fahrverhalten eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und dessen Klangcharakter offengelegt. Auf Basis der ermittelten Schwachstellen wird anschließend ein Konzept für das neue System erstellt.

Der praktische Teil der Arbeit befasst sich mit der hardwarespezifischen Umsetzung des neu konzeptionierten Systems, sowie dem Erstellen neuer Soundpakete. Neben dem, auf dem Neukonzept basierenden Umbau des Versuchsfahrzeugs, werden zudem zusätzlich kurze

Grundlagen im Bereich Lautsprechertechnik und Lautsprecherbau beschrieben und vermittelt. Anschließend wird der Aufnahmeprozess der Fahrzeugsounds und das Einpflegen der neuen Soundpakete in das neue System beschrieben.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung sowie eine Abschlussbewertung des neuen Soundgenerators. Die zentrale Frage, ob der Soundgenerator in der Lage ist, ein authentisches Klangbild eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und dessen klanglich dynamisches Verhalten unter Last zu reproduzieren, soll geklärt werden.

2 Grundlagen

Im Folgenden wird auf die Grundlagen und Voraussetzungen, die zum Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig sind, eingegangen. Zunächst wird auf die Grundlagen des menschlichen Hörens, der menschlichen Wahrnehmung und der damit verbundenen Psychoakustik näher eingegangen, bevor einzelne Möglichkeiten der aktiven und passiven Klanggestaltung im Automobilbereich näher beleuchtet werden. Hinzu kommt eine genauere Betrachtung der Geräuschquellen an einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, sowie eine kurze Beschreibung des CAN-Bus-Systems.

2.1 Grundlagen des Hörens

Das Ohr und das Gehör des Menschen bilden zusammen eines der wichtigsten Sinnesorgane des Menschen. Das Ohr stellt einen natürlichen Schallempfänger dar, welcher seit je her zur Wahrnehmung und Lokalisation potentieller Gefahrenquellen dient und somit für das Überleben und die Weiterentwicklung des Menschen von essentieller Bedeutung ist.

Grundsätzlich erfolgt die anatomische Einteilung des Ohrs in äußeres Ohr, Mittelohr und Innenohr. Das äußere Ohr besteht aus der Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang. Die hauptsächlich aus Knorpel bestehende Ohrmuschel dient als Schallempfänger. Der äußere Gehörgang, mit einer durchschnittlichen Länge von 23 mm und einem Durchmesser von ca. 6-8 mm, schließt durch eine ungefähr 0,1 mm dicke Hautmembran, dem Trommelfell, zum Mittelohr ab².

Das Mittelohr ist ein luftgefüllter Raum. Dieser ist über eine doppelläufige, röhrenartige Verbindung mit dem Rachenraum des Menschen verbunden. Diese Verbindung wird eustachische Röhre oder Ohrtrumpete genannt. Im Mittelohr befinden sich die Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel, die kleinsten Knochen des menschlichen Skeletts. Alle drei Knochen sind gelenkartig miteinander verbunden³. Bei einem auftretenden Schallereignis, wird der eintreffende Schall über die Ohrmuschel und den Gehörgang zum Trommelfell geleitet. Das Trommelfell schwingt synchron zu den auftreffenden Schallwellen mit. Die Schwingungen des Trommelfells werden auf den Hammer und über Amboss und Steigbügel auf das Innenohr übertragen⁴.

² vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 42

³ vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 43

⁴ vgl. Ackermann, 1991, S. 6

Das Innenohr besteht aus dem Hörorgan, der Cochlea, und dem Gleichgewichtsorgan. Zum Mittelohr hin weist das Innenohr zwei, mit Membranen abgeschlossene, Öffnungen auf. Diese Öffnungen werden ovales Fenster und rundes Fenster genannt. Das ovale Fenster ist durch die Fußplatte des Steigbügels verschlossen und bildet die Ankopplungsstelle der Gehörknöchelchen. Der äußere Schalldruck löst über die Membran des ovalen Fensters eine in der Innenohrflüssigkeit fortlaufende Druckwelle aus. Auf diesem Wege werden die Schwingungen auf das Innenohr übertragen. Die Membran des runden Fensters dient als Ausgleich für die durch das ovale Fenster verursachten Druckschwankungen⁵. Die Cochlea wird aufgrund ihres Aussehens auch Hörschnecke genannt. Sie stellt das Rezeptorfeld für die Hörwahrnehmung dar. Die Cochlea ist in drei übereinanderliegende, flüssigkeitsgefüllten Gänge gegliedert. Sie heißen *Scala vestibuli* (Vorhoftreppe), *Scala media* (Schneckengang) und *Scala tympani* (Paukentreppe). Der Schneckengang wird durch die Reißnersche Membran und die Basilarmembran von den beiden anderen Gängen getrennt. Auf der Basilarmembran befindet sich das so genannte Cortische Organ. Das Cortische Organ beinhaltet Sinneszellen (Haarzellen). Generell werden die Sinneszellen in äußere und innere Haarzellen unterschieden. Es gibt ca. 3500 innere Haarzellen und 12000 -13000 äußere Haarzellen. Auf den Rezeptoren, befinden sich so genannte Härchen, oder Stereozilien, die den Rezeptoren den Namen „Haarzellen“ geben. Diese Stereozilien ragen aus dem Cortischen Organ heraus⁶. Die äußeren Haarzellen dienen der Verstärkung der Schallwellen innerhalb der Cochlea. Sie sind in der Lage Schallereignisse selbst zu registrieren und zu verstärken. Diese selektive Verstärkung wird an die benachbarten inneren Haarzellen weitergegeben. Die inneren Haarzellen stimulieren die neuronalen Nervenbahnen, die vom Gehirn kommend in der Cochlea enden. Diese neuronalen Nervenzellen des Gehirns wandeln die mechanische Bewegung der Haarzellen, welche durch eintreffende Schallwellen verursacht wird, in elektrische Impulse um. Diese elektrischen Impulse können im Gehirn interpretiert werden⁷.

⁵ vgl. Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 191

⁶ vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 43-44

⁷ vgl. Ackermann, 1991, S. 7

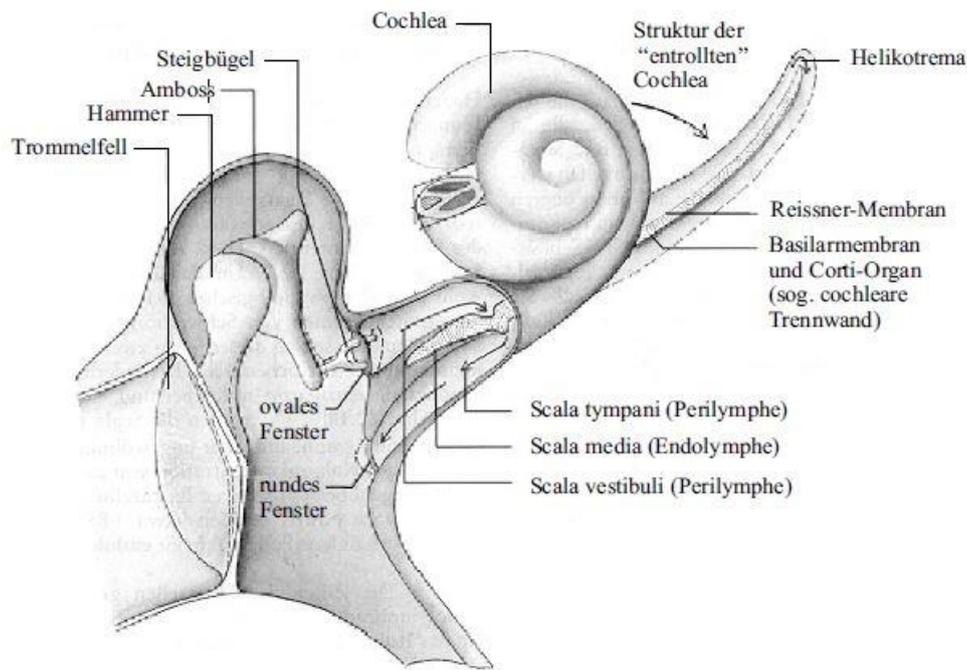


Abbildung 1: Schema des Mittelohrs und der Cochlea⁸

Die extrem frequenzspezifische Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs entsteht durch spezifische physiologische Eigenschaften von äußerem Ohr, Mittelohr und Innenohr. Die größte Empfindlichkeit des Ohres liegt bei Frequenzen zwischen 2 kHz und 5 kHz. Diese Empfindlichkeit entsteht durch Resonanzen im äußeren Gehörgang. Die wichtigsten umweltrelevanten Informationen befinden sich in diesem Frequenzbereich. Im Mittelohr bewirken die Gehörknöchelchen eine Impedanzanpassung. Diese Anpassung ist nötig, da die Dichte der Luft geringer ist als die Dichte der Innenohrflüssigkeit. Würden die Luftschwingungen direkt an die Innenohrflüssigkeit weitergegeben werden, so würde ihr größter Anteil reflektiert werden. Sie wären somit für das Gehirn nicht zu interpretieren. Durch den Flächenunterschied der sich zwischen Trommelfell und Steigbügelplatte ergibt, sowie durch die optimale Hebelwirkung der Gehörknöchelchen, können die Luftschwingungen um das 20-fache verstärkt werden. Dies ermöglicht eine fehlerfreie Interpretation im Gehirn. Aufgrund von Reibung und Masse wirkt das Mittelohr zudem wie ein gedämpftes System. Dies hat zur Folge, dass keinerlei Nachschwinger des Trommelfells möglich sind. Bei einem Nachschwingen des Trommelfells würden nachfolgende Schallreize entscheidend beeinflusst werden. Um einen Druckausgleich zwischen Mittelohr und atmosphärischem Außendruck herstellen zu können, öffnet sich die Eustachische Röhre bei Schluckbewegungen. Diese Druckänderungen können die Schallwahrnehmung beeinflussen. Durch den so genannten Stapediusreflex ist

⁸ Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 191

die Mittelohrmuskulatur zudem in der Lage, sich vor zu lauten Schalldrücken zu schützen. Ein unwillkürlicher Reflex der Gehörknöchelchen bewirkt, dass ein Teil des auftreffenden Schalldrucks am Trommelfell reflektiert wird. Diese Schutzfunktion kann allerdings nur aktiv werden, wenn sich der Schalldruck langsam aufbaut, da für die volle Muskelkontraktion ca. 100-200 ms benötigt werden. Aus evolutionsbiologischer Sicht lässt sich also sagen, dass die Hauptfunktion der Mittelohrmuskeln primär in der Wahrnehmung der Frequenzen zwischen 2000 Hz und 5000 Hz liegt. In diesem Frequenzbereich befinden sich viele der für das Sprachverstehen wichtigen Konsonanten und Umweltgeräusche⁹.

Am mit Flüssigkeit gefüllten Innenohr, wo das ovale Fenster liegt, erzeugen eintreffende Schallwellen Druckbewegungen. Dadurch wird die Flüssigkeit in Bewegung versetzt. Eine Wanderwelle bildet sich entlang der Basilarmembran aus, welche eine Auslenkung der Basilarmembran und des Cortischen Organs zur Folge hat. Ort und Amplitude der Wellenauslenkung sind hierbei von Frequenz und Intensität der eintreffenden Schallwelle abhängig, wobei die Lage der Maximalauslenkung auf der Basilarmembran der Frequenz der Schallwelle direkt zugeordnet ist. Hierbei gilt, je niedriger die Frequenz der eintreffenden Schallwelle, desto größer der Abstand der Maximalauslenkung der Wanderwelle vom ovalen Fenster.

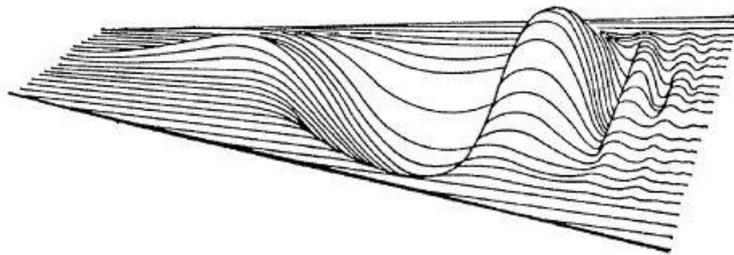


Abbildung 2: Räumliche Darstellung der Wanderwelle auf der Basilarmembran¹⁰

Sobald ein Schallereignis mehrere Frequenzkomponenten enthält, entsteht auf der Basilarmembran ein frequenz aufgelöstes Auslenkungsmuster. Das Cortische Organ wandelt dies in ein neuronales Erregungsmuster. Lange konnte die Frequenzselektivität und die Frequenzempfindlichkeit des Innenohrs durch die beschriebene Wanderwellentheorie nicht quantitativ erklärt werden. Neuere Modelle beschäftigen sich mit der Nachbildung des nichtlinearen Gesamtsystems im Bereich der Basilarmembran bis zum Hörnerv unter Einbeziehung von

⁹ vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 46-47

¹⁰ Lerch, Sessler, & Wolf, 2009

Rückkopplungen. Diese neuen Modelle erlauben eine relativ genaue Darstellung der Frequenzselektivität des Innenohrs und eröffnen neue Einblicke in die hohe Intensitätsempfindlichkeit des menschlichen Gehörs¹¹.

2.2 Psychoakustik

Die wissenschaftliche Disziplin der Psychoakustik ist für das Hörempfinden des Menschen unabdingbar. Sie beschreibt die Zusammenhänge zwischen physikalischen Reizen und den durch sie beim Menschen hervorgerufenen Empfindungen. Für die Psychoakustik ist der Schall, der das Gehör trifft der physikalische Reiz und das Hörempfinden des Menschen die dazugehörige Empfindung. Im Folgenden wird primär auf die Wahrnehmung des Menschen und die damit verbundenen psychoakustischen Phänomene eingegangen.

Nicht jede Luftschwingung die auf das Trommelfell auftrifft, löst beim Menschen eine Hörempfindung aus. Als Absolutschwelle oder Hörschwelle bezeichnet man den Schalldruckpegel den es benötigt, um beim Rezipienten eine Hörempfindung auszulösen. Ab diesem Punkt wird ein Schallereignis hörbar. Die Hörschwelle kann von Versuchspersonen mit großer Sicherheit bestimmt werden und ist deshalb gut reproduzierbar¹². Charakteristisch für den Verlauf der Hörschwelle ist zunächst, dass sie im Bereich tiefer Frequenzen relativ hoch ist. So liegt sie beispielsweise bei einer Frequenz von 50 Hz bei einem Pegel von 40 dB, fällt jedoch bis 200 Hz auf ca. 15 dB ab. Zwischen 500 Hz und 2 kHz sinkt die Hörschwelle weiter ab. Im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 5 kHz können dann bereits Werte von bis zu 0 dB gemessen werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das Gehör in diesem Frequenzbereich am empfindlichsten reagiert. Dies hängt mit der in *Kapitel 2.1* beschriebenen Hauptfunktion der Mittelohrmuskulatur zusammen. Oberhalb von 5 kHz schwankt die Hörschwelle individuell, liegt aber zumeist im Bereich von 0 dB bis 10 dB. Im Frequenzbereich ab 12 kHz steigt die Hörschwelle schnell an und erreicht bei etwa 16 kHz einen Grenzwert. Danach sind selbst bei großen Pegeln keine Hörempfindungen mehr zu verzeichnen. Mit fortschreitendem Alter verschiebt sich die Hörschwelle. Die Abnahme der Empfindlichkeit ist hierbei vor allem bei hohen Frequenzen deutlich. Im Alter von 60 Jahren ist die Hörschwelle bei 10 kHz um bis zu 30 dB, bei 5 kHz um ca. 15 dB angehoben¹³.

Das folgende Schaubild zeigt die mittlere Hörschwelle (Zentralwert) von Versuchspersonen in Abhängigkeit der Frequenz.

¹¹ vgl. Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 192-194

¹² vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 53

¹³ vgl. Zwicker, 1982, S. 31-33

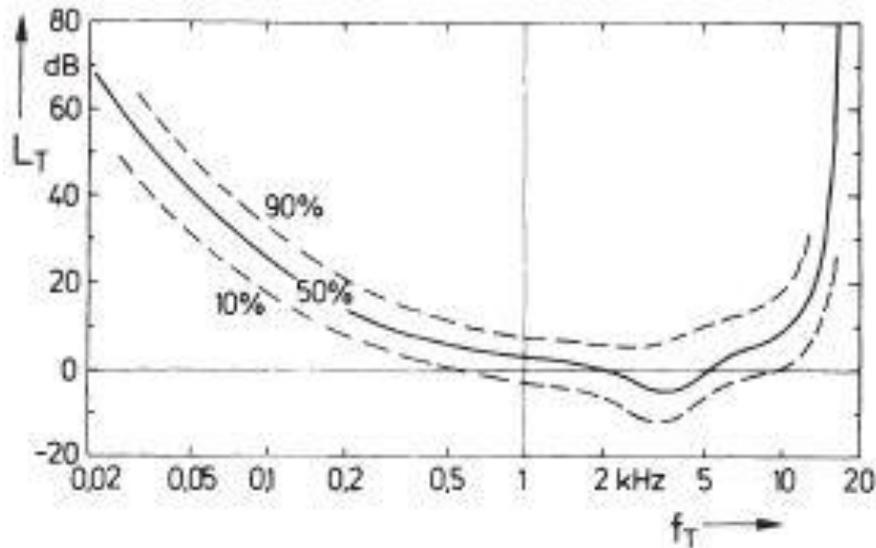


Abbildung 3: Mittelwert (sowie 10% - und 90% -Wert) der Ruhehörschwelle L_T von Versuchspersonen unter 25 Jahren in Abhängigkeit der Frequenz f_T ¹⁴

Neben der Absolutschwelle lässt sich prinzipiell auch eine Obergrenze für das Hörempfinden bestimmen. Diese wird als Schmerzschwelle oder Schmerzgrenze bezeichnet. Hierbei treten Lautstärkepegel auf, oberhalb derer ein Schallereignis als schmerzhaft empfunden wird. Unangenehme Lautstärkeeinflüsse treten an der Schmerzschwelle bei ca. 100 dB SPL auf, die Schmerzgrenze wird mit 120-140 dB SPL erreicht¹⁵. Das Gebiet der normalen Schallwahrnehmung umfasst die Pegel zwischen Hörschwelle und Schmerzschwelle und den Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz. Das Gebiet zwischen Hör- und Schmerzschwelle wird als Hörfläche des menschlichen Gehörs bezeichnet. Dieses Gebiet verdeutlicht, in welchem Bereich das Gehör arbeiten kann. Im folgenden Schaubild sind diejenigen Bereiche schraffiert, in denen die Komponenten der Sprache und der Musik liegen. Beide Komponenten liegen im unteren Bereich der Hörfläche¹⁶.

¹⁴ Zwicker, 1982, S. 33

¹⁵ vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 55

¹⁶ vgl. Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 196

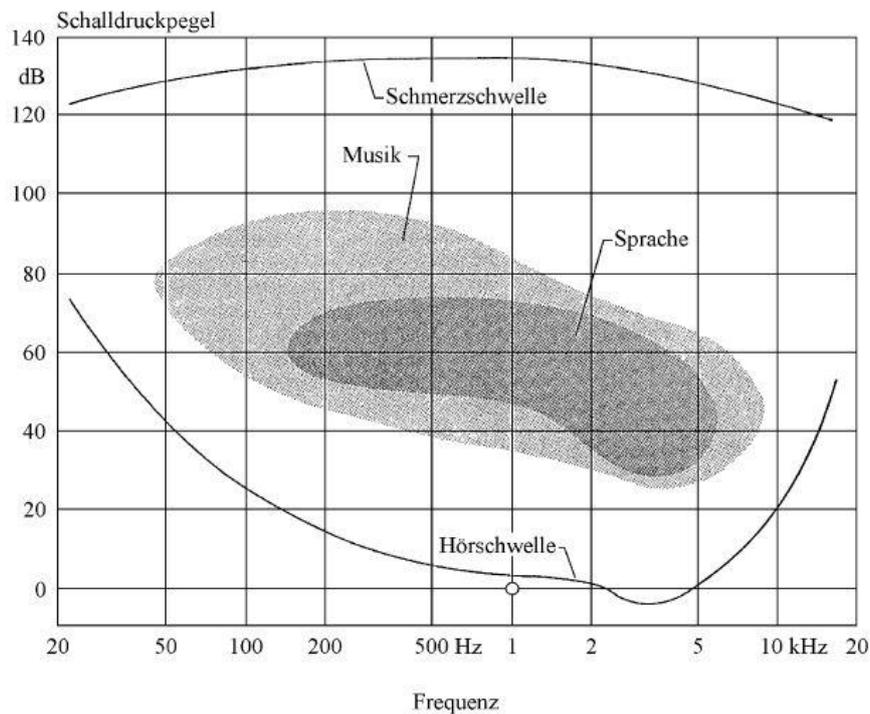


Abbildung 4: Hörfläche eines normalhörenden Menschen¹⁷

Verschiedene Schallereignisse werden, trotz gleichen Schalldrucks, bei unterschiedlichen Frequenzen vom menschlichen Gehör als nicht gleich laut wahrgenommen. Der objektiv messbare Schalldruck genügt dabei nicht zur subjektiven Bewertung eines Schallereignisses. Um das frequenzabhängige Schallempfinden des Gehörs berücksichtigen und darstellen zu können, muss eine neue Kenngröße eingeführt werden. Hierbei handelt es sich um die sogenannte Lautstärke. Die Definition der Lautstärke beruht hierbei auf dem subjektiven Vergleich eines Schallereignisses mit dem Schalldruck eines Referenzschalls. Als Referenzschalldruck dient der Schalldruck p einer frontal auf einen normalhörenden Beobachter eintreffenden Welle mit der Frequenz 1000 Hz. Man bezieht p hierbei auf den Referenz-Schalldruck

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

und betrachtet den Schalldruckpegel

$$L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) [\text{dB}]^{18}.$$

¹⁷ Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 196

¹⁸ vgl. Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 194-195

Der Lautstärkepegel eines beliebigen Schalles ist also derjenige Pegel eines 1000 Hz-Sinustones, der bei frontalem Auftreffen einer Schallwelle auf eine Versuchsperson die gleiche Lautstärkeempfindung hervorruft wie der zu messende Schall. Die Einheit der neu eingeführten Kenngröße der Lautstärke wird in *phon* angegeben. Jeder Schall der beispielsweise einen Lautstärkepegel von 80 phon aufweist, ist demnach genauso laut wie ein 1000 Hz-Sinuston von 80 dB SPL. Die Lautstärkepegel für verschiedene Frequenzen werden in den Kurven gleicher Lautstärke (Isophonlinien) festgehalten. Die Kurven gleicher Lautstärke verbinden die Punkte gleicher Lautstärkeempfindungen miteinander. Aus ihnen wird ersichtlich, dass dem Gehör im Bereich tiefer Frequenzen deutlich höhere Schalldrücke geboten werden müssen, um subjektiv dasselbe Lautstärkeempfinden hervorzurufen wie bei mittleren Frequenzen. Die Ruheschwelle und die Schmerzschwelle sind in den Kurven gleicher Lautstärke ebenfalls aufgeführt¹⁹.

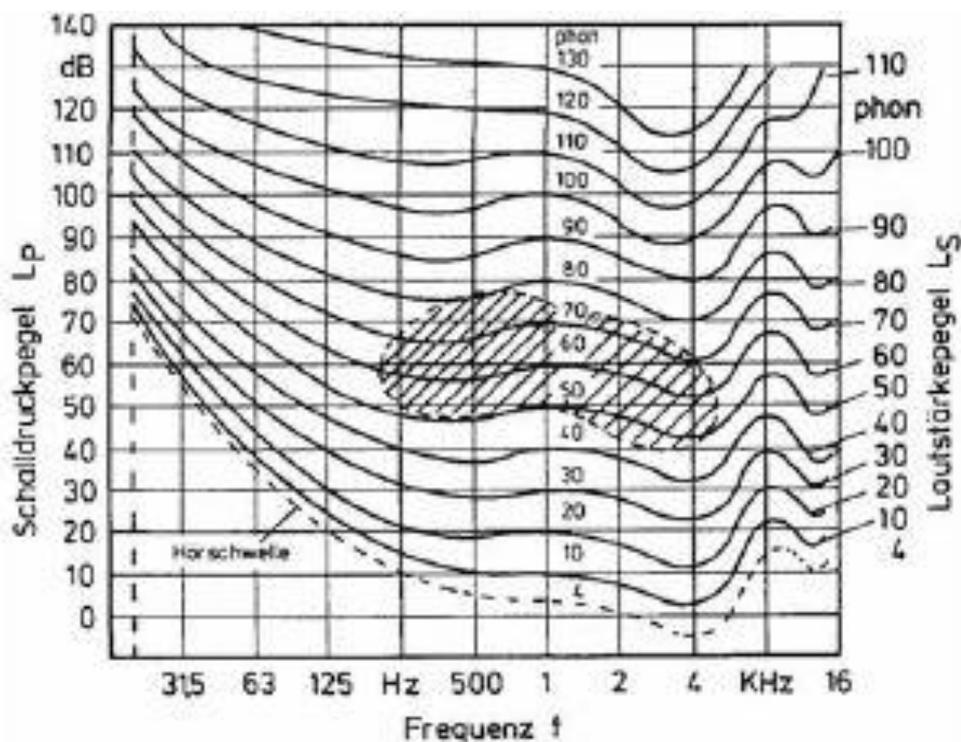


Abbildung 5: Kurven gleicher Lautstärke (schraffierter Bereich: menschliche Sprache)²⁰

Das beschriebene Phänomen steht in enger Verbindung mit den herkömmlichen Methoden der Lautstärkemessung. In der Praxis gestalten sich Lautstärkemessungen jedoch schwierig, da die subjektive Bewertung von Schallereignissen schlecht in einem messtechnischen Verfahren dargestellt werden kann. Es wird eine objektive Methode benötigt, welche es erlaubt

¹⁹ vgl. Zwicker, 1982, S. 72-74

²⁰ Henn, Sinambari, & Fallen, 2008, S. 190

die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs darzustellen. Dies wird über so genannte „inverse Filter“ ermöglicht. Eine herkömmliche Schalldruckmessung kann über ein solches Filter mit entsprechender Filtercharakteristik ein Schallereignis nach der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Gehörs bewerten und ermöglicht somit eine Messung der Lautstärke. Der frequenzbewertete Schalldruckpegel wird jedoch nicht in *phon* angegeben, sondern in dB²¹. Alle sogenannten Frequenzbewertungsfilter sind genormt. Sie stellen annähernd den inversen Kurvenverlauf stark vereinfachter Isophone (Kurven gleicher Lautstärke) dar. Es sind drei Filter gebräuchlich; das A-Filter (in dB(A)), das B-Filter (in dB(B)) und das C-Filter (in dB(C)). Das A-Filter entspricht den phon-Kurven im Pegelbereich bis 30 phon, das B-Filter entspricht dem mittleren Bereich von 30-60 phon und das C-Filter entspricht dem hohen Schallpegelbereich über 60 phon. Die A-Bewertung ist im Bereich der Messtechnik zur Lautstärkebestimmung am gebräuchlichsten. Von ihr wird unter anderem im Bereich der Fahrzeugakustik häufig Gebrauch gemacht. Das A-Filter schwächt im tiefen und hohen Frequenzbereich den Schallpegel ab. Es verläuft dabei annähernd invers zur 20 phon-Kurve. Durch diese Frequenzbewertung ist das Messverfahren somit an den Frequenzgang des Ohres angeglichen²².

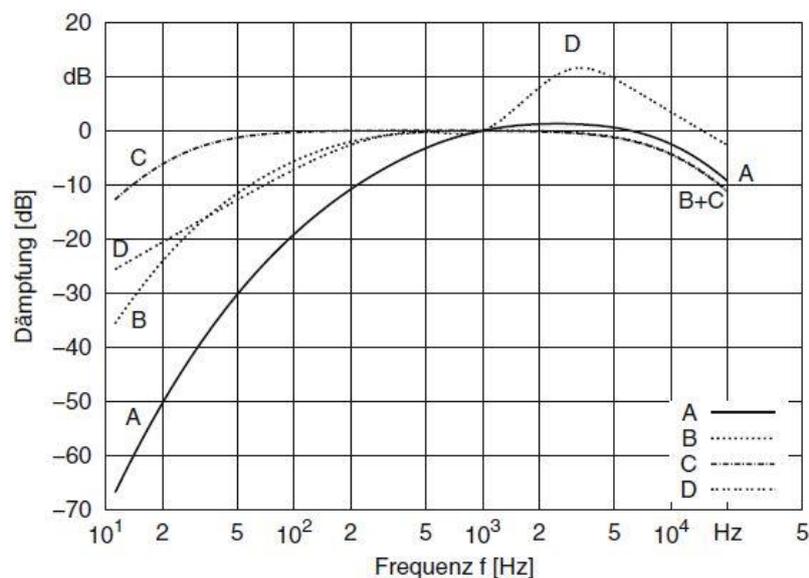


Abbildung 6: A-, B-, C-, D-Filterkurven (D-Bewertung nicht relevant)²³

²¹ vgl. Lerch, Sessler, & Wolf, 2009, S. 195

²² vgl. Ellermeier & Hellbrück, 2008, S. 56

²³ Möser, 2012, S. 12

2.3 Soundgestaltung im Automobilbereich

Im folgenden Kapitel erfolgt ein Einblick in die Möglichkeiten der Klanggestaltung im Automobilbereich. Da die Möglichkeiten der Beeinflussung des Fahrzeugklangs recht umfassend sind, wird nachfolgend ein kurzer Einblick in die passiven Maßnahmen gewährt. Zudem werden die wichtigsten Möglichkeiten im Hinblick auf aktive Außen- und Innengeräuschgestaltung aufgezeigt. Außerdem werden Beispiele von Technologien präsentiert, die bereits in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommen.

Um ein generelles Verständnis für die bereits in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommenden Technologien zu entwickeln, muss zunächst geklärt werden, um was es sich bei einer passiv- bzw. einer aktivakustischen Maßnahme handelt. Über passivakustische Maßnahmen wird der Klangcharakter eines bestimmten Fahrzeugbauteils, beispielsweise der Abgasanlage, über passive Akustik Elemente gezielt verändert oder eliminiert. Zu diesen passiven Akustikbauteilen zählen Dämmungselemente wie Dämmwolle oder Akustikschaumstoff, Resonatoren oder Schalldämpfer oder Absorptionselemente. Passive Maßnahmen dienen in erster Linie dazu die Weiterleitung von Schwingungen und die Abstrahlung von Geräuschen zu verhindern. Über aktivakustische Maßnahmen wird, mit Hilfe aktiver Systeme wie Soundgeneratoren in Kombination mit Lautsprechern, der akustische Gesamteindruck eines Fahrzeugs sowohl im Innenraum als auch im Außenbereich gezielt beeinflusst. Hierbei ist es möglich sowohl Störschallpegel auszulöschen, sowie den Geräuschkomfort mittels Soundgestaltung aktiv zu verändern.

2.3.1 Passive Maßnahmen

Passive akustische Maßnahmen kommen einerseits bei den sich in Festkörpern ausbreitenden Körperschallphänomenen zum Einsatz und andererseits bei Schall, der sich durch die Luft ausbreitet. Da sich die gezielte Beeinflussung der Klangkulisse eines Fahrzeugs durch passive Maßnahmen hauptsächlich im Fahrzeuginnenraum niederschlägt und somit direkt vom Fahrer wahrgenommen werden kann, werden im Folgenden ausschließlich einige Beispiele für Luftschallmaßnahmen behandelt.

Seit Anfang der 1960er-Jahre beschäftigt sich die Bauteilentwicklung mit der gezielten Beeinflussung der Fahrzeugakustik. Anfangs waren die Lärminderungsmaßnahmen nur in Oberklassefahrzeugen üblich. Heute sind diese selbst in Fahrzeugen günstigeren Preissegmenten vorzufinden. Spezielle Zulieferfirmen werden frühzeitig in den Entwicklungsprozess

der Fahrzeuge mit einbezogen um Akustikbauteile zur passiven Lärminderung den Vorgaben entsprechend entwickeln oder im Hinblick auf Kosten, Gewicht und Leistungsfähigkeit zu optimieren. Im Gegensatz zu aktiven Maßnahmen (siehe *Kapitel 2.3.2*), werden bei passiven Maßnahmen spezielle Bauteile nach den physikalischen Prinzipien der Dämmung, Dämpfung oder Absorption an entsprechenden Übertragungswegen des Fahrzeugs (z.B. Stirnwand zwischen Innenraum und Motorraum) eingesetzt. Die Geräuschkulisse am Fahrzeugs setzt sich aus mehreren Geräuschquellen zusammen. Die Wichtigsten sind hierbei das Antriebsgeräusch, Windgeräusche, Reifenabrollgeräusche und Abgasanlagengeräusche. Durch die von Fahrzeug zu Fahrzeug variierenden Einbau- und Platzverhältnisse, entstehen immer unterschiedliche Übertragungswege zwischen Geräuschquelle und Empfänger. Zudem unterscheiden sich entsprechende Geräusche immer in Pegel und Frequenz. Dies hat zur Folge, dass es keine einheitliche Entwicklungslösung für passive Bauteile gibt. Jede Randbedingung erfordert eine passende Lösung. Bei passiven Bauteilen wird in quellennahe Bauteile (nahe an der Geräuschquelle) und quellenferne Bauteile (Entfernung zur Geräuschquelle) unterschieden²⁴.

Um eine optimale Wirkung zu erreichen, werden quellennahe Bauteile sehr nah an der Geräuschquelle angebracht. Dies ermöglicht eine kleine und leichte Dimensionierung der Bauteile. Zumeist werden Vlies-oder Schaumstoffabsorber als quellennahe Bauteile verwendet. Direkt am Karosserieblech verbaut, verstärkt sich ihre Wirkungsweise. Beim physikalischen Prinzip der Absorption dringen Schallwellen in das poröse Material ein. Die Schallenergie wird hierbei durch Umwandlung in Wärme vermindert. Hat die Schallwelle das poröse Material durchlaufen, wird sie an der schallharten Rückwand reflektiert und durchläuft das Material erneut. Die Wirksamkeit des Absorbers wird dadurch verdoppelt (siehe Abbildung). Je nach Beschaffenheit des verwendeten Materials, können bestimmte Frequenzbereiche gezielt abgeschwächt werden. Hierbei gilt; je dünner der Absorber, desto geringer ist die tieffrequente Absorption. Typische Beispiele für quellennahe Absorber sind beispielsweise die Zylinderkopfabdeckung oder der Frontklappenabsorber. Als Absorbermaterialien werden Polyurethan-Schaumstoffe, Mischfaservliese und Mineralwolle verwendet. Diese Bauteile verhindern ein vordringen der dominanten Geräusche aus dem Motorraum in den Innenraum des Fahrzeugs. Allgemein lässt sich sagen, dass die Luftschallbedämpfung immer größer wird, je mehr Absorber im Motorraum verwendet werden²⁵. Neue Entwicklungstrends setzen mittlerweile auf eine thermodynamische Kapselung, welche den Motor komplett umschließt

²⁴ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 466-467

²⁵ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 467-468

(siehe Abbildung). Die Kapselung besteht aus wärmeisolierendem und schallabsorbierendem Material. Durch die vollständige Motorkapselung können somit andere Passivmaßnahmen gegebenenfalls entfallen²⁶.

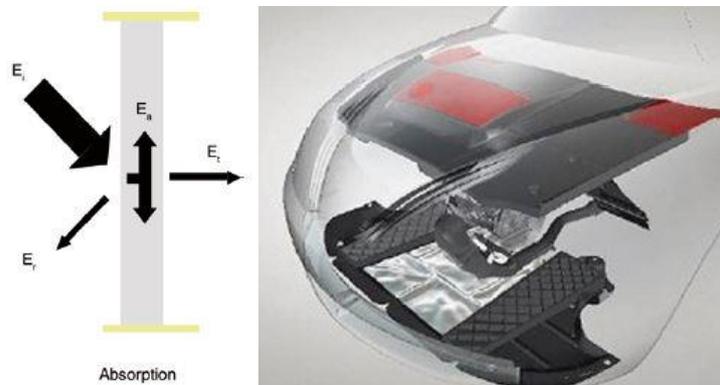


Abbildung 7: Prinzip Absorption²⁷ (L) und thermoakustische Motorkapselung²⁸ (R)

Die wichtigsten quellenfernen Bauteile sind die Stirwandisolation (Stirnwand trennt Motorraum von Fahrerkabine) sowie Decken- und Bodenverkleidung. Diese Bauteile funktionieren nach zwei Wirkungsprinzipien; dem mehrschichtigen Absorber oder einem Isolationssystem (Feder-Masse-System)²⁹. Aus physikalischer Sicht, ergibt sich der Isolationskoeffizient aus dem Verhältnis von durchtretender zu einfallender Energie (Reflektion). Bei einschaligen Isolationssystemen weist die einschalige Wand einen frequenzabhängigen Dämmungsverlauf auf. Im unteren Frequenzbereich bestimmt die Steifigkeit der Wandschale die Dämmung. Darauf folgt ein Bereich in dem die Dämmung von der Resonanz der Wandschale abhängt. Im darauffolgenden Bereich bestimmt die Masse der Wandschale den Dämmungsverlauf. Dieser steigt dort mit 6 dB/Oktave bis zur Koinzidenzfrequenz an. Ab dieser Frequenz, bei der die Wellenlänge des Luftschalls gerade derjenigen der Biegewelle des Bauteils entspricht, steigt der Dämmungsverlauf mit bis zu 10 dB/Oktave, bei doppelwandigen Systemen sogar bis zu 18 dB/Oktave, an. Aus diesem Grund bestehen Isolationsbauteile ausschließlich aus doppelwandigen Systemen³⁰. Die Bauteildicke der Stirnwand beträgt an ihrer dicksten Stelle maximal 35 mm. Um das Feder-Masse-Prinzip richtig ausnutzen zu können, wird die Stirnwand aus Schwerfolie aufgebaut, welche mit weichem, federndem Material aufgeschäumt wird. Der Schaum sollte hierbei möglichst weich und die Schwerfolie möglichst biegeweich sein, um die Resonanzfrequenz des Systems so weit wie möglich abzusen-

²⁶ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 470

²⁷ Pfäfflin, et al., 2010, S. 480

²⁸ Pfäfflin, et al., 2010, S. 470

²⁹ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 473-474

³⁰ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 480-481

ken, da erst oberhalb dieser die volle Wirkung des Systems erzielt werden kann. Andere quellenferne Bauteile sind aus mehrschichten Absorbern aufgebaut. Zu ihnen zählen beispielsweise der Dachhimmel oder die Bodenverkleidung. Sie bestehen zumeist aus porösen Vliesen oder Leichtbauschäumen und wirken in mittleren und hohen Frequenzbereichen schallschluckend, was eine angenehme Innenraumakustik zur Folge hat³¹.

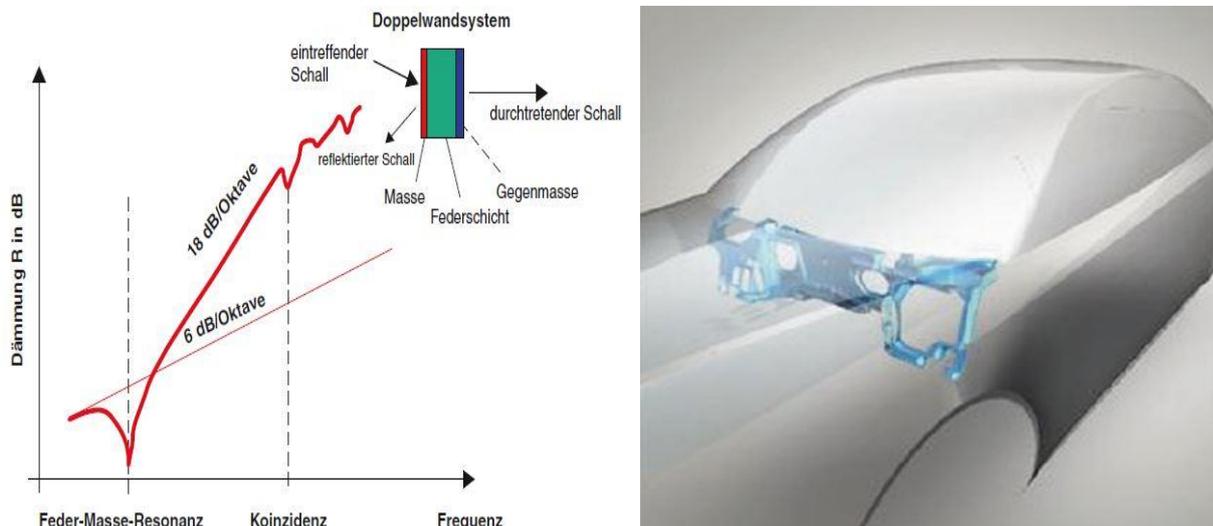


Abbildung 8: Dämmungsverlauf Doppelwand³² (L) und Stirnwandisolation³³ (R)

2.3.2 Aktive Maßnahmen

Aktive Systeme kommen vor allem im Bereich der Innenraumakustik und zur Beeinflussung des Abgasmündungsgeräusches zum Einsatz. Das Abgasmündungsgeräusch beeinflusst wesentlich den akustischen Gesamteindruck eines Fahrzeugs, sowohl im Fahrzeugäußeren als auch im -inneren. Die Entwickler von Abgasanlagen beschäftigen sich eingehend mit der Thematik, wie ohne große Pegelerhöhung, über gezieltes Sounddesign und Hörversuche, ein besonderer Klangeindruck des Gesamtfahrzeugs entstehen kann. Die besondere Herausforderung ist hierbei die variierende Klangvorstellung je nach Käufergruppe und Marktsegment³⁴. Die immer kleiner werdende Dimensionierung von Motoren lässt häufig den Klangcharakter ihrer Vorgängermodelle vermissen. Durch aktive Systeme in der Abgasanlage ist man jedoch in der Lage Schall zu dämpfen, Mündungsgeräusche zu verstärken und Störgeräusche zu beseitigen. Die Soundgestaltung erfolgt hierbei über Software und ist daher nicht bauteilabhängig. Dies spart Kosten und zudem ist solche Software schnell abänderbar. Der gestaltete Sound muss den Gesamteindruck des Fahrzeugs untermalen und dem Fahrer ein

³¹ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 474-476

³² Pfäfflin, et al., 2010, S. 482

³³ Pfäfflin, et al., 2010, S. 473

³⁴ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 492

Gefühl von guter Gesamtqualität und Sicherheit vermitteln aber muss auch eine Rückmeldung über die aktuelle Fahrsituation liefern. Die aktive Beeinflussung des Schalls wird durch elektromagnetische Aktoren ermöglicht. Nachdem alle Störeinflüsse beseitigt sind und der Geräuschpegel durch entsprechende Maßnahmen (Schalldämpfer, Gegenschall) reduziert wurde, kann die aktive Klangentwicklung (Active Sound Design, ASD) erfolgen. Die Beseitigung der Störeinflüsse erfolgt bei Dieselmotoren durch standartmäßig verbauten Partikelfilter, bei Ottomotoren durch aktive Gegenschallsynthese des Systems. Hierbei wird über einen Sensor, welcher in Echtzeit den Störschall analysiert, ein gegenphasiges Antischallsignal erzeugt, welches durch Phasenauslöschung den Störschall absenkt (Active Sound Cancellation, ANC). Ein Beispiel für ein solches Active-Sound-System, welches bereits in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommt, wurde von der Firma Eberspächer entwickelt. Das Basisdesign des Systems wird je nach Kundenwunsch auf ein entsprechendes Fahrzeug angepasst. Der elektromagnetische Aktor ist hierbei mit leistungsstarken Lautsprechern ausgestattet und wird über ein Anschlussrohr direkt mit dem Abgasstrang verbunden. Der generierte Schall wird direkt in den Hauptstrang der Abgasanlage eingespeist. Der Aktor wird über eine Steuereinheit angesteuert (Active Silence Control Unit, ASCU). Die ANC-oder ASD-Algorithmen werden in einem Microcontroller, welcher auf Motordrehzahl und Motorlast vom Motorsteuergerät reagiert, berechnet und in Form akustischer Signale über eine Verstärkerendstufe zum Aktor geführt. Das System kann sich demnach dynamisch der Fahrsituation anpassen³⁵.

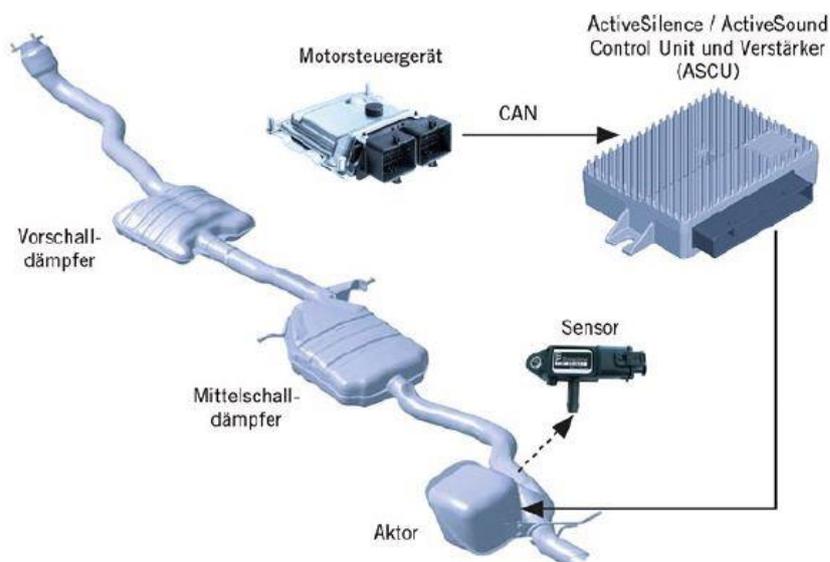


Abbildung 9: Aufbau eines Active-Sound-Systems mit seinen Komponenten³⁶

³⁵ vgl. Krüger, Pommerer, & Conrath, 2013, S. 549-552

³⁶ Krüger, Pommerer, & Conrath, 2013, S. 550

Das System hat sich in der Praxis bereits bewährt. Bei einem 4-Zylinder Benzinmotor sind beispielsweise die zweite, vierte und sechste Motorordnung dominant. Motorordnungen entstehen durch Kolbenausgleichsbewegungen im Motor und machen sich je nach Zylinderanzahl akustisch unterschiedlich bemerkbar. Für einen 4-Zylinder Ottomotor ist die charakteristische Motorordnung (MO) wie folgt definiert:

$$MO = \frac{n}{2}$$

Die Anzahl der Zylinder ist hierbei n . Bei einem 4-Zylinder-Viertaktmotor ist demnach die 2. Ordnung und deren Vielfache (4/6/8) charakteristisch. Die zugeordnete Frequenz lässt sich durch

$$f = n * MO$$

errechnen. Bei aktiviertem ANC werden diese Hauptordnungen um bis zu 8 dB(A) gedämpft. Bei aktiviertem ASD können die dominanten Motorordnungen um bis zu 2 dB(A) verstärkt werden. Auch im Innenraum sind ANC und ASD deutlich wahrnehmbar.

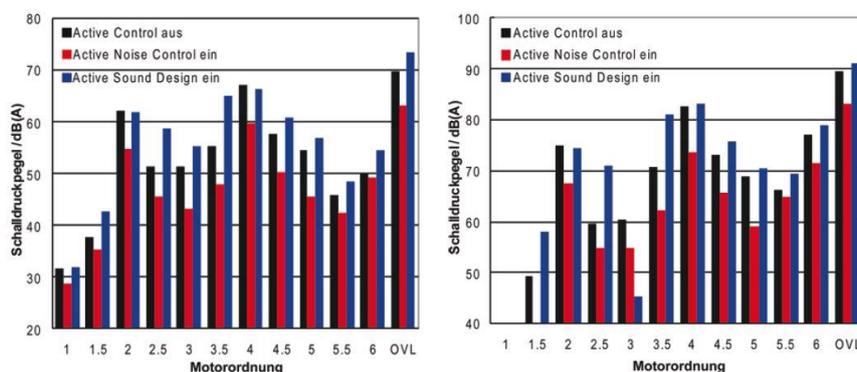


Abbildung 10: Schalldruckpegel an der Abgasmündung (L) und Innenraum (R)³⁷

Bei Dieselmotoren gestaltet sich das Sounddesign deutlich schwieriger, da der standartmäßig verbaute Dieselpartikelfilter die klanglichen Eigenschaften der Dieselmotoren unterdrückt. Daher muss der synthetische Sound an den Charakter der Dieselmotoren angeglichen werden. Dies gelingt in der Praxis gut. Das aktive System ist beispielsweise in der Lage, bei einem 6-Zylinder Dieselmotor die dominanten Motorordnungen (drei, sechs, neun) deutlich anzuheben³⁸.

³⁷ Pfäfflin, et al., 2010, S. 494

³⁸ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 493-495

Auch die Akustik im Fahrzeuginnenraum kann über aktive Systeme beeinflusst werden. Die hierbei nötige Hardware ist in Form des Infotainment-Systems (Lautsprecher und Verstärkerstufen) größtenteils in den allermeisten Fahrzeugen vorhanden. Die Schallbeeinflussung ist im Fahrzeuginnenraum nur bei hinreichend tiefen Frequenzen möglich, da bei zu hohen Frequenzen, durch sich lokal ausbildende Raummoden, Schallschwankungen entstehen würden. Die Schallerfassung über Mikrofone und die Schallwiedergabe über Lautsprecher würden hierbei problematisch werden. Eine Schalldruckminderung am Fahrerohr würde beispielsweise eine Schalldruckerhöhung am Beifahrerohr verursachen. Da die erste Eigenfrequenz der Fahrerkabine zumeist unter 100 Hz liegt, kann über ein aktives System nur ein bestimmter tieffrequenter Bereich in Hinblick auf Pegelminderung beeinflusst werden. Bei einem Aktiv-System zur Beeinflussung der Innenraumakustik wird über ein Mikrofon im Innenraum des Fahrzeugs ein Momentansignal der Geräuschkulisse im Innenraum eingefangen. Über dieses Ist-Signal wird in Abhängigkeit von Parametern wie Drehzahl und Motorlast ein gegenphasiges Zielsignal berechnet, welches wiederum über die Verstärkerstufe und die Lautsprecher des Infotainment-Systems zurück in die Fahrerkabine eingespeist wird. Unangenehm tiefe Motorordnungen können um bis zu 15 dB(A) gemindert werden. Nach Bedarf können bestimmte Motorordnungen in Hinblick auf Sounddesign auch verstärkt werden. Aktive Systeme an der Abgasanlage und aktive Systeme zur Innenraumbeschallung können kombiniert werden um eine zielgerichtete Gesamtfahrzeugakustik zu ermöglichen³⁹. In der Praxis wird beispielsweise das Active Sound Management-System (ASM) der Firma Bose eingesetzt. Das System umfasst in seiner Grundform vier Mikrofone, die Türlautsprecher sowie ein Bassmodul in der Reserveradmulde. Eine externe Steuereinheit (ECU) generiert durch den ASM-Algorithmus unter Berücksichtigung von Lastmoment und Drehzahl des Motors ein Signal. Dieses Signal wird über Endstufe und Lautsprecher zurück in den Innenraum geleitet. Das System ermöglicht beispielsweise am Fahrerplatz im Frequenzbereich zwischen 2000 Hz und 3000 Hz bei einem 4-Zylinder Dieselmotor eine Abschwächung der dominanten Motorordnung um bis zu 10 dB(A). Das System ist zudem in der Lage speziell designte Klangprofile wiederzugeben, um einen bestimmten Klangcharakter eines Motors zu unterstützen. Der Algorithmus verstärkt in diesem Fall die höheren Motorordnungen um den Klangcharakter dynamisch aggressiv zu gestalten. Eine Verstärkung der niedrigen Ordnungen würde ein ungewolltes tieffrequentes Brummen verursachen. Zudem ist man im Entwicklungspro-

³⁹ vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 496-497

zess eines Klangprofils in der Lage, den Klang in Echtzeit über spezielle Software im Fahrzeuginnenraum anzupassen. Dies ermöglicht eine zielgerichtete Klangentwicklung speziell nach Kundenwunsch⁴⁰.

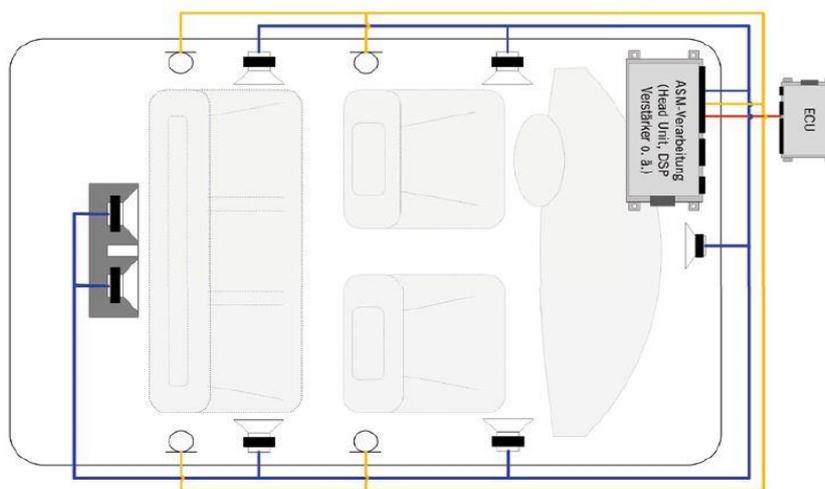


Abbildung 11: Systemlayout des ASM-Systems von BOSE⁴¹

2.3.3 Aktiv erzeugtes Fahrzeugaußengeräusch bei Elektrofahrzeugen

Das fehlende Verbrennungsgeräusch bei Elektrofahrzeugen stellt die NVH-Entwicklung vor neue Herausforderungen. Elektrofahrzeuge sind daher vor allem im niedrigen Geschwindigkeitsbereich kaum wahrnehmbar. Dies stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko für andere Verkehrsteilnehmer, speziell Fußgänger dar. Vor diesem Hintergrund treten ab 2019 Gesetze in Kraft, die Sound für Elektrofahrzeuge in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich voraussetzen. Vor allem für sportliche Elektrofahrzeuge stellt die fehlende Soundkomponente einen erheblichen Verkaufsnachteil dar. Die Forschungsabteilungen großer Automobilhersteller beschäftigen sich daher mit den Möglichkeiten der synthetischen Erzeugung von Motorengeräuschen und der Entwicklung von Soundgeneratoren, um diese über Lautsprecher in den Außenbereich und nach Bedarf in den Fahrzeuginnenraum abzustrahlen. Der Sound soll sich hierbei in Abhängigkeit von Parametern wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung dynamisch verändern⁴². Verschiedene Hersteller wie Toyota, BMW oder Tesla bieten Elektrofahrzeuge bereits mit solchen Soundgeneratoren an. Beispielsweise beim Modell Prius von Toyota wird ein Soundgenerator bereits seit 2010 gegen einen Aufpreis von 120 € verbaut. Dieser erzeugt jedoch lediglich ein Warngeräusch in Form eines dezenten Brummens⁴³. Jeder der

⁴⁰ vgl. Ahrens, Fox, & Feng, 2014, S. 41-45

⁴¹ Ahrens, Fox, & Feng, 2014, S. 41

⁴² vgl. Pfäfflin, et al., 2010, S. 499

⁴³ vgl. Pander, 2010

besagten Hersteller setzt hierbei auf eigene Technologien. Bisher hat sich noch kein Serienstandard von Soundgeneratoren für Elektrofahrzeuge auf dem Markt etabliert. Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass der Soundgestaltung in diesem Bereich der Fahrzeugakustik keinerlei Grenzen gesetzt sind, bietet diese Thematik einen optimalen Ansatz für die Erstellung dieser Abschlussarbeit.

2.4 Wesentliche Geräuschquellen eines Fahrzeugs

Um für das Recording eines Fahrzeugs bestens vorbereitet zu sein, muss im Vorfeld geklärt werden, welche Geräuschquellen eines Automobils entscheidend zum Gesamtklang des Fahrzeugs beitragen. Dies macht die Auswahl der entsprechenden Mikrofone sowie deren Positionierung am Fahrzeug im Vorfeld des Aufnahmeprozesses wesentlich einfacher. Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Geräuschquellen eines Fahrzeugs, welche für eine audioteknische Aufnahme relevant sind, aufgeführt.

Eine häufig übersehene, aber dennoch wichtige Geräuschquelle am Fahrzeug ist die so genannte Ansaugung. Motoren benötigen, wie der Mensch auch, Frischluft um reibungslos zu funktionieren. Das Ansauggeräusch entsteht hierbei durch einen Luftstrom, der durch einen schmalen Durchgang strömt, ähnliche wie bei einem Blechblasinstrument⁴⁴. Eine herkömmliche Ansauganlage besteht aus einem Rohluftkanal, einem Luftfilter, einem Reinluftkanal und einem Saugmodul, welches die Luft auf die verschiedenen Zylinder verteilt. Sie befindet sich meistens im vorderen Teil des Fahrzeugs, um dem Motor möglichst kühle Luft zuführen zu können. Der Schall aus der Ansaugöffnung wird als Mündungsschall bezeichnet. Dieser trägt maßgeblich zur Innenraumakustik und zum Außengeräusch bei. Aus klanglicher Sicht, verstärkt das Ansauggeräusch die Hauptordnungen des Motors⁴⁵. Je nach geometrischer Auslegung und Bauart der Ansauganlage entsteht ein rauer Klang, welcher vor allem bei sportlichen Fahrzeugen erwünscht ist. Dieses so genannte Strömungsrauschen setzt sich aus breitbandigen, hochfrequenten Rauschanteilen im Bereich zwischen 6 kHz und 10 KHz zusammen⁴⁶.

Das Hauptantriebsgeräusch wird durch den Verbrennungsmotor und seine zugehörigen Komponenten verursacht. Die Hauptgeräuschquelle bilden hierbei die Ventile des Motors und der Turbolader. Das Ventiltriebgeräusch entsteht durch das Einströmen der Luft und des

⁴⁴ vgl. Hermes, 2014

⁴⁵ vgl. Engel, et al., 2010, S. 228-229

⁴⁶ vgl. Engel, et al., 2010, S. 232-233

Benzins in den Zylinder. Das Einlassventil öffnet und schließt sich dabei in kurzen Abständen. Dabei entsteht ein bestimmtes Geräusch. Der einzelne Mechanismus des Öffnens und des Schließens ist lediglich ein kurzes, breitbandiges Ereignis⁴⁷. Im Leerlauf sind die einzelnen Ventiltriebgeräusche vom Ohr noch sehr gut aufzulösen. Sie machen sich als so genanntes Tickern bemerkbar. Ab einer Drehzahl von ca. 3000 Umdrehungen pro Minute wird dieses Tickern zu einem breitbandigen Rauschen. Die Ventiltriebgeräusche sind die dominante Schallquelle für das mechanische Geräusch eines Verbrennungsmotors⁴⁸. Eine weitere Komponente des Motors, welche das Klangbild des Gesamtfahrzeugs beeinflusst, ist der Turbolader. Turbolader verwenden Kompressoren um mehr Luft in die Zylinder zu pumpen um deren Bewegungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Dies führt zu einer Leistungssteigerung⁴⁹. Das Turboladergeräusch setzt sich aus eine Vielzahl an tonalen und strömungsbedingten Komponenten zusammen. Es macht sich meist als hochfrequentes Heulen oder Pfeifen bemerkbar, ist jedoch abhängig von der jeweiligen Fahrsituation⁵⁰.

Eine weitere dominante Schallquelle bildet das Getriebe mit seinen Komponenten. Bei einem Verbrennerfahrzeug sind die Kolben über die Pleuelstange mit der Kurbelwelle verbunden und diese schließlich mit dem Getriebe. Das Getriebe überträgt die Kraft des Motors auf die Antriebswelle, welche wiederum die Räder antreibt. Das Getriebe ist eine angenehme, vorhersehbare Geräuschquelle. Es verursacht tonale Geräusche, welche sich als Heulen bzw. Pfeifen oder Rasseln bzw. Klappern manifestieren. Das Getriebegeräusch ist, gleich dem Ventiltriebgeräusch, das Ergebnis sehr schnell erfolgender Einzelereignisse, welche aufsummiert als konstanter Ton wahrgenommen werden. Der Klang des Getriebes macht ca. 30 Prozent des Antriebsgeräusches aus. Die entstehenden Geräuschphänomene sind von der Drehzahl, sowie der Rotationsgeschwindigkeit der einzelnen Zahnräder des Getriebes abhängig⁵¹.

Die wohl dominanteste Schallquelle des Gesamtfahrzeugs bildet die Abgasanlage. Je nach Dimensionierung des Motors und der Anzahl der Zylinder ergibt sich ein anderes Verbrennungsgeräusch und somit ein anderes Klangbild der Abgasanlage. Das Abgasmündungsgeräusch ist bei den meisten Fahrzeugen im niederfrequenten Bereich angesiedelt. Abgasanlagen gibt es in vielerlei Bauformen. Je nach Bauform ergibt sich ein unterschiedlicher Klang. Zum Beispiel sorgt eine Abgasanlage, die lediglich aus einem Rohr besteht, für ein extrem lautes Mündungsgeräusch, während eine Anlage mit Schalldämpfer und Resonatoren dieses

⁴⁷ vgl. Hermes, 2014

⁴⁸ vgl. Engel, et al., 2010, S. 208

⁴⁹ vgl. Hermes, 2014

⁵⁰ vgl. Engel, et al., 2010, S. 211-212

⁵¹ vgl. Engel, et al., 2010, S. 220

extrem abdämpft. Je nach Fahrzeugtyp werden andere Abgasanlagen verwendet. Bei Sportwagen besteht zudem häufig die Möglichkeit durch so genannte Drosselklappen den Abgasstrom durch zwei oder nur ein Rohr zu leiten, was den Klangcharakter wesentlich beeinflusst⁵². Beim Abgasmündungsgeräusch sind die impulsiven Abgasströme beim Verlassen ins Freie besonders charakteristisch. Sie werden als Mündungsschall bezeichnet. Beim Mündungsschall sind die Geräusche, die für die Motorordnungen relevant sind besonders dominant. Diese dominanten Geräusche liegen bei Benzinmotoren im Frequenzband zwischen 30 Hz und 800 Hz und bei Dieselmotoren zwischen 20 Hz und 600 Hz⁵³.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die für eine Tonaufnahme wichtigen Schallquellen des Außengeräusches aus Abgasanlage, Motormechanik und Ansaugung bestehen. Dies gilt es in den Aufnahmen zu berücksichtigen um die Klangkulisse eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor so genau wie möglich abzubilden.

2.5 Der CAN-Bus (Controller Area Network)

Die Steuerung von bestimmten Prozessabläufen in einem Kraftfahrzeug wird von so genannten Steuergeräten (engl. ECU = electronic control unit) übernommen. Die Kommunikation zwischen den Steuergeräten wird durch das so genannte CAN-Bus-Netzwerk ermöglicht. Das Controller Area Network, kurz CAN, findet seit Anfang der neunziger Jahre Verwendung in der Fahrzeugtechnik. Es vernetzt über einen zweiadrigen Kabelstrang verschiedene Steuergeräte miteinander, zum Beispiel die Motorsteuerung. Bei maximal 32 Teilnehmern beträgt die Übertragungsgeschwindigkeit zwischen 10 kBit/s und 10 Mbit/s bei einer maximalen Buslänge von 1000 Metern. Sämtliche Busteilnehmer können sowohl Daten und Informationen empfangen als auch senden. Immer wenn eine Nachricht versendet werden soll, wird der entsprechende CAN-Controller beauftragt und bringt die Nachricht auf den Weg sobald das Übertragungsmedium frei ist. Jeder Teilnehmer empfängt immer alle Nachrichten. Das Netzwerk ist zudem zur Fehlererkennung befähigt. Beschädigte Controller können erkannt und vom Netzwerk getrennt werden⁵⁴. Auf den beiden Adern des CAN-Busses werden Spannungspegel übertragen. Je nach Übertragungsgeschwindigkeit werden die Spannungspegel CAN_HIGH oder CAN_LOW verwendet. Eine dritte Ader, CAN_GND, ist optional. Als Steckverbindungen werden meist neunpolige Sub-D-Stecker verwendet⁵⁵. Über spezielle Interfaces

⁵² vgl. Hermes, 2014

⁵³ vgl. Engel, et al., 2010, S. 264

⁵⁴ vgl. Dudenbostel, Schneider, & Volk, 2011, S. 681

⁵⁵ vgl. CiA - CAN in Automation, 2016

ist man in der Lage, auf den CAN-Bus zuzugreifen, um spezifische Fahrzeugparameter auszulesen. Das Abgreifen von Parametern wie Drehzahl, Drehmoment oder Gaspedalstellung ermöglicht es, den generierten Sound aktiver Systeme dynamisch der entsprechenden Fahrsituation anzupassen.

3 Konzeption des neuen Soundgenerators

Der nachfolgende Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung bzw. der Neukonzeption des bestehenden Soundgenerators am Versuchsfahrzeug der GIGATRONIK GmbH. Zunächst erfolgt eine kurze Beschreibung des Versuchsfahrzeugs, bevor die Funktionsweise des alten Soundgenerators erklärt wird. Schwachstellen dieses Systems werden aufgezeigt und durch eine Neukonzeption beseitigt. Im Rahmen der Beschreibung der Neukonzeption des Soundgenerators wird die Verarbeitung der relevanten Daten und Parameter zur dynamischen Beeinflussung des Fahrzeugsounds, sowie der hardwarespezifische Umbau am Fahrzeug selbst beschrieben.

3.1 Beschreibung des Versuchsfahrzeugs

Bei dem von der Firma GIGATRONIK bereitgestellten Versuchsfahrzeug, handelt es sich um ein ehemaliges Quad mit Verbrennungsmotor der Firma Yamaha. Die Modellbezeichnung lautet Yamaha Grizzly 700. Bei einem Quad handelt es sich um ein kompaktes, vierrädriges Kraftfahrzeug. Charakteristisch für ein Quad ist die Sattelform wie bei einem Motorrad, sowie die Lenkung über eine Lenkstange. Im Rahmen verschiedener Projektarbeiten wurde das Quad von einem Verbrennungsmotor auf einen Elektroantrieb umgebaut. Das Fahrzeug ist ein straßenzugelassener Prototyp und dient der Firma als Anschauungsobjekt und zur Präsentation auf Messen. Das Quad besitzt einen komplett elektronischen Antriebsstrang. Jedes der vier Räder wird separat durch einen eigenen Motor mit eigener Kontrolleinheit (Power Stage) angetrieben. Die Motoren werden als permanenterregte Synchronmotoren bezeichnet. Die Energieversorgung der Power Stages und der Motoren erfolgt über vier Lithium-Ionen-Akkus mit einer Nennspannung von 48V. Bei einem Leergewicht von 310 kg ergibt sich eine Reichweite von ca. 65 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h. Über verschiedene Bedienelemente hat der Fahrer unterschiedliche Einstellmöglichkeiten bezüglich Gashebel, Fahrtrichtung, Fahrmodus oder Lichtanlage mit Blinkern und Scheinwerfern. Um weitere Technik am Quad verbauen zu können oder als simple Aufbewahrungsmöglichkeit für einen Helm oder ähnliches wurde hinter der Fahrerposition ein so genanntes Hardcase verbaut. Alle Steuereinheiten des Quads kommunizieren über den CAN-Bus miteinander. Verschiedene Zugangspunkte ermöglichen es, über spezielle Interfaces auf den CAN-Bus zuzugreifen, um verschiedene Parameter auszulesen⁵⁶.

⁵⁶ vgl. Kunz, 2013

3.2 Beschreibung und Funktionsweise des alten Soundgenerators

Im Rahmen einer Abschlussarbeit wurde in Kooperation mit der Firma GIGATRONIK bereits im Jahr 2015 ein Soundgenerator entwickelt. Die Funktionsweise und die dabei verwendete Hardware werden im Folgenden kurz beschrieben. Auf den Autor der Arbeit wird am Ende des Kapitels verwiesen.

Der Soundgenerator greift, wie viele bereits in Serienfahrzeugen verwendeten Systeme, zur Beeinflussung des Fahrzeugklangs, auf den CAN-Bus zu. Die verwendete Hardware besteht zunächst aus einem Vermittlungsgerät, einem Gateway, welches CAN-Nachrichten in MIDI-Signale wandeln kann. Die GIGABOX Gate FR Extended ist eine hausinterne Entwicklung. Zusätzlich kommen ein Computer zur Datenverarbeitung mit Hackintosh-Betriebssystem (PC, auf dessen Basis ein Mac OS X-Betriebssystem installiert ist) und ein darauf installierter Software-Synthesizer (*Steinberg HALION*) zum Einsatz. Um die 19V-Betriebsspannung für den Computer bereits zu stellen, wird ein DC/DC-Wandler (Gleichspannungs-Gleichspannungs-Wandler) verwendet. Das System umfasst zudem eine gewöhnliche Class D-Autoendstufe (*Ampire MBM 100.2*) mit zwei Cinch-Eingängen und zwei symmetrischen Lautsprecher-Ausgängen. Der zu erzeugende Sound wird über vier Lautsprecher, zwei Koaxiallautsprecher in einem geschlossenen Gehäuse (*MB Quart NKA 116*) in der Fahrzeugfront, plus zwei fest verbaute Breitbandlautsprecher (*Visaton FRS 10 WP*) im Hardcase auf Höhe des Fahrers, wiedergegeben. Alle Komponenten sind mit Klettklebeband im Hardcase befestigt. Die Verkabelung aller Komponenten erfolgt über einen, im Hardcase fest verbauten, Kompaktstecker.

Die Funktionsweise des Soundgenerators ergibt sich zunächst durch den Zugriff des CAN-MIDI-Gateways (GIGABOX) auf den CAN-Bus. Hierbei werden relevante CAN-Nachrichten gefiltert. Die gefilterten Kenngrößen erlauben es, in zwei Fahrzeugzuständen Sound zu generieren. Im Stand bzw. Leerlauf generiert die GIGABOX durch die Stellung des Daumengases ein MIDI-Signal, in Fahrt wird die Drehzahl als Eingangsgröße verwendet. Je nach verwendeter Variante zur Klangsynthese, passt der implementierte Algorithmus der GIGABOX das MIDI-Signal an. Das System umfasst verschiedene Soundpakete, die alle auf unterschiedliche Klangsynthese-Verfahren zurückgreifen. Der Sound eines Traktors ist hierbei am authentischsten. Dabei wird zur Klangsynthese die so genannte Sampling-Technik verwendet. Bei der Sampling-Technik generiert die GIGABOX ein MIDI-Signal, welches eine bestimmte Tonhöhe und Anschlagsstärke (Velocity) beinhaltet. Die Stellung des Daumengases oder die eingehende Drehzahl werden einem Ton mit bestimmter Tonhöhe und Anschlagsstärke zugeordnet. Über ein MIDI-Interface kann der Computer das generierte MIDI-Signal der GIGABOX weiterverarbeiten. Der darauf installierte Software-Synthesizer *HALION* ordnet, je

nach Tonhöhe und Anschlagsstärke, dieses MIDI-Signal einem so genannten Sample zu. In diesem Fall ist das Sample ein 10 Sekunden langes Audiofile in Form einer Tonaufnahme eines Traktor-Motors mit konstanter Drehzahl. Je nach eingehender Drehzahl (in Fahrt) oder veränderter Stellung des Daumengases (im Leerlauf) wird ein entsprechendes Sample abgespielt. Je niedriger die Tonhöhe des eingehenden MIDI-Signals ist, desto tiefer ist das entsprechende Drehzahl-sample. Die einzelnen Sounds werden als Loops (Endlosschleifen) wiedergegeben. Beim Wechseln auf das nächste Sample wird über eine bestimmte Kurve überblendet (gefadet), um einen sauberen Übergang zwischen den Samples verschiedener Drehzahlbereiche zu ermöglichen.

Die Tonaufnahmen am Traktor erfolgten lediglich im Stand bzw. im Leerlauf. Verschiedene Teilbereiche des Traktors wurden hierbei mikrofoniert, um ein ausgewogenes Klangbild zu erzeugen. Mehrere verschiedene Mikrofonmodelle bilden die wesentlichen Geräuschquellen wie Lüfter, Ventile oder Auspuff ab. Die Aufnahme erfolgte über ein herkömmliches Audio-interface. Die Drehzahl des Fahrzeugs wurde in Zehnerschritten erhöht, um das gesamte Drehzahlband so genau wie möglich darstellen zu können. Zudem wurden separat der Vorgang des Startens und des Stoppens des Traktors aufgenommen. Jeder der einzelnen Drehzahlbereiche wurde im Nachhinein in ein zehn Sekunden langes, separates Audiofile (Sample) geschnitten. Die einzelnen Signale wurden nicht klanglich bearbeitet, sondern lediglich zeitlich aufeinander verschoben und angepasst, um laufzeitbedingte Verzögerungen zu kompensieren. Die Ausgabe der Einzelsignale erfolgt schließlich über eine Stereo-Spur, wobei der Auspuffklang die Basis bildet, die Ventilgeräusche halb links bzw. halb rechts und die Lüftergeräusche hart links bzw. hart rechts im Stereobild verteilt wurden. Die fertig geschnittenen Samples können nun auf die 128 möglichen Tasten einer Velocity-Ebene in *HALION* verteilt werden. Sobald mehr als 128 Samples vorhanden sind, muss auf eine andere Velocity-Ebene ausgewichen werden, was eine Reduzierung des Lautstärkepegels gleichkommt (geringere Anschlagsstärke bedeutet geringeren Lautstärkepegel). Dieser Pegel müsste immer softwareintern kompensiert werden, weshalb es sich lohnt, nur eine ausreichende Anzahl an Soundsamples auf genau einer Velocity-Ebene zu verteilen.

HALION gibt schließlich ein digitales Signal aus, welches über die interne Soundkarte des Computers D/A gewandelt wird. Über ein 3,5 mm-Klinke auf 2-Stereo-Cinch-Stecker wird das Signal über die Soundkarte des Computers an die Verstärkerendstufe übertragen. Die vier parallel geschalteten Lautsprecher, zum einen in einem geschlossenen Gehäuse in der Fahrzeugfront und zum anderen auf Höhe des Fahrers im Hardcase, geben das Audiosignal

schließlich nach außen hin wieder. Das Stereo-Signal wird hierbei zu gleichen Teilen aus allen vier Lautsprechern wiedergegeben⁵⁷.

3.3 Aufzeigen und Bewertung der Schwachstellen des Soundgenerators

Das beschriebene System weißt im Hinblick auf eventuelle Serienanwendung, Bedienbarkeit und Erweiterbarkeit konzeptionelle Schwachstellen auf. Bevor ein neues System entwickelt werden kann, müssen diese Schwachstellen lokalisiert, analysiert und evaluiert werden. Basierend darauf kann ein neuer Soundgenerator konzeptioniert werden.

Mit Blick auf das vorgegebene Ziel der Firma, dass sich der Motorsound des Quads dynamisch der Fahrsituation anpassen soll, stellt die fehlende Lastdynamik die größte Schwachstelle des Systems dar. Damit ist gemeint, dass der generierte Motorsound nicht nur von der Drehzahl abhängig ist, sondern auch von der momentan anliegenden Motorlast. Im Leerlauf liegt keine Last am Motor an, in Fahrt ist diese abhängig vom anliegenden Drehmoment. Die Drehzahl, oder Umdrehungsfrequenz, ist eine mechanische Größe die bei Drehbewegungen die Häufigkeit der Umdrehungen angibt. Im Fall eines Kraftfahrzeugs gibt sie die Umdrehungsfrequenz der Kurbelwelle an. Das Drehmoment beschreibt die Drehwirkung einer Kraft auf einen Körper. Bei einem Verbrennungsmotor bestimmt das Drehmoment zusammen mit der Drehzahl die übertragene Leistung. Befindet sich ein Motor im Betriebszustand der Volllast, wird bei einer gegebenen Drehzahl das maximal mögliche Drehmoment bereitgestellt. Die gesamte zur Verfügung stehende Leistung des Motors wird auf einmal abgerufen. Der Motor verfügt über keinerlei Leistungsreserven mehr. Sobald durch Drosselung ein geringeres Drehmoment anliegt, spricht man von Teillast. Das Fahrgeräusch ist von der Motorlast abhängig. Beim Beschleunigen eines Fahrzeugs kommt durch die steigende Motorlast ein hörbarer Anteil an Motorgeräusch hinzu. Dieser Anteil wird bei Volllast pegelbestimmend und hebt sich deutlich vom Klang des Motors im Leerlauf oder Teillastbetrieb ab. Dieser Pegelsprung bei Volllast fügt dem Motorengeräusch eine subjektive Dynamikkomponente hinzu. Das Pegelverhalten im Lastmoment lässt sich aus der folgenden Abbildung ablesen.

⁵⁷ vgl. Haußmann, 2015

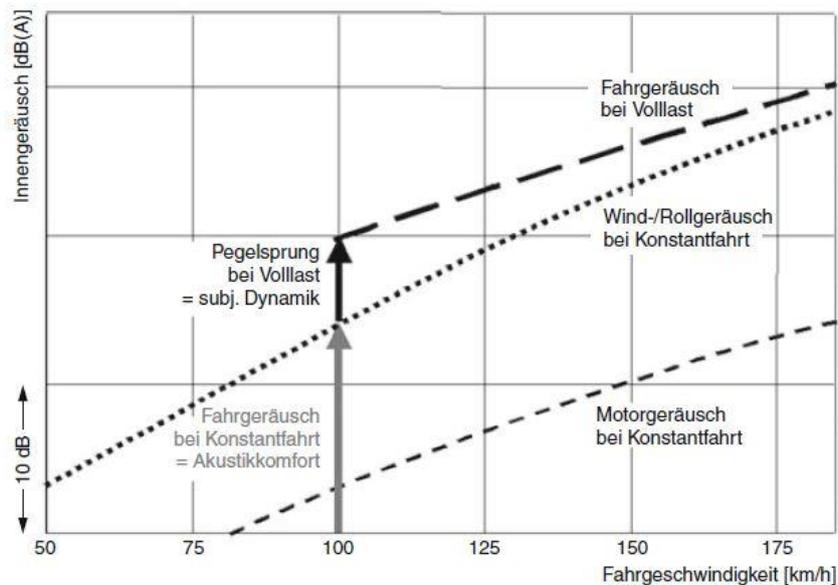


Abbildung 12: Pegelverhalten im Lastmoment ⁵⁸

Da die Drehzahl bisher die einzige Eingangsgröße im Fahrbetrieb darstellt und zudem durch die Software nur Samples angesteuert werden, die im Leerlauf eines Fahrzeugs aufgenommen wurden, ist das System durch Verwendung GIGABOX in Kombination mit einem Software-Synthesizer nicht in der Lage, ein dynamisches Lastverhalten des Motors klanglich darzustellen. Ebenfalls lässt sich die bisherige MIDI-Logik der GIGABOX in Kombination mit dem Software-Synthesizer *HALION* als durchaus abstrakt bezeichnen. Da das MIDI-Datenprotokoll für den Austausch musikalischer Steuerinformationen zwischen elektronischen Musikinstrumenten wie Keyboards oder Synthesizer entwickelt wurde, lässt sich sein Einsatz zur Steuerung von Motorsounds eines Fahrzeugs durchaus in Frage stellen. Da sich das Motorengeräusch mit steigender Drehzahl kontinuierlich erhöht, ist es schwierig dieses auf der Halbtonstruktur des Software-Samplers darzustellen. Diese Halbtonstruktur dient normalerweise der Tonhöhenänderung bei digitalen Musikinstrumenten. Das Sampling ist zudem mit einem großen Dateiaufwand verbunden. Für einen flüssigen Übergang zwischen den einzelnen Drehzahlbereichen, werden extrem viele Soundsamples benötigt. Die Differenz zwischen den einzelnen Bereichen muss hierbei möglichst klein gehalten werden. Im Optimalfall muss das gesamte Drehzahlband des Fahrzeugs, welches aufgenommen wird, in Einer-Schritten erhöht werden. Selbst in diesem Fall, würde für eine perfekte Auflösung zwischen den Samples eine Interpolation benötigt. Gleichzeitig erhöht sich der Arbeitsaufwand signifikant, der durch das Recording und Schneiden der Soundsamples entstehen würde. Ein Recording unter

⁵⁸ Guggenmos, 2011, S. 63

Volllast wäre durch die geforderten Umstände, also ein möglichst enges Abfahren und gleichzeitiges Aufnehmen der Drehzahlbereiche, nur auf einem akustisch optimierten Rollenprüfstand möglich, bei dem sich die Drehzahl und das Lastmoment extern regeln lässt. Eine Aufnahme im Fahrbetrieb wäre unmöglich. Daher muss softwareseitig eine Lösung gefunden werden, welche in der Lage ist, die Lastdynamik eines Motors zu simulieren, ressourcensparend arbeitet und den Datenaufwand, der durch das Sampling entsteht, in einer handhabbaren Größe hält. Man wäre dadurch gegebenenfalls in der Lage auf die MIDI-Wandlung zu verzichten.

Eine weitere Schwachstelle zeigt sich im Bereich des Abstrahlverhaltens der Lautsprecher des Soundgenerators. Bisher erfolgt die Wiedergabe durch zwei Lautsprecherpaare in der Fahrzeugfront und im Hardcase auf Höhe des Fahrers. Beide Lautsprecherpaare strahlen jeweils in Fahrtrichtung ab. Eine Lautsprecherkomponente mit einem Abstrahlverhalten entgegen der Fahrtrichtung fehlt. Dies erschwert die Wahrnehmung des synthetisierten Motorenklangs, sobald man sich hinter dem Fahrzeug befindet. Über einen zusätzlichen, nach hinten abstrahlenden Lautsprecher und über die Möglichkeit der diskreten Ansteuerung aller im Fahrzeug verbauten Lautsprecher, könnten sich alle wesentlichen Schallquellen eines Verbrennerfahrzeugs abbilden lassen. Somit würde ein homogenes Klangbild entstehen. Über das momentane Setup ist lediglich eine Stereo-Wiedergabe möglich. Zudem werden alle wesentlichen Schallquellen über ein Stereo-Audiofile wiedergegeben und nicht unterschiedlich auf die verschiedenen Lautsprecher verteilt.

Als weitere Schwachstelle lässt sich das Hackintosh-Betriebssystem, welches auf dem Computer zur Datenverarbeitung installiert ist, bezeichnen. Dieses bringt keine nennenswerten Vorteile mit sich. Neben dem Erlöschen der Garantie, verlangsamt sich die Boot-Zeit des gesamten Systems. Durch eine Rückkehr zum vorinstallierten, zuverlässigen Windows-System würde die Boot-Zeit des Systems wieder verkürzt, was vor allem im Hinblick auf Kundenpräsentationen und Messevorführungen ein enormer Vorteil wäre.

3.4 Neukonzeption des Soundgenerators

Auf Basis der aufgeführten Schwachstellen kann ein Konzept für die Weiterentwicklung des Soundgenerators erstellt werden. Hierbei werden möglichst viele Komponenten des alten Systems (vorhandene Lautsprecher, Endstufe, PC) weiterverwendet.

Der Hauptansatzpunkt der Neukonzeption des Soundgenerators muss die fehlende dynamische Klangregelung unter dem Einfluss der Motorlast sein. Nach eingehender Überlegung und Recherche wurde festgestellt, dass Software-Sampler, wie das bereits verwendete

HALION, für diesen Zweck ungeeignet sind. Arbeitsaufwand und Kosten würden durch das zusätzliche Sampling im Volllastbetrieb extrem ansteigen. Das Aufnehmen der benötigten Drehzahl-Zwischenschritte zur sauberen Überblendung der einzelnen Drehzahl-Samples wäre nur auf einem akustisch optimierten Rollenprüfstand durchführbar. Aus wirtschaftlicher Sicht (Zeitaufwand, Kostenaufwand) entfällt diese Möglichkeit. Daher muss eine Alternative zur Sampling-Software gesucht werden. Die im Bereich der Rennsimulations-Video-spiele verwendeten Audio Engines bieten hierbei einen potentiellen Lösungsansatz. Eine Audio Engine (*engl. engine = dt. Spielwerk*) ist ein spezielles Programmiergerüst, welches entsprechend dem Spielverlauf für die Steuerung der zugehörigen Audio-Dateien verantwortlich ist. Speziell in Rennsimulationsspielen spielt der Sound von Motoren eine entscheidende Rolle. Die Motorsounds müssen sich möglichst realistisch verhalten. Dies bedeutet, dass sie sich dynamisch an die durch das Spiel vorgegebene Fahrsituation anpassen und klanglich dementsprechend verhalten müssen. Über Sound Engines ist es möglich, jegliche Art von Sounddesign für beliebige Situationen in einem Videospiel wiederzugeben. Hierzu zählen zum Beispiel Dialoge, Musik oder Umgebungsgerausche. Auf dem Markt haben sich mehrere Möglichkeiten etabliert. Hierzu zählen primär *FMOD Studio* des Herstellers *Firelight Technologies* oder *Wwise* von *audiokinetic* (für einen genauen Vergleich beider Engines siehe Kersten, 2017). In vielen aktuellen Rennsimulationsspielen wie *Project Cars (Slightly Mad Studios)*, *Assetto Corsa (Kunos Simulazioni)* oder *Forza Horizon 3 (Playground Games)* kommt die Audio Engine *FMOD Studio* zum Einsatz. Das Spielekonzept von *Assetto Corsa* ermöglicht es, eigens entwickelten Content Dritter dem Spiel hinzuzufügen. Damit sind vor allem neue Strecken oder Fahrzeuge gemeint. Für diesen Zweck stellt der Entwickler extra ein so genanntes SDK (Software Development Kit) zur Verfügung. In diesem wird unter anderem genau beschrieben, wie das Sounddesign für ein komplettes Fahrzeug in *FMOD Studio* zu Stande kommt, sodass es im Spiel funktioniert. Im Folgenden wird dieses SDK als Hauptinformationsquelle verwendet.

Die Sound Engine *FMOD Studio* arbeitet eventbasiert. Das heißt, dass einzelne so genannte Events definiert werden können. Diese werden durch die Logik des Spiels angesteuert. Beispielsweise Schritte; ein vordefiniertes Schritt-Event wird jedes Mal aufs Neue angesteuert, sobald ein Spielecharakter läuft. Die Soundsamples in den einzelnen Events können hierbei sowohl auf einer Timeline (chronologischer zeitlicher Ablauf) als auch auf selbst definierten Parametern mit frei definierbarem Wertebereich angelegt werden. In *Assetto Corsa* werden zur dynamischen Beeinflussung des Motorsounds primär zwei Parameter verwendet; rpm-

Parameter (Drehzahl des Fahrzeugs) und throttle-Parameter (Gaspedalstellung des Fahrzeugs). Im rpm-Parameter werden die einzelnen Soundsamples des Motors angelegt. Hierbei werden Samples unterschieden, die einerseits unter Volllast (ONLOAD-Samples) und andererseits im Leerlauf (OFFLOAD-Samples) aufgenommen wurden. Innerhalb des rpm-Parameters werden die Samples auf separaten Spuren angelegt. Die einzelnen Soundsamples wurden für diesen Zweck immer nur in bestimmten Abständen des Drehzahlbandes aufgenommen. Die Soundsamples werden den entsprechenden Werten des rpm-Parameters zugeordnet. Die Interpolation zwischen den einzelnen Drehzahl-Samples erfolgt über einen software-internen Pitch-Algorithmus. Sobald die Tonhöhe des gepitchten Samples die Tonhöhe des nachfolgenden Samples erreicht hat, wird mittels eines Fades übergeblendet. Dadurch entstehen saubere Übergänge zwischen den einzelnen Samples (siehe Schaubild). Aufgrund des hierbei verwendeten Prinzips ist es möglich, Volllast-Samples in Fahrt aufzunehmen, da immer nur in bestimmten Abständen eine Aufnahme des Motors erfolgen muss und keine Zwischenschritte benötigt werden. Die klangliche Motordynamik kommt letztendlich durch eine im throttle-Parameter definierte Lautstärkeautomation zustande. Beide Spuren, OFFLOAD und ONLOAD, werden hierbei parallel wiedergegeben. Je nach anliegender Last erfolgt eine entsprechende Lautstärkeüberblendung. Gibt die Spielelogik beispielsweise den Betriebszustand der Volllast vor (komplett durchgetretenes Gaspedal), so reagiert die Audio Engine mit dem vollen Anheben der Lautstärke der ONLOAD-Samples und einem gleichzeitig gänzlichen Absenken der OFFLOAD-Samples. Sobald in den Betriebszustand der Teillast gewechselt wird, werden OFFLOAD- und ONLOAD-Samples in einem durch die Automation vorgegebenen Lautstärkeverhältnis wiedergegeben. Sobald keine Last anliegt (Leerlauf oder Konstantfahrt) werden nur die OFFLOAD-Samples wiedergegeben.

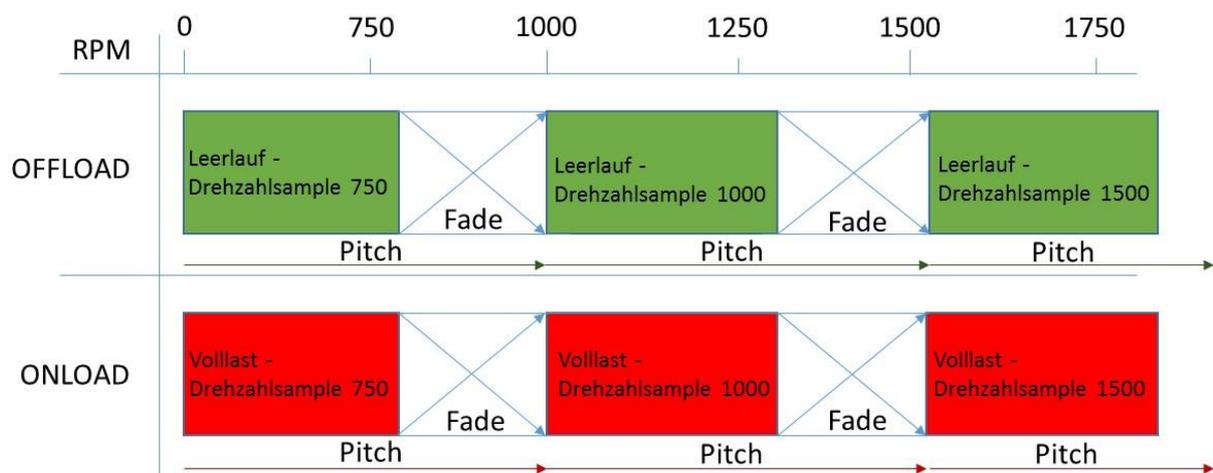


Abbildung 13: Anordnung der Samples im rpm-Parameter in FMOD-Studio



Abbildung 14: Lautstärkeverhältnisse der Samples je nach Betriebszustand

Die in den Rennsimulationsspielen verwendete Logik von *FMOD Studio* zur dynamischen Klangänderung von Motorsounds lässt sich mit geringen Abänderungen für den Zweck der Soundgenerierung am Quad verwenden. Ein Lastparameter (load) zur Steuerung des Lautstärkeverhältnisses kann aus den realen Kenngrößen Drehzahl und Drehmoment errechnet werden. Hierbei bietet sich an, diese relevanten Kenngrößen und Signale direkt vom CAN-Bus auszulesen, um anschließend von der Audio Engine verarbeitet zu werden. Es muss eine Programmstruktur entwickelt werden, die die relevanten Nachrichten zur Berechnung und Steuerung der Lastdynamik ausliest, verarbeitet und an die Audio-Engine weiterleitet. Die bisher verwendete GIGABOX und die darauf implementierte MIDI-Logik entfallen somit aus dem System. Über die frei definierbaren Parameter der Engine besteht zudem die Möglichkeit akustisches Feedback weiterer Elemente des Fahrzeugs (Blinker, Ladezustand des Akkus, Piepen bei Rückwärtsgang) zu ermöglichen. Die einzelnen Soundsamples sollen über Tonaufnahmen an Verbrennerfahrzeugen entstehen. Es sollen Soundpakete zweier Fahrzeuge mit unterschiedlichen Motoren entstehen. Der Aufnahmeprozess wird in *Kapitel 4* im Detail beschrieben. Des Weiteren ermöglicht die Engine eine diskrete Mehrkanalwiedergabe. Das heißt, dass verschiedene Geräuschquellen eines Verbrennerfahrzeugs auf verschiedene Lautsprecher des Systems verteilt werden können, wodurch ein homogener Gesamtklang eines Verbrennerfahrzeugs reproduzierbar wäre.

Das Auslesen der relevanten CAN-Nachrichten ist über spezielle Interfaces möglich. Die hausintern verwendete Hardware der Firma *Vector Informatik GmbH* erfüllt die gewünschten Voraussetzungen. Das kleinste verfügbare Interface, VN1610, wurde als am geeignetsten befunden. Es lässt sich über USB mit einem PC verbinden und über einen neunpoligen D-Sub-Stecker mit einer CAN-Bus Schnittstelle. Das Filtern und Auslesen der relevanten CAN-Nachrichten ist über eine, bereits in mehreren Projekten verwendete, Programmstruktur

möglich. Nach entsprechender Aufbereitung und Anpassung konnte die fertige Programmstruktur verwendet werden. Das Einbinden der Engine sowie die Verarbeitung der relevanten Can-Nachrichten zur Steuerung der Motordynamik muss in einer eigens entwickelten Programmstruktur erfolgen (genauere Informationen siehe Kersten, 2017). Für die diskrete Mehrkanalwiedergabe muss die Anzahl der Ausgangskanäle erweitert werden. Da der verwendete PC nur über eine Stereo-Ausgabe verfügt, muss eine externe Soundkarte verwendet werden. Diese muss prinzipiell nur über Audio-Ausgänge verfügen und sollte keine externe Spannungsversorgung benötigen. Das Acht-Kanal USB Audiointerface *Gigaport HD+* der Firma *ESI* bietet die optimale Lösung. Es verfügt über acht analoge Cinch-Ausgänge und wird über USB mit Spannung versorgt. Durch ein robustes Metallgehäuse lässt es sich gut am Fahrzeug verbauen. Über die acht verfügbaren Kanäle können noch mehr als die bisher verwendeten Lautsprecher verwendet werden. Durch einen weiteren Lautsprecher im hintern Teil des Quads mit einer Abstrahlcharakteristik entgegen der Fahrtrichtung ist es möglich, die Wahrnehmung und die Ortbarkeit des Fahrzeugs zu verbessern und zudem einen realistischen Gesamtklang eines Verbrennerfahrzeugs herzustellen. Durch den Einsatz eines weiteren Lautsprechers ist es notwendig eine weitere Endstufe in das System zu integrieren. Es bietet sich hierbei an, eine wie bereits im bisherigen System verwendete Class-D-Endstufe zu verwenden. Diese zeichnen sich durch geringen Stromverbrauch, hohen Wirkungsgrad und eine kompakte Bauform aus. Das Modell *GTO4120* der Firma *Crunch* erfüllt die benötigten Kriterien. Die Endstufe verfügt über vier analoge Cinch-Eingänge, vier Lautsprecher-Ausgänge und benötigt eine 12 Volt-Stromversorgung. Der bisher im System zur Datenverarbeitung verwendete PC kann weiterverwendet werden. Allerdings ist es zwingend notwendig, zum ursprünglich installierten Windows-Betriebssystem zurückzukehren, da die hausintern entwickelten Software-Tools zur Filterung der Can-Nachrichten Windows-Applikationen sind. Des weiteren kann der DC/DC-Wandler zur Spannungsversorgung des PC's erhalten bleiben. Alle Komponenten des Systems sollen möglichst platzsparend und effizient im Hardcase des Quads verbaut werden. Nach Möglichkeit sollen alle Komponenten schnell zu erreichen und auswechselbar sein. Die folgenden Unterpunkte befassen sich im Genaueren mit den oben bereits aufgeführten Neuerungen des Systems. Es folgt eine genauere Betrachtung der Funktionsweise der Audio Engine *FMOD Studio*, eine Erklärung der Datenverarbeitung der CAN-Nachrichten sowie eine Beschreibung des Baus des neuen Lautsprechers. Abschließend wird der Einbau und die Inbetriebnahme des neuen Systems beschrieben.

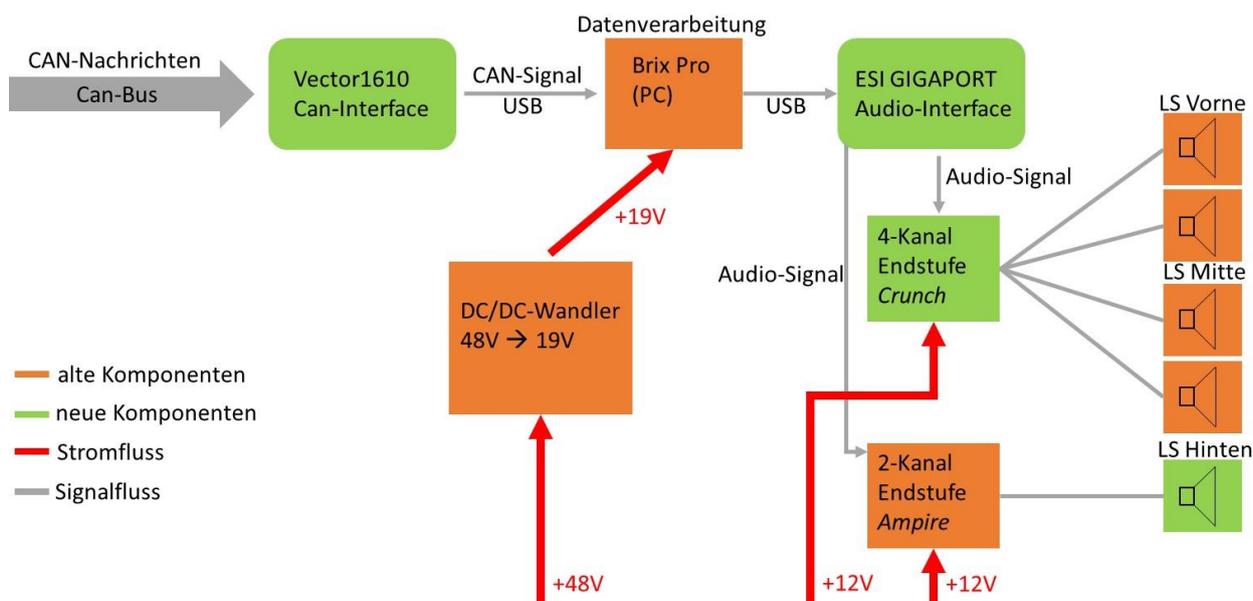


Abbildung 15: Signalflussdiagramm des neuen Soundgenerators

3.4.1 FMOD Studio

Im Folgenden wird die Audio Engine *FMOD Studio* des Herstellerstudios *Firelight Technologies* beschrieben werden. Hierbei werden in kurzer Form der Aufbau und die verschiedenen Möglichkeiten der bereitgestellten Middleware der Engine erklärt.

Über die Audio Engine *FMOD Studio* lässt sich Audio-Inhalt für Videospiele kreieren. *FMOD* kann auf sämtlichen Plattformen wie Windows, Mac OS, Xbox oder Playstation betrieben werden. Bei nicht-kommerzieller Nutzung des Endproduktes, für dessen Zweck die Engine eingesetzt wird, ist der Erhalt einer Lizenz zur Registrierung und Benutzung kostenlos. *FMOD Studio* zeichnet sich vor allem durch eine benutzerfreundliche Middleware aus, die vom Hersteller bereitgestellt wird. Als Middleware bezeichnet man ein anwendungsneutrales Programm, das zwischen verschiedenen Anwendungen vermittelt. Da die Middleware einer gängigen DAW (Digital Audio Workstation) wie *Logic Pro*, *ProTools* oder *AbletonLive* nachempfunden ist, stellt die Anwendung für Benutzer, die bereits mit einer solchen DAW gearbeitet haben, keine große Schwierigkeit dar. Um die Audio Engine in eigens entwickelte Programme einbinden zu können, stellt der Hersteller eine separate API zur Verfügung. Eine API (engl. application programming interface) ist eine Programmierschnittstelle um Softwaresysteme an andere Programme anzubinden. In die gängigen Gaming Engines *Unity* oder *Unreal* ist die Sound Engine *FMOD Studio* standardmäßig integriert.

Das beim Öffnen der Middleware erscheinende Edit-Fenster gestaltet sich ähnlich dem einer DAW. Da die Audio Engine eventbasiert arbeitet, ist es möglich einzelne Events für einen

bestimmten Zweck anzulegen. In den einzelnen Events werden interaktive Soundpakete vorbereitet, die durch die Logik des Spiels gezielt angesteuert und wiedergegeben werden. Es kann beispielsweise ein Event zur klanglichen Untermalung des Wetters angelegt werden. Auf verschiedenen Spuren innerhalb des Events werden entsprechende Audiodateien (Regensounds, Windsounds, Schneefallsounds) angelegt. Diese können über frei definierbare Parameter beispielsweise klanglich beeinflusst oder ineinander übergeblendet werden. Die verschiedenen Events werden so genannten Banks zugeordnet und als *.bank*-Dateien exportiert. Dabei handelt es sich um spezielle Dateien, die von der Audio Engine später verarbeitet werden können. Sie beinhalten sowohl Audio-Dateien als auch die zugehörigen Metadaten. Jedes Event kann genau einer beliebigen Bank zugeordnet werden. Der Assets-Bereich des Edit-Fensters fungiert als interner Dateibrowser. Über ihn können Audiodateien von der Festplatte des Computers ausgewählt werden und auf die Spuren der Events verteilt werden. Die anwendungsspezifische Strukturierung und der entsprechende Projektaufbau in *FMOD Studio* werden in Kersten, 2017 genauer beschrieben. Die Middleware bietet zudem die Möglichkeit der klanglichen Bearbeitung der einzelnen Spuren. Softwareinterne Effekte wie Equalizer, Distortion, Gain oder Pitch können für jede Spur individuell angelegt werden. Zudem können externe Plugins eingebunden werden. Über einen Surround-Panner können alle Einzelspuren individuell im Panorama verteilt werden. Ein in die Software integrierter Profiler ermöglicht es, alle Aktionen der Audio Engine die durch die Spiellogik ausgelöst werden aufzuzeichnen. Die aufgezeichneten Profile können gespeichert und jederzeit wieder abgespielt werden. Außerdem können über ein softwareinternes Live-Update verschiedene Parameter-einstellungen wie Lautstärkeverhältnisse oder Panning während der Laufzeit einer Anwendung direkt geändert werden. Der Profiler und das Live-Update eignen sich gut für den Einsatz am Quad, um die Funktion des Soundgenerators testen zu können. Die Verteilung der Einzelspuren auf die verschiedenen Lautsprecher sowie das Anpassen der Lautstärke können im laufenden Betrieb des Quads direkt angepasst werden. Zudem können zum Testen des klanglichen Verhaltens des Motors unter Lasteinfluss Profile, die mit dem Quad vorher abgefahren wurden, aufgezeichnet und im Nachhinein wiedergegeben werden. Dies ermöglicht eine erleichterte Arbeitsweise, da sich das Quad zur Korrektur der entsprechenden Parameter (Lastkurve = Lautstärkeautomation) nicht im Fahrbetrieb befinden muss. Entsprechende Korrekturen können in der Middleware geändert werden und mittels des aufgezeichneten Profils überprüft werden.

Eine ungefähre Beschreibung der Synthese eines Motorsounds in *FMOD Studio* erfolgt in *Kapitel 4.4*, für eine detaillierte Beschreibung siehe Kersten, 2017.



Abbildung 16: Überblick FMOD Studio Edit-Fenster

3.4.2 Datenverarbeitung und Ansteuerung der Sound Engine FMOD Studio

Zur Verarbeitung der empfangenen Can-Signale und zur Berechnung der Werte zur Steuerung der in *FMOD* definierten Parameter werden eigens entwickelte Programme benötigt. Die Funktion dieser Programme soll ansatzweise in diesem Kapitel erklärt werden. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Berechnungen und die genaue Ansteuerung der Sound Engine findet sich in Kersten, 2017.

Die Ansteuerung der Lautstärkeautomation in *FMOD Studio* und die damit generierte Lastdynamik wird durch zwei Programmstrukturen erzeugt. Das erste dieser beiden Programme ist die von der Firma GIGATRONIK entwickelte Software *CarPC*. Der *CarPC* bindet die API des Vector-Interfaces an. Vorher festgelegte CAN-Nachrichten werden durch die Software vom Bus ausgelesen und zwischengespeichert. Diese gefilterten Nachrichten werden über das von der Software genutzte MQTT-Protokoll an die zweite Programmstruktur weitergegeben. Das MQTT-Protokoll ist ein offenes Nachrichtenprotokoll zur Übertragung von Messdaten zwischen zwei Teilnehmern eines Netzwerks. Es findet häufig im Bereich der eingebetteten Systeme in Fahrzeugen Verwendung. Bei der zweiten Programmstruktur handelt es sich um eine eigens entwickelte Software mit dem Namen *Soundgenerator*. Diese bindet die Engine über die zugehörige API ein. Die über MQTT empfangenen Nachrichten werden von

der *Soundgenerator*-Software weiterverarbeitet, sodass die in der Engine definierten Parameter angesteuert werden können. Über das empfangene Signal des Drehmoments wird über Soll- und Ist-Werte die Motorlast errechnet. Die errechneten Werte steuern den in *FMOD* definierten Lastparameter. Der Drehzahlparameter wird bei anliegender Last über das ausgelesene Drehzahlsignal des Quads gesteuert. Die Stellung des Handgases steuert im Leerlauf den Drehzahlparameter. Soundwechsel, Starten und Stoppen der Motorsounds sowie Stummschalten des Sounds ist über Knopfdruck der Bedienelemente am Lenker des Quads und die dadurch empfangenen Signale möglich. Zusätzlich ist es möglich über eine von der Firma entwickelte Tablet-App, welche ebenfalls in der Lage ist spezielle Can-Botschaften zu verschicken, die Lautstärke des gesamten Soundgenerators zu regeln sowie ebenfalls den Sound zu wechseln. Blinker und Piepen bei Rückwärtsfahrt können zudem durch zugehörige Can-Nachrichten akustisch umgesetzt werden. Im folgenden Flussdiagramm ist der Zusammenhang zwischen beiden Programmstrukturen vereinfacht dargestellt.

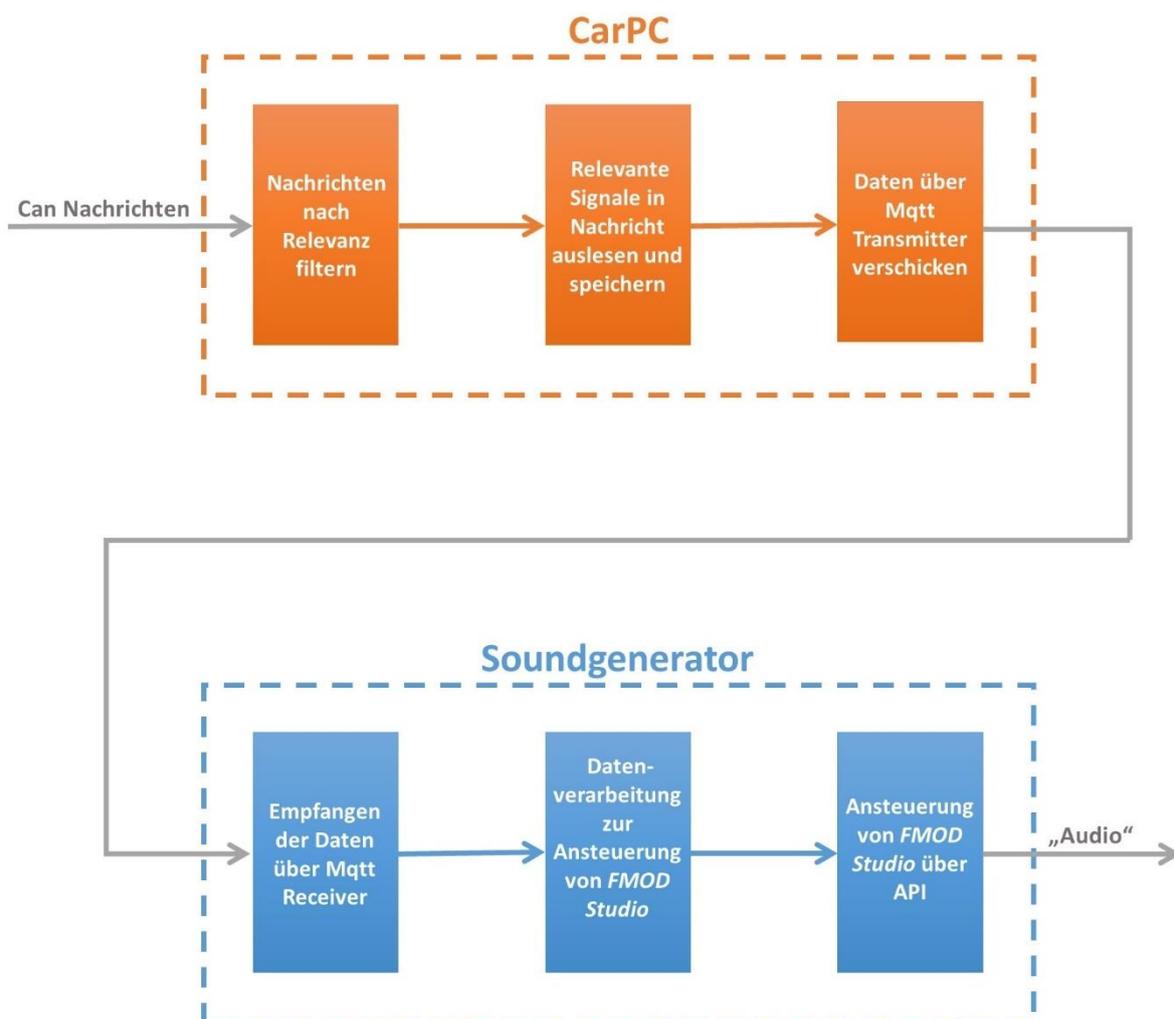


Abbildung 17: Flussdiagramm Datenverarbeitung

3.4.3 Lautsprecherbau

Vor allem im Hinblick auf das bisherige Abstrahlverhalten der am Quad verbauten Lautsprecher und die damit verbundene Wahrnehmung des synthetisierten Motorenklangs hinter dem Fahrzeug wurde beschlossen, eine zusätzliche Lautsprecherkomponente am Quad zu verbauen. Zusätzlich soll es dadurch ermöglicht werden, durch ein diskretes Ansteuern aller fünf verfügbaren Lautsprecherkanäle, alle wesentlichen Schallquellen eines aufgenommenen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor über die vorhandenen Lautsprecher darzustellen. Im Folgenden wird zunächst grundlegendes Basiswissen im Bereich Lautsprechertechnik vermittelt, bevor auf Konstruktion, Fertigung und Einbau des neuen Lautsprechers eingegangen wird.

Ein elektrodynamischer Lautsprecher funktioniert nach dem Prinzip eines elektrodynamischen Wandlers. Die Membran des Lautsprechers wird hierbei durch die Lorentz-Kraft, die auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld wirkt, bewegt. Die Richtungen der Magnetkraft und des Stromflusses stehen dabei senkrecht zueinander. Das Magnetfeld wird durch einen Permanentmagneten erzeugt. Eine Schwingspule bildet den stromdurchflossenen Leiter. Die auf einen Träger gewickelte Schwingspule wird durch die Wechselspannung eines Audio-Signals gespeist und in einem möglichst eng gehaltenen Luftspalt durch eine Zentrierspinne geführt. Die dabei auf die Spule wirkende Kraft verursacht eine Anziehung und Abstoßung beider Magnetfelder, was in einer Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Spule resultiert. Diese Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen werden auf die mit der Spule verbundene Membran übertragen. Dies führt zu Druckschwankungen in der Luft, die für das menschliche Gehör wahrnehmbar werden. Je größer die Membran eines Lautsprechers ist, desto eher neigt diese zu so genannten Partialschwingungen. Dabei folgt die Membran nicht mehr den von der Schwingspule vorgegebenen Bewegungen, sondern fängt an, in sich zu schwingen. Dieser Effekt tritt verstärkt bei der Wiedergabe von hohen Frequenzen auf⁵⁹. Ein Lautsprecher stellt ein schwingendes System dar, ein so genanntes Feder-Masse-System. Die Spule mit der befestigten Membran bildet hierbei die Masse, die Zentrierspinne bildet die Feder. Bedämpfte Feder-Masse-Systeme zeigen einen Anstieg der Schwingungsamplitude bis zur Eigenfrequenz des Systems, der so genannten Resonanzfrequenz. Ab der Resonanzfrequenz fällt die Schwingungsamplitude ab. Im Frequenzgang eines Lautsprechers ist die Resonanzfrequenz meist deutlich erkennbar. Masse und Dämpfung des Systems sind die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Eigenfrequenz des Lautsprechers. Unterhalb der

⁵⁹ vgl. Goertz, 2008, S. 424-425

Resonanzfrequenz strahlt der Lautsprecher nur noch wenig Nutzschaall ab. Sie gilt als eine wichtige Kenngröße für Lautsprecher⁶⁰. Weitere Faktoren um Lautsprecher beurteilen zu können sind die so genannten Thiele-Small-Parameter. Zu ihnen gehören die Freiluftfrequenz f_s , die mechanische Güte Q_{MS} , die elektrische Güte Q_{ES} , die Gesamtgüte Q_{TS} und das Äquivalentvolumen V_{AS} . Die Freiluftresonanzfrequenz wird zur Gehäuseberechnung benötigt. Sie gibt diejenige Frequenz an, bei der ein Lautsprecher im nicht eingebauten Zustand schwingt d.h., bei welcher Frequenz die geringste Leistung benötigt wird, um die größtmögliche Membranauslenkung zu verursachen. Ab dieser Frequenz kann ein Lautsprecher effektiv Nutzschaall abstrahlen. Die oben genannten Güte-Faktoren werden auch als Q-Faktoren bezeichnet. Sie beschreiben die Verluste in einem schwingenden System, die durch Dämpfung verursacht werden. Q_{MS} beschreibt hierbei die Dämpfung, welche durch mechanische Reibung der Membran verursacht wird, Q_{ES} beschreibt die durch das Magnetfeld verursachte Dämpfung und die Gesamtgüte Q_{TS} enthält beide genannten Einzelfaktoren. Das äquivalente Luftnachgiebigkeitsvolumen wird aus effektiver Membranfläche und der Nachgiebigkeit der Membraneinspannung berechnet. Die Federwirkung der Einspannung des Chassis wird umgerechnet in die Federwirkung eines geschlossenen Luftvolumens. Das heißt, dass das Boxeninnenvolumen dieselbe Rückstellkraft auf die Membran wirken lässt, wie die mechanische Einspannung des Chassis. Als letzte wichtige Kenngrößen seien noch die Nennbelastbarkeit und der Kenschalldruckpegel erwähnt. Die Nennbelastbarkeit, angegeben in Watt, gibt die elektrische Leistungsfähigkeit eines Lautsprechers an, die diesem im Dauerbetrieb zugeführt werden kann. Dabei darf der Lautsprecher keinen Schaden erleiden. Der mittlere Kenschalldruckpegel ist der Mittelwert des Schallpegels im linearen Teil des Frequenzbereichs des Lautsprechers. Dieser wird in einem Meter Abstand unter der zugeführten Leistung von einem Watt gemessen und in dB angegeben⁶¹.

Anhand der aufgeführten Parameter unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen und dem damit verbundenen maximalen Gehäusevolumen, lässt sich ein geeignetes Lautsprecherchassis auswählen, welches alle nötigen Voraussetzungen erfüllen sollte. Zunächst muss beachtet werden, dass über den Lautsprecher hauptsächlich der Klang der Auspuffanlage wiedergegeben soll, um ein homogenes Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs nachzubilden und zusätzlich die Wahrnehmbarkeit des Quads zu steigern. Wie bereits in *Kapitel 2.4* beschrieben, bildet die Abgasanlage die dominanteste Schallquelle eines Verbrennungsfahrzeugs und ist maßgeblich für dessen Klangcharakter verantwortlich. Der Frequenzbereich

⁶⁰ vgl. Schneider, 2008, S. 320

⁶¹ vgl. Gaedtke, 1985

des auszuwählenden Lautsprecherchassis sollte daher tief genug gehen, um die wesentlichen Frequenzen einer Abgasanlage darstellen zu können. Da sich der Lautsprecher im Außenbereich des Quads befinden soll, ist der Einfluss der Witterung zu beachten. Der Lautsprecher sollte daher spritzwassergeschützt sein. Zudem sollte der Kostenfaktor möglichst gering gehalten werden. Aus den aufgeführten Gründen wurde für den Bau des Lautsprechers der Breitbandlautsprecher *FR 16 WP* der Firma Visaton für geeignet befunden. Dieser kommt vor allem in Booten, Schiffen und offenen Fahrzeugen zum Einsatz. Der Hersteller gibt folgende technische Eigenschaften auf seiner Website www.visaton.de an:

technische Eigenschaften Visaton FR 16 WP:

Bezeichnung	FRS 16 WP
Größe	16 cm (6,5“)
Nennbelastbarkeit	60 W
Nennimpedanz	4 Ohm
Übertragungsbereich	60-15000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel	86 dB (1W/1m)
Abstrahlwinkel	46°/4000 Hz
Resonanzfrequenz f_s	85 Hz
Gesamt-Q-Faktor Q_{TS}	1,02
V_{AS}	10l
Effektive Membranfläche S_d	130 cm ²
Kosten	ca. 26 Euro

Der umfangreiche Übertragungsbereich von 60 Hz bis 15000 Hz macht es möglich, das wesentliche klangliche Spektrum einer Abgasanlage darzustellen. Um den vollen Übertragungsbereich des Lautsprechers gewährleisten zu können, muss das vom Hersteller angegebene Gehäusevolumen von 10 Litern eingehalten werden. Bei der Planung des Gehäuses gilt es, die vorhandenen Platzverhältnisse an der Rückseite des Quads zu überprüfen. Aufgrund von Eigengewicht des Lautsprechers, welches bei einem Gehäusevolumen von 10 Litern bei einer Materialstärke von 12mm zu Stande kommen würde, entfällt die Möglichkeit einer Befesti-

gung des Lautsprechers am Trägergerüst des Quads unterhalb des Hardcase. Um das Gehäuse von unten zu stützen und aufgrund der noch vorhandenen Platzverhältnisse im Hardcase wurde beschlossen, den Lautsprecher mittig im Hardcase zu platzieren. Zunächst wurde auf Basis der 10 Liter Mindestvolumen und des vorhandenen Platzes im Case ein Pappmodell des Lautsprechergehäuses erstellt um die endgültigen Maße des Gehäuses festlegen zu können. Auf Grundlage des Pappmodells wurde ein 3d-Modell des endgültigen Lautsprechers erstellt.

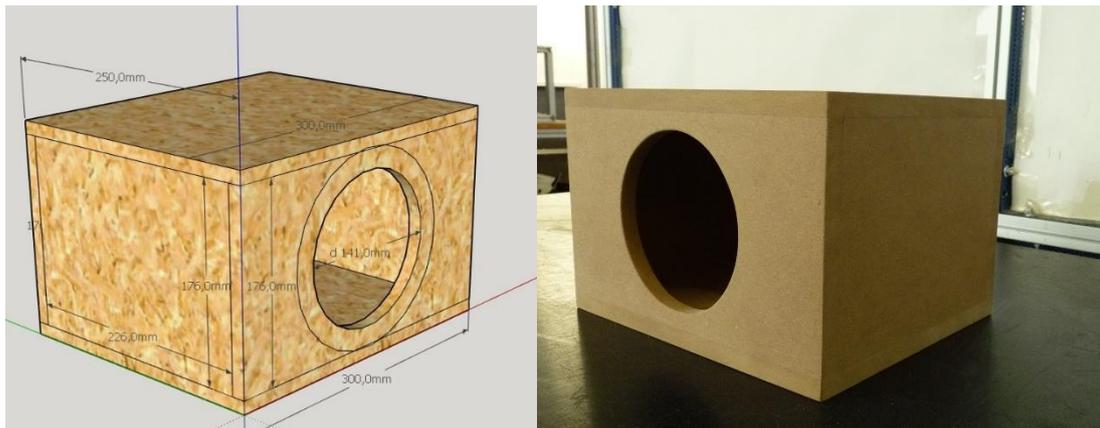


Abbildung 18: 3d-Modell (L) und fertiges Lautsprechergehäuse (R)

Um das Abstrahlen des Lautsprechers nach hinten zu ermöglichen, wurde in das Hardcase, entsprechend der Höhe und Länge des Lautsprechergehäuses, eine passgenaue Öffnung gesägt, durch welche der Lautsprecher geschoben wird. Die Öffnung schließt bündig mit dem Lautsprechergehäuse ab (genaue Maße des Lautsprechers; Höhe 20 cm, Breite 30 cm, Tiefe 25 cm). Um materialbedingte Toleranzen auszuschließen wurde beschlossen, das Gehäuse von einer Schreinerei maßanfertigen zu lassen. Die Arbeiten am Lautsprecher selbst beschränkten sich daher auf das Einsetzen und verkabeln des Chassis, das Anbringen des Dämmmaterials, sowie auf die Lackierung. Das Gehäuse besteht aus Multiplex mit einer Materialstärke von 12 mm, der Lochdurchmesser für das Chassis beträgt 14,1 cm. Um ein luftdichtes Abschließen aller Einzelteile des Gehäuses zu gewährleisten, wurden alle Kanten des Gehäuses geleimt. Das Chassis wird direkt am Gehäuse verschraubt und mittels zweier Kupferkabel mit einem Querschnitt von 2,5 mm² verkabelt. Die Kabel sind über Crimpstecker am Chassis befestigt. Mittels einer Kabelverschraubung werden beide Kabel hinten aus dem Gehäuse geführt. Durch die Kabelverschraubung bleibt das Gehäuse luftdicht. Um den Klang des Lautsprechers zusätzlich zu verbessern, wurden im Gehäuse drei Schichten Dämmwolle aus Polyestervlies verklebt. Abschließend wird das Gehäuse mit witterungsresistentem Lack schwarz lackiert und mittels Industrie-Klettverschluss-Klebeband im Inneren des Hardcase

befestigt. Durch die Platzierung des Lautsprechers im Hardcase, ist ein leichtes Verkabeln mit der entsprechenden Endstufe ermöglicht. Zudem schützt das Hardcase den Lautsprecher trotz Lackierung zusätzlich vor Witterung.



Abbildung 19: Hardcase vorher (L) und mit eingesetztem Lautsprecher (R)

Zur Messung des Frequenzgangs des Lautsprechers wird die Freeware-Software *Carma* der Firma *Audionet* verwendet. Die Messungen werden mit dem Messmikrofon *ECM 8000* des Herstellers *Behringer* durchgeführt. Das Mikrofon mit Kugelcharakteristik weist einen annähernd linearen Frequenzgang auf. Zudem ist ein softwareinternes Korrekturprofil für Frequenz- und Phasengang des Mikrofons vorhanden. Zur Messung wird das Mikrofon in einem Abstand von einem Meter auf der 0°-Achse des Lautsprechers aufgestellt. Die auf den Frequenzgang der Endstufe betreffenden Einstellungen wurden bestmöglich reduziert um das Messergebnis nicht zu verfälschen. Die Messung des Frequenzgangs des Lautsprechers erfolgte über einen Sinus-Sweep. Das Schaubild (Oktavband-Glättung 1/12, FFT Größe 65536) zeigt, dass der Frequenzgang des Lautsprechers im Bereich zwischen 100 Hz und 10000 Hz weitestgehend linear verläuft. Lediglich zwei kleinere Einbrüche bei ca. 600 Hz und 5500 Hz sind zu verzeichnen. Im Bereich unter 100 Hz und über 10000 Hz fällt der Frequenzgang deutlich ab. Um die wesentlichen klanglichen Anteile des Abgasmündungsgeräusches ausreichend wiedergeben zu können, reicht der lineare Anteil des Frequenzspektrums des Lautsprechers aus. Zusätzlich zur Messung des Frequenzgangs des Rücklautsprechers erfolgte eine separate Messung der weiteren Lautsprecher des Soundgenerators. Die Messergebnisse sind im Anhang der Bachelorarbeit aufgeführt.

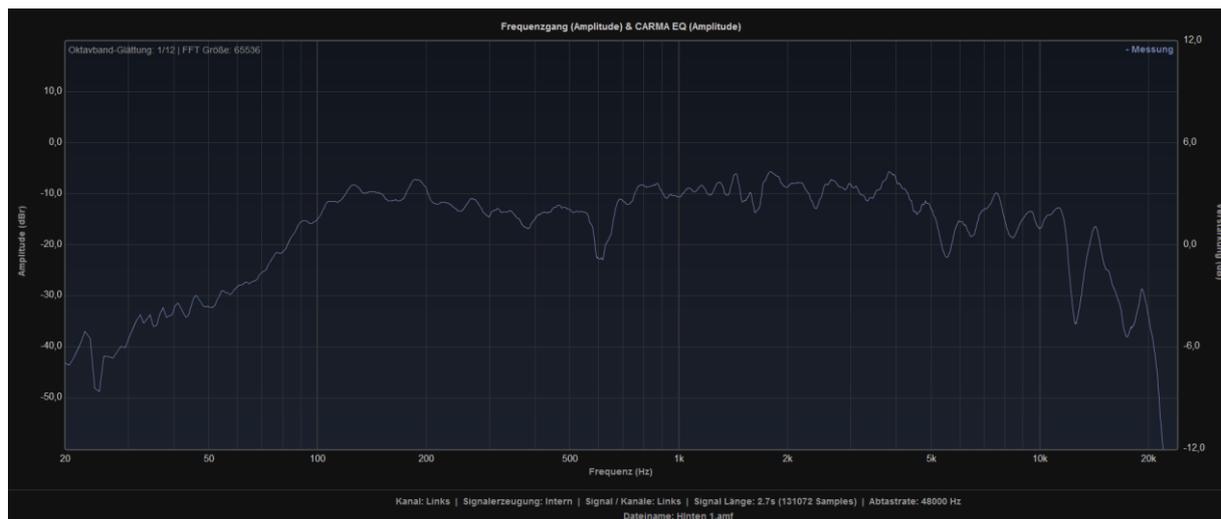


Abbildung 20: Frequenzgang des Rücklautsprechers

3.4.4 Verkabelung und Einbau der Komponenten

Beim Anschließen und Verkabeln der einzelnen Komponenten des Soundgenerators gilt es, darauf zu achten, dass die bereits vorhandene Verkabelung des alten Systems im Rahmen der Möglichkeiten weiter benutzt werden kann.

Da die MIDI-Wandlung durch die Neukonzeption des Soundgenerators nicht mehr relevant ist, kann die GIGABOX aus dem System genommen werden. Das damit in Verbindung stehende MIDI-Interface und der ehemals zum Abschalten des PCs benötigte Tastaturwandler können somit aus dem Gehäuse des DC/DC-Wandlers entfernt werden. Der DC/DC-Wandler zur Spannungsversorgung des PCs sowie dessen Verkabelung und ein Filterelement zur Glättung der Gleichspannung können komplett in das Neukonzept integriert werden. Bei allen restlichen Komponenten des Systems bestand die Anforderung, diese so zu verkabeln, dass sie jederzeit aus dem System entfernt oder ausgetauscht werden können. Die grundsätzliche Verkabelung erfolgt über einen 24-poligen, zweiteiligen Kompaktstecker. Ein Teil ist dabei fest im Boden des Hardcases verbaut. Alle Spannungsversorgungen, die Lautsprecherkabel der Frontlautsprecher sowie eine Leitung des CAN-Busses laufen als zusammengefügtter Kabelstrang in den hinteren Teil des Quads. Dort sind alle Leitungen in das Gegenstück des Kompaktsteckers eingepinnt. Der Stecker kann unter dem Hardcase zusammengesteckt werden.

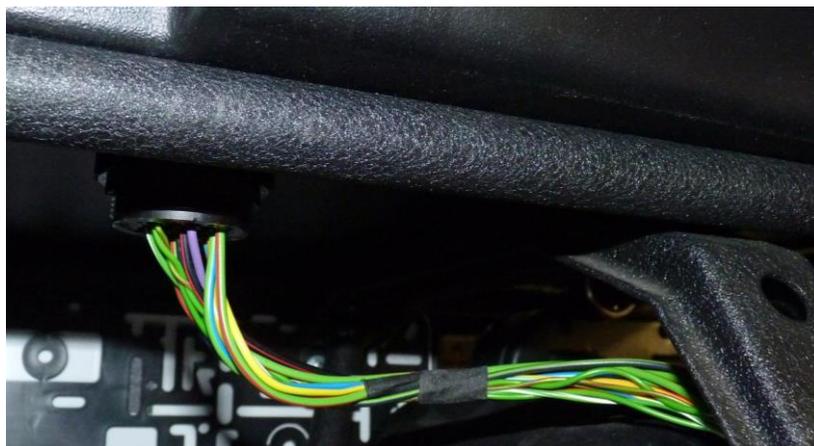


Abbildung 21: Kompaktstecker unter dem Hardcase

Für die zusätzlich in das System verbaute Endstufe muss eine Spannungsversorgung von einem der noch vorhandenen Verbraucher des Quads in das Hardcase gelegt werden. Hierbei werden zwei Kupferkabel mit einem Querschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ verwendet. Der Kabelstrang wurde unter der Verkleidung des Quads am Hauptkabelbaum entlang bis zum Kompaktstecker gelegt und dort eingepinnt. Die bereits vorhandene Leitung des CAN-Busses kann weiterverwendet werden. Allerdings wird zum Anschluss des Vector-Interfaces der weibliche Teil eines 9-poligen D-Sub-Steckers benötigt. Ein entsprechender Stecker wird konfektioniert, wobei die beiden CAN-Leitungen an die entsprechenden Pins des D-Sub-Steckers gelötet werden. Für die externe Soundkarte *Gigaport HD+* wird keine weitere Spannungsversorgung benötigt, da diese über die USB-Verbindung mit dem PC erfolgt. Die softwareintern belegbaren Ausgänge der externen Soundkarte werden über gekaufte Cinch-Kabel mit den Endstufen verbunden. Die Lautsprecher aus der Fahrzeugfront sowie die fest im Hardcase verbauten Lautsprecher werden mit der Vierkanal-Endstufe *Crunch GTO4120* verbunden, der Rücklautsprecher mit der gebrückten Zweikanal-Endstufe *Ampire MBM 100.2*. Alle Spannungsversorgungen der einzelnen Komponenten sowie die Lautsprecherkabel werden mit spritzwassergeschützten Superseal-Steckverbindungen versehen. Dies ermöglicht ein schnelles an- und abklemmen aller Komponenten.



Abbildung 22: Superseal-Steckverbindung 2-polig

Durch das begrenzte Platzangebot im Hardcase des Quads, ist das Unterbringen der Komponenten in diesem mit Schwierigkeiten verbunden. Die Komponenten müssen möglichst kompakt verbaut werden und die Kabellängen sollten dabei möglichst kurz gehalten werden. Durch die Konstruktion eines Trägerelements aus 2 cm Aluminium-Profilstangen und Lochblech können diese Anforderungen erfüllt werden. Das Trägerelement ermöglicht die Anordnung der Komponenten übereinander. Durch das Lochblech ist eine ausreichende Belüftung der Komponenten von unten sowie das feste Verschrauben dieser gewährleistet. Das Trägerelement wurde so dimensioniert, dass dieses genau neben dem Rücklautsprecher im Hardcase angebracht werden kann. Beim Lösen aller Superseal-Steckverbindungen kann der Träger mit allen darauf verschraubten Komponenten im Ganzen aus den Hardcase genommen werden. Jedes Einzelteil des Systems kann somit flexibel gewartet oder ausgetauscht werden. Zudem sichert die Verschraubung die Komponenten vor Stößen im Fahrbetrieb. Zur Dokumentation der Verkabelung wurde ein Schaltbild erstellt, welches im Anhang aufgeführt ist. In diesem sind alle Komponenten und deren Verkabelung untereinander aufgeführt.

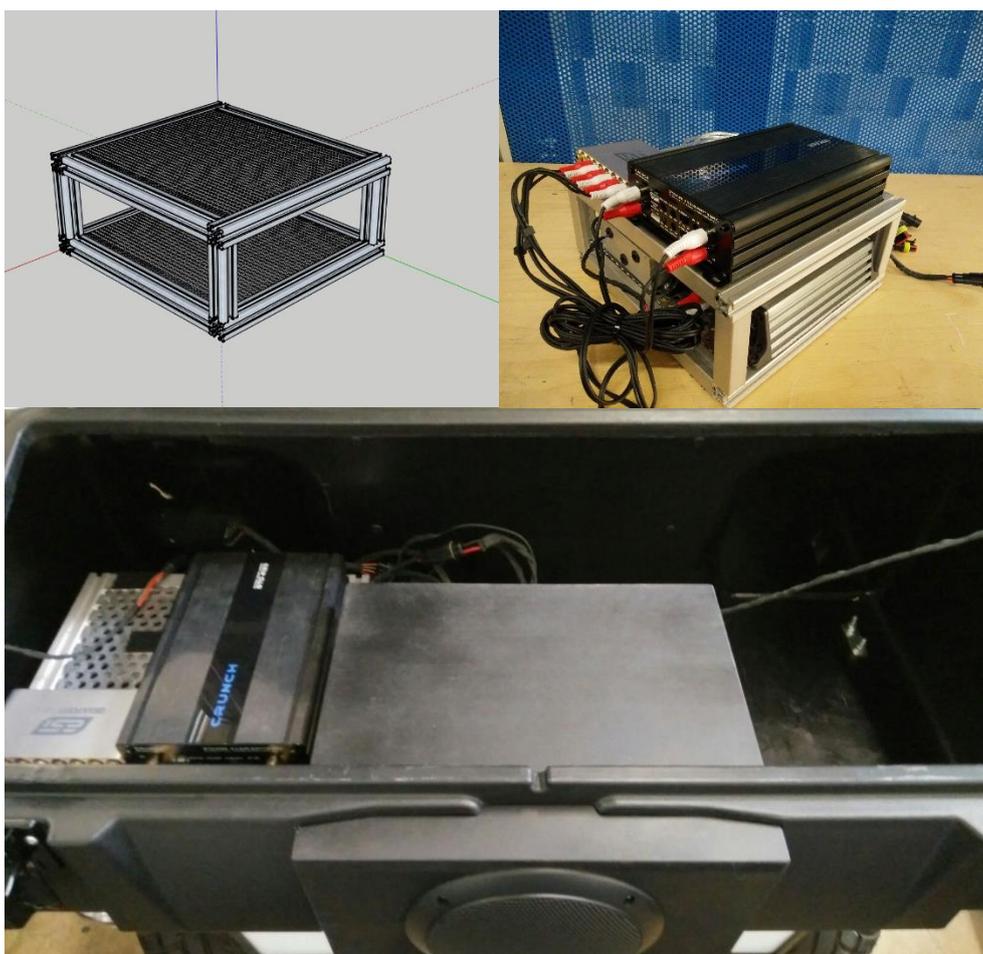


Abbildung 23: Konstruktion des Trägers (oben links) und Einbau der Komponenten (oben rechts/unten)

4 Tonaufnahmen der Samples

In den nachfolgenden Kapiteln werden die, den Samples zu Grunde liegenden, Tonaufnahmen beschrieben. Zum allgemeinen Verständnis werden zunächst einige bereits genannte Begrifflichkeiten vertiefend erklärt, sowie das von *FMOD Studio* verwendete Klangsyntheverfahren kurz beschrieben. Im Anschluss werden die, für die Tonaufnahme verwendeten, Versuchsfahrzeuge und deren besondere klangliche Merkmale beschrieben. Abschließend erfolgt eine Beschreibung der Organisation, Planung und Durchführung der Tonaufnahmen, sowie eine kurze Skizzierung des Nachbearbeitungsprozesses und der Implementierung der einzelnen Samples in *FMOD Studio*.

4.1 Allgemeines

Um ein allgemeines Verständnis für das nachfolgende Kapitel zu gewährleisten, werden im Folgenden kurz die bereits im Laufe der Arbeit häufig aufgeführten Begriffe des *Samples* und des Klangsyntheverfahrens des *Samplings*, genauer beschrieben.

Im musikalischen Sinne bezeichnet ein Sample einen beliebig langen Teil einer Ton- oder Musikaufnahme. Zumeist werden diese kurzen Teile aus einer bereits bestehenden Ton- oder Musikaufnahme herausgeschnitten und in einem neuen Kontext verwendet.

Das so genannte Sampling beschreibt - aus musikalischer Sicht - den Vorgang des Wiederverwendens der einzelnen Samples in einem neuen musikalischen Kontext. Es werden hierbei nicht nur Musikaufnahmen verwendet, sondern beispielsweise auch Samples einzelner Töne eines Musikinstruments. Diese werden in Samplingbibliotheken von bestimmten Sampling-Programmen gespeichert und können beispielsweise auf Tastenanschlag eines Synthesizers jederzeit aufgerufen werden. Die Samples aus solchen Bibliotheken bestehen zumeist aus detaillierten, kleinstteiligen Aufnahmen. Solche Aufnahmen werden durch das so genannte Loop-Verfahren wiedergegeben. Dabei werden Loops, d.h. Endlosschleifen erzeugt. Das bedeutet, dass nach Abspielen des Samples ständig zu einem vordefinierten Punkt zurückgesprungen wird und das Sample von dort erneut ausgelesen und abgespielt wird. Durch dieses Prinzip sind die einzelnen Samples in ihrer Klangdauer prinzipiell unbegrenzt.

Das Synthetisieren der Motorensounds in *FMOD Studio* erfolgt nach einer ähnlichen Technik. Als Samples werden Tonaufnahmen eines Verbrennungsfahrzeugs bei verschiedenen Drehzahlstufen verwendet. Da eine vollständige Zündabfolge eines Verbrennungsmotors im Bereich weniger Millisekunden liegt und sich der Motorenklang bei konstanter Drehzahl nicht verändert, können die einzelnen Drehzahlsamples sehr kurz sein. Bei der Loop-Wiedergabe

der einzelnen Samples gilt es zu beachten, dass eine möglichst große Übereinstimmung der Wellenform am Sampleanfang und am Sampleende vorliegt. Sobald ein Unterschied in Klangfarbe oder Amplitude vorliegt, wird dies als hörbares Knacken beim Sprung auf den Sampleanfang wahrgenommen⁶². Im Schnitt der Samples ist daher zu beachten, dass im Null-durchgang der Wellenform sowohl Start-als auch Endpunkt des Samples gesetzt werden. Durch die Möglichkeit extrem kurze Samples zu verwenden und die damit verbundene kleine Dateigröße dieser, kann enorm Speicherplatz eingespart werden.

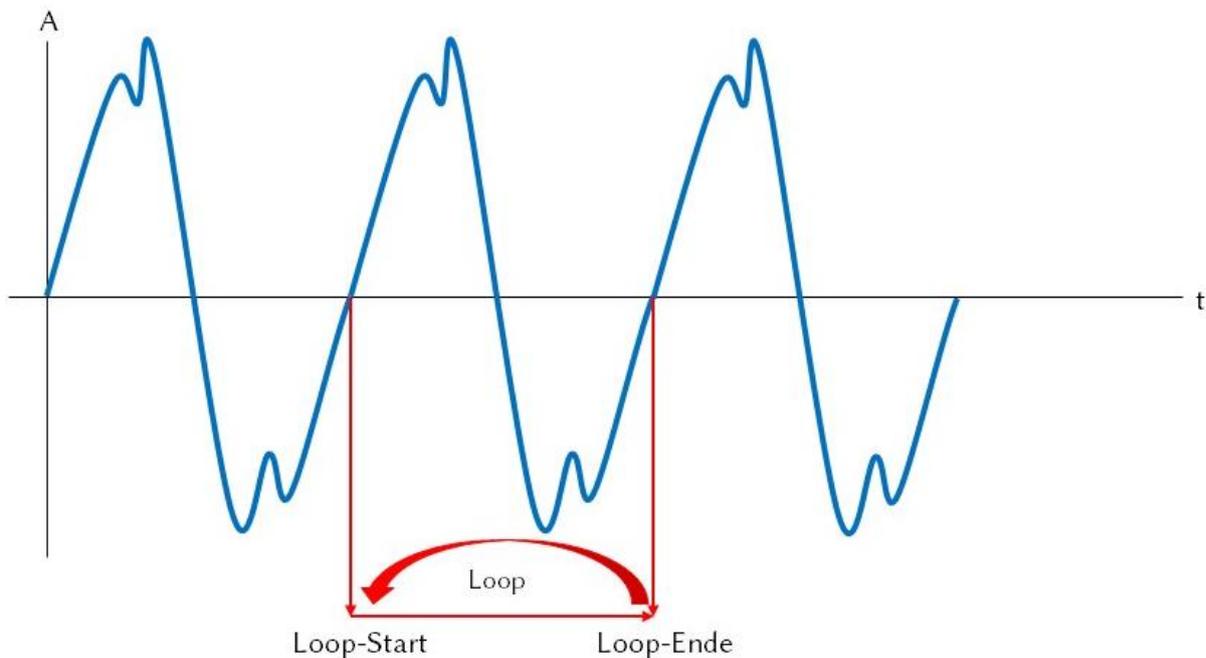


Abbildung 24: Loop-Durchgänge bei Samples

Durch das von *FMOD Studio* verwendete Prinzip zur dynamischen Lasterzeugung (siehe Kapitel 3.4) werden Drehzahlsamples im Leerlauf und unter Volllast benötigt. Da nur einzelne Drehzahlstufen benötigt werden und alle Zwischenschritte per Pitch interpoliert werden, ist es möglich, die Volllast-Samples während der Fahrt aufzunehmen. Ein Fahrdynamik-Prüfstand wird nicht benötigt. Um ein homogenes Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs darzustellen, müssen alle wesentlichen Schallquellen eines Fahrzeugs entsprechend mikrofoniert und aufgenommen werden. Das Aufnahmeverfahren und die bei den Aufnahmen verwendeten Fahrzeuge und deren klangliche Besonderheiten werden im Folgenden beschrieben.

⁶² vgl. Ackermann, 1991, S. 24-25

4.2 Fahrzeugauswahl

Die erste Prämisse bei der Auswahl eines passenden Fahrzeugs ist ein charakteristischer Gesamtklang des Fahrzeugs. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Ausführung der Abgasanlage, da diese den Großteil des Klangbilds des Gesamtfahrzeugs ausmacht. Dabei ist es nicht von Relevanz, ob eine Abgasanlage mit einem oder zwei Endrohren vorliegt. Nach Möglichkeit sollte das ausgewählte Fahrzeug über eine gute Motorkapselung verfügen. Dadurch können Geräuschquellen aus dem Motorraum möglichst störgeräuschfrei aufgenommen werden. Des Weiteren sollte ein Kraftfahrzeug mit Handschaltgetriebe oder manuell einstellbarem Automatikgetriebe ausgewählt werden. Dies erleichtert das Fahren während der einzelnen Aufnahmezyklen im selben Gang. Die Wahl des Verbrennungsprinzips spielt hierbei keine Rolle. Sowohl Benzin- als auch Dieselmotoren bringen eine eigene klangliche Charakteristik mit sich. Der Sound des Dieselmotors zeichnet sich durch das charakteristische „Diesel-Nageln“ aus. Allerdings wird der klangliche Anteil der Abgasanlage durch den Dieselrußpartikelfilter bedämpft. Ein Benzinmotor besitzt statt eines Partikelfilters einen Katalysator. Der Katalysator lässt die verursachten Abgasmündungsgeräusche in größerem Maße passieren, wodurch ein prägnantes Mündungsgeräusch entsteht. Auch das vorhandene Platzangebot im Motorraum und im Bereich der Endrohre spielt eine wichtige Rolle, um die zur Aufnahme benötigten Mikrofone am Fahrzeug entsprechend anbringen zu können. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Mikrofone, vor allem im Motorraum, nicht durch Hitzeentstehung zu Schaden kommen. Im Bereich der Endrohre sollte genügend Platz vorhanden sein, um die Mikrofone ausreichend hinter dem Fahrzeug befestigen zu können.

Aufgrund des finanziellen Budgets musste auf Fahrzeuge aus dem eigenen Bestand der Firma GIGATRONIK zurückgegriffen werden. Die Auswahl fiel dabei auf ein Fahrzeug des Herstellers Audi (Modell; A6 Avant 3.0 TDI) sowie auf ein Fahrzeug des Herstellers Porsche (Modell; Panamera GTS). Beide Fahrzeuge weisen die oben aufgeführten Kriterien auf. Da beide Fahrzeuge über unterschiedliche Motoren und Abgasanlagen verfügen, zeichnen sich beide durch einen sehr charakteristischen Eigenklang aus. Die technischen Eigenschaften beider Fahrzeuge sowie deren klangliche Eigenschaften und Besonderheiten werden im Folgenden näher beschrieben.

4.2.1 Audi A6 Avant 3.0 TDI

Der Audi A6 Avant lässt sich in die Fahrzeugklasse der Limousinen einordnen. Der Begriff Avant ist beim Hersteller Audi die Verkaufsbezeichnung für ein Kombifahrzeug. Die mechanische Motorleistung, bei dem zur Aufnahme ausgewählten Fahrzeug, weist 240 kW /326 PS

bei einer Drehzahl von 4500 Umdrehungen pro Minute auf sowie ein maximales Drehmoment von 650 Nm bei einer Drehzahl zwischen 4000 und 4500 Umdrehungen pro Minute. Ein 8-Gang-tiptronic Getriebe ermöglicht ein manuelles Ansteuern der einzelnen Gänge bei den Aufnahmen. Bei Dieselfahrzeugen in die Kategorie der Limousinen ist zumeist eine akustisch unspektakuläre Geräuschkulisse des Fahrzeugs vorzufinden. Die Besonderheit des A6 Avant liegt allerdings im serienmäßig verbauten Active-Sound-System der Firma Eberspächer. Im Fahrzeug lassen sich auf Knopfdruck einerseits unerwünschte akustische Störeinflüsse durch Gegenschallsynthese eliminieren sowie die dominanten Motorordnungen durch zusätzlich erzeugten Schall verstärken. Vor allem im Betriebszustand der Vollast verleiht dieses aktive Sounddesign dem Fahrzeug einen deutlich sportlicheren Charakter. Ziel der Tonaufnahmen ist es, diesen sportlichen Charakter des Fahrzeugs, mit eingeschaltetem Active-Sound-System, einzufangen. Das großzügige Platzangebot im Motorraum sowie an der Rückstoßstange des Fahrzeugs begünstigen das Anbringen entsprechender Mikrofone.



Abbildung 25: Audi A6 Avant 3.0 TDI

4.2.2 Porsche Panamera GTS

Die Abkürzung GTS steht bei Porsche für „Gran Turismo Sport“. Der Porsche Panamera GTS kann als eine Mischung aus Limousine und Sportwagen beschrieben werden. Der Benzinmotor weist eine mechanische Leistung von 316 kW / 430 PS bei einer Drehzahl von 6700 Umdrehungen pro Minute auf, ebenso wie ein maximales Drehmoment von 520 Nm bei einer Drehzahl von 3500 Umdrehungen pro Minute. Das siebenstufige Doppelkupplungsgetriebe lässt sich, im Hinblick auf die Tonaufnahmen, manuell schalten. Das Fahrzeug zeichnet sich vor allem durch seinen charakteristischen V8-Sound aus. Dieser wird primär durch die Abgasanlage des Fahrzeugs erzeugt. Bei der Abgasanlage des Porsche Panamera GTS handelt

es sich um eine zweiflutige Klappenauspuffanlage. Auf Knopfdruck kann eine Abgasklappe geöffnet werden. Das Öffnen der Abgasklappe hat einen deutlich lautereren und aggressiveren Gesamtklang des Fahrzeugs zur Folge. Der Porsche klingt dadurch deutlich sportlicher. Ziel der Tonaufnahmen ist es, den charakteristisch sportlichen „Porsche-Sound“ einzufangen und ihn als Soundpaket am Quad zu reproduzieren. Die Platzverhältnisse im Motorraum sowie an der Rückstoßstange lassen es zu, die zur Aufnahme benötigten Mikrofone am Fahrzeug zu befestigen.



Abbildung 26: Porsche Panamera GTS

4.3 Planung/Organisation/Umsetzung der Aufnahmen

Im nachfolgenden Kapitel werden die einzelnen für die Aufnahmen benötigten Schritte erklärt. Zunächst werden die Anforderungen an die Aufnahmeumgebung und deren Auswahl beschrieben, bevor genauer auf die spezielle Mikrofonierung der Fahrzeuge, das zur Aufnahme verwendete Equipment sowie den Ablauf der Aufnahme eingegangen wird. Abschließend erfolgt eine kurze Erklärung des Schnitts und der Nachbearbeitung der einzelnen Samples.

4.3.1 Anforderungen an die Aufnahmeumgebung und Auswahl der Teststrecke

Die Aufnahmeumgebung zur Aufnahme der Leerlaufsamples erfordert kein umfassendes Anforderungsprofil. Die zur Aufnahme ausgewählte Umgebung sollte zunächst möglichst frei von Reflexionen sein. Direkt reflektierter Schall würde die Qualität der Aufnahmen wesentlich beeinflussen. Als mögliche Umgebungen kommt daher ein reflexionsarmer Semifreifeldraum oder eine freie Fläche außerhalb eines Gebäudes in Frage. Aufgrund der absorbierenden Bauweise können in einem Semifreifeldraum keine Reflexionen oder stehenden Wellen an

Wänden auftreten. Im Freien sind diese so genannten Freifeldbedingungen auf natürliche Weise gegeben. Eine solche Fläche im Freien muss zur Einhaltung der Freifeldbedingungen weit entfernt von jeglichen schallreflektierenden Wänden oder Gegenständen sein. Zusätzlich sollten bei einer Aufnahme im Freien keine Störgeräusche wie Wind oder ähnliches die Aufnahmequalität beeinflussen.

Für die Aufnahme der Volllastsamples muss aus Kostengründen eine Alternative zu einem akustisch optimierten Rollenprüfstand gefunden werden. Da der Betriebszustand der Volllast erst dann eintritt, wenn der Motor bei einer bestimmten Drehzahl über keinerlei Leistungsreserven mehr verfügt, muss eine Möglichkeit gefunden werden, wie dieser Betriebszustand über einen längeren Zeitraum gehalten werden kann. Die Lösung für das beschriebene Problem liegt in einer Konstantfahrt bergauf. Über eine gleichmäßig ansteigende Bergaufstrecke kann der Volllast-Zustand über einen längeren Zeitraum gehalten werden. Zudem können bei Bergauffahrt einzelne Drehzahlstufen konstanter und einfacher gehalten werden, als in der Ebene. Als Strecke für die Aufnahmen wurde eine bergauf verlaufende Straße von ca. 1 km Länge ausgewählt. Diese befindet sich in einem wenig befahrenen Waldstück in der Nähe des Flugplatzes des Aero-Clubs Esslingen. Am Start- und Endpunkt der Strecke kann problemlos und schnell gewendet werden. Durch eine gleichmäßige Steigung und sehr guten Fahrbahnbelag bietet die Strecke optimale Voraussetzungen für die Aufnahme der Volllastsamples. Die Leerlaufsamples können auf dem Parkplatz des Flugplatzes im Stand aufgenommen werden.



Abbildung 27: Lage der Teststrecke (rote Pfeile) und des Parkplatzes (Quelle: Google Maps)

4.3.2 Mikrofonierung

Um ein möglichst einheitliches und vollständiges Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs reproduzieren zu können, muss bei der Mikrofonierung im Vorfeld der Aufnahme darauf geachtet werden, dass alle relevanten Schallquellen der zur Aufnahme verwendeten Fahrzeuge durch die verwendeten Mikrofone erfasst werden. Besonders wichtig sind hierbei die Geräusche der Ansauganlage, die Ventiltriebgeräusche sowie der Klang der Abgasanlage. Durch die Anordnung der Lautsprecher am Quad können alle aufgenommenen Geräuschquellen entsprechend ihrer Position am Verbrennerfahrzeug am Quad wiedergegeben werden. Um alle Geräuschquellen so genau wie möglich abzubilden, ist es notwendig, die Mikrofone so nah wie möglich an ihnen zu positionieren.

Um die Geräusche der Ansauganlage sowie die der Ventile erfassen zu können, müssen die Mikrofone im Motorraum angebracht werden. Durch die dort vorherrschenden, begrenzten Platzverhältnisse sowie Einflussfaktoren, wie die sich beim Fahren entwickelnde Motorabwärme, ist die Auswahl der in Frage kommenden Mikrofone stark eingeschränkt. Störgeräuscheinflüsse wie Wind- oder Abrollgeräusche treten durch die Kapselung des Motors nicht in Erscheinung. Aufgrund ihrer Bauform und ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Strömungs- und Windgeräuschen, sowie ihrer geringen Richtwirkung, können keine gewöhnlichen Großmembran-Kondensatormikrofone verwendet werden. Auch handelsübliche, für den Live-Bereich konzipierte, Tauchspulenmikrofone wie das *Shure SM58* oder ähnliche Modelle kommen nicht als Alternative in Frage. Zwar heben sich diese Mikrofontypen durch ihre Robustheit von den Großmembran-Kondensatormikrofonen ab, doch auch die zu große Bauform dieser Mikrofone verhindert ein problemloses Anbringen im Motorraum unter der Motorhaube. Das optimale Mikrofon für eine Aufnahme im Motorraum muss sich daher durch seine Robustheit und durch eine kleine Dimensionierung auszeichnen. Die vor allem im Live-Fernsehen und häufig bei Filmdrehs verwendeten so genannten Lavalier- oder Ansteckmikrofone sind für den Zweck der Aufnahme der motornahen Schallquellen optimal. Dieser Mikrofontyp wird häufig für Sprachanwendungen verwendet. Da sie von den Sprechern direkt am Körper getragen werden und für den Zuschauer möglichst unsichtbar bleiben sollen, fällt ihre Bauweise extrem klein aus. Sie werden zumeist an Krawatten oder Knopflöchern befestigt. Die meisten Lavalier-Mikrofone weisen das Empfängerprinzip eines Druckempfängers mit Kugelcharakteristik auf. Dieses Empfängerprinzip wird durch eine rückseitig geschlossene Mikrofonkapsel realisiert. Eintreffender Schall ist nicht in der Lage, die Membran von hinten auszulenken. Durch die von der Einfallsrichtung unabhängige Wie-

dergabe des Schalls in immer gleicher Polarität, ergibt sich die Richtcharakteristik einer Kugel⁶³. Viele der im Motorraum verbauten Komponenten entwickeln in Fahrt extrem hohe Abwärme, wodurch große Sorgfalt beim Auswählen der Befestigungsmöglichkeiten für die Mikrofone geboten ist. Freie Stellen des Karosserieblechs oder die am Rand des Motorraums verbauten Dichtungsgummis eignen sich am besten zur Anbringung der Mikrofone. Um den Klang der motornahen Schallquellen so exakt wie möglich zu erfassen, werden die Mikrofone entsprechend sorgfältig positioniert. Um das Ansauggeräusch gut aufzeichnen zu können, wird ein Mikrofon möglichst nah an der Ansaugöffnung im vorderen Teil des Motorraums angebracht. Hierbei muss darauf geachtet werden, dieses nicht im Sog der Ansaugöffnung zu platzieren. Die Ventiltriebgeräusche lassen sich über zwei, an den Seitenrändern des Motorraums platzierten, Mikrofone erfassen. Alle drei verwendeten Mikrofone können problemlos mit faserverstärktem Klebeband (Gaffa Tape) befestigt werden. Die zum Anschließen benötigten, extrem dünnen und flexiblen XLR-Kabel können nach dem Befestigen der Mikrofone zu einem Kabelstrang zusammengefasst und nahe der Windschutzscheibe auf Beifahrerseite aus dem Motorraum geführt werden. Die Positionierung und Richtwirkung der drei Mikrofone ermöglicht das Erfassen aller relevanten Schallquellen im Motorraum.

Auch die Auswahl der Mikrofone zur Erfassung des Abgasmündungsgeräusches ist stark eingeschränkt. Zwar treten Einflussfaktoren wie Hitzeentwicklung nicht in Erscheinung, da die Mikrofone aber im Außenbereich hinter dem Fahrzeug angebracht werden müssen, ist mit Störgeräuscheinflüssen wie Wind- oder Abrollgeräuschen zu rechnen. Bedingt durch ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber Störgeräuschen sowie ihrer Richtwirkung kommen ebenfalls keine Großmembran-Kondensatormikrofone in Frage. Robuste Tauchspulenmikrofone wären für diesen Anwendungszweck zwar geeignet, eine erhöhte Richtwirkung der Mikrofone zur gezielten Ausblendung von Störgeräuschen wäre allerdings ein besserer Lösungsansatz. Die beim Filmtone oder im Live-Fernsehen, bei Unwetter häufig verwendeten Richtrohrmikrofone erweisen sich für den Zweck der Aufnahme des Abgasmündungsgeräusches als am Geeignetesten. Ein gewöhnliches Richtrohrmikrofon weist das Empfängerprinzip eines Druckgradientenempfängers mit Nieren- oder Supernierencharakteristik auf. Im Gegensatz zum reinen Druckempfänger, weisen Druckgradientenempfänger einen gerichteten Schallempfang auf. Eintreffende Schallwellen können die Membran des Mikrofans sowohl von vorne als auch von hinten auslenken. Vor der Membran eines Richtrohrmikrofans ist ein seitlich geschlitztes oder gelochtes Richtelement angebracht. Die starke Richtwirkung des Mik-

⁶³ vgl. Dickreiter, 1997, S. 162-163

rofons ergibt sich durch das physikalische Prinzip der Interferenz. Direkt einfallende Schallanteile werden hierbei gleichphasig addiert. Seitlich eintreffende Schallanteile erreichen die einzelnen Öffnungen des Richtelements zeit- und dadurch phasenversetzt. Hierbei erfolgt eine, je nach Phasenlage, partielle bzw. vollständige Auslöschung der Schallanteile⁶⁴. Da die beiden, zur Aufnahme ausgewählten, Fahrzeuge über eine zweiflutige Abgasanlage verfügen, müssen zwei Richtrohre verwendet werden. Als Windschutzmaßnahme wird ein Korbwindschutz verwendet, in dem die Mikrofone fixiert werden. Der Korbwindschutz ist mit einem gewebeartigen Stoff bespannt und bewirkt lediglich eine leichte Höhenbedämpfung. Der Korbschutz kann zusätzlich noch mit einem Fellwindschutz überzogen werden. Als optimale Mikrofonpositionen bieten sich die Stoßstange hinter dem Fahrzeug sowie der Teil der Karosserie zwischen Abgasmündung und Rücklicht an. Die Mikrofone in den Windkörben werden mit faserverstärktem Klebeband am Fahrzeug befestigt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Mikrofone genau auf die beiden Abgasmündungen ausgerichtet werden und dabei so weit wie möglich im Windschatten des Fahrzeugs bleiben, um Störgeräuscheinflüsse weitestgehend zu unterdrücken. Die zum Anschließen benötigten XLR-Kabel werden durch das Dichtungsgummi des Kofferraums in den Innenraum des Fahrzeugs verlegt.

Die Kabel aller Mikrofone werden zum Beifahrerplatz verlegt. Die Kabel der hinteren Mikrofone werden dabei durch den Kofferraum verlegt, die drei vorderen Mikrofonkabel werden unter der A-Säule des Fahrzeugs durch das Dichtungsgummi der Beifahrertür gezogen. Ein handelsübliches Audiointerface kommt für die Aufzeichnung der einzelnen Mikrofonsignale nicht in Frage. Bei fünf Eingangskanälen würde für ein adäquates Interface eine zusätzliche Spannungsversorgung benötigt werden. Über einen akkubetriebenen, mobilen Achtkanal-Audiorecorder können alle Audiosignale in entsprechender Qualität aufgezeichnet werden. Der ganze Aufnahmeprozess kann somit gänzlich unabhängig von externen Spannungsversorgungen während der Fahrt und im Stand durchgeführt werden. Die folgende Grafik verdeutlicht nochmals die genannten Positionen der einzelnen Mikrofone und zeigt deren Ausrichtung (Pfeile), sowie deren Aufnahmebereich (Kreise) auf.

⁶⁴ vgl. Dickreiter, 1997, S. 171-172

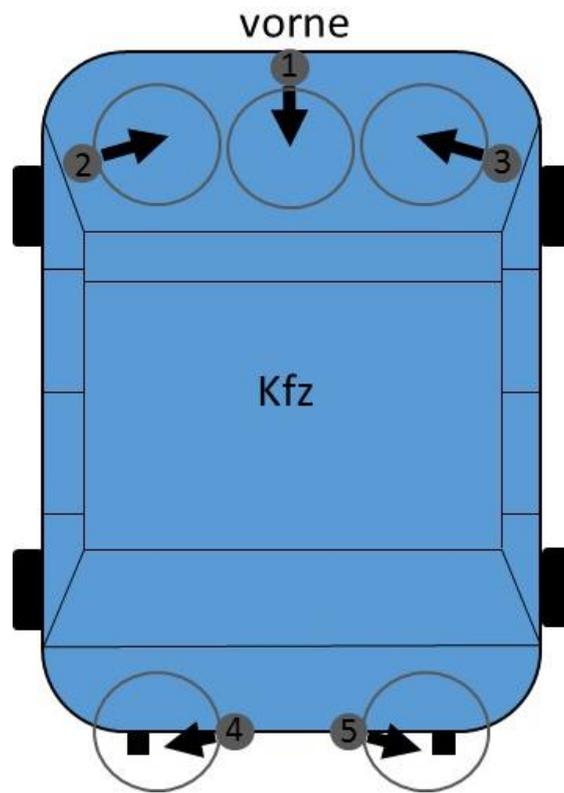


Abbildung 29: Aufsicht auf Kfz mit allen Mikrofonpositionen



Abbildung 28: Rückseitige Mikrofonierung



Abbildung 30: Mikrofonierung im Motorraum

4.3.3 Aufnahmeequipment

Für die Aufnahmen im Motorraum wurden drei Mikrofone des Herstellers *Countryman*, Modellbezeichnung *B6*, verwendet. Laut dem Hersteller ist auf dem Markt kein kleineres Lavalier-Mikrofon zu finden⁶⁵. Somit ist das *B6* für den Aufnahmezweck und das Anbringen am Fahrzeug hervorragend geeignet. Das Mikrofon zeichnet sich durch eine Kugelcharakteristik und einen relativ ebenen Frequenzgang aus. Für das Mikrofon sind drei Filterelemente vorhanden. Diese bewirken jeweils eine unterschiedliche Pegelanhebung im Frequenzbereich zwischen 10 kHz und 20 kHz. Für die Aufnahmen am Fahrzeug wurde der *Flat*-Filter verwendet, da dieser so gut wie keine Pegelerhöhung hervorruft. Der maximale Schalldruckpegel von 120 dB SPL reicht für die Aufnahmen der Motorschallquellen aus. Um eventuell auftretende Strömungs- oder Windgeräusche zu unterdrücken, wurden alle drei Mikrofone mit einem Windschutz aus Schaumstoff versehen.

⁶⁵ vgl. Countryman, 2016

Die Aufnahmen der Auspuffanlage wurden mittels zweier Richtrohrmikrofone des Herstellers *Sennheiser*, Modell *MKH416P48*, realisiert. Dieses Modell zeichnet sich durch seine hohe Richtwirkung und zudem durch seine Robustheit und Klimafestigkeit aus. Für Aufnahmen im Freien unter erschwerten Bedingungen, ist dieses Mikrofon somit ideal. Auch der Grenzschalldruckpegel von 130 dB SPL reicht für den Zweck der Aufnahmen hinter dem Fahrzeug aus. Als Windschutzmaßnahme wurden zwei Modulkits, bestehend aus Korbwindschutz, Fellwindschutz und Mikrofon-Haltevorrichtung des Herstellers *Rycote* verwendet. Über die Halterung wird das Richtrohrmikrofon im Inneren des Windkorbs befestigt.

Die Mikrofonensignale werden über den mobilen Audiorecorder *788T-SSD* der Firma *Sound Devices* aufgezeichnet. Die austauschbaren Akkus des Recorders garantieren eine mehrstündige Laufzeit im Aufnahmebetrieb. Die Aufnahmen werden mit einer Abtastrate von 48 kHz bei einer Bittiefe von 24 Bit durchgeführt. Für die bei jeder Aufnahme entstehenden Audiofiles kann bereits im Voraus der Aufnahme im Gerät eine entsprechende Nomenklatur für die Vollast- und Teillastsamples angelegt werden. Dadurch können beim Sichten der Aufnahmen alle Audiofiles sauber voneinander getrennt werden. Eine, im Gerät verbaute, analoge Limiterschaltung verhindert zudem ein Übersteuern der Mikrofonensignale. Über die integrierten Pegelanzeigen ist der Beifahrer jederzeit dazu in der Lage, die Mikrofonpegel zu überprüfen, um diese notfalls zu korrigieren. Ein Kopfhörerausgang ermöglicht das Mithören aller oder einzelner Signale während der Aufnahme. Vier der acht Eingangskanäle können mit dreipoligen Standard-XLR-Kabeln belegt werden. Die übrigen vier Kanäle weisen eine kleinere Form einer XLR-Buchse auf. Daher muss auf die entsprechende Standardgröße adaptiert werden. Die fünf Kabel, die am Fahrzeug verbauten Mikrofone, werden am Beifahrerplatz mit dem Audiorecorder verbunden. Die Aufnahmen können vom Beifahrer nach Belieben gestartet oder gestoppt werden. Die fünf Eingangssignale werden separat aufgenommen. Somit kann jedes einzelne Signal im Nachbearbeitungsprozess klanglich verändert und den Vorstellungen entsprechend angepasst werden.

Die fünf Mikrofone sowie das *Rycote* Kit wurden von der Stuttgarter Verleihfirma *Licam GmbH* ausgeliehen.



Abbildung 31: Sound Devices 788T-SSD (L) und Rycote Kit (R)⁶⁶

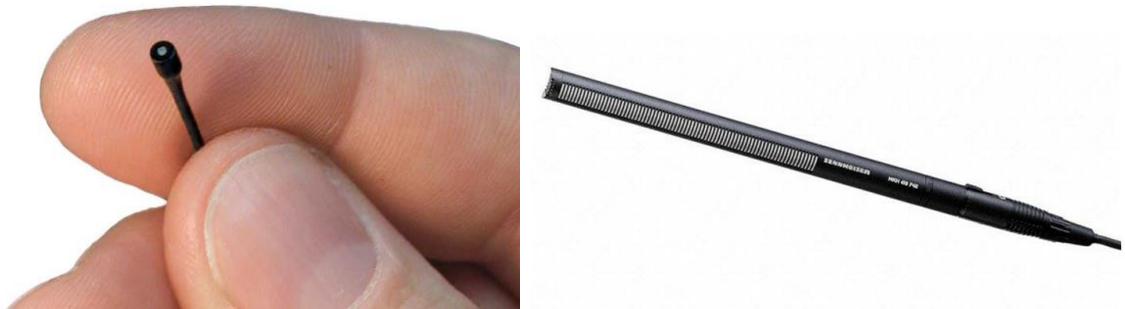


Abbildung 32: Countryman B6 (L)⁶⁷ und Sennheiser MKH416P48 (R)⁶⁸

4.3.4 Ablauf der Aufnahmen

Bevor die Aufnahmen durchgeführt werden können, müssen die Fahrzeuge mit den entsprechenden Mikrofonen aufgerüstet werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die Gefahr eines Ablösens der Mikrofone von den Fahrzeugen weitestgehend minimiert wird. Außerdem muss die Verkehrssicherheit der Fahrzeuge weiterhin gewährleistet sein. Die Mikrofonkabel sollten im Falle eines Ablösens eines der Mikrofone als zusätzliche Sicherung fungieren. Mit dem fertig aufgerüsteten Fahrzeug kann anschließend zur Aufnahmestrecke gefahren werden. Dies ermöglicht dem Beifahrer schon während der Anfahrt, die Signalpegel der Mikrofone entsprechend auszusteuern. Beim Aussteuern bzw. Einpegeln der Mikrofone gilt es zu beachten, allen Einzelpegeln, trotz vorgeschalteter Limiterschaltung des *Sound Devices*, genug Abstand zur Vollaussteuerung zu lassen. Die einzelnen Signale sollten nach dem Einpegeln in etwa die gleichen Lautstärkepegel erzeugen. Bevor die einzelnen Samples in den zwei Betriebszuständen Vollast und Leerlauf, aufgenommen werden können, sollte der Motor des

⁶⁶ vgl. Rycote Microphone Windshields Ltd., 2016

⁶⁷ vgl. Countryman Associates, Inc., 2016

⁶⁸ vgl. Sennheiser Electronic GmbH & Co.Kg, 2016

Fahrzeugs durch ein mehrmaliges Abfahren der Aufnahmestrecke auf Betriebstemperatur gebracht werden. Anschließend kann mit den Aufnahmen begonnen werden.

Die Aufnahmen werden in zwei Aufnahmezyklen eingeteilt, einen Leerlaufzyklus und einen Volllastzyklus. Durch, im Voraus der Aufnahmen, mit dem Fahrzeug des Autors durchgeführte Testaufnahmen, wurde das Aufnehmen der Drehzahlsamples mit einer Schrittweite von 500 Umdrehungen pro Minute als am Sinnvollsten befunden (Ausnahme ist der Schritt von Standgas auf 1000 Umdrehungen pro Minute). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass das Drehzahlband in 500er-Schritten abgefahren wird und für jeden dieser Schritte eine separate Aufnahme erfolgt. Die Aufnahmen unter Volllast werden auf der in *Kapitel 4.3.1* beschriebenen bergauf verlaufenden Straße durchgeführt. Beim bergauf Fahren steuert der Fahrer mit Hilfe der Drehzahlanzeige des Fahrzeugs die entsprechende Drehzahl an. Diese muss im Nachhinein über die komplette Bergauffahrt konstant gehalten werden. Hierbei sollte in einen möglichst niedrigen Gang geschaltet werden, um den Betriebszustand der Volllast schnellstmöglich zu erreichen. Der Beifahrer startet die Aufnahme, sobald die Drehzahlstufe erreicht ist und stoppt diese mit dem Erreichen des flachen Straßenabschnitts am Ende der bergauf verlaufenden Straße. Im Anschluss wird das Fahrzeug gewendet und die Bergauffahrt wiederholt. Dabei wird die 500 Umdrehungen pro Minute höher liegende Drehzahl angesteuert und die Aufnahme erneut gestartet. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die maximale Drehzahl des Fahrzeugs erreicht und aufgenommen ist. Der Volllastzyklus wird insgesamt dreimal durchgeführt, um in der Nachbereitung eine breite Auswahl an Samples zu gewährleisten. Bei der Implementierung der einzelnen Samples in *FMOD Studio* sollten diejenigen Samples verwendet werden, die in ihrer Klangfarbe und Tonalität am besten übereinstimmen. Dadurch werden sprunghafte Übergänge zwischen den einzelnen Samples vermieden.

Das Aufnehmen der Leerlaufsamples erfolgt im Anschluss an die Aufnahmen der Volllastsamples. Hierbei werden dieselben Drehzahlen aufgenommen. Im Leerlauf werden die einzelnen Drehzahlstufen nacheinander gezielt angesteuert. Mit dem Erreichen der jeweiligen Drehzahlstufen wird die zugehörige Aufnahme gestartet. Auch die Leerlaufzyklen werden insgesamt dreimal wiederholt. Zusätzlich, zu den einzelnen Leerlauf- und Volllastsamples, müssen das Anlassen und Abstellen des Fahrzeugs mehrmals aufgenommen werden. Ferner empfiehlt sich das Aufnehmen von Referenzsounds. Damit ist das Aufzeichnen so genannter Motorhochläufe gemeint. Das Fahrzeug wird vom Standgas bis zu einer hohen Geschwindigkeit aufgenommen. Im Gegensatz zu den beschriebenen Aufnahmezyklen wird das Fahrzeug

normal hochgeschaltet und nicht in einem bestimmten Gang gefahren. Im Nachbearbeitungsprozess können die aufgenommenen Volllast- und Leerlaufsamples mit den Referenzen abgeglichen werden und klanglich der Referenz angepasst werden. Zusätzlich können weitere akustische Phänomene, wie Fehlzündungen oder Blinker, aufgenommen werden. Im Anschluss an die Aufnahmen müssen alle Aufnahmen gesichtet und sortiert werden, bevor die klangliche Nachbearbeitung erfolgen kann. Abschließend werden alle Soundsamples geschnitten und in die Projektstruktur von *FMOD Studio* implementiert.

4.4 Nachbearbeitung, Schnitt und Implementierung der Samples

Das folgende Kapitel gibt einen groben Überblick über die Bearbeitungsmöglichkeiten und den Schnitt der Samples. Zusätzlich wird kurz auf deren Implementierung in die Projektstruktur von *FMOD Studio* eingegangen. Die genaue Beschreibung der Nachbearbeitung sowie ein ausführlicher Einblick in die Funktion der projektspezifischen Struktur von *FMOD Studio* für den Zweck der Synthese von Motorsounds erfolgt in der parallel durchgeführten Arbeit (Kersten, 2017).

Für einen strukturierten Nachbearbeitungsprozess empfiehlt es sich, die einzelnen Aufnahmen in eine gewöhnliche DAW zu importieren. Alle Bearbeitungsschritte sowie der Schnitt können dort durchgeführt werden. Die bereits im, zur Aufnahme verwendeten, Audiorecorder festgelegte Nomenklatur der einzelnen Aufnahmetakes erleichtert das Sortieren der Aufnahmen nach Leerlauf und Volllast. Die Aufnahmen der fünf Mikrofone sollten jeweils auf separaten Einzelspuren nach aufsteigender Drehzahl in die DAW geladen werden. Die beiden Signale des Abgasmündungsgeräusches werden aus Gründen der leichteren Bearbeitung auf einer Stereospur zusammengefasst. Somit verbleiben vier Spuren für die Volllastsamples und vier Spuren für die Leerlaufsamples zur Bearbeitung. Vor der klanglichen Bearbeitung werden die einzelnen Aufnahmen grob auf eine Länge von ca. 1,5 Sekunden geschnitten. Unbrauchbare Aufnahmen werden direkt aussortiert.

Bevor die einzelnen Aufnahmen klangästhetisch bearbeitet werden, sollten diese von Störgeräuscheinflüssen befreit werden. Vor allem die Signale der im Freien hinter dem Fahrzeug angebrachten Mikrofone sind davon betroffen. Störeinflüsse wie Wind- oder Reifenabrollgeräusche äußern sich mit zunehmender Geschwindigkeit als breitbandiges Rauschen. Die Störeinflüsse lassen sich mit entsprechenden Software-Plugins jedoch gut lokalisieren und entfernen. Hierbei gilt es zu beachten, dass keine Frequenzanteile der dominanten Motorordnungen beschnitten werden. Ein solches Beschneiden würde den Klangcharakter der Aufnahmen wesentlich beeinflussen.

Nachdem die Signale bestmöglich von Störeinflüssen bereinigt wurden, kann die klangästhetische Bearbeitung erfolgen. Da nur ein Lautsprecher im hinteren Teil des Quads verbaut wurde, empfiehlt es sich, die beiden Mikrofonsignale des Abgasmündungsgeräusches auf einer Mono-Spur zusammenzufassen. Bei der klanglichen Bearbeitung der einzelnen Aufnahmen dienen die aufgezeichneten Motorhochläufe als klangliche Referenz. Zudem fließt der subjektive Höreindruck, der bei der Fahrt mit den Fahrzeugen entstanden ist, bei der Bearbeitung mit ein. Die Betonung der Frequenzbereiche der dominanten Motorordnungen spielt, vor allem bei der Bearbeitung der Aufnahmen des Abgasmündungsgeräusches, eine entscheidende Rolle. Da die Abgasanlage den Großteil des Gesamtklangbilds darstellt, werden die entsprechenden Frequenzbereiche besonders betont. Über Spectrum-Analyzer-Plugins und Equalizer-Plugins der DAW werden die entsprechenden Frequenzbereiche lokalisiert und durch Pegelanhebung betont. Um den Klang gegebenenfalls sportlicher oder aggressiver zu gestalten, kann zusätzlich mit Verzerrer-Plugins gearbeitet werden. Die Aufnahmen der motornahen Schallquellen zeichnen sich, bedingt durch die Nähe der Mikrofone zur Schallquelle, durch einen besonders hellen Klang aus. Da diese Geräusche in der Realität durch die Motorkapselung abgedämpft werden, werden sie vom Rezipienten weniger deutlich wahrgenommen. Diese akustische Dämpfung lässt sich durch ein gezieltes Absenken der dominanten hohen Frequenzen über einen Equalizer nachempfinden. Bei der Bearbeitung gilt es generell zu beachten, dass alle Samples klanglich aufeinander angepasst werden. Bei der späteren Implementierung in *FMOD Studio* wird somit ein sauberer Hochlauf der Samples gewährleistet.

Nachdem alle Samples klangästhetisch bearbeitet wurden, werden diese auf ihre endgültige Länge geschnitten. Um Knackgeräusche während der Endlosschleifen-Wiedergabe zu verhindern, muss am Sampleanfang und am Sampleende sauber im Nulldurchgang der Wellenform geschnitten werden. Um die Schnitte so sauber wie möglich zu setzen, wird die Ansicht der Wellenform in der DAW maximal vergrößert. Sobald ein gemeinsamer Nulldurchgang aller vier Spuren lokalisiert ist, wird der Schnitt gesetzt. Durch die beiden Schnitte ergibt sich letzten Endes ein Soundsample mit einer Länge von ca. 0,5 s – 1 s.

Für die Implementierung in die projektspezifische Struktur von *FMOD Studio* werden diejenigen Samples ausgewählt, welche klanglich am besten harmonieren. Klangfarbe und Klangcharakter sind hierbei die entscheidenden Faktoren. Die einzelnen Soundsamples werden im vorher definierten Drehzahlparameter von *FMOD Studio* ihren entsprechenden Drehzahlwerten zugeordnet. Im Drehzahlparameter ist der exakte Wertebereich des Drehzahlbandes des entsprechenden Verbrennerfahrzeugs genau definiert. Hierbei bilden die Samples der beiden

hinteren Mikrofone, die Samples der gegenüberliegenden Mikrofone aus dem Motorraum sowie die Samples der Ansauganlage eine separate Spur. Für Leerlauf- und Volllastsamples ergeben sich somit sechs separate Spuren. Für jedes einzelne Sample muss anschließend die Loop-Funktion aktiviert werden, um eine kontinuierliche Wiedergabe zu erzeugen. Um die Zwischenschritte zwischen den aufgenommenen Drehzahlstufen zu interpolieren, wird ein Pitch definiert. Über eine softwareinterne Pitch-Automation, den so genannten Root-Pitch, lässt sich eine Drehzahl definieren, ab der die Tonhöhe des entsprechenden Samples kontinuierlich hochgepitcht wird. Der Root-Pitch wird über die Zylinderanzahl der Motoren sowie die Frequenz der ersten dominanten Motorordnung für jedes Sample einzeln errechnet. Je genauer der Root-Pitch angegeben wird, desto exakter können die Samples ineinander überblendet werden. Die Drehzahlsamples werden so lange gepitcht, bis das nächste Drehzahlsample erreicht ist. Zur sauberen Überblendung werden die Samples gefadet. Die Länge der Fades kann von Sample zu Sample variieren und wird separat angepasst. Durch die exakte Berechnung des Root-Pitches sowie durch das saubere Faden, entsteht ein sauberer Motorhochlauf. Durch den im Projekt definierten Lastparameter wird eine Lautstärkeautomation festgelegt. Diese regelt das Lautstärkeverhältnis zwischen Volllastsamples und Leerlaufsamples zur Erzeugung der klanglichen Lastdynamik.

Über den softwareinternen Surround-Panner werden die Einzelspuren auf die entsprechenden Ausgangskanäle der externen Soundkarte geroutet. Durch die Lautsprecherkonfiguration am Quad werden schlussendlich die motornahen Schallquellen über das vordere Lautsprecherpaar und der Klang der Auspuffanlage über den Rücklautsprecher wiedergegeben. Das Lautsprecherpaar auf Höhe des Fahrers kann akustisches Feedback von Komponenten wie beispielsweise dem Blinker wiedergeben. Als akustische Rückmeldung über den Fahrzustand kann über die Lautsprecher auf Fahrerhöhe zusätzlich eine Mischung aus Abgasmündungsgeräusch sowie Motorschallquellen wiedergegeben werden. Aufgrund dieser Verteilung aller Schallquellen auf verschiedene Lautsprecher ist es möglich, das Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs annähernd zu reproduzieren.

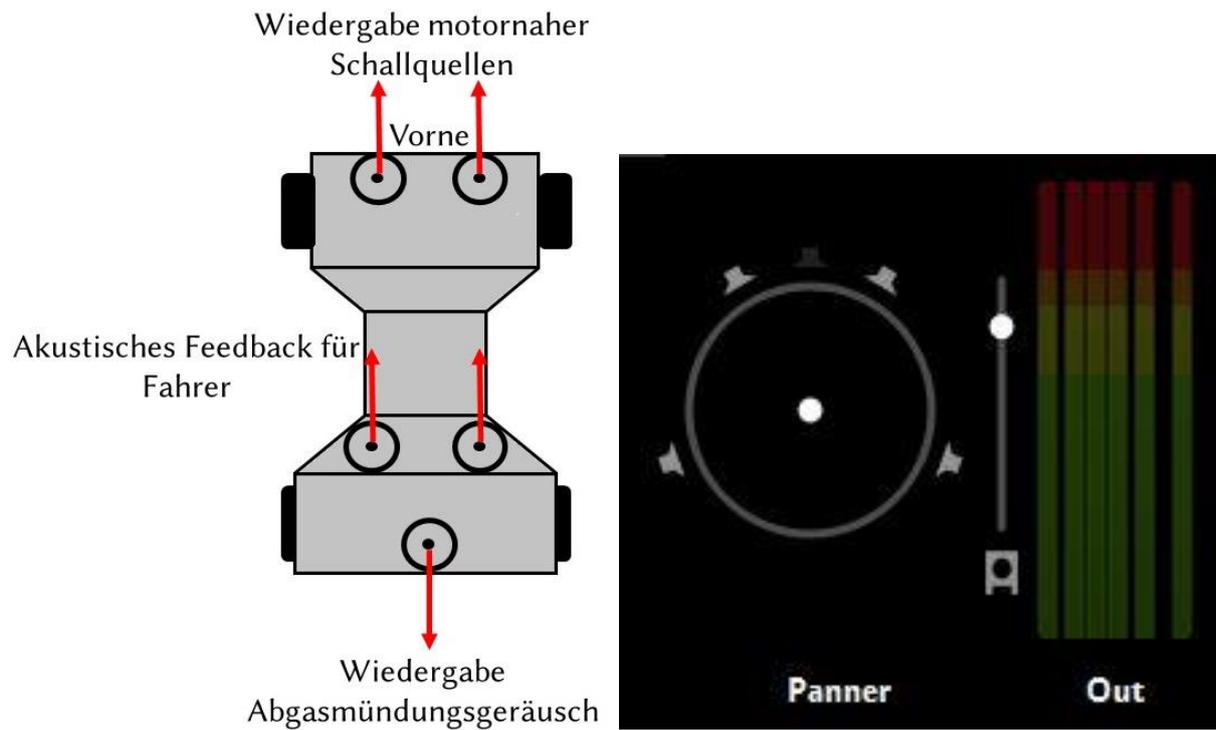


Abbildung 33: Abstrahlverhalten der Lautsprecher am Quad (L) und FMOD-Surround-Panner (R)

5 Zusammenfassung und Abschlussbewertung

Ziel dieser Arbeit war die Weiterentwicklung eines Soundgenerators für Elektrofahrzeuge unter besonderer Berücksichtigung der klanglichen Dynamikentwicklung des Motorengeräusches eines Verbrennerfahrzeugs bei verschiedenen Lastzuständen.

Auf Basis eines bereits bestehenden Soundgenerators wurde ein neues System realisiert. Als Technikträger diente ein, von der Firma GIGATRONIK entwickeltes, Quad mit elektronischem Antriebsstrang. In der Konzeptionsphase lag der Fokus auf dem Aufzeigen und der Bewertung der Schwachstellen des alten Soundgenerators. Hierbei wurde vor allem die fehlende klangliche Dynamikentwicklung der synthetischen Motorensounds unter Last festgestellt. Die Synthese des Motorenklangs wurde hierbei über eine Wandlung von CAN-Signalen in MIDI-Signale generiert. Zehn-sekündige Soundsamples eines aufgenommenen Verbrennungsmotors wurden auf die Halbtonstruktur eines Software-Synthesizers gemappt. Die CAN-Signale der Handgasstellung (im Leerlauf) oder der Drehzahl der Elektromotoren (in Fahrt) wurden als relevante Kenngrößen in entsprechende MIDI-Signale gewandelt. Mit ansteigendem Wertebereich der Handgasstellung oder der Drehzahl wurde ein entsprechendes Drehzahlsample in Endlosschleife wiedergegeben. Die verwendeten Soundsamples wurden durch die Aufnahme verschiedener Schallquellen eines Traktormotors im Leerlauf generiert und gleichermaßen über alle vier, am Quad verbauten, Lautsprecher wiedergegeben. Ein Weiterverwenden der MIDI-Logik würde einen horrenden Anstieg der Anzahl der Benötigten Soundsamples, im Leerlauf und unter Last nach sich ziehen. Ebenfalls wäre es nötig gewesen, die verwendete MIDI-Logik zur Lastengenerierung komplett umzuprogrammieren. Um die angesprochenen Probleme zu lösen, wurden das CAN-MIDI-Gateway sowie der Software-Synthesizer und alle damit in Verbindung stehenden Komponenten aus dem System entfernt.

Bei der Neukonzeption des Soundgenerators musste daher ein Lösungsansatz verfolgt werden, bei dem die zur Lastgenerierung benötigten Kenngrößen, Drehzahl und Drehmoment, ohne vorherige Wandlung zur Ansteuerung von Audiodateien verwendet werden können. Die in vielen Rennsimulations-Videospielen verwendete Audio-Engine *FMOD Studio* bot hierbei die optimale Lösung. Die klangliche Dynamikentwicklung des Motorensounds wird dort mittels Lautstärkeüberblendungen zwischen Leerlauf- und Volllastsamples gesteuert. Die Automationskurve zur Steuerung dieses Lautstärkeverhältnisses zwischen Leerlauf- und Volllastsamples wird durch die reale Kenngröße des Drehmoments berechnet. Das Aufnehmen der Drehzahlenstufen der Fahrzeuge in den Betriebszuständen Volllast und Leerlauf

kann zudem in relativ großen Drehzahlsprüngen erfolgen, da die Schritte zwischen den einzelnen Drehzahlstufen mittels eines softwareinternen Pitch-Algorithmus der Audio-Engine generiert werden. Dadurch kann, im Vergleich zur MIDI-basierten Lösung des alten Systems, eine große Menge an Dateiaufwand gespart werden. Die entsprechenden CAN-Nachrichten zur Ansteuerung der Audiodateien können über ein CAN-Interface direkt vom CAN-Bus ausgelesen und über USB an einen PC zur Weiterverarbeitung übertragen werden. In der parallel durchgeführten Bachelorarbeit (Kersten, 2017) wurde die entsprechende Software zur Verarbeitung der relevanten CAN-Signale entwickelt. Die CAN-Nachrichten werden dort softwareintern aufbereitet und an die Audio-Engine weitergeleitet. Im Voraus in der Engine definierte Parameter, wie Drehzahl oder Last, werden von den eingehenden Werten gesteuert. Diese Parameter können exakt an den Wertebereich der eingehenden Werte angepasst werden. Zudem ist über die Audio-Engine eine diskrete Mehrkanalwiedergabe möglich. Um die Ortbarkeit des Quads zu erhöhen wurde beschlossen, einen weiteren Lautsprecher entgegengesetzt zur Fahrtrichtung im hinteren Teil des Quads zu verbauen. Dadurch ist man zusätzlich in der Lage, die wesentlichen Schallquellen eines Verbrennerfahrzeugs auf verschiedene Lautsprecher am Quad zu verteilen. Diese neue Verteilung macht es möglich, dass ein authentisches, homogenes Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs reproduziert werden kann. Diese Mehrkanalwiedergabe wird durch den Einsatz zweier Class-D-Endstufen sowie einer externen Achtkanal-Soundkarte ermöglicht. Der Lautsprecher wurde mit allen anderen Systemkomponenten kompakt in einer Kofferbox hinter dem Fahrerplatz verbaut. Hierbei wurden alle Stromversorgungen und Kabelverbindungen so konfektioniert, dass ein schnelles Austauschen oder Entfernen einer beliebigen Komponente jederzeit möglich ist.

Die Tonaufnahmen der Samples wurden an zwei Firmenfahrzeugen der Firma GIGATRONIK durchgeführt (Porsche Panamera GTS, AUDI A6 Avant 3.0 TDI). Die zur Aufnahme verwendeten Mikrofone wurden sowohl im Motorraum, als auch hinter dem Fahrzeug befestigt. Ziel war es hierbei, alle wesentlichen Geräuschquellen eines Verbrennerfahrzeugs aufzunehmen. Um die verschiedenen Lastzustände abbilden zu können, wurden die Leerlauf-Aufnahmen im Stand und die Volllast-Aufnahmen durch Bergauffahrt realisiert. Hierbei wurde jeweils das komplette Drehzahlband mit der Schrittweite 500 Umdrehungen pro Minute aufgenommen. Die Aufnahmen wurden im Nachbearbeitungsprozess klanglich bearbeitet, um den Charakter der Fahrzeuge entsprechend zu betonen. Anschließend wurden die Aufnahmen auf ihre endgültige Größe von ca. einer Sekunde geschnitten und in die Projektstruktur von *FMOD Studio* implementiert. Die einzelnen aufgenommenen Geräuschquellen können über

den softwareinternen Surround-Panner auf die verschiedenen Lautsprecher des Systems verteilt werden. Über eine zusätzliche Profiling-Funktion der Engine, war es möglich, das Verhalten und die Ansteuerung des Sounds im Nachhinein zu verändern, um den synthetisierten Sound dem Fahrverhalten entsprechend bestmöglich anzupassen.

Die klangliche Dynamikerzeugung in verschiedenen Lastzuständen wird durch das finale System annähernd perfekt simuliert. Je nach Lastzustand passt sich der Klang der Motorsounds individuell an die Fahrsituation an. Zudem wird durch den gezielten Einsatz aller am Quad verbauten Lautsprecher die Ortbarkeit des Fahrzeugs erhöht. Alle aufgenommenen Schallquellen können, entsprechend ihrer Position an einem Verbrennerfahrzeug, auf die entsprechenden Lautsprecher am Quad verteilt werden. Somit kann ein homogenes Klangbild eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor reproduziert werden. Dies steigert außerdem auch die emotionale Wirkung auf den Fahrer. Die Eindrücke konnten anhand von Zuhörerreaktionen sowie durch das Gespräch mit Fachpersonal bestätigt werden. Durch die Weiterentwicklung des Soundgenerators konnte somit ein deutlicher Mehrwert für die Firma GIGATRONIK geschaffen werden. Je nach Belieben kann der Sound des Fahrzeugs durch die Bedienelemente des Quads oder eine App flexibel geändert werden. Durch die angewandten Aufnahmetechniken und die verwendete Software ist man zudem in der Lage, je nach Kundenwunsch neue Sounds in einem kurzen Zeitraum in das System zu integrieren, oder bestehende Sounds zu verändern. Das Ziel dieser Arbeit, ein Konzept für eine Weiterentwicklung eines Soundgenerators der Firma GIGATRONIK zu erstellen sowie dieses im Hinblick auf die klangliche Dynamikentwicklung eines Motors bei verschiedenen Lastzuständen umzusetzen, wurde erreicht.

6 Ausblick

Die Ergebnisse der beiden durchgeführten Bachelorarbeiten könnten theoretisch die Grundlage für ein Serienprodukt darstellen. Um dies zu realisieren müsste allerdings eine eigene Programmstruktur entwickelt werden, mit derselben Funktionalität wie die Audio-Engine *FMOD Studio*. Ziel wäre es, alle Komponenten wie PC plus zugehöriger Software, Soundkarte oder CAN-Interface zusammen in einer Hardware zu vereinen. Das System könnte in jedem Fahrzeug, ob Elektrofahrzeug oder Verbrennerfahrzeug, in Kombination mit dem bereits vorhandenen Infotainment-System zum Einsatz kommen. Es würde sich somit sowohl zur Innenraumbeschallung, als auch zur Außenbeschallung eignen. Dieses Produkt würde allerdings einen enormen Entwicklungsaufwand mit sich bringen und dadurch hohe Kosten verursachen, weshalb dieser Ansatz nur in der Theorie zu betrachten ist.

Am Versuchsfahrzeug selbst besteht die Möglichkeit, die Ortbarkeit des Fahrzeugs sowie das emotionale Fahrerlebnis für den Fahrer durch den Einsatz besserer Lautsprecherchassis zu steigern. Hierbei gilt es darauf zu achten, dass deutlich leistungsfähigere Chassis ausgewählt werden. Diese sollten mit den vorhandenen Lautsprechergehäusen trotzdem kompatibel bleiben. Somit wäre man in der Lage, die Gesamtlautstärke des Systems nochmals zu erhöhen und dadurch den klanglichen Anteil der Elektromotoren des Fahrzeugs noch deutlicher zu übertönen. Da nur fünf Ausgänge der externen Soundkarte vom aktuellen System belegt werden, könnten zudem weitere Lautsprecher im Fahrzeug integriert werden. Ein zweiter Rücklautsprecher würde beispielsweise eine Stereo-Wiedergabe des Auspuffklangs ermöglichen.

Weiterführend könnten psychoakustische Untersuchungen am Quad durchgeführt werden. Hierbei sollte der Fokus sowohl auf der Ortbarkeit des Fahrzeugs für Passanten liegen sowie die Fragestellung untersuchen, inwieweit sich das synthetisierte Klangbild des Quads, welches über die Lautsprecher wiedergegeben wird, von dem realen Klangbild eines Verbrennerfahrzeugs abhebt und unterscheidet. Auch die Authentizität des synthetisierten Motorenklangs könnte psychoakustisch untersucht werden. Anhand der Untersuchungsergebnisse wäre man in der Lage, den Klang der einzelnen Motoren zielgruppengerecht anzupassen oder neue Klänge zu gestalten.

Die, während der Projektarbeit, entstandenen Soundpakete zielen nur auf die möglichst authentische Wiedergabe eines synthetisierten Verbrennungsmotors ab. Ein spezieller Sound, ausschließlich für Elektrofahrzeuge, wird nicht behandelt. Ein Elektrofahrzeug sollte allerdings klanglich nicht die simple Imitation eines Verbrennungsmotors sein, jedoch für den Kunden genauso erlebbar bleiben. Deshalb bietet die Forschung nach dem endgültigen Klang

eines Elektrofahrzeugs entscheidendes Entwicklungspotential. Da mögliche Klänge eines Elektrofahrzeugs nicht durch Richtlinien eingeschränkt werden, bleibt die Soundgestaltung für die Entwicklungsabteilungen der Automobilhersteller völlig offen. Mit dem entwickelten System und durch die zum Einsatz kommende Software ist es möglich, jegliche Art von Motorsound, vom realen Verbrennungsmotor bis hin zum Future-Car, völlig frei zu gestalten. Für die Vorentwicklung und Simulation zukünftiger Fahrzeugsounds bildet das entwickelte System somit die optimale Grundlage.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich für die Unterstützung und Betreuung, sowohl während des gesamten Studiums, als auch während der Thesis, bei meinem Erstprüfer von der Hochschule der Medien, Herrn Prof. Oliver Curdt, bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei meinem Zweitprüfer, Herrn Dipl.-Ing. Jochen Lüling, für die Betreuung seitens der Firma GIGATRONIK Stuttgart GmbH. bedanken.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen der Firma GIGATRONIK ohne deren Hilfe das Projekt nicht möglich gewesen wäre. Besonders hervorzuheben möchte ich hierbei Simon Kunz, Raphael Wank, Florian Klingenstein, Lukas Herrmann und Tobias Holl.

Ein besonderer Dank geht an Max Kersten für die gute Zusammenarbeit an diesem Projekt über das halbe Jahr.

Für die ganze Studienzeit, im Bachelorstudium, danke ich meinen Kommilitonen Roman Pertschi, Dominik Schempp, Mitra Schmidt, Sophie Kojelles und Benedikt Maile. Ohne euch wäre alles nur halb so Spaßig geworden!

Für die Unterstützung in guten sowie in schlechten Zeiten möchte ich meinen engsten Freunden aus der Schulzeit, Maximilian Meyer, Jannik Mayer, Nico Staller, Hans Yao, Daniel Landes und Max Riebelmann danken!

Für die lehrreiche und tolle Zeit in meinem Praxissemester und für jeden guten Ratschlag danach möchte ich mich bei Tim Langenfeld, Stefan Dijkema, Silvia Jellen und Luisa Wittig bedanken.

Der größte Dank geht abschließend an meine Familie für jeden guten Rat sowie die finanzielle Unterstützung in knapp vier Jahren Studium. Dankeschön!

Literaturverzeichnis

- Ackermann, P. (1991). *Computer und Musik - Eine Einführung in die digitale Klang- und Musikverarbeitung*. Wien New York: Springer-Verlag.
- Ahrens, S., Fox, U., & Feng, J. (März 2014). Aktive Methoden für freie Gestaltung des Motorengeräuschs . *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift (Ausgabe 3, 2014)*, S. 40-45.
- CiA - CAN in Automation. (2016). *can-cia.org/can-knowledge/*. Abgerufen am 3. Dezember 2016 von can-cia.org: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/>
- Countryman Associates, Inc. (2016). *B6 OMNIDIRECTIONAL LAVALIER*. Abgerufen am 10. Dezember 2016 von Countryman: <http://www.countryman.com/b6-omnidirectional-lavalier-microphone>
- Dickreiter, M. (1997). *Handbuch der Tonstudioteknik*. München: K.G. Saur Verlag KG.
- Dudenbostel, D., Schneider, K., & Volk, T. (2011). Elektrik/Elektronik/Software. In H.-H. Braess, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 644-762). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Ellermeier, W., & Hellbrück, J. (2008). Hören-Psychoakustik-Audiologie. In S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik* (S. 42-45). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Engel, K., Snitil, B., Wolff, K., Handel, R., Krüger, J., Gauterin, F., . . . Brass, O. (2010). Wesentliche Geräuschquellen am Fahrzeug und deren Charakterisierung . In K. Genuit, *Sound-Engineering im Automobilbereich* (S. 205-316). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gaedtke, M. (1985). *Parametermessungen an Lautsprecher-Chassis*. München: Franzis-Verlag GmbH.
- Goertz, A. (2008). Lautsprecher. In S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik* (S. 421-491). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Guggenmos, J. (2011). Fahrzeugphysik. In U. Seiffert, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 33-82). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Haußmann, M. (2015). *Sound für Elektro- und Hybridfahrzeuge (Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS))*. Stuttgart: Hochschule der Medien, Bachelorarbeit.
- Henn, H., Sinambari, R. G., & Fallen, M. (2008). *Ingenieurakustik - Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag.

- Hermes, M. (8. Juli 2014). *A Brief Tour of Automotive Sound Sources*. Abgerufen am 27. November 2016 von Designing Sound - Art and technique of sound design: <http://designingsound.org/2014/07/a-brief-tour-of-automotive-sound-sources/>
- Kersten, M. (2017). *Weiterentwicklung eines Soundgenerators für Elektrofahrzeuge - softwaretechnische Umsetzung und Implementierung der Audio Engine FMOD Studio*. Stuttgart: Hochschule der Medien, Bachelorarbeit.
- Krüger, J., Pommerer, M., & Conrath, M. (Juli 2013). Aktive Abgasschalldämpfer - Von der Pegelabsenkung zum Sound Design. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift (Ausgabe 7-8, 2013)*, S. 549-552.
- Kunz, S. (2013). *Optimierung des Antriebsstrangs eines Elektro-Quads unter besonderer Berücksichtigung des Batterie- und Antriebssystems*. Esslingen : Hochschule Esslingen, Bachelorarbeit.
- Lerch, R., Sessler, G. M., & Wolf, D. (2009). Physiologische und psychologische Akustik. In *Technische Akustik* (S. 189-207). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Möser, M. (2012). *Technische Akustik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pander, J. (25. August 2010). *Schleichfahrt mit Gebrumm - Tongenerator für den Toyota Prius*. Abgerufen am 4. Dezember 2016 von Spiegel Online: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/tongenerator-fuer-den-toyota-prius-schleichfahrt-mit-gebrumm-a-713735.html>
- Pfäfflin, B., Gerhard, H.-M., Ehinger, P., Herrmann, R., Bathelt, H., Scheinhardt, M., & Krüger, J. (2010). Geräuschgestaltung. In K. Genuit, *Sound-Engineering im Automobilbereich* (S. 427-500). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Rycote Microphone Windshields Ltd. (2016). *Modular Windshield Kits*. Abgerufen am 10. Dezember 2016 von Rycote: <http://rycote.com/microphone-windshield-shock-mount/modular-windshield-kit/>
- Schneider, M. (2008). Mikrofone. In S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik* (S. 313-421). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schönherr, M. (27. März 2015). *Mehr Sicherheit durch künstlichen Sound*. Abgerufen am 4. Januar 2017 von Deutschlandfunk: http://www.deutschlandfunk.de/elektroautos-mehr-sicherheit-durch-kuenstlichen-sound.676.de.html?dram:article_id=315522

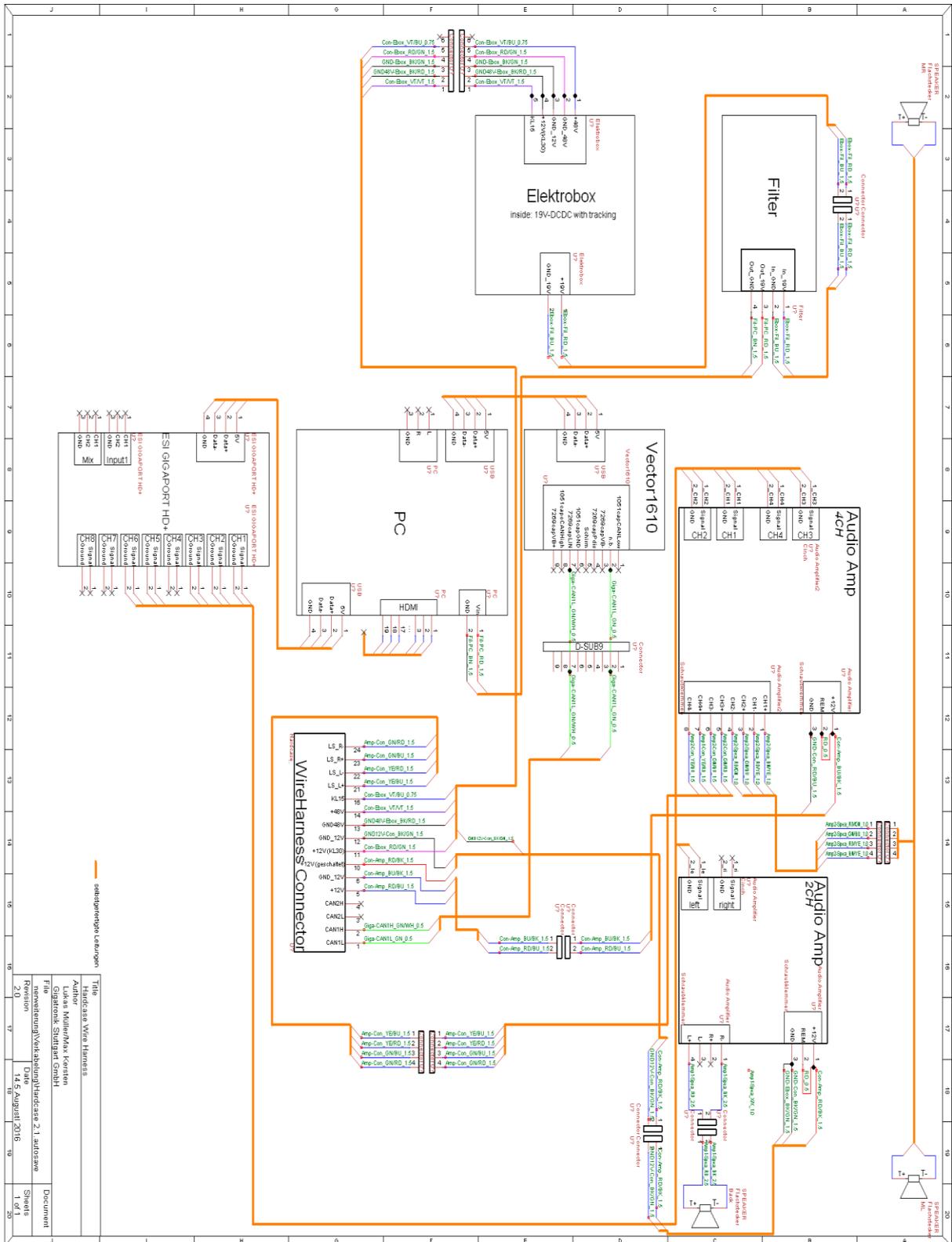
Sennheiser Electronic GmbH & Co.Kg. (2016). *MKH 416-P48U3*. Abgerufen am 10. Dezember 2016 von Sennheiser: <http://de-de.sennheiser.com/richtrohrmikrofon-reportage-spielfilm-funk-fernsehen-mkh-416-p48u3>

Sound Devices, LLC. (2016). *788T-SSD*. Abgerufen am 10. Dezember 2016 von Sound Devices: <https://www.sounddevices.com/products/recorders/788t>

Zwicker, E. (1982). *Psychoakustik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Anhang

Schaltplan aller verbauten Komponenten



Rundumsicht des Quads mit allen verbauten Lautsprechern



