

Bachelorarbeit

im Studiengang

Audiovisuelle Medien (AMB 6)

Sound für Elektro- und Hybridfahrzeuge (Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS))

vorgelegt von **Mathias Haußmann**

Matrikelnummer: 23973

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 15.01.2015

Gesperrt bis: 15.01.2018

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Jochen Lüling

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Mathias Haußmann, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Sound für Elektro- und Hybridfahrzeuge (Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS))“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn 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.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Datum, Unterschrift

Kurzfassung

Mit der wachsenden Anzahl an Elektro- und Hybridfahrzeugen auf weltweiten Straßen gehen Regierungen zunehmend der Frage nach, inwiefern solche Fahrzeuge eine Gefahr für schwächere Verkehrsteilnehmer darstellen können. Aufgrund der Tatsache, dass diese – wie Studien belegen konnten – von Natur aus im Bereich von Stillstand bis etwa 30 km/h keinen wahrnehmbaren bis nur sehr geringen Geräuschpegel von sich geben, sehen Regierungen hier zwingenden Handlungsbedarf. Daher wird für jene Fahrzeugkategorie im Raum der Europäischen Union ab 1.7.2019 per Gesetz der künstliche Motorklang verpflichtend, bekannt als „Acoustic Vehicle Alerting Systems“, kurz AVAS. Mit der Entwicklung und erfolgreichen Realisierung eines solchen akustischen Warnsystems setzt sich die vorliegende Bachelorthesis in ihrem Kern auseinander und zeigt dabei, dass ein solches System nicht nur sinnvoll ist, sondern darüber hinaus den Zuhörer emotional sehr positiv erreichen kann. Wird die Aufmachung des akustischen Warnsystems auch noch mit dem Ziel verfolgt, dass es dem Zuhörer Spaß bereiten soll, so bietet dieses am Ende, besonders durch seine Flexibilität in Sachen Sound-Auswahl, der gesamten Elektromobilität gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ein besonderes Alleinstellungsmerkmal.

Abstract

With the growing amount of electric and hybrid vehicles on streets worldwide, governments are increasingly concerned with the question if this type of vehicle can be a threat in terms of safety for weaker traffic participants. As studies have shown, it is a fact that these vehicles do emit almost no perceivable to a very low noise level from idle to about 30 km/h, which reveals to governments an urgent need for action. In consequence, the European Union has released a rule that will force new vehicles of this category to have a synthesized engine sound by 1st of July, 2019, known as “Acoustic Vehicle Alerting Systems” (AVAS). The development and successful implementation of such an acoustic warning system is the central subject of this bachelor thesis. In this frame it can be shown that this system has more to it than just being useful, it can be a thing that reaches the listener emotionally in a very positive way. And by creating this system with the goal in mind to bring fun to the listener, you end up with a unique selling point for the entire electromobility versus vehicles with internal combustion engines, featured mainly by the system’s flexibility in terms of choice of different sounds.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kalkulator zur Berechnung der Verbrauchersparnis zwischen einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und dem Tesla MODEL S

Abbildung 2: Noise-level of EV (Electric Vehicle) / HV (Hybrid Vehicle) compared to ICE (Internal Combustion Engine) / GE (Gasoline Engine)

Abbildung 3: Antriebskonzepte bei Straßenfahrzeugen

Abbildung 4: Überblick über den elektronischen Aufbau eines rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs

Abbildung 5: Die modellhafte Darstellung des CAN-Buses in einem Elektrofahrzeug

Abbildung 6: MIDI-Port-Schaltplan

Abbildung 7: GIGABOX Gate FR Extended mit MIDI-Ausgang

Abbildung 8: Aufnahmesituation von der Traktorfront

Abbildung 9: Aufnahmesituation von linker Traktorseite

Abbildung 10: Aufnahmesituation von rechter Traktorseite

Abbildung 11: Stereobild des Traktor-Sounds aus Sicht des Zuhörers

Abbildung 12: Mapping von Traktor-Samples

Abbildung 13: Hüllkurve des Traktor-Sounds in HALion 5

Abbildung 14: Tablet PC „E-Quad App“

Abbildung 15: „Display Buttons“ am Tacho des Quads

Abbildung 16: AMPIRE MBM 100.2 Endstufe

Abbildung 17: Frequenzgang AMPIRE MBM 100.2 Endstufe

Abbildung 18: Volumenvermessung des Stauraums in der Schnauze des Quads

Abbildung 19: Isometrische CAD-Darstellung der Gehäusefront

Abbildung 20: CAD-Darstellung der Gehäusedraufsicht

Abbildung 21: Verschrauben des Lautsprechergehäuses

Abbildung 22: Passprobe Lautsprechergehäuse am Elektro-Quad

Abbildung 23: Lautsprechergehäuse mit angezeichneten Lufteinlässen

Abbildung 24: Lautsprechergehäuse mit verspachtelten Löchern & verbautem
Dämmmaterial & probeweise angebrachtem NKA 116 Treiber

Abbildung 25: Fronschrürze Quad mit Blick auf Lausprecher links

Abbildung 26: NT55 Frequenzgang

Abbildung 27: Frequenzgang des Sound-Systems

Abbildung 28: Aufbau und Signalfluss des Sound-Systems

Abkürzungsverzeichnis

	Seite
[A/C] Air Conditioning (Klimaanlage)	22
[AVAS] Acoustic Vehicle Alerting Systems	1
[BIOS] Basic Input Output System	31
[BMW] Bayerische Motoren Werke	8
[BYD] Build Your Dreams	8
[CAD] Computer Aided Design	61
[CAN] Controller Area Network	20
[CEO] Chief Executive Officer	4
[CO ₂] Kohlenstoffdioxid	3
[CPU] Central Processing Unit	24
[DAW] Digital Audio Workstation	27
[DC] Direct Current (Gleichstrom)	55
[ECU] Electronic Control Unit	22
[E-Mobil] Elektro-Mobil	3
[E-Mobilität] Elektromobilität	3
[EU] Europäische Union	1
[EV] Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)	10
[FM] Frequenzmodulation	25
[frunk] front trunk (Kofferraum unter der Motorhaube (Front))	5
[GE] Gasolin Engine (Benzinmotor)	10
[GmbH] Gesellschaft mit beschränkter Haftung	2
[HDMI] High Definition Multimedia Interface	30
[HV] Hybrid Vehicle (Hybridfahrzeug)	10
[ICE] Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)	10
[ID] Identifikationsnummer	20
[Inc] Incorporated	3
[JASIC] Japan Automobile Standards Internationalization Center	10

	Seite
[LSB]	Least Significant Bit 50
[Mac]	Macintosh (ein Computermodell der Firma Apple)24
[mbH]	mit beschränkter Haftung 15
[MIDI]	Musical Instrument Digital Interface 28
[MSB]	Most Significant Bit 33
[NEDC]	New European Driving Cycle4
[NHTSA]	National Highway Traffic Safety Administration 11
[OS]	Operating System (Betriebssystem eines Computers)24
[PC]	Personal Computer 24
[RAM]	Random Access Memory 29
[RMS]	Root Mean Square (Effektivwert) 60
[S/PDIF]	Sony/Philips Digital Interface 30
[SPL]	Sound Pressure Level (Schalldruckpegel) 39
[SSD]	Solid State Disk30
[UART]	Universal Asynchronous Receive and Transmit 32
[UNECE]	United Nations Economic Commission for Europe 11
[USA]	United States of America 11
[USB]	Universal Serial Bus 32

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Eidesstattliche Erklärung	I
Kurzfassung	II
Abstract	II
Bildverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
1. Einführung und Überblick	1
2. Geschichtlicher Hintergrund der Elektromobilität	3
3. Diskussion über das Pro und Kontra der Elektromobilität	4
3.1. Konkreter Vergleich zweier Fahrzeugmodelle	4
3.2. Gründe für die E-Mobilität	7
3.3. Gründe gegen die E-Mobilität	8
4. Einflüsse auf die Entwicklung des akustischen Warnsystems	9
4.1. Gesetzliche Grundlage	11
4.2. Richtlinien des UNECE-Beschlusses zu AVAS	12
4.3. Emotion	13
4.3.1. Hintergrund zur emotionalen Wirkung von Klängen	13
4.3.2. Wie soll das AVAS klingen?	14
5. Einblick in die Technik eines Elektrofahrzeugs	16
5.1. Antriebskonzepte bei Straßenfahrzeugen	16
5.2. Gegenüberstellung von entfallenden und hinzukommenden Fahrzeugkomponenten	18
5.3. CAN – Controller Area Network	20
6. Entwicklung und Realisierung des akustischen Warnsystems	22
6.1. Welche Einflüsse auf die Klangerzeugung müssen beachtet werden?	23
6.1.1. Klangvorstellungen	23
6.1.2. „State of the Art“ bei Sound-Generatoren	24
6.1.3. Klangerzeugungsformen	25
6.1.4. Software als Basis für die Klangerzeugung	27

	Seite
6.1.5. PC versus Mac	29
6.2. Aufbau der Signalflusskette des akustischen Warnsystems	30
6.2.1. BRIX™ Pro	30
6.2.2. An- und Abschaltvorgang des Sound-Generators	31
6.2.3. Entwicklung der Schnittstelle zwischen CAN-Bus und MIDI	32
6.2.4. GIGABOX Gate FR Extended	34
6.3. Verwendete Methoden zur Klangerzeugung	35
6.3.1. Methode 1 – Klangmodulation per Sample Mapping	35
6.3.1.1. Voraussetzungen für die Tonaufnahme	35
6.3.1.2. Tonaufnahmeplanung	36
6.3.1.3. Testaufnahme für das Sample Mapping	38
6.3.1.4. Vollwertige Tonaufnahme für das Sample Mapping	39
6.3.1.5. Mischung und Schnitt der Tonaufnahme	43
6.3.1.6. Ein Sampler-Instrument macht Motorsound	44
6.3.1.7. Das Loop-Verfahren (Schleifen-Wiedergabe)	45
6.3.2. Methode 2 – Klangmodulation per Pitch Bend	46
6.3.3. Vergleich der beiden Klangmodulationsmethoden	47
6.4. GIGABOX-Steuerung – Die Logik hinter dem Soundprocessing	47
6.4.1. Funktionsauswahl durch Tablet PC und Display Buttons	48
6.4.2. Vertiefung – MIDI-Datenprotokoll	50
6.4.3. Start-Funktion	51
6.4.4. Steuersignale der verschiedenen Modi zur Klangerzeugung	51
6.4.4.1. Klangerzeugung im Pitch Bend Mode	52
6.4.4.2. Klangerzeugung im Sample Mode	52
6.4.5. Stopp-Funktion	52
6.4.6. Not-Aus	53
6.4.7. Stummschaltung – „Mute“	53
6.4.8. Lautstärkeregelung	54
6.4.9. Sound-Wechsel	54

	Seite
6.4.9.1. Auswahl per Tablet PC	54
6.4.9.2. Auswahl per Display Button	54
6.5. Energiemanagement	55
6.6. Betriebssystem des BRIX™ Pro	56
6.7. Endstufe AMPIRE MBM 100.2	57
6.8. Aufbau der Lautsprecherbox	59
6.8.1. Tontreiber	60
6.8.2. Lautsprechergehäuse	61
6.8.2.1. Konstruktion	61
6.8.2.2. Fertigung	65
6.8.3. Frequenzgang des Sound-Systems	67
6.9. Das akustische Warnsystem auf einen Blick (Signalfluss-Diagramm)	68
7. Zusammenfassung	69
8. Ausblick	71
Danksagung	72
Literatur- und Quellenverzeichnis	i
Anhang	a

1. Einführung und Überblick

Willkommen zum Thema „Sound für Elektro- und Hybridfahrzeuge“. Elektro- und Hybridfahrzeuge im Elektromodus sind bei geringen Geschwindigkeiten konzeptbedingt für andere Verkehrsteilnehmer klanglich nicht wahrnehmbar oder weisen allenfalls einen nur sehr geringen natürlichen Geräuschpegel auf. Erst bei höheren Geschwindigkeiten werden Fahrzeuge dieser Art durch Fahrtwind und Abrollgeräusche ähnlich gut akustisch wahrnehmbar wie konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Das beinahe lautlose und vibrationsfreie Fahren eines solchen Fahrzeugs mit Elektromotor kann für den Fahrer / die Fahrerin eine sehr angenehme Erfahrung sein, stellt jedoch für schwächere Verkehrsteilnehmer, wie Passanten oder Radfahrer, ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Denn der Mensch ist es gewohnt, sich auf die Geräuschkulisse von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu verlassen und zieht besonders aus dem Klang jenes Motors wertvolle Informationen über Ort, Geschwindigkeit, Fahrverhalten und Fahrtrichtung des Fahrzeugs. Fehlen diese Informationen, wird das herannahende Fahrzeug unter Umständen gar nicht oder zu spät wahrgenommen.

Die Politik hat dieses Sicherheitsrisiko erkannt. Daher gibt es weltweit Bestrebungen, dieser Gefahr mit geeigneten Maßnahmen entgegenzutreten. Die bislang geschaffenen rechtlichen Grundlagen werden in Kapitel 4 dieser Thesis behandelt. In der EU wurde ein Gesetzentwurf erarbeitet und beschlossen, der unter dem Namen „Acoustic Vehicle Alerting Systems“, kurz AVAS, ein akustisches Warnsystem vorsieht, dass durch künstliche Erzeugung eines Motorenklangs schwächere Verkehrsteilnehmer vor dem Fahrzeug warnen soll.

Thema dieser Bachelor-Thesis ist die Entwicklung und Realisierung eines solchen akustischen Warnsystems. Hier jedoch mit einigen Zusatzoptionen ausgestattet. Die nachfolgenden Seiten geben einen umfassenden Einblick in die Thematik „Sound für Elektro- und Hybridfahrzeuge“. Ausgehend von den Einflüssen auf die Entwicklung eines akustischen Warnsystems in Kapitel 4, die neben der rechtlichen Basis auch emotionale Aspekte des Klangs einschließen, erfolgt die Darstellung der eigentlichen Entwicklung und Realisierung des AVAS zu einem funktionierenden Gesamtsystem in Kapitel 6.

Zuvor wird das Thema Elektromobilität aus einem größeren Blickwinkel beleuchtet. Schließlich hängt die Verbreitung von Systemen wie dem AVAS maßgeblich davon ab, ob Elektrofahrzeuge tatsächlich das Potenzial besitzen, sich als praxistaugliche Alternativen zu

herkömmlichen Fahrzeugen im großen Stil auf dem Markt durchzusetzen. Dazu gibt Kapitel 2 einen kurzen historischen Abriss der Elektromobilität.

Kapitel 3 zeigt anhand eines Vergleichs zweier Fahrzeugmodelle, welches Potenzial kommerziell erhältliche Elektrofahrzeuge bereits heute haben. Zudem werden Argumente dargelegt, die aus heutiger Sicht für oder gegen die Elektromobilität sprechen.

Kapitel 5 gibt einen Einblick in technische Grundlagen von Elektrofahrzeugen, worauf das hier entwickelte akustische Warnsystem aufbaut.

In Kapitel 7 folgt abschließend eine Zusammenfassung sowie in Kapitel 8 ein Ausblick, in welchem aufgezeigt wird, wie man in sinnvollen weiteren Schritten an das bestehende akustische Warnsystem dieser Bachelorarbeit anknüpfen könnte.

Diese Bachelor-Thesis entstand bei der Firma GIGATRONIK Stuttgart GmbH [\[1\]](#) in der Sparte Automotive, dort betreut durch Dipl.-Ing. Jochen Lüling. Für Messezwecke hat GIGATRONIK ein Elektro-Quad entwickelt, dessen Ziel es ist, die hauseigenen Kernkompetenzen auf Messen zu präsentieren. Um das Quad in seinem Funktionsumfang abzurunden, sollte eine akustische Warnsignallösung implementiert werden, die neben einem kräftigen Sound einen Funktionsumfang bietet, der deutlich über die Richtlinien der Europäischen Union hinausgeht.

2. Geschichtlicher Hintergrund der Elektromobilität

Im Jahre 1881 wurde das erste Straßenfahrzeug mit elektrischem Antrieb in Paris präsentiert und als solches offiziell anerkannt. Der Elektromotorenentwickler Gustave Trouvé hatte in diesem Jahr ein dreirädriges Fahrzeug in Betrieb genommen, um damit seine Elektromotoren zu prüfen [2][3].

So kam es in den Folgejahren von 1897 bis 1912 zu einem regelrechten Boom auf dem Elektromobilitätssektor, wodurch in einem beträchtlichen Maße Elektroautos auf den Straßen Europas und Amerika anzutreffen waren. Erst als es durch den Verbrennungsmotor möglich war, größere Reichweiten zu erzielen und diese Technik durch die Erfindung des Anlassers in der Bedienung vereinfacht wurde, begann der Markt der Elektro-Mobile, kurz E-Mobile, beinahe auszusterben [2][3].

Doch seit einigen Jahren ist die Elektromobilität – kurz E-Mobilität – wieder auf dem Vormarsch. Dies ist besonders den klimatischen Bedingungen unseres Planeten und den daraus resultierenden Zielen der Regierungen zuzuschreiben. Ein Ziel ist es, die Emissionen des Treibhausgases CO₂ deutlich zu senken, um den Klimawandel im besten Fall aufzuhalten ([4], Min. 9:12 - 13:00 & 21:25 - 22:00) oder wenigstens die globale Erwärmung zu begrenzen. In der Folge hat auch ein Umdenken bei Firmen und Privatleuten eingesetzt, sodass diese heute eher darüber nachdenken, Elektrofahrzeuge anzuschaffen ([5], Min. 10:00 - 13:05).

Besonders ein Unternehmen spielt seit jüngerer Zeit auf dem Sektor dieser E-Mobilität eine signifikante Rolle. Die Firma Tesla Motors, Inc. hat es sich durch ihren Firmenchef Elon Musk zum Auftrag gemacht, der automobilen Welt von heute zum Wandel zu verhelfen, ihn gar zu beschleunigen. Musk sieht sich als Katalysator [6] mit dem Ziel, Gutes zu tun ([4], Min. 33:00 - 33:30). Musk möchte das Voranschreiten von nachhaltigem Transport weltweit beschleunigen ([7], Min. 6:05 - 7:44). Um der Frage nachzugehen, ob Elektrofahrzeuge geeignet sind, die etablierten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als Transportmittel zu ersetzen, soll an dieser Stelle nun eine Diskussion über das Für und Wider jener elektrifizierten Transportmittelform eröffnet werden. Die Ausarbeitung dieser Darstellung beschränkt sich hierbei auf die nachfolgenden Inhalte, sodass der Fokus auf die eigentliche Themenstellung dieser Bachelor-Thesis nicht verloren geht.

3. Diskussion über das Pro und Kontra der Elektromobilität

Elektrofahrzeugen hängt in der Bevölkerung oft der Ruf nach, sie seien in Sachen Fahrleistung, Reichweite und Anschaffungskosten keine echte Alternative zu bestehenden Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Um diese Vorurteile zu entkräften, soll vorweg ein faktenbasierter Vergleich zweier konkurrierender Fahrzeugmodelle angestellt werden. Dabei zeigt sich, dass die E-Mobilität bereits heute mit schlagkräftigen und alltagstauglichen Fahrzeugkonzepten punkten kann.

3.1. Konkreter Vergleich zweier Fahrzeugmodelle

Im Vergleich stehen das rein batteriebetriebene Elektrofahrzeug MODEL S der Tesla Motors, Inc. und die derzeit aktuelle Generation der S-Klasse mit Verbrennungsmotor aus dem Geschäftsfeld Mercedes-Benz Cars der Daimler AG. Die beiden Fahrzeuge bewegen sich im selben Segment der PKW-Oberklasse, womit ein fairer Vergleich möglich wird. Beim Betrachten von Motorleistung und Fahrdaten ist jedoch rasch klar, dass dieser Vergleich erst in sinnvollem Maße durchführbar ist, wenn man das MODEL S der von der Mercedes-AMG GmbH veredelten V12-Variante der S-Klasse namens S 65 AMG gegenüber stellt.

Die angegebenen Fahrzeugdaten entstammen, den offiziellen Angaben des jeweiligen Fahrzeugherstellers.

Fakten zum Tesla MODEL S:

- Die Reichweite des MODEL S beträgt 502 km nach „New European Driving Cycle“ (NEDC) [8]. Die reale Reichweite kann je nach Fahrstil und Topologie etc. variieren [9]. Laut Tesla Motors, Inc. ist eine Reichweite von 460 km bei 105 km/h realistisch [8].
- Beschleunigung 0 - 100 km/h in 3,4 Sekunden bei Dual Motor-Ausstattung (Allradantrieb)
- 190 - 210 km/h, als Tesla MODEL S P85D sogar bis 250 km/h Spitzengeschwindigkeit
- Bis zu 515 kW Antriebsleistung
- Autopilot: Das Fahrzeug wird in naher Zukunft von selbst fahren. Laut CEO Elon Musk könnte dann das MODEL S sogar jemanden auf Bestellung selbstständig abholen [8] ([10], Min. 8:35 - 10:55).

- Kofferraumvolumen von 1.645,2 Litern
- Ein „frunk“ (frunk= **front trunk**), d. h. ein Kofferraum vorne unter der Motorhaube, da kein Verbrennungsmotor vorhanden ist [11] [12].
- „Supercharger“: Schnellladestation an Autobahnen, in 30 Minuten nachladen = 270 km
- Dauerhaft kostenlose Nutzung der Schnellladestationen für Besitzer des MODEL S [13]
- Leermasse: 2.100 kg [14]
- Preis bei Ausstattungsvariante „P85D“ mit allen Extras: 141.220,- Euro brutto [8].
- Weitere Besonderheiten finden sich auf der Homepage von Tesla Motors, Inc. [15].

Fakten zum Mercedes-Benz S 65 AMG:

Das Fahrzeug S 65 AMG bietet mit V12-Motor maximal 463 kW Leistung. Der Verbrauch soll im Durchschnitt bei rund 11 Litern pro 100 km liegen. Die Beschleunigung ist laut Herstellerangaben in maximal 4,0 Sekunden von 0 - 100 km/h möglich. Die Leermasse der S-Klasse beträgt rund 2,1 Tonnen. Dabei schlägt die Modellausführung S 65 AMG mit 234.906,- Euro brutto zu Buche. [16]

Diese Eckdaten des S 65 AMG zeigen Folgendes: Kauft man heute anstelle des MODEL S P85D den S 65 AMG, so bezahlt man rund das 1,7-fache vom MODEL S P85D. Dabei bekommt man beim S 65 AMG insgesamt deutlich weniger Fahrleistung zu einem gleichzeitig höheren Kostenfaktor.

Neben den so gesehen günstigeren Anschaffungskosten kann auch mit geringeren Betriebskosten für das Tesla MODEL S gerechnet werden. Beispiele hierfür sind deutsche Steuervergünstigungen für Elektrofahrzeuge, voraussichtlich geringerer Verschleiß und daraus resultierend niedrigere Wartungskosten sowie geringere Energiekosten. So fallen beispielsweise die umgerechneten Verbrauchskosten von Super Benzin (1,38⁹ €/l an OMV Tankstelle Wendlingen am Neckar am 15.12.2014) des S 65 AMG, bei einer Laufleistung von 10.000 km, gegenüber dem Stromverbrauch des MODEL S, mit einer Kostenersparnisratio von 1:3,09 zu Gunsten des Tesla MODEL S aus. Die im Kalkulator aus Abbildung 1 angegebenen 27 Cent Stromkosten pro kWh sind als durchschnittlich gerundeter Wert zu betrachten, welche nach Angaben meines Elternhauses ohne Gewähr im Jahr 2013 anfielen.

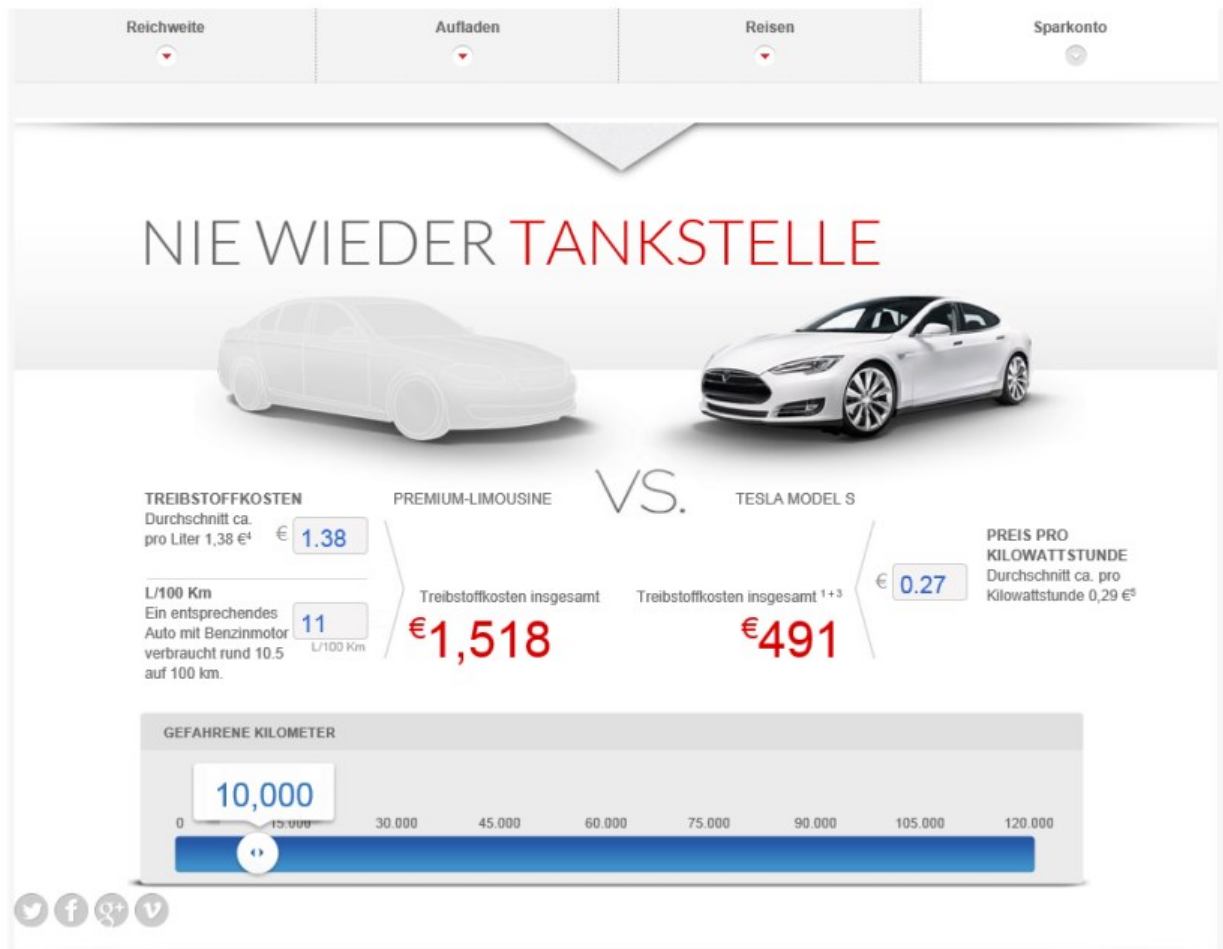


Abbildung 1: Kalkulator zur Berechnung der Verbrauchersparnis zwischen einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und dem Tesla MODEL S [17]

Auch andere Werte, wie z. B. die Beschleunigung oder der Ausstoß von CO₂ ([18], Min. 6:35 - 8:30) legen dar, dass das MODEL S P85D dem S 65 AMG massiv überlegen ist (siehe für Beschleunigung auch ([10], Min. 2:38 - 5:40).

Weiter zeigt Elon Musk, dass ein möglicher Batterieaustausch in weniger als der halben Zeit einer vergleichbaren Vollbetankung eines Audi A8 realisierbar wäre. Damit beweist Tesla Motors, dass Elektroautos wegen noch schnelleren Nachfüllzeiten auch in diesem Punkt den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor den Rang streitig machen könnten. So sieht Musk das Elektrofahrzeug als die Zukunft der Mobilität. [19]

Dies macht klar, dass ein beträchtlicher Vorsprung gegenüber den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor entstehen kann, wenn man die Umsetzung eines Elektrofahrzeugs mit entsprechendem Ernst und Gewissenhaftigkeit anstrebt.

3.2. Gründe für die E-Mobilität

- Ein CO₂-emissionsfreies Fahren, wobei der verlagerte CO₂-Ausstoß zur Energiegewinnung je nach Stromanbieter und Eigenstromerzeugung durch Photovoltaik-Anlagen bis zu 100 % CO₂-frei realisierbar sein kann, in jedem Fall jedoch nach dem „Well to Tank / Well to Wheel“-Prinzip [20] deutlich besser ausfällt (siehe für CO₂-Ausstoß auch [18], Min. 6:35 - 8:30), als es von einem Verbrennungsmotor geleistet werden könnte.
- Der Elektromotor bietet eine Energie-Effizienz / Wirkungsgrad von über 90 % in jedem Drehzahlbereich [21]. Der Verbrennungsmotor ist im Vergleich nur in einem schmalen Drehzahlband mit einem optimalen Wirkungsgrad von 36 - 43 % versehen [22]. Jedoch sollte berücksichtigt sein, dass sein Wirkungsgrad außerhalb dieses Drehzahlbandes deutlich schlechter ausfällt. Meist arbeitet der Verbrennungsmotor in einem Fahrzeug fernab von seinem Optimum in Sachen Energie-Effizienz, daher ist ein Wirkungsgrad von 15 - 20 % wohl als realistischer anzusehen ([23], Min. 32:20 - 33:15).
- Weniger Verschleißteile, siehe hierzu Kapitel 5.2. auf Seite 18 und 19.
- Kann geringere Wartung und Wartungskosten zur Folge haben, da viele Teile, die für den Verbrennungsmotor notwendig sind, nun entfallen ([4], Min. 34:50 - 40:25). Fairerweise sollten hier jedoch hinzukommende Komponenten aus dem Elektroniksektor genannt werden. Die Wartung selbst dürfte deutlich schmutzfreier verlaufen.
- Das über einen weiten Drehzahlbereich anliegende konstante Drehmoment eines Elektromotors und damit die gegenüber dem Wirkprinzip des Verbrennungsmotors vorteilhafte Beschleunigung des Fahrzeugs.
- Ist der Ansatz des Elektromobils als vollwertiger Ersatz herkömmlicher Automobile ernst gemeint, so werden, wie sich anhand des Beispiels von Tesla Motors, Inc. zeigt,

schon heute Resultate erzielt, die an der Praxistauglichkeit der E-Mobilität nicht mehr zweifeln lassen [24] ([4], Min. 32:00 - 34:48).

- Diese Ernsthaftigkeit beinhaltet auch eine Antwort auf die Versorgung durch Ladestationen für unterwegs sowie das Recyceln der Batterien [25]. Auf diese Herausforderung antwortet Tesla mit einem riesigen Bauprojekt:

- Tesla Motors, Inc. errichtet in den kommenden Jahren bis 2020 im US-Bundesstaat Nevada eine Hightech-Fabrik für die Produktion von Lithium-Ionen-Akkus, genannt „Gigafactory“. Diese soll das weltweite Produktionsvolumen derartiger Akkus aus dem Jahr 2013 auf Dauer mindestens verdoppeln. [26]

In diesem Zuge wurde in großem Stil auch an das Recycling der Akkupacks gedacht (siehe hierzu [27]).

3.3. Gründe gegen die E-Mobilität

Leider ist die hiesige Autoindustrie dem Hersteller Tesla Motors, Inc. oder auch anderen Herstellern wie BYD (Build Your Dreams) Company Limited (Elektroauto Denza im Joint Venture mit der Daimler AG, Reichweite 300 km) deutlich hinterher ([4], Min. 14:06 - 17:37). Ein Grund hierfür ist, dass sich die hiesige Automobilindustrie wohl nur schwer von dem alten Konzept des Verbrenners zu lösen vermag, da hier viel Geld in Innovation und „know how“ gesteckt wurde. Sich nun auf ein neues Zeitalter einzulassen fällt offenbar schwer ([4], Min. 18:07 - 23:05 und 26:01 - 27:07).

Betrachtet man die Daten der Elektrofahrzeuge der deutschen Autohersteller, so wird schnell klar, dass Fahrzeuge wie die B-Klasse Electric Drive der Daimler AG, der Volkswagen e-Golf oder der i3 der BMW AG lediglich zum alltäglichen Pendeln ausgelegt sind [28]. Daher ist die landläufige Meinung „Elektroautos haben kaum Reichweite, sehen zum Teil hässlich aus und sind daher bezüglich eines Kaufs uninteressant“ durchaus nachvollziehbar. Doch wie bereits gezeigt werden konnte, ist diese Haltung nicht in jedem Fall angemessen.

Mit Ausnahme des Tesla MODEL S und BYD´s Denza ist das hohe Gewicht wegen der Batterie im Verhältnis zu der geringen Reichweite ungünstig ausgelegt. Mit Ausnahme des „Supercharger“-Netzwerks von Tesla Motors, Inc. gibt es bisher auch noch keine schlüssig ineinandergreifenden und damit akzeptablen Lade-Infrastrukturen, sodass man einfach und

bequem jeder Orts mit nur einem Knopfdruck nachladen könnte. Auch die Ladezeiten für unterwegs sind mit Ausnahme der „Supercharger“ von Tesla bisher inakzeptabel. Beispielsweise benötigt der BMW i3 schon am heimischen Netz drei Stunden, um mit einer dafür entworfenen Schnellladebox (Aufpreis pflichtig), einer sogenannten „Wallbox Pure“ (nur für Heimanwendung gedacht), einen Ladestand von 80 % zu erreichen [29]. Für unterwegs bedarf es so einer aufwändigen Vorausplanung für Elektrofahrzeuge, die nicht mit Teslas „Supercharger“-Netzwerk kompatibel sind. Dazu ist man gezwungen, geeignete / öffentliche Schnellladestation in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Energieversorgern zu suchen [30]. Dies würde mit einem Tesla, Dank besagtem Netzwerk, nicht passieren und nur abseits des „Supercharger“-Netzes drohen. Unter Nutzung des Tesla Schnellladenetzwerks, welches weltweit ausgebaut wird [15], beträgt die Ladezeit für eine 80 %-Ladung gerade einmal 30 - 45 Minuten, trotz der ungleich höheren Akku-Kapazität des Tesla MODEL S [31] im Vergleich zum BMW i3.

Daher bleibt mit Ausnahme von Tesla Motors, Inc. die Wirtschaftlichkeit dieser Elektrofahrzeuge fraglich.

Allgemein hat die E-Mobilität jedoch eine Sache gemein – sie bietet ein beinahe „lautloses Fahren“. Doch dieser vermeintliche Vorteil stellt gleichzeitig eine Gefahr für schwächere Verkehrsteilnehmer dar und kann daher als Schwäche bezeichnet werden. So findet man weltweit Politiker, die Gegenmaßnahmen fordern [32].

4. Einflüsse auf die Entwicklung des akustischen Warnsystems

Bereits in jungen Jahren lernt man als Fußgänger im Straßenverkehr, neben der Umsicht automatisch auch auf das Motorgeräusch zu achten. So gewinnt der Mensch aus dem Klang des Verbrennungsmotors grundlegende Informationen über das Verhalten eines Fahrzeugs. Dies kann so weit führen, dass Personen ohne Umsicht über die Straße gehen, da sie sich vollständig auf ihr Gehör und ihre Erfahrung verlassen. Diese wichtige Hintergrundinformation des Fahrzeugverhaltens fehlt beim Elektro- oder auch Hybridfahrzeug im Elektromodus. Es ist im parkenden, doch eingeschalteten Zustand sowie bei Geschwindigkeiten unter 20 - 30 km/h fast nicht hörbar und kann daher von außen leicht

überhört und somit auch übersehen werden. Oberhalb dieser Geschwindigkeitsgrenze geht man davon aus, dass Fahrtwind und Abrollgeräusch der Reifen ausreichend zur Erkennung des Fahrzeugs beitragen. Somit könne man laut Studien in diesem Betriebsbereich auf eine zusätzliche Warnmaßnahme verzichten, da der Geräuschpegel zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor nur geringe Differenzen aufweist und somit davon auszugehen ist, dass kein signifikanter Unterschied in der akustischen Wahrnehmbarkeit dieser Fahrzeuge besteht. Dies wird beispielsweise in der Studie „A Study on Approach Warning Systems for hybrid vehicle in motor mode“ des Japan Automobile Standards Internationalization Center, kurz JASIC, gegenüber der Europäischen Kommission dargelegt (siehe Abbildung 2).

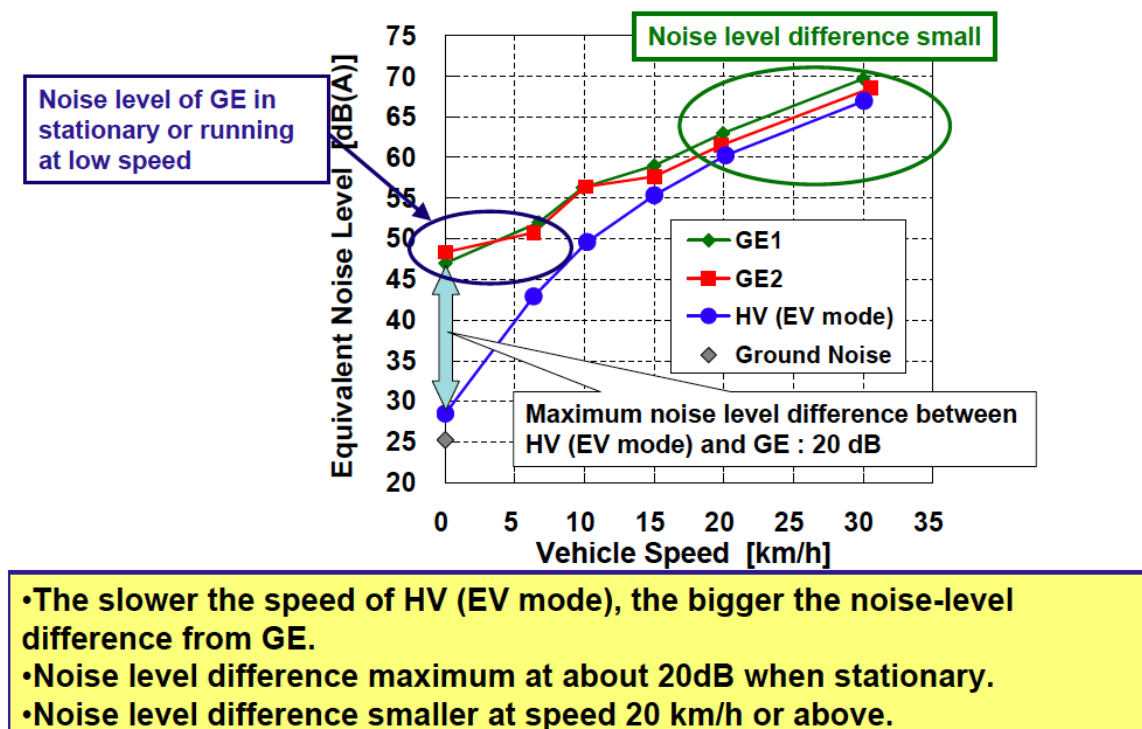


Abbildung 2: Noise-level of EV (Electric Vehicle) / HV (Hybrid Vehicle) compared to ICE (Internal Combustion Engine) / GE (Gasoline Engine) [33]

Da derzeit jedoch noch die gesetzlichen Verpflichtungen für entsprechende akustische Warnsysteme fehlen, ist es für die Insassen eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs hierzulande ein besonderes Fahrgefühl, wenn in dessen fahrbereitem und fahrendem Zustand keine Geräusche und Vibrationen, wie vom Verbrennungsmotor gewohnt, zu vernehmen sind. Doch die Gefährdung gegenüber schwächeren Verkehrsteilnehmern ist erkannt und Regierungen von EU-Staaten, der USA, Japan sowie der Volksrepublik China sind bereits aktiv, um für mehr Sicherheit auf öffentlichen Straßen zu sorgen. Denn von solch

stillen Fahrzeugen geht besonders für Radfahrer, ältere Menschen, Menschen mit Sehbehinderung und für unaufmerksame Fußgänger eine Gefahr aus. [34]

4.1. Gesetzliche Grundlage

So hat **Japan** bereits 2010 einen Leitfaden ausgegeben, nach dem sich die Fahrzeughersteller bezüglich akustischer Warnsysteme richten können [35].

Die **USA**, mit ihrer zuständigen Behörde „National Highway Traffic Safety Administration“ (NHTSA), arbeiten bisher noch an einem Gesetzesentwurf für „Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Cars“, denn anscheinend sind die Vorgaben laut Autohersteller noch unvollständig. Der ursprüngliche Plan sah vor, dass das Gesetz ab September 2014 in Kraft treten sollte. Doch nun scheint die erste Phase des Gesetzes frühestens 2016 in Kraft zu treten, sodass voraussichtlich ab 1. September 2016 die ersten Fahrzeuge mit akustischem Warnsystem ausgestattet werden müssen [36] [37]. Geplant ist jedoch nach wie vor, dass ein etwaiges akustisches Warnsystem im Bereich von Stillstand bis hin zur Geschwindigkeitsgrenze von 30 km/h sowie beim rückwärtigen Fahren operieren muss, um Sicherheit zu gewähren [38] [39].

Im Gegensatz dazu, ist die **Europäische Union** bereits einen Schritt weiter. Zum 2. April 2014 hat die „United Nations Economic Commission for Europe“ – kurz UNECE – ihre Richtlinien bezüglich akustischer Warnsysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge unter der Bezeichnung „Acoustic Vehicle Alerting Systems“ (AVAS) beschlossen und gibt den Autobauern als Übergangszeit nun eine fünfjährige Entwicklungsphase vor.

Die beschlossenen Richtlinien werden ab 1. Juli 2019 für alle Neufahrzeuge verpflichtend. [40] [41]

Sie sollen hier keinesfalls unerwähnt bleiben und werden daher im Folgenden sinngemäß dargestellt.

4.2. Richtlinien des UNECE-Beschlusses zu AVAS

Vorweg jedoch der Hinweis, dass die beschlossenen Vorgaben zur Ausführung des AVAS durch die zuständige Kommission bis 1. Juli 2017 noch angepasst werden können (siehe [41], Artikel 8 auf Seite 9). Somit ist es möglich, dass sich der im Anschluss beschriebene Anhang VIII noch einmal verändert.

Bisher sehen die Vorgaben unter „ANNEX VIII“ (Anhang 8) der offiziellen Verordnung jedoch vor, dass bei Verbauung eines AVA-Systems folgende Rahmenbedingungen gelten (siehe [41], Seite 46):

1. Das System muss einen automatisch generierten Sound mindestens beim Anfahren und ferner bis etwa 20 km/h sowie beim Rückwärtsfahren erklingen lassen. Hat das Fahrzeug einen zusätzlichen Verbrennungsmotor an Bord, so muss das AVAS abschalten, sobald der Verbrennungsmotor anspringt und die eben genannten Bedingungen zutreffen.
Bei Fahrzeugen, die bereits mit einem akustischen Warnsystem für das Rückwärtsfahren ausgestattet sind, ist ein Ertönen des AVAS in selbigem Fahrmodus nicht erforderlich.
2. Das AVAS muss mit einem Schalter steuerbar sein, welcher so platziert wird, dass er für den Fahrer / die Fahrerin leicht zugänglich ist, um so ein An- / Abschalten des AVAS zu ermöglichen. Standardmäßig muss das AVAS bei einem Neustart des Fahrzeugs eingeschaltet sein.
3. Während das Fahrzeug in Betrieb ist, darf die Lautstärke des AVAS geregelt werden.
4. Der vom AVAS erzeugte Sound muss kontinuierlich erklingen und enthält für Fußgänger und andere Verkehrsteilnehmer die Information, dass das Fahrzeug aktiv ist. Er muss das Verhalten des Fahrzeugs klar verdeutlichen und sollte dem Klang eines Fahrzeugs aus derselben Kategorie mit Verbrennungsmotor in vergleichbarer Weise nachkommen.

5. Der Ausdruck des vom AVAS erzeugten Klangs muss das Fahrzeugverhalten wiedergeben. Zum Beispiel wird dies durch automatische Anpassung des Geräuschpegels oder durch synchrone Anpassung des Klangcharakters an die Fahrzeuggeschwindigkeit erzielt.
6. Der Geräuschpegel des vom AVAS erzeugten Sounds darf den näherungsweise gemessenen Geräuschpegel eines Fahrzeugs der Klasse M_1 (zur Definition von Klasse M_1 siehe [41], Seite 32) mit verbautem Verbrennungsmotor nicht überschreiten. Dabei gelten für beide die gleichen Betriebsbedingungen.

4.3. Emotion

4.3.1. Hintergrund zur emotionalen Wirkung von Klängen

Der Klang jedes Films, jedes Computerspiels, jeder Musik, bis hin zur Werbung entscheidet neben der visuellen Darstellung darüber, ob man das Objekt, dem jener Klang zugeordnet ist, ansprechend findet oder nicht. Die geschaffenen Klangwelten werden häufig unbewusst wahrgenommen, doch ihre Wirkung resultiert in Emotionen. Laut Friedrich Blutner, einem der führenden deutschen Sound Designer, verweist tiefes Brummen „[...] auf Kraft, hohe Frequenzen auf Dynamik und Modulationen auf Emotionen; welches Schlüsselmuster man bevorzugt, liegt an der persönlichen Konditionierung [42].“

Und genau dessen sind sich die Fahrzeughersteller bewusst. Sie sorgen mit viel Aufwand dafür, dass ihr Klangkonzept zum Kauf eines Fahrzeugs animiert. Dabei bietet ihnen gezieltes Sounddesign das wichtige Element der eindeutigen klanglichen Identifikation. Ob dies zutrifft, kann man im Selbstversuch leicht prüfen, indem man an das Soundlogo von Mercedes-Benz, BMW oder auch AUDI denkt.

Bei Mercedes-Benz bekommt man derzeit die engelsgleiche Kinderstimme zu hören [43]. BMW setzte bisher auf einen lang verhallten, zweischlägigen, hölzernen hämmernden Klang, welcher nun von einer anfangs „einfadenden“ Melodie, synthetisch erzeugt, ersetzt wurde [44]. AUDI hat nach wie vor das über die Zeit leicht veränderte herzschnallegleiche, dumpfe Pochen, welches mit einem Liegeton untermalt ist [45].

Wirft man nun einen Blick in Richtung Fahrzeug, wird deutlich, dass auch hier klanglich

nichts dem Zufall überlassen ist – genannt Fahrzeugakustik. Zu diesem Thema kann man beispielsweise an der Universität Stuttgart eine entsprechende Vorlesung besuchen. Als Erkenntnis aus dieser kann ich ableiten: In der Automobilindustrie wird viel Geld mobilisiert, um den Klang eines Fahrzeugs in gezielte Bahnen zu lenken. Dies fängt beim Dämmen des Innenraums an, um Straßenlärm sowie Wind- und Abrollgeräusch der Reifen für Insassen zu minimieren. Es geht weiter über das gezielte Detektieren und Beeinflussen von Schallquellen, erzeugt durch Fahrzeugumströmung und Mechanik, wie auch durch den Verbrennungsvorgang im Motor. Hinzu kommen Maßnahmen wie das aktive Zumischen von künstlichen Motorengeräuschen im Innenraum, wiedergegeben vom Sound-System. Auch das echte Motorgeräusch kann alternativ durch einen sogenannten „Sound Symposer“, welcher aus einem definierten Rohrsystem mit zwischengelagertem Resonanzkörper besteht, in klangbehandelter Form in den Fahrzeuginnenraum geleitet werden. Siehe zu diesen beiden Methoden die 2014er Modelle „Renault Clio RS“ [\[46\]](#) und „Ford Fiesta ST“ [\[47\]](#).

Inzwischen wird sogar der Sound des Motorgeräuschs aktiv am Endtopf der Abgasanlage, per integriertes Lautsprechersystem, beeinflusst. Damit kann per Knopfdruck aus einem sehr dezenten, ein spektakulär klingender Verbrennungsmotor erzeugt werden. Ein Beispiel hierfür ist das 2014er Modell des Audi A6, in dessen Endrohren zwei Lautsprecher drehzahlabhängigen sonoren Sound einspielen – entwickelt von der Firma Eberspächer Climate Control Systems GmbH & Co. KG in Esslingen am Neckar [\[48\]](#) [\[49\]](#).

Daher lässt sich ableiten, dass eine gezielte Klanggestaltung auch am Elektrofahrzeug von großem Stellenwert für Fahrzeughersteller ist oder künftig sein wird. Doch bereits jetzt gibt dazu die UNECE erste Vorgaben.

4.3.2. Wie soll das AVAS klingen?

Im Unterpunkt 4 des Kapitels 4.2. auf Seite 12 dieser Bachelorarbeit wird beschrieben, wie der Sound zu klingen hat. Er sollte „...dem Klang eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor aus derselben Kategorie, in vergleichbarer Weise nachkommen“. Das heißt, würde man beispielsweise für den „Smart ForTwo Electric Drive“ ein AVAS nach dieser Maßgabe gestalten, käme dafür eigentlich kein V8-Sportwagen sound in Frage, da der Smart ForTwo mit Verbrennungsmotor dieser Fahrzeugkategorie nicht angehört. Es dürfte jedoch ein Klangbild sein, welches ebenso bieder, wie hakelig klingt – ganz nach dem Vorbild seines

Verbrennerpendants. Doch glücklicherweise findet man auch im Hause Smart einen Tuner, der im Bereich Verbrennungsmotoren für besseren Sound sorgt. So könnte man die von der BRABUS Gesellschaft mbH getunte Smart-Variante zum Vorbild nehmen. Daraus ergibt sich postwendend ein breiteres Klangspektrum. Schaut man nun noch einmal genauer hin, müsste man strenggenommen zugeben, dass am Ende doch auch ein V8-Sportwagen-sound für den kleinen Smart ForTwo Electric Drive legitim wäre. Denn dank des Arguments der heute schon erhältlichen sounddynamisch anpassbaren Abgasanlage für Verbrennungsmotoren ist eine festgeschriebene Motorklangform kaum mehr möglich.

Dennoch wird eine Sache deutlich, die Auswahl von akustischen Warnsignalen ist per EU-Vorgabe definiert. Der Warnsound des Elektrofahrzeugs soll dem Motorklang nachempfunden sein, um Verwirrung und Irritation bei Verkehrsteilnehmern zu verhindern. Daraus lässt sich ableiten, dass das Einbetten von Naturklängen, wie etwaiges Vogelgezwitscher oder gar das Abspielen jeder Art von Musik, in einem AVAS ausgeschlossen ist. Das heißt, man wird auch keine Laserschwerte oder sonstige bekannte, doch futuristische Geräusche aus „Kultfilmen“ zu hören bekommen.

Zudem sind die Menschen nach meinen Beobachtungen ohnehin über die Frage gespalten, ob es denn wirklich sein muss, dass ein zusätzlich generierter Sound in elektrisch betriebene Fahrzeuge eingebaut wird. Auch hierfür hat die EU eine Lösung entwickelt. Siehe hierzu den Unterpunkt 2 des Kapitels 4.2. auf Seite 12. Es soll einen Schalter geben, der ein Abstellen des Sounds nach jedem Fahrzeugstart ermöglicht.

So ist für all die Menschen Abhilfe geschafft, welche keinen Warnton – in diesem Fall als Lärm empfunden – durch das Fahrzeug widergegeben, abspielen möchten.

Für Klangaffine lassen diese Regularien dennoch zuversichtlich hoffen, dass es ein breites Spektrum an Klangvarianten geben wird, das sich mit der Zeit durch gezieltes Sounddesign zu füllen vermag. So können Autobauer die emotionale Bindung zum Fahrzeug herstellenspezifisch steigern und haben obendrein noch die Möglichkeit, den Klang endkundengerecht individuell anzupassen. Ganz nach dem Beispiel der Musik, wo sich von einem Stück verschiedene Interpretationen finden lassen.

Als Schlüssel zur Emotion des AVAS-Sounds kann man daher seine Klangentfaltung und Veränderung über den zeitlichen Verlauf, wie auch seine individuell dem Fahrzeughalter / der Fahrzeughalterin anpassbare Größe, definieren.

5. Einblick in die Technik eines Elektrofahrzeugs

Der Einblick in die Technik von Elektrofahrzeugen soll mit einem Überblick zu aktuellen Antriebstechnologien von Fahrzeugen beginnen. Gefolgt von einer Darstellung darüber, welche Komponenten und Systeme beim rein batteriebetriebenen Elektroauto gegenüber einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor entfallen und welche dafür hinzukommen. Abrundend folgt in diesem Kapitel ein vereinfachter Gesamtüberblick über die Elektronik und Vernetzung an Bord eines solchen Fahrzeuges.

5.1. Antriebskonzepte bei Straßenfahrzeugen

Abbildung 3 zeigt eine Zusammenfassung bekannter Antriebstypen. Sie werden anschließend im Einzelnen näher beschrieben.

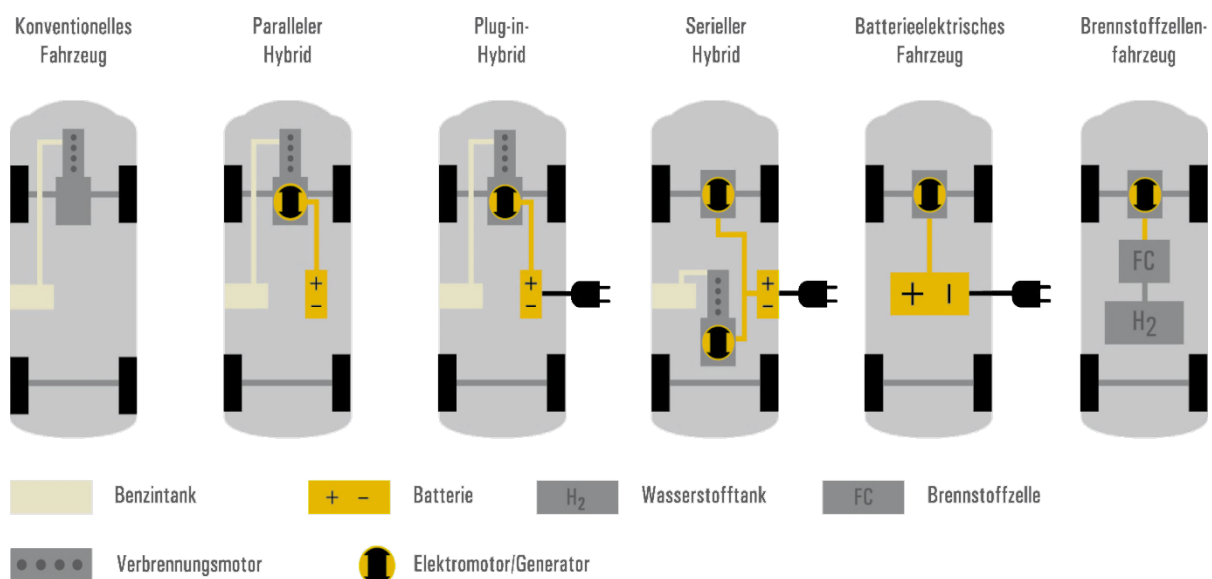


Abbildung 3: Antriebskonzepte bei Straßenfahrzeugen [50]

- Brennstoffzellenfahrzeug:

Diese Technologie erzeugt elektrische Energie mit Hilfe der sogenannten Brennstoffzelle. Funktionsprinzip: In die Brennstoffzelle wird Wasserstoff geleitet, der hier mit dem Sauerstoff aus der Luft chemisch reagiert. Bei diesem Vorgang entsteht in der Brennstoffzelle elektrische Energie und als Abfallprodukt Wasser. Der Antrieb des Fahrzeugs erfolgt per Elektromotor. Bisher hat sich dieses Wirkungsprinzip jedoch

nicht durchgesetzt. Ebenso wenig wie eine Antriebsvariante auf Wasserstoffbasis, welche in Abbildung 3 nicht gelistet ist – der mit Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotor. Bei dieser Antriebsart wird der Wasserstoff in einen konventionellen Verbrennungsmotor geleitet und dort gezündet ([51], Min. 00:08 - 00:47).

- Konventionelles Fahrzeug:
Mechanische Energie entsteht durch die Verbrennung von Kraftstoff im Motor und wird zum Vortrieb des Fahrzeugs an die Räder übertragen. Der Großteil heutiger Automobile funktioniert nach diesem Prinzip.
- Paralleler Hybrid:
Der Vortrieb entsteht durch Kraftübertragung von Elektro- und Verbrennungsmotor auf dieselben Räder. Der zusätzlich Batteriespeicher wird alleine durch das Fahrzeug gelad und entladen. Ein Beispiel hierfür ist der Honda Civic Hybrid [52].
- Plug-in-Hybrid:
Dieser bietet die Möglichkeit, den Batteriespeicher zusätzlich per Steckdose nachzuladen. Die Kraftübertragung erfolgt wie in der zuvor genannten Variante des Parallelhybrids. Ein Beispiel wäre der Toyota Prius oder auch der BMW i8.
- Serieller Hybrid:
Beim seriellen Hybrid kann während der Fahrt die Batterie per Verbrennungsmotor nachgeladen werden. Der Vortrieb entsteht ausschließlich durch den Elektromotor. Der BMW i3 mit Reichweitenverlängerer ist in selbigem Modus ein gutes Beispiel.
- Batterieelektrisches Fahrzeug:
Unter diesem Begriff verbirgt sich das landläufig bekannte „Elektrofahrzeug“, sei es PKW, LKW, Bus oder Sonstiges. Der Antrieb erfolgt über einen Elektromotor, der seine Energie ausschließlich aus einem Akkupaket, im Optimalfall wegen möglichst niederem Schwerpunkt und einfachem Ausbau am Unterboden verbaut, bezieht.

Das Nachladen erfolgt per Generator (Rekuperation der kinetischen Energie des Fahrzeugs) oder per Ladestation.

Hält man sich nun vor Augen, welche Teile von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gegenüber rein batteriebetriebenen Fahrzeugen wegfallen, wird klar, dass man mit deutlich weniger Einzelteillaufwand genauso gute Autos bauen kann.

5.2. Gegenüberstellung von entfallenden und hinzukommenden Fahrzeugkomponenten

Hierfür soll im ersten Schritt dargestellt werden, welche Komponenten beim reinen Verbrennerfahrzeug unnötig würden, funktionierte man dieses zum Elektrofahrzeug um. Im Folgeschritt muss geprüft werden, welche Teile im Gegenzug hinzukommen.

Es entfällt / entfallen:

- Der Verbrennungsmotor. Darin enthalten: Kolben, Zylinder, Pleuel, Nockenwellen, Kurbelwellen, Ventile, Motorblock, Zylinderkopf, Dichtungen, Zündkerzen, Lichtmaschine, Zahnriemen, Steuerkette bzw. -riemen, Öl, Ölpumpe, Kühlerrad, Ansaugtrakt: Ansaugrohre, Luftfilter samt Gehäuse, gegebenenfalls Abgasturbolader oder Kompressor
- Das Getriebe mit Kupplung und zugehörigem Gehäuseblock, Getriebeöl und Ölpumpe
- Die Abgasanlage: Krümmer, Schalldämpfer, Katalysator, Lambdasonde sowie das Rohrsystem, gegebenenfalls Rußpartikelfilter
- Die gesamte Motoraufhängung samt Elastomerlagern
- Die Kraftstofftechnik. Dazu gehören der Tank inkl. Einfüllstutzen, die Benzinpumpe, Verbindungsschläuche, Sensorik und Kraftstoff in Form von Benzin / Diesel.
- Aufwändige Motorsteuerelektronik mit vielen Sensoren (und deren Verkabelung) zur Regelung und Optimierung des Verbrennungsprozesses.

Nicht zu vergessen, mit dem Wechsel des Antriebskonzeptes entfällt auch weitgehend das Motorgeräusch. Damit verbunden könnten Strukturen zur Schalldämmung der Fahrgastzelle reduziert werden.

Auch außerhalb des Fahrzeugs erfolgen umfangreiche Veränderungen. So könnte nach und nach das etablierte Betankungsnetz entfallen, herkömmliche Tankstellen würden überflüssig und ein enormer Markt für die Ölindustrie würde wegbrechen. Darüber hinaus würde der auf den Verbrennungsmotor spezialisierte Industrie- und Zuliefererzweig an Arbeitsplätzen deutlich einbüßen.

Es kommen hinzu:

- Der Elektromotor mit einfach-übersetztem Getriebe. Diese Einheit treibt direkt die Räder an.
- Im Getriebe, für die Schmierung, geringe Mengen an Öl (Wartung sehr gering bis unnötig) sowie Lager.
- Die Batterie mit Regelungselektronik für den Ladevorgang, für die Fahrt als auch zur Energierückgewinnung, genannt Rekuperation. Dadurch wird im Übrigen ein neues Bremsverhalten für den Fahrer erforderlich.
- Ein Management-System zur Kühlung / Beheizung (je nach Umgebungstemperatur und Betriebszustand) der Batterie, welches damit an jene Stelle rückt, wo zuvor das Kühlsystem des Verbrenners angesiedelt war.
- Hochvoltleitungen sowie Ladebuchse im Tankdeckel oder anderenorts am Fahrzeug.
- Bremskraftverstärker elektrisch betrieben, welcher zuvor per Verbrennungsmotor angetrieben wurde.
- Motortreiber, Motorregler, Leistungselektronik
- Das Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS), in übertragener Form auch für den Innenraum eines Fahrzeugs anwendbar, um die Kraft des Elektroantriebs hörbar zu machen.

Der Vorgang von hinzukommenden Komponenten im Fahrzeug selbst ist damit jedoch noch nicht abgeschlossen. Auch außerhalb sind Veränderungen zu verzeichnen. Beispielsweise muss eine Infrastruktur zum Nachladen der Akkupakete jedes Fahrzeugs aufgebaut werden. Es entstehen neue Manufakturen, die wiederum Arbeitsplätze im großen Stil zu belegen haben werden, man beachte die bereits erwähnte „Gigafactory“ von Tesla Motors, Inc. mit voraussichtlich zu besetzenden 6.500 Arbeitsstellen [26].

Da dieses Kapitel die Technik von Elektrofahrzeugen behandelt, soll nun anhand der Abbildung 4 ein Überblick über den elektronischen Aufbau eines rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs gegeben werden:

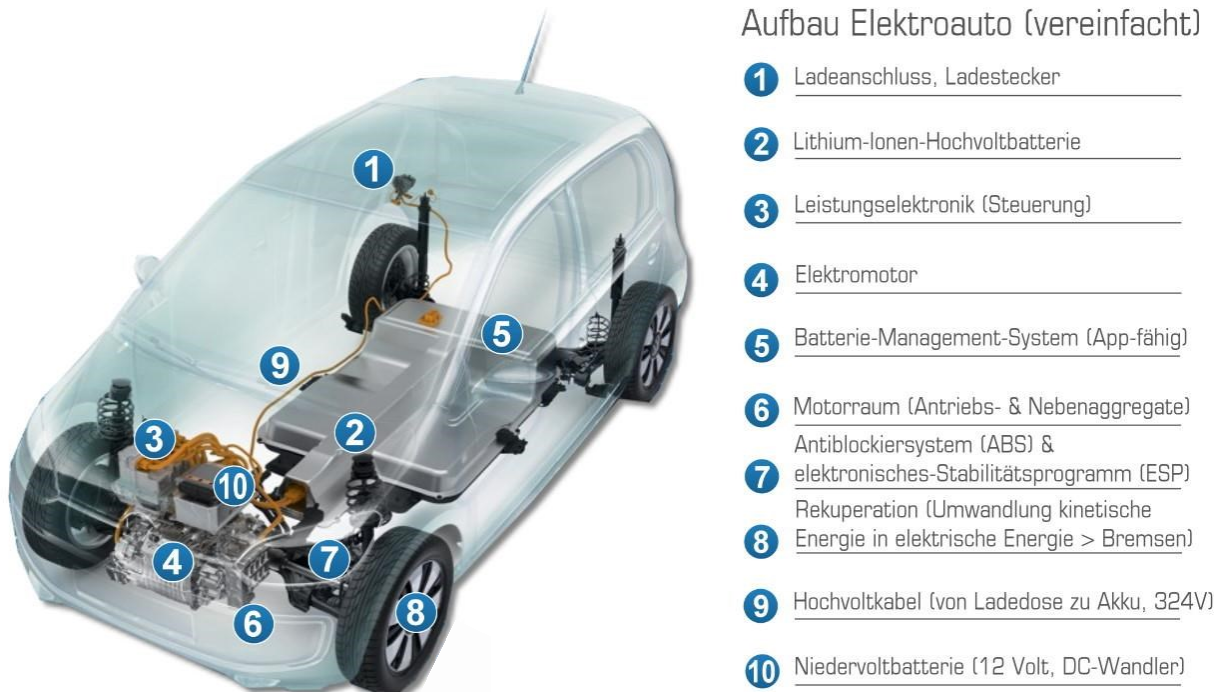


Abbildung 4: Überblick über den elektronischen Aufbau eines rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs (eigene Darstellung in Anlehnung an [53])

5.3. CAN – Controller Area Network

Heutzutage ist es im Fahrzeugbereich üblich, dass jede Komponente, die eine Art Sensorik verbaut hat, mit allen anderen Komponenten im selben Fahrzeug kommunizieren kann. Dies gelingt, da jeder Absender seine Nachricht eindeutig mit einer fest definierten Identifikationsnummer (ID) kennzeichnet. Eine Nachricht wird in Form eines seriellen Datenpaketes übertragen, wobei über 50 Bit allein für die ID und die Fehlerkorrektur anfallen. Hinzu kommen noch 0-8 Daten-Bytes, welche die eigentliche Information enthalten und deren Anzahl im sogenannten „Data Length Code“ zuvor definiert ist. Physikalisch betrachtet werden die Daten bitweise codiert über selben Kanal gesendet und empfangen. Über eine Ringleitung stehen jedem damit verbundenen Teilnehmer alle darin enthaltenen Daten zur Verfügung. Gleiches gilt auch in die entgegengesetzte Richtung. Dieses Netzwerk, welches sich somit als zentrales Nervensystem eines jeden Fahrzeugs darstellt, nennt sich „Controller Area Network“, kurz „CAN“. Die Signalführung verläuft symmetrisch, physikalisch

im Ansatz mit einem XLR-Kabel aus dem Audiobereich vergleichbar. Jedoch werden zur Datenübermittlung digitale Spannungswerte angenommen und am Ende miteinander verrechnet, um etwaige äußere Einstreuungen aus den Leitungen zu filtern (Unterdrückung von Gleichtaktstörungen). Dies bedeutet, es wird über das eine Kabel das sogenannte CAN-Hi-Signal mit 2,5 Volt = binär 1 oder 3,5 Volt = binär 0 und im anderen das sogenannte CAN-Low-Signal mit 2,5 Volt = binär 1 oder 1,5 Volt = binär 0 gesendet. Daraus ergibt sich bei Verrechnung der beiden Signale bei binär *Eins* eine Differenzspannung von 0 Volt und bei binär *Null* eine Differenzspannung von 2 Volt und ist von angebundenen Geräten so einzuhalten. Die Kupferleitungen selbst sind an beiden Enden über einen Abschlusswiderstand bedämpft, um keine Reflektionen und damit Auslöschungen im Datensignal zu bekommen. [54]

Für weitere Details zu CAN-Bus-Systemen empfiehlt es sich, das Buch „CAN: Controller Area Network: Grundlagen, Design, Anwendungen, Testtechnik“ Gebundene Ausgabe – 31. Mai 2011 der Autoren Wolfhard Lawrenz und Nils Obermüller [55] einzusehen.

Auf das CA-Netzwerk trifft man daher auch bei Elektrofahrzeugen. So soll an dieser Stelle an Hand eines verallgemeinerten Schaubilds veranschaulicht sein, inwieweit CAN die Steuerung im Elektrofahrzeug (Electric Vehicle = EV) verbindet, um zu verdeutlichen, dass das CAN-Bus-System als zentrales Nervensystem verstanden werden kann (siehe dazu alle blauen Pfeile in Abbildung 5).

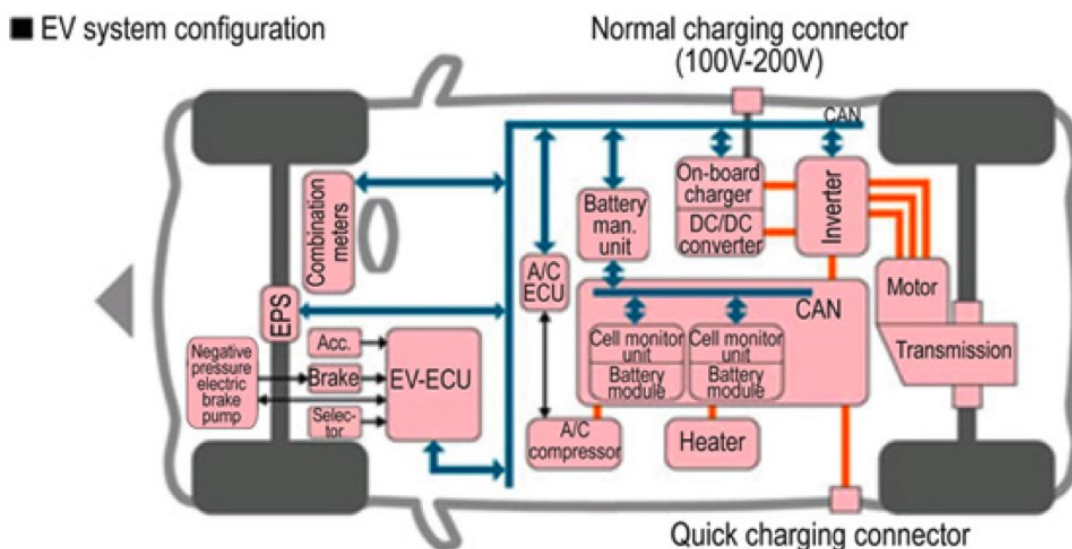


Abbildung 5: Die modellhafte Darstellung des CAN-Buses in einem Elektrofahrzeug [56]

Erklärung von einigen der eben gesehenen Komponenten aus Abbildung 5:

- (EV)-ECU: Steht für (EV) Electronic Control Unit. Diese Einheit stellt ein Steuergerät für die verbauten Komponenten dar. Es verarbeitet die Daten, welche über den zentralen CAN-Bus sowie von den direkt angebundenen Sensoren kommen und sendet an andere Komponenten über den CAN-Bus entsprechende Steuerbefehle zurück.
- A/C ECU & A/C compressor: Komponenten der Klimaanlage
- Combination meters: Tachoanzeigen

Die übrigen Begriffe sollten sich von selbst erklären. Daher kann von weiteren Erläuterungen absehen werden. Wie man gesehen hat, ist das CAN-Bus-System aus heutigen Fahrzeugen nicht mehr wegzudenken, es vernetzt alle Komponenten und deren Funktionen miteinander. Auch für diese Arbeit spielt das CA-Netzwerk eine gewichtige Rolle und wird im weiteren Verlauf der Thesis noch einmal aufgegriffen. Doch zuerst muss geklärt sein, wie das klangliche Ziel des AVAS auszusehen hat. Dabei setzt man am sinnvollsten dort an, wo der Klang erzeugt wird.

6. Entwicklung und Realisierung des akustischen Warnsystems

Für die Entwicklung und Realisierung dieses Sound-Projekts stellte die GIGATRONIK Stuttgart GmbH ein im Hause entwickeltes Elektro-Quad zur Verfügung. Das Elektro-Quad ist ein nicht straßenzugelassener Prototyp, der als Präsentationsfahrzeug der GIGATRONIK-Gruppe auf Messen in ganz Deutschland unterwegs ist. Angepasst an diese Rahmenbedingungen werden die von der Europäischen Union vorgegebenen Anforderungen eines AVAS in annähernder Form umgesetzt. Für dieses Fahrzeug soll jedoch das Show-Ereignis für Messepräsentationen eine übergeordnetere Rolle spielen, gleichzeitig aber die Vorgaben eines AVAS in Sichtweite bleiben, was beim Motorklang beginnt und bei den Funktionen des Elektro-Quads endet.

6.1. Welche Einflüsse auf die Klangerzeugung müssen beachtet werden?

6.1.1. Klangvorstellungen

Der Sound des akustischen Warnsystems soll, wie durch die EU bereits definiert, dem Klang eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor aus derselben Fahrzeugkategorie in vergleichbarer Weise nachkommen.

Wie bereits erwähnt, kommen somit alle Verbrennungsmotorenklänge in Frage, daneben auch synthetisierte Warngeräusche, die jenen im Verhalten und Charakter nachempfunden sind.

Bevor man also grundlegend überlegt, wie man solch einen Sound technisch erzeugt bekommt, muss zunächst geklärt sein, wie sich der Klang eines Verbrennungsfahrzeugs entwickelt.

Denkt man an einen Verbrennungsmotor, fallen folgende Eigenschaften auf:

- Es entsteht ein Klang beim Einschalten sowie beim Ausschalten der Zündung.
- Im eingeschalteten Zustand hört man zunächst eine Leerlaufdrehzahl.
- Mit steigender Geschwindigkeit nimmt die Verbrennungsfrequenz im Motor zu.
 - o Der Grundton erhöht sich.
 - o Der Geräuschpegel nimmt zu.
 - o Gegenteilige Entwicklung bei Entschleunigung; wobei hier nochmals weitere motortechnische Klangeigenheiten mit einstreuen können, z. B. ein Knallen am Auspuff.
- Ist die Kupplung getreten oder kein Gang eingelegt, entwickelt sich der Klang beim Beschleunigen des Motors leichtgängiger, da kein Lastmoment an den Rädern wirkt.
- Mit Lastmoment wird das Motorengeräusch bei Beschleunigung zu Anfang basslastiger, wirkt härter / schwergängiger und damit auch lauter.
- Bei Entschleunigung unter Last entwickelt der Motor noch einmal einen anderen Klangcharakter.
- Sollte man vorhaben, das Schalten von Gängen im AVAS zu realisieren, muss man sich bewusst sein, dass beim Verbrenner ein Klang abhängig vom Getriebe- und Kupplungstyp erzeugt wird.
- Generell ist der Sound jedes Fahrzeugmodells mit Verbrennungsmotor anders. Daher findet man keinen einheitlichen Motorklang.

Diese eben genannten Eigenschaften stellen grundlegende Merkmale eines real klingenden Verbrennungsmotors dar.

Nach Besprechen dieses Ausgangspunktes mit der Firma GIGATRONIK sollten zwei Ziele verfolgt werden: Einerseits, reale Motoren künstlich wiederzugeben, und andererseits, eigene Klänge für spätere Vergleiche zu schaffen, wobei beide Klangarten am Ende von extern oder am Fahrzeug selbst frei anwählbar sein sollten. Dabei stellte sich die klare Maßgabe, dass entsprechende Hard- / Software nur teilweise selbst entwickelt werden könnte. Etwaiges Endziel sollte das Verbauen jener Komponenten in das Elektro-Quad sein.

Dieser Ausgangspunkt zur Entwicklung eines akustischen Warnsystems verlangt die Klärung, mit welcher Soft- und Hardware die Klangerzeugungsfrage lösbar ist. Also muss ein System gefunden werden, das sowohl künstliche als auch aufgenommene Audio Files mittels externer Ansteuerung wiedergeben kann.

6.1.2. „State of the Art“ bei Sound-Generatoren

Nach Recherche im Internet und Telefonaten mit Fachgeschäften, wie dem Soundland in Fellbach oder dem Rock Shop in Karlsruhe, konnte eins ausgeschlossen werden: Gewöhnliche Masterkeyboards / Synthesizer wären zwar grundsätzlich geeignet, um jene Klänge gezielt einzupflegen und anzusteuern. Jedoch werden sie entweder mit Klaviertastatur ausgeliefert und sind daher aus platztechnischer Sicht nicht zu gebrauchen oder es können im Falle der Drum Computer nicht genügend Audio Files auf einmal abgespielt werden. Weiter ist die Bearbeitungsoberfläche je nach Gerät für die Realisierung dieses Projekts ungeeignet, da man entweder das System nicht fein genug abstimmen kann, um eine flüssige Klangentwicklung zu generieren oder die Geräte bieten besonders in der Bearbeitung der einzelnen Samples ungenügende Flexibilität.

Daher bleibt eine Lösung auf PC- oder Macintosh-Basis zu suchen. Eine auf Apple Mac OS X basierende Lösung ist mit einem deutlich größeren Kostenfaktor für vergleichsweise weniger Speicher-, CPU-, und Anschluss-Leistung verbunden, weshalb aus dieser Sicht eine PC-basierende Lösung als die bessere Wahl erscheint. Mögliche Risiken bezüglich der Zuverlässigkeit von Microsoft Windows-basierten PC-Systemen gegenüber Apple-Systemen dürfen jedoch nicht ungeachtet bleiben und sollten daher berücksichtigt werden.

Nach erneuter Rücksprache mit der Firma GIGATRONIK fiel die Entscheidung auf die Windows basierende PC-Variante.

Auf dieser Grundlage muss nun eine Software gefunden werden, die den gewünschten Anforderungen eines PCs entspricht. Welche Anforderungen können das sein?

Nun, dazu muss geklärt werden, wie die Klangerzeugung aussehen soll, sodass am Ende ein Motor-Sound erklingt, der sich so nah wie irgend möglich an der Realität orientiert. Das heißt, er muss den tonalen wie auch pegelseitigen Verlauf über den Geschwindigkeitsbereich des Fahrzeugs nachbilden.

Es muss also eine Klangerzeugungsart gewählt werden, die mehr als nur einen statischen Sound erzeugen kann. Der Sound muss sich dynamisch entwickeln können.

In diesem Fall könnten folgende Klangerzeugungsverfahren zur Auswahl kommen:

Additive-, Subtraktive-, FM-, und Granularsynthese, so wie Sampling in Form eines Sampler-Instruments.

6.1.3. Klangerzeugungsformen

Additive Klangsintese:

Die additive Klangsintese verfolgt den Ansatz, dass Klänge aus Teilschwingungen bestehen und daher theoretisch vollständig nachbildbar sind. Somit werden bei diesem Funktionsprinzip aus genannten Teilschwingungen Klänge aufgebaut, wobei sich der Klangentfaltungscharakter über deren Hüllkurvenfunktion definieren lässt. Daraus ließe sich in der Theorie jeder natürliche Klang nachbilden. [57]

Subtraktive Klangsintese:

Dieses Verfahren setzt einen Oszillator voraus, welcher Schwingungen mit obertonreichem Klangspektrum erzeugt. Es werden beispielsweise Sinus-, Sägezahn-, Dreieck- und Rechteck-Wellenformen erzeugt. Anschließend folgt eine subtraktive Klangbearbeitung. Die ausgegebene Wellenform wird beispielsweise per Filtereinheit oder Hüllkurveneinstellung so verändert, dass Anteile des Dauertons gemäß dieser Faktoren entfernt werden. [58]

Frequenzmodulationssynthese (FM-Synthese):

Bei der Frequenzmodulationssynthese wird der Klang über mindestens zwei Oszillatoren erzeugt. Der tonausgebende Oszillator (Trägeroszillator) ist vom Modulationsoszillator angesteuert, wodurch dessen ausgegebene Wellenform moduliert erklingt. Komplexere Verschaltungen mit mehreren Oszillatoren sind ebenfalls möglich. [59]

Zusammenfassend kann man über die bisher genannten Klangerzeugungsformen folgendes sagen: Sie lassen die dynamische Änderung mit der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zu, jedoch sind sie aus klanglicher Sicht zu sehr am gewohnten Höreindruck von Instrumenten orientiert und fallen damit als alleinige klangerzeugende Methode aus dem Rahmen, einen zufriedenstellenden Motorensound erzeugen zu können.

Als sinnvolle Wahl zur Klangerzeugung von Motorensounds bieten sich zwei andere Methoden an.

Granularsynthese:

Mit der Granularsynthese bietet sich die wohl höchste Flexibilität der Bearbeitung eines einzelnen Quellklangs, welcher zuvor synthetisch oder per Audio File erzeugt wird. Die Granularsynthese splittet jenen Quellklang in viele winzige Schnipsel, die sogenannten „Grains“. Deren Schnipsellänge kann im Millisekundenbereich frei bestimmt werden, wobei die Auswahl auf ein einzelnes Grain oder auf übergreifender Basis definiert sein kann. Auch die Hüllkurve der Grains ist kombiniert oder einzeln einstellbar. Man erzielt damit ein schnelleres oder langsames Abspielen bei fester oder variabler Tonhöhe. [60]

Auf dieses Prinzip aufbauend bieten Sampler-Instrumente, beispielsweise als Software für den PC oder Mac eine noch breitere Basis.

Sampler-Instrument:

Diese Form der Klangerzeugung wendet ein oder mehrere hinterlegte Audio Files an, um in aller Regel ein real vorkommendes Instrument auf synthetischer Basis darzustellen. In einem Sampler-Instrument wird das hinterlegte Audio File auf Knopfdruck abgespielt und kann dabei in seiner Abspielgeschwindigkeit variiert werden. So entsteht mit variabler Abspielgeschwindigkeit, genannt „Pitching“, im Bezug zum Original ein höherer oder tieferer Klang während des Spiels. Diese Wiedergabemethode kann mit der Granularsynthese vereint

werden, denn beide Klangerzeugungsarten greifen auf Audio Files zurück um einen Klang zu erzeugen. Jedoch werden beim einfachen Sampler keine Grains erzeugt.

Eine Taste an solch einem Sampler-Instrument kann eines oder mehrere Audio Files desselben Tons, dann allerdings mit unterschiedlicher Anschlagsstärke / Artikulation, hinterlegt haben. Bei günstigen Modellen stehen nur wenige Audio Files als Quelle zur Tonwiedergabe zur Verfügung. In diesem Fall müssen die wenigen Audio Files einen größeren Tonumfang abdecken und werden innerhalb dieses Umfangs um die notwendige Tonhöhe „gepitched“. Dies bedeutet, dass das einzelne Audio File, welches über solch einen Tastenbereich definiert ist, beschleunigt oder verlangsamt abgespielt wird – abhängig von der darin betätigten Taste. Allerdings dient eine der im definierten Abspielbereich vorhandenen Tasten dem Audio File als Referenz. Meist ist dies jene mit der niedrigsten Tonfrequenz in solch einem Block, zu welcher dann das Audio File in originaler Geschwindigkeit / Tonhöhe abgespielt wird.

Es zeigt sich also, dass ein Sampler-Instrument in Verbindung mit der möglichen Granularsynthese die geeignete Klangsyntheseform für ein Acoustic Vehicle Alerting System sein kann, um das gefordertes Ziel – den Sound eines echten Verbrennungsmotors – zu erreichen. Obendrein könnte damit die Zusatzanforderung der Generierung von nicht realen Motor-Sounds realisiert werden. So soll diese klangerzeugende Methode, aufgeteilt in zwei Untergruppen, im Kapitel 6.3. ab Seite 35 und folgende, weiter verfolgt werden.

6.1.4. Software als Basis für die Klangerzeugung

Da entschieden ist, dass die grundlegende Sound-Generierung über einen Computer erfolgen soll, muss nun eine passende Software gefunden werden, die eben genanntes Kriterium der Klangsynthese erfüllt. Sucht man hier den Softwaremarkt ab, so kommt man an zwei Programmen nicht vorbei. Es handelt sich dabei um das von der Firma Native Instruments GmbH entwickelte Programm KONTAKT 5 [61] und das von der Firma Steinberg Media Technologies GmbH entwickelte HALion 5 [62].

Beide sind „stand alone“-fähig, sie kommen also ohne zusätzliche Digital Audio Workstation (DAW) aus, um gestartet werden zu können und um Sound abzuspielen. Sie haben beide eine eigenständige Bearbeitungsoberfläche und ermöglichen das benötigte Signal-Routing

auf entsprechende Audiokanäle. Bis zu sechs Mono-Audiokanäle für 5.1 Surround Sound sind möglich [61] [62].

Durch Austesten ließ sich sicherstellen, dass es ferner möglich ist, beiden Programmen Steuerbefehle anzulernen, womit ein Ansteuern von internen Fadern, Drehreglern und Knöpfen per MIDI-Controller-Befehl von extern möglich ist. Dieses Feature soll für das hier entwickelte akustische Warnsystem dazu genutzt werden, Funktionen wie die Lautstärkeregelung und Stummschaltung im späteren Verlauf von außen ansteuerbar zu machen.

Einschub:

Selbstverständlich könnte man das Stummschalten auch durch einen im Protokoll der MIDI-Architektur definierten sogenannten „Note Off“-Befehl lösen und ebenso das Volume per Anschlagsstärke im sogenannten „Note On“-Befehl variieren – MIDI steht für Musical Instrument Digital Interface. Doch damit müssten die beiden eben genannten MIDI-Befehle dauerhaft für alle Noten eines Sounds ausgeführt werden und stellen damit eine umständlichere Lösung dar. Obendrein würde eine Regelung des Geräuschpegels per „Note On“-Befehle dazu führen, dass jener Sound, welcher für diesen Befehl hinterlegt ist, immer wieder aufs Neue angehalten werden müsste, um anschließend mit einem anderen Geräuschpegel starten zu können. Dies hat unweigerlich eine unnötige Wiederholung des Klangs zur Folge und kann im schlimmsten Fall zu hörbaren Artefakten führen, was zwingend zu vermeiden ist.

Somit bleibt die Frage offen, welches der beiden „Stand Alone“-Programme wohl die bessere Wahl ist?

Durch Prüfen von HALion 5 und Kontakt konnte folgendes festgestellt werden: HALion 5 bietet grafisch gegenüber KONTAKT 5 die bessere Bearbeitungslösung. Besonders die Wellenformdarstellung ist deutlich besser aufgelöst, was zu einem exakteren und angenehmeren und daher vermutlich auch zu einem schnelleren Arbeitsprozess bei der Bearbeitung etwaiger Audiofiles führt. Ein Nachteil von HALion ist, man benötigt einen zusätzlichen Dongle, wie man es z. B. auch von Avid ProTools oder den Waves Plug-ins kennt. Auf diesem Dongle ist die Software-Lizenz gespeichert. Wird jener Dongle einmal nicht sauber erkannt oder fällt dieser vollständig aus, so ist die Ausführung des Programms

unmöglich. Jedoch erhält man durch den Dongle gleichzeitig eine deutlich höhere Flexibilität. Daher kann man HALion 5 auf mehreren Rechnern installieren und muss zur Nutzung lediglich den Dongle einstecken. Das ist mit KONTAKT 5 nicht möglich. Hier ist man auf 2 Produktschlüssel festgelegt, welche nach Onlineaktivierung nur mit Aufwand erneut freigegeben werden können, um einen anderen PC / Mac nutzbar zu bekommen. So spricht im Rahmen der Entwicklungsphase die höhere Flexibilität und jene Bearbeitungsoberfläche für HALion 5.

Nach Begutachten der Voraussetzungen und den Möglichkeiten der Bearbeitung fiel die Entscheidung zu Gunsten von HALion 5 aus.

6.1.5. PC versus Mac

Mit HALion 5 werden Hardware-Mindestanforderungen gesetzt; etwa eine Intel oder AMD Dual Core CPU, 4 GB RAM und 20 GB Festplattenspeicher. Als Betriebssystem kommen alle Versionen von Apple ab Mac OS X 10.7 und Microsoft ab Windows 7 oder neuer in Frage. [63]

HALion ist also sowohl auf Windows wie auch auf Mac OS X nutzbar. Doch da bekanntermaßen ein Apple-Rechner leicht das Dreifache eines vergleichbaren Windows-Rechners kosten kann, ist die Antwort recht schnell klar. Es kommt kein Mac in Frage, auch wenn er im Gegensatz zu einem Windows-Rechner voraussichtlich stabiler laufen würde.

Genau genommen müsste man auch noch bedenken, dass dieser Rechner obendrein auch noch automotive-tauglich sein sollte.

Hierfür gibt es auf dem Markt sogenannte „Car-PCs“. Deren Hardware-Komponenten sind resistent gegen Temperaturschwankungen von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ (definierter Arbeitsbereich), unempfindlich gegen Erschütterung und ihre Versorgungsspannung beziehen sie aus den 12 Volt des Bordnetzes. Doch da dies ein Versuchsstadium ist, und es das Ziel zu erreichen gilt zunächst einmal zu zeigen, dass solch ein Sound-System grundsätzlich möglich ist, kann hier von einem sogenannten „Car-PC“ abgesehen werden. Zumal solch ein PC-System in der preislichen Kategorie von einem Apple-Rechner einzuordnen ist. [64]

Abgesehen davon ist meine Beobachtung, dass ein Car-PC im Grunde aus den gleichen Komponenten wie ein gewöhnlicher Desktop-PC besteht. Ein Motherboard, eine CPU mit aktiver oder passiver Kühlung, Arbeitsspeicher und eine Festplatte, wobei letztere

sinnvollerweise durch eine SSD ersetzt wird. Damit bleibt bei aktiver Kühlung nur der Lüfter als mechanisch bewegte Komponente. Alle anderen Komponenten sind unbeweglich verbaut und daher erschütterungsunempfindlicher. Überträgt man diese Eigenschaften nun auf einen herkömmlichen PC, so lässt sich hier etwas sehr Gutes schon für unter 600 Euro finden. Obendrein kann dieser PC im Verhältnis dazu auch noch sehr klein sein, was zusätzlich Platz spart. Ferner sollte man sich auch über die Bootzeit Gedanken machen, also wie lange solch ein PC benötigt, bis er hochgefahren ist. Um diese Zeit auf unter 30 Sekunden zu drücken, muss man auf eine Hardware zurückgreifen, die extrem schnell und zusätzlich klein ist.

6.2. Aufbau der Signalkette des akustischen Warnsystems

6.2.1. BRIX™ Pro

Wie zuletzt im Abschnitt zuvor beschrieben, stellte sich die Anforderung eine möglichst kurze Boot-Zeit zu erzielen. Darauf bietet der von der Firma GIGABYTE angebotene BRIX PRO GB-BXi7-4770R, mit einem Intel i7 Quad Core Prozessor (max. 3,9 GHz) und einem Kantenaußenmaß von gerade einmal 6,2 x 11,1 x 11,4 cm, die richtige Antwort. Laut Hersteller liegt sein Arbeitsbereich zwischen 0° C und +35° C, wobei die Lagerungstemperatur weit darüber hinausgeht. Sie reicht von -20° C bis +60° C. Dies zeigt, dass ein normaler Desktop-PC von einem Car-PC keinesfalls weit entfernt sein kann. Zudem vermag der hier beschriebene BRIX™ in 15 Sekunden unter Windows 8 kalt starten ([65], Min. 8:00 - 12:00). Ferner bietet dieser neben dem standardmäßigen Stereo-Miniklinke-Ausgang auch einen Optical S/PDIF- und einen HDMI-Ausgang [66]. Also kann eine Tonsignalübertragung im Falle einer schlechten elektromagnetischen Verträglichkeit auch auf digitalem Wege bis kurz vor die Lautsprecher hin übertragen und erst dort in ein analoges Signal gewandelt werden. Aufgrund meines Anratens, entschied sich GIGATRONIK für diesen Mini-PC als Soundgenerator für das Prototypenfahrzeug. Dabei war der Wunsch gegeben, den Sound über die Onboard-Soundkarte am Miniklinke-Ausgang auszuspielen. Ob diese Entscheidung bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit eine gute Wahl ist, muss sich im weiteren Verlauf der Nutzung des Systems zeigen. Klar ist jedoch, dass diese Variante eine erhöhte Anfälligkeit für Einstreuung von Störsignalen bieten kann, da die Signalführung unsymmetrisch verläuft.

6.2.2. An- und Abschaltvorgang des Sound-Generators

Gut wäre es, wenn dieser PC nach seinem Vorbild eines Car-PCs automatisch startet, sobald Spannung an seinem Eingang anliegt. Dies lässt sich über die BIOS-Einstellungen festlegen.

Doch wie kann bei einem PC das Abschalten gelingen, wenn man wünscht, dass dies ohne Benutzerinteraktion über Monitor und PC-Maus funktionieren soll? Ein AVAS muss schließlich ohne Monitor auskommen.

Auch hier lassen sich Lösungen finden. Da das Betriebssystem Mac OS X im späteren Verlauf dieser Bachelorarbeit hier noch einmal eine Schlüsselfunktion übernimmt, soll es in der folgenden Aufstellung berücksichtigt werden.

Sucht man nach Möglichkeiten, das Windows- oder Mac OS X-Betriebssystem ohne Monitor und PC-Maus abzuschalten, so bieten sich folgende Varianten:

- **Ohne Tastatur:**

- Hartes Abschalten durch Entfernen der Spannungsversorgung. Dies kann jedoch zur Folge haben, dass im schlimmsten Fall das Festspeichermedium zerstört wird oder aber beim nächsten Start ein Rettungsprogramm aufgerufen wird. Im besten Falle passiert nichts und das System startet normal und ohne Verzögerung.
- Sanftes Abschalten durch Nutzen der Funktion „Herunterfahren“. In Windows 7 kann diese durch das Betätigen des „Power“-Tasters realisiert werden. Unter Mac OS X bietet sich keine Lösung, da sich bei Betätigung jenes Tasters ein Auswahlménü öffnet und man anschließend PC-Maus und Monitor benötigt, um den Vorgang abschließen.

- **Mit Tastatur:**

- Sanftes Abschalten gelingt unter Windows 7 durch das nacheinander gefolgte Drücken der Windows-, Rechtspfeil- und „ENTER“- / „RETURN“-Taste einer Windows-Tastatur. Unter Mac OS X kann dies mit selbiger Tastatur und der Tastenkombination „Command“ + „Strg“ + „Alt“ + „F12“ ausgeführt werden.

Es zeigt sich damit, dass ein sauberes und sanftes Abschalten eines Computers zu bevorzugen ist und dies mit einer Tastatur ohne Nutzung von Monitor und PC-Maus gelingen kann.

Beim Herunterfahren darf auch die genutzte Software keine Probleme verursachen. Sie muss ohne einen Fehler oder eine Unterbrechung – beispielsweise durch eine Aufforderung zum Speichern – abschalten. Dies gelingt mit Steinbergs HALion 5 durch Selektieren des Feldes „Don't prompt for confirmation when quitting HALion“. Dank der Tatsache, dass all diese Funktionen reibungslos zusammenspielen, kann das AVAS ohne Monitor auskommen und wird, wie im späteren Verlauf noch beschrieben, über einen Tastaturcontroller abgeschaltet. Die Darstellung dieser Applikation folgt im Unterkapitel 6.5. auf Seite 55.

6.2.3. Entwicklung der Schnittstelle zwischen CAN-Bus und MIDI

Anschließend muss dafür gesorgt sein, dass an HALion MIDI-Steuerdaten gesendet werden. HALion ist dafür konzipiert, von bis zu vier (unterschiedlichen) USB-MIDI-Interfaces gleichzeitig MIDI-Steuerdaten zu empfangen. Ein MIDI-USB-Interface wandelt die von einem Masterkeyboard, einem externen Synthesizer oder von einem Drumpad kommenden MIDI-Daten in ein USB-gerechtes Datenprotokoll um. Die in das USB Datenprotokoll verpackten MIDI-Daten werden nach dem Erkennen des Interfaces in HALion umgesetzt, um Audio anzusteuern.

Man entschied sich an dieser Stelle für den Zukauf eines entsprechenden MIDI-USB-Interface, da es lediglich 15 Euro kostet und eine Eigenentwicklung somit unnötig macht [67]. Was im Detail hinter dem Universal Serial Bus (USB) steckt, kann auf der Website USB.org [68] ausführlich nachgelesen werden und soll in dieser Bachelorarbeit nicht weiter beleuchtet werden, da dieser Teil nicht neu entwickelt ist. Anders steht es jedoch um die Frage der Befehlseingabe, und damit um die Frage, wie jenes MIDI-Datenprotokoll nutzbar gemacht werden kann, sodass HALion diese Daten am Ende zuverlässig empfängt.

Betrachtet man den Anfang der Signalkette, so setzt das MIDI-USB-Interface im Musikbereich, wie bereits erwähnt, als Eingabeoberfläche einen entsprechenden Controller voraus, z. B. ein Masterkeyboard. Diese Eingabeoberfläche besteht in aller Regel aus Tasten und Dreh- / Schiebereglern. Bei Betätigung dieser mechanischen Komponenten ändern sich analoge Spannungswerte, welche zentral von der internen Schaltung des Controllers interpretiert werden.

In dieser Schaltungskette ist das entscheidende Bauelement, der „Universal Asynchronous Receiver Transmitter“, kurz UART, eingebunden. Er wandelt jene Werte am Ausgang in das

seriell gesendete MIDI-Protokoll mit einer Datendurchsatzrate von 31250 Bit/s. Abbildung 6 veranschaulicht den Schaltplan der drei MIDI-Ports, wie sie an einem Masterkeyboard vorzufinden sind. Für diese Thesis ist allein der MIDI-OUT-Port von Relevanz.

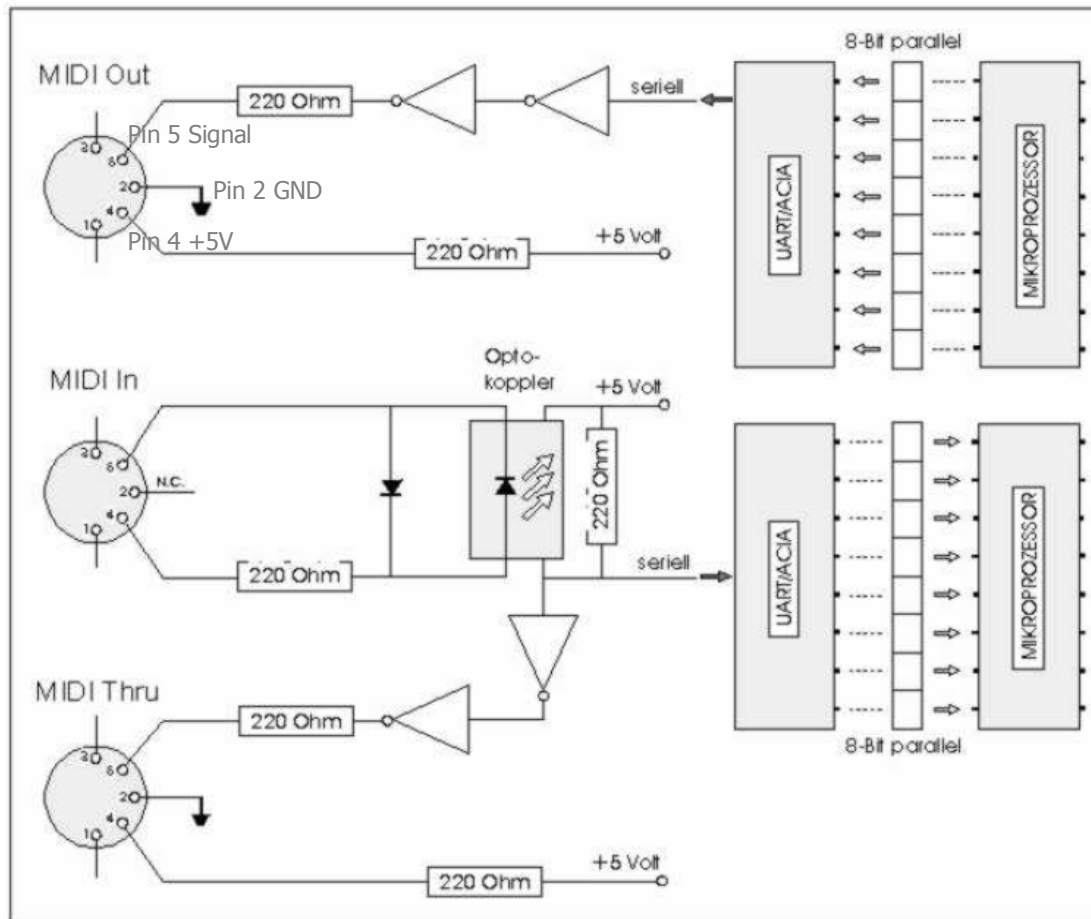


Abbildung 6: MIDI-Port-Schaltplan (eigene Darstellung in Anlehnung an [69])

Wie man in Abbildung 6 am MIDI-OUT-Port erkennen kann, ist die Datenübermittlung über zwei Drähte an Pin 5 und Pin 4 gewährt. Pin 2 dient als Masseanschluss. Das einzelne MIDI-Wort besteht aus acht Bit, wobei das „Most Significant Bit“ (kurz MSB), das Bit mit der größten Wertigkeit darstellt. Das MSB beschreibt, ob ein Status- (Wert 1) oder ein Daten-Byte (Wert 0) gesendet wird. Zusätzlich dienen ein Start- und ein Stopp-Bit der Synchronisation des Empfängers in der asynchronen Datenübertragung, ausgehend vom UART. Eine Parität wird nicht mitgesendet. So bekommt man für ein Status- oder Daten-Byte eine Nachrichtenlänge von nicht nur acht, sondern zehn Bit. Die mittleren acht Bit (Bit 2-9) stellen also den notwendigen Inhalt der Nachricht dar. Da ferner das MSB belegt ist, um die Unterscheidung von Status- oder Datenbyte sicherzustellen, stehen jedem Byte lediglich

sieben Bit für die Informationsübertragung zur Verfügung. [70] [71] [72]

Mit diesem Kenntnisstand kann nun entsprechende Hardware entwickelt werden, um eine nötige Eingabeoberfläche, wie beispielsweise ein Masterkeyboard zur Ansteuerung von HALion, zu ersetzen.

Eine nötige Vertiefung zum MIDI-Datenprotokoll bezüglich abschließender Logikprogrammierung folgt in Unterkapitel 6.4.2. auf Seite 50.

6.2.4. GIGABOX Gate FR Extended

Mit dem eben beschriebenen Wissen über MIDI kann nun eine eigene Eingabeschnittstelle entwickelt werden, um den letzten Baustein in der Signalkette zwischen Sound-Generator (PC unter Nutzung von HALion 5) und CAN-Bus zu schließen. Hierfür hat die Firma GIGATRONIK ein Gateway entwickelt, das auf Basis ihres bereits vorhandenen Produkts „GIGABOX Gate FR Extended“ entstanden ist. Generell sind die sogenannten GIGABOXen von GIGATRONIK als Schnittstelle entwickelt worden, um im Prototypenstadium unter anderem CAN-Signale empfangen, verarbeiten und senden zu können. Wird ein Signal von solch einem Gateway – der GIGABOX – intern verarbeitet, so kann auf anderen



Abbildung 7: GIGABOX Gate FR Extended mit MIDI-Ausgang

Ausgängen dieses Gateways eine gezielte Aktion folgen. In der Sonderanfertigung für die hier geforderte Anwendung wurde in der GIGABOX Gate FR Extended ein zusätzlicher UART verbaut, dessen Funktionseigenschaft MIDI-gerecht konfiguriert ist und damit die geforderte MIDI-Eingabeoberfläche ersetzt (siehe auch Abbildung 7). Die in Abbildung 7 ersichtliche MIDI-Buchse, wurde zuletzt entfernt sowie interne Signalleitungen zur Datenübertragung auf rückseitig befindliche freie Ausgänge verlegt.

Klangrelevante Nachrichten:

Mit dieser GIGABOX Gate FR Extended können am zentralen CAN-Bus nun Daten über Fahrgeschwindigkeit, Motorendrehzahl, anliegendes Drehmoment sowie Signale von Knöpfen

oder die Daumengasstellung und vieles mehr empfangen werden. Somit auch Nachrichten, die von einem per Bluetooth mit dem Quad verbundenen Tablet PC gesendet werden. Der Großteil dieser eben genannten Nachrichten wird in Unterkapitel 6.4. (siehe Seite 47 und folgende) beschrieben und kommt zur Anwendung.

Doch bevor ein Sound erklingen kann, muss dieser entweder von einem Sound Designer elektronisch geschaffen oder an einem realen Verbrennungsmotor aufgenommen werden.

6.3. Verwendete Methoden zur Klangerzeugung

Die beiden genutzten Klangerzeugungsmethoden des im Praxisteil dieser Thesis entstandenen akustischen Warnsystems sind die Klangmodulation per Sample Mapping und die Klangmodulation per Pitch Bend-Funktion.

6.3.1. Methode 1 – Klangmodulation per Sample Mapping

Diese Methode sieht vor jene Drehzahlveränderung des Motorklangs durch aufeinander folgende Klangstufen zu realisieren, festgehalten in einzelnen Audio Samples. Diese Samples werden auf die einzelnen Tasten des Sampler-Instruments – im einfachsten Fall nacheinander aufsteigend – verteilt und dort verankert. Sie sind also auf die Tasten des Sampler-Instruments „gemapped“. Jedoch müssen diese Audio Samples zuvor generiert werden. Dies gelingt mit der Tonaufnahme des gewünschten Motors.

6.3.1.1. Voraussetzungen für die Tonaufnahme

Wohlwissend, dass jeder Sound als sogenanntes Sampler-Instrument in HALion eingebettet sein würde, stünden theoretisch für jedes Sampler-Instrument 128 x 128 belegbare Sample-Plätze zur Verfügung. Das ergibt 16.384 Plätze, die man innerhalb jedes einzelnen Sampler-Instruments – hier auch als (Motor-) Sound-Programm definiert – in HALion ansteuern könnte. Da die Aufnahme, die Bearbeitung und das Einpflegen von so vielen Samples für ein einzelnes Sound-Programm aus zeitlichen Gründen keinen Sinn macht, muss ein Maß gefunden werden, welches das Gehör zufrieden stimmt, doch den Aufwand der Generierung jenes Sounds nicht ausarten lässt.

Zwei Testaufnahmen mit realen Motoren konnten zeigen, dass ein Erkennen von Sample-Stufen per Gehör umso schwerer fällt, je feiner die Abstufung der Drehzahländerung am Motor gewählt ist. Im Falle der zweiten Aufnahme (an einem Traktormotor), konnte geklärt

werden, dass eine Differenz von zehn Umdrehungen pro Minute zwischen benachbarten Sample-Stufen eine günstige Größe für den „Tondifferenz“-Abstand darstellen. Denn nach Tests mit firmeninternen Probanden war zu erkennen, dass für unwissende und ungeschulte Ohren der Übergang von Sample-Stufe zu Sample-Stufe unbemerkt blieb. Der Motorklang stellt sich für diese Personen als ein bündiges und natürliches Klangerlebnis dar. Lediglich eingewiesene Personen mit dafür geschulten Ohren konnten die Abstufungen erkennen. Doch auch hierfür fand sich eine Teillösung. Diese sieht vor, dass alle Sample-Stufen in der Form ausgeschnitten werden müssen, dass zu Beginn jedes Samples der Beschleunigungsvorgang von vorheriger zu aktueller Drehzahl noch kurz zu hören sein muss. Würden nun all diese Samples in rascher Folge aufsteigend aneinander gereiht, so könnte dies eine einheitliche Drehzahlbeschleunigungskurve ergeben, so die Theorie. Diese Vorgehensweise müsste man ebenfalls für fallende Drehzahlen umsetzen. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Theorie nicht vollständig umsetzbar ist. Denn der Lüfter des Motors setzt wegen Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von der geforderten Kühlleistung unregelmäßig ein. Daher sind die beiden Rampen zueinander klanglich nicht identisch, wodurch man sich auf eine der beiden beschränken muss, um Unhörbarkeit der einzelnen Sample-Stufen weitestgehend zu gewähren. Also hat man die Qual der Wahl, entweder die steigende oder fallende Variante zu verwenden. Gerüstet mit diesem Hintergrundwissen kann eine Aufnahme von einem Verbrennungsmotor geplant und durchgeführt werden.

6.3.1.2. Tonaufnahmeplanung

Um ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor aufzunehmen, kristallisieren sich vier Methoden heraus:

1. Fahrzeug im Stand

Dabei wirkt kein Lastmoment über die Räder auf den Motor, welches Einfluss auf den Motorklang hätte. Da das Fahrzeug während der Aufnahme standortgebunden bleibt, kann eine Mikrofonierung ohne Berücksichtigung des Fahrtwinds stattfinden, da dieser schlicht nicht anfällt. Die Platzierung der Mikrofone ist um das Fahrzeug herum frei wählbar, so kann der bestmögliche Klang eingefangen werden. Für diese Aufnahmemethode bietet sich ein freier, lärmarmen Platz mit Stromversorgung an. Die Kosten blieben gering und Reflexionen durch schallharte Wände wären nicht oder kaum zu vernehmen. Ideal wäre hier ein Sportplatz mit Vereinsheim, welcher

außerorts gelegen sein sollte. Jedoch ist man mit dieser Methode wind- und wetterabhängig.

2. Fahrzeug in Fahrt

Dabei erzeugt der Antrieb das geforderte Drehmoment zur Fortbewegung. Die Folge ist eine auf natürliche Weise verbundene Klangänderung von Motor und angeflanschter Abgasanlage gegenüber einem Fahrzeug im Stand. Diese Methode bietet auch die Möglichkeit, den natürlichen Klang des Motors im Leerlauf und damit im Stand aufzunehmen. Doch für den Klang mit Drehmomenteinfluss muss sich das Fahrzeug bewegen. In diesem Zustand sind Windgeräusche unvermeidlich. Als Gegenmaßnahme bietet sich an, die für die Aufnahme benötigte Mikrofone mit Windschutz auszustatten. Jedoch bedeutet dies ein Verfärben des natürlichen Klangbildes. Je nach Windstoppmaßnahme kann ein besonders starker Pegelabfall im oberen Frequenzspektrum verzeichnet werden. Auch ist das feste Anbringen solcher Aufnahmesysteme nicht ganz unkritisch, doch zwingend für die bevorstehende Fahrt nötig. Mikrofone müssen gegen ein Lösen und Abfallen vom Fahrzeug geschützt sein. Das Aufnahmesystem selbst muss portabel und gleichzeitig mehrkanalfähig sein. Ferner benötigt man eine Teststrecke plus gute Wetterverhältnisse. Des Weiteren kann man nicht immer den bestmöglichen Aufnahmeort um das Fahrzeug herum wählen, da es mobil sein muss. [73]

3. Fahrzeug im Stand auf einem Rollenprüfstand

Diese Methode bietet neben der Aufnahme des Motors im Leerlauf die Möglichkeit, den Klang mit auf den Antriebsstrang einwirkenden Lastmoment festzuhalten. So hätte man den Vorteil, dass das Fahrzeug während der Aufnahme ortstreu bliebe und bekäme eine erhöhte Flexibilität in Bezug auf die Platzierung der Mikrofone. Daneben wäre man unabhängig vom Fahrtwind sowie von Wettereinflüssen, da Rollenprüfstände zumeist bei Einrichtungen wie dem TÜV und daher in Hallen zu finden sind. Dies bringt allerdings auch den Nachteil der raumakustisch nicht optimierten Örtlichkeit mit sich. Dagegen sind Rollenprüfstände wie beispielsweise jener im Windkanal der Universität Stuttgart befindliche zwar akustisch optimiert, doch voraussichtlich auch um ein Vielfaches teurer. Abschließend bringt diese Methode noch das Abrollgeräusch der Reifen sowie die mechanische Bremse eines Rollenprüfstands auf den Plan, welche sich dem Nutzsignal beimengen können. Dies

müsste so weit als möglich abgestellt werden. [74]

4. Fahrzeug im Stand mit an den Radnaben angeflanschten „Dynapacks“

Diese Methode bietet beide Möglichkeiten der Aufnahme. Das heißt, eine Aufnahme sowohl mit als auch ohne Lastmomenteinwirkung auf den Antriebsstrang. Mit diesem System sind Abroll- und Bremsgeräusche durch Reifen sowie Geräusche von der Bremse eines Rollenprüfstands eliminiert. Diese Störgeräusche erzeugenden Schallquellen treten nicht mehr auf, weil das Fahrzeug mit seinen Radnaben an hydraulischen Bremsen, den „Dynapacks“, befestigt wird. Zudem ist man mit „Dynapacks“ nicht an eine Örtlichkeit gebunden. Sie können im Freien oder im Gebäude mitsamt Fahrzeug aufgestellt werden. Man kann damit eine freiere Wahl der Örtlichkeit treffen, was Probleme mit der Raumakustik zu lösen vermag. Und besonders können daher alle Mikrofone optimal um das Fahrzeug herum platziert werden. Eine umfangreiche Beschreibung des „Dynapack“-Systems findet sich auf der Website von „Dynapack Chassis Dynamometers“. [75] [76]

Aus Gesichtspunkten der Machbarkeit und der anfallenden Kosten sowie angesichts des Teststadiums der Entwicklung, entschied sich GIGATRONIK für die erste der eben genannten Aufnahmemethoden. Denn für Anwendungszwecke auf Messen würde das Elektro-Quad zumeist am Stand stehen. Damit reicht der gewöhnliche Leerlauf-Sound aus und macht eine Aufnahme unter Lastmomenteinfluss nicht erforderlich. Für zukünftige Aufnahmen soll an dieser Stelle jedoch aus akustischer Sicht das System aus Variante vier mit angeflanschten „Dynapacks“ wärmstens empfohlen werden.

6.3.1.3. Testaufnahme für das Sample Mapping

Mit der ersten Aufnahme war zu zeigen, dass das Prinzip der Abstufung von aufeinander folgenden Drehzahlstufen funktioniert. Für diese Aufnahmen stellte GIGATRONIK ein M-Audio Fast Track-System der ersten Generation mit Pro Tools MPowered Essential, ein Shure Beta 52 plus eine Mercedes-Benz ML-Klasse mit V8-Dieselmotor bereit. Leider bot das Fahrzeug keinen besonders voluminösen V8-Klang, wie man ihn an den Abgasendrohren erwarten hätte. Der Motorblock selbst erzeugte deutlich mehr Geräuschkulisse als die Abgasanlage. Unter diesen Voraussetzungen konnte der beste Klang vor dem Motorblock in einem Abstand von ca. 50 Zentimetern erzielt werden. Nach Einpflegen in HALion war deutlich zu erkennen, dass das Prinzip der Sound-Stufen grundsätzlich funktionieren würde.

Jedoch war tatsächlich eine noch feinere Abstufung, für die Drehzahlstufen nötig, um die Schwelle der Unhörbarkeit auch wirklich zu erreichen.

Weiterhin konnte aus dieser Aufnahme die Erfahrung gewonnen werden, dass die Kombination Fuß plus Gaspedal plus Drehzahlmesser unweigerlich zu Drehzahlschwankungen und somit zu hörbaren Schwankungen im aufgenommenen Audiomaterial führt. Diese würden später für den Hörer das verwendete Loop-Verfahren im Sampler-Instrument in Form von tonalem Springen aufdecken, was zwingend vermieden werden muss, wenn man Qualität bieten möchte.

6.3.1.4. Vollwertige Tonaufnahme für das Sample Mapping

Die zweite Aufnahme dient dem Zweck, zu zeigen, dass das Aufnahme-Equipment einen deutlichen Anteil an der Klangqualität bestimmt und eine exakte Ansteuerung des Motors per Werteeingabe der Drehzahl in Zehnerschritten erfolgen muss, um die Ungenauigkeiten im Zusammenspiel von Mensch und Maschine abzustellen. Für diese Tonaufnahme wurde professionelles Studio-Equipment von der Firma events creative GmbH in Plochingen ausgeliehen und durch eigenes Equipment ergänzt. Dabei kann bei der Mikrofonwahl auf Erfahrungswerte aus Studio- und Live-Tonaufnahmen zurückgegriffen werden. Ebenso fließt in die Auswahl der zu erwartend hohe Schalldruckpegel ($SPL = \text{Sound Pressure Level}$) und die Gegebenheit der voraussichtlich auftretenden Luftverwirbelungen durch Auspuff und Lüfter mit ein. So fällt die Wahl der Mikrofone zu Gunsten jener aus, die einen hohen Schalldruckpegel aushalten würden, bei gleichzeitig guten bis sehr guten Klangwandlungseigenschaften (Frequenzgang). Daneben sollten diese unbedingt einen Windstopper / Popschutz bieten. Daher stehen vor Ort folgende Mikrofone zur Verfügung: 2 x AKG C547 (max. 133 dB_{SPL}) [77], 2 x Electro-Voice RE20 (keine Angaben) [78], 2 x Neumann KM 184 (max. 138 dB_{SPL}) [79], 2 x Schoeps MK 4 (max. 132 dB_{SPL}) [80], 4 x Shure Beta 98D/S (max. 156 dB_{SPL}) [81]. Außerdem noch ein RME Fireface 800, ein MOTU 896 HD, mein Apple MacBook mit Logic Pro 9 sowie das geschlossene Kopfhörermodell AKG K271 Mk II. Ebenfalls zugehörige Kabel und Stative. Zur Absicherung wird ein Schallpegelmessgerät mitbestellt. In Sachen Mikrofoningstechnik würde wie bei der ersten Testaufnahme erneut eine Entscheidung direkt am Fahrzeug zu treffen sein. Das verwendete Fahrzeug ist ein Fendt 516 VARIO PROFI PLUS. Dieser Traktor bietet den Vorteil, dass sich die Motordrehzahl neben dem gewohnten Gaspedal auch per Bordcomputereingabe

definieren lässt. So bietet sich die Möglichkeit, jene Zehnerstufung von Leerlaufdrehzahl (780 U/min) bis Maximum (2.130 U/min) schrittweise exakt abzugreifen. Da es der Wunsch von GIGATRONIK war, den Stereo-Miniklinke-Ausgang des BRIX™ Pro zu verwenden, sollte eine Stereomischung erzielt werden.

Beschreibung der zweiten Aufnahme:

Zunächst lässt man den Motor warmgelaufen, da er andernfalls seinen Klang über den bevorstehenden Drehzahl-Sweep (kontinuierliche Drehzahlveränderung vom Leerlauf bis Maximum) verändern könnte. Ist geprüft, dass der Motor die maximale dB_{SPL} -Grenze der Mikrofone nicht überschreitet, kann mit dem Stellen der Mikrofone begonnen werden. Im Fall des Traktors war an den unterschiedlichen Mikrofonpositionen ein Maximalwert von $103 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ zu messen und lag damit noch deutlich unter dem zulässigen Maximum der Mikrofone. Besonders achtsam muss man aus Eigenschutz und zum Schutz der Mikrofone vor heißen Stellen, wie dem Motor und dem Auspuff, sein. Auch auf die Abgase ist in diesem Rahmen zu achten. Die Mikrofonierung des Traktors bedeutete sich einer neuen Herausforderung zu stellen. Zwar kann wohl durch vorherige Überlegungen sowie durch Erfahrungswerte aus Studio- und Live-Aufnahmen klar werden, woher man den besten Klang mit dem voraussichtlich richtigen Mikrofon bekommen kann, Beispiel Auspuff oder Motorblock, doch um die Besonderheiten des Motorklangs gezielt einzufangen, ist ein stets wachsames Ohr, eine bewusste Suche nach der richtigen Klangquelle sowie ein Austesten der Mikrofone unbedingt nötig. Dafür sollte man ausgiebig Zeit in Anspruch nehmen, um mit einer gezielten Mikrofonaufstellung das Optimum im Klang zu erhalten. Denn nur dann kann der zeitliche Aufwand für das spätere Abmischen der Signale im Tonstudio verringert werden und sich ein natürlich runder Klang von Beginn an einstellen. Für diese Art von Aufnahme bietet sich daher an, mehrere Mikrofone an einer Schallquelle auszutesten, um im späteren Verlauf die aufgezeichneten Signale in Ruhe vergleichen und im Zweifel aussortieren zu können. Daneben ist es notwendig, die Mikrofonierung so zu wählen und zu platzieren, dass sich später alle Signale auf der Stereoebene sinnvoll abbilden. Auch aus diesem Grund ist das Aufnehmen mit mehreren Mikrofonen an einer Schallquelle sinnvoll. Sinnigerweise sollten dabei baugleiche Mikrofone dieselbe Schallquelle schallwandeln, um Unterschiede zwischen beiden Mikrofonsignalen im Klangwandlungsprozess so gering wie möglich zu halten. Bevor die Aufnahme beginnt, muss auf die Pegel der Mikrofonsignale und deren

Klangcharakter geachtet werden. Im ungünstigen Fall ist ein Nachjustieren erforderlich. Während der Suche nach dem richtigen Mikrofon für entsprechendes Quellsignal am Traktor stellte sich schnell heraus, dass die AKG C547 jene Klangerwartungen an unterschiedlichen Klangquellen nicht erfüllten. Sie wurden daher aussortiert. Deren Klang vermittelte ein unsauberes und unangenehm auflösendes Bild von Testsektionen am Traktor. Auch war die Platzierung erschwert, da sie nur durch Festkleben mit GAFFA-Tape an einer Stelle am Traktor verblieben. Ebenso musste wegen Defekts eines der beiden RE20 aussortiert werden. Wie später im Stereo-Dreieck von Abbildung 11 (Seite 43) dargestellt ist, ergab sich nach eben genannten Aufbaukriterien mit dem Großteil der restlichen Mikrofone folgende Mikrofonierung, siehe dazu Abbildung 8 bis 10:

- Das RE20 und die beiden MK4 wurden am Endrohr des Auspuffs auf Bass- und Höhenverhalten getestet.
- Die KM 184 bildeten das mechanische Klackern der Ventile ab.
- Die Beta 98D/S übertrugen den Lüfter des Kühlers in einer Art A/B-Stereophonie.

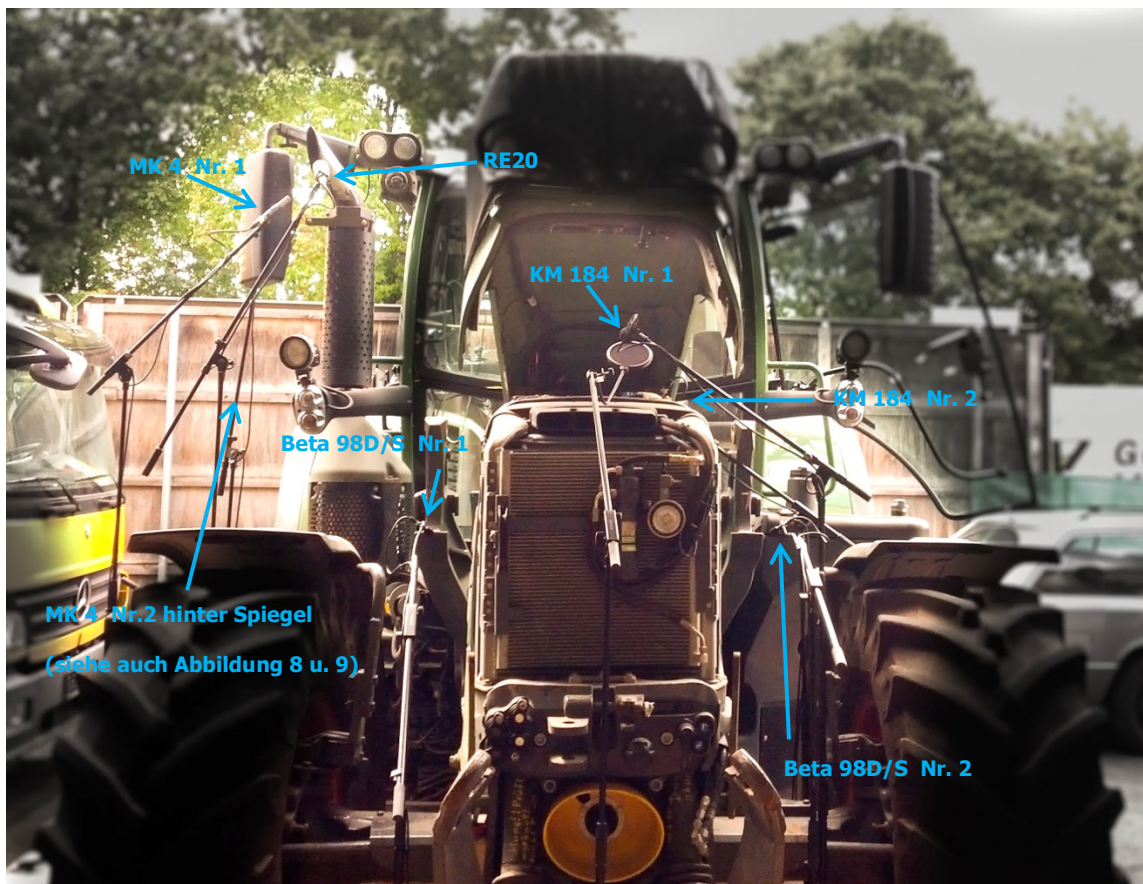


Abbildung 8: Aufnahmesituation von der Traktorfront: 1 x RE20 und 2 x MK 4 am Auspuff; 2 x Beta 98D/S am Lüfter; 2 x KM 184 am Motorblock. Windschutz an Beta 98D/S und KM 184 sowie Popschutz unter der Motorhaube wegen Lüfter

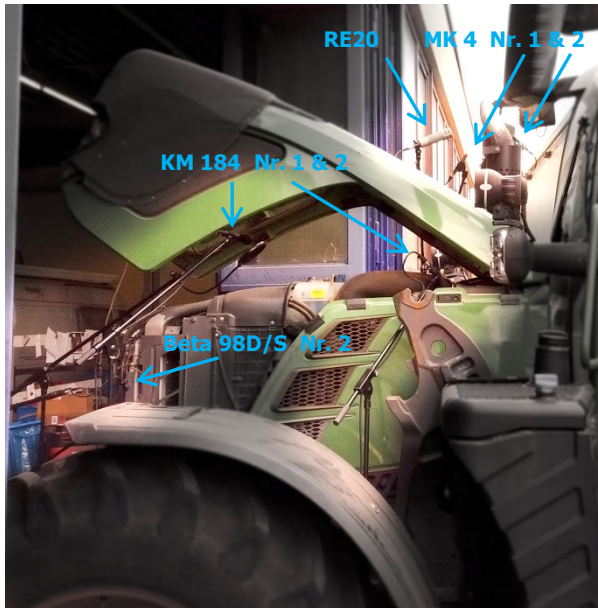


Abbildung 9: Aufnahmesituation von linker Traktorseite

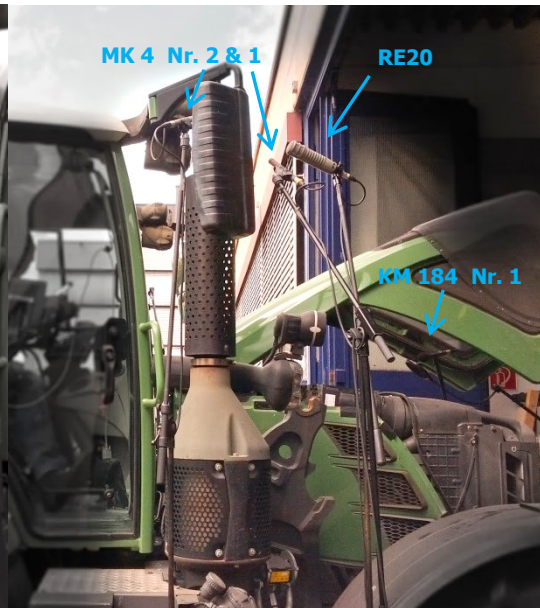


Abbildung 10: Aufnahmesituation von rechter Traktorseite

Das Einpegeln des Signals der einzelnen Mikrofone ist in Referenz zur oberen Drehzahlgrenze des Motors zu setzen, da hier der maximale dB_{SPL} -Pegel vorzufinden ist. Nach 20-minütigen Warmlaufenlassen des Traktors kann anschließend die Aufnahme beginnen.

Dazu schaltet man den Motor ab, wartet bis auch das letzte Geräusch / Knacksen des Blechs verstummt ist und startet den Aufnahmeprozess. Der Motor wird angelassen und für mehr als zehn Sekunden in der Grunddrehzahl belassen, da er sich anfangs erst einpendeln muss. Anschließend kann der Drehzahl-Sweep folgen – alle zehn Sekunden eine Änderung um zehn Umdrehungen pro Minute, welche sich im Bordcomputer des Traktors exakt einstellen lässt. Klug ist hierbei, in der Aufnahmesoftware passende Marker zu setzen, um beim späteren Schneiden des langen Audiofiles leichter voran zu kommen.

Abschließend ist noch einmal die Grunddrehzahl einzustellen, von der man erneut zehn Sekunden aufnimmt um folglich den Motor auszuschalten. Die Aufnahme muss dabei solange weiterlaufen bis auch das letzte Geräusch vom Fahrzeug verstummt ist.

Als nächster Schritt kann die Bearbeitung und der Schnitt des gewonnenen Audiomaterials folgen.

6.3.1.5. Mischung und Schnitt der Tonaufnahme

Dank hochwertigem Equipment und guter Platzierung der Mikrofone für die Aufnahme war bei der Mischung der Tonsignale wenig Equalizing nötig. Ein Delay zwischen Lüfter- / Motor-Sektion und den drei Tonspuren vom Auspuff sorgte für mehr Klarheit / Schärfe in der Klangzeichnung. Somit flossen alle aufgenommenen Audiosignale in die Tonmischung ein. Die Pegelverhältnisse wurden an der lautesten Stelle ins Verhältnis gesetzt, wobei auch die leisen Stellen auf das Klangverhältnis zu prüfen waren, sodass sich am Ende ein ausgewogener Klangeindruck über alle Mikrofonsignale auf Stereobasisbreite einstellte.

Automationen wurden keine eingebunden, da dies die natürliche Dynamik des Motorklangs verfälscht hätte. Da das Endergebnis der Mischung auf eine Stereo-Anlage am Elektro-Quad ausgelegt sein sollte, sah die Klangverteilung der Mikrofone wie in Abbildung 11 dargestellt aus.

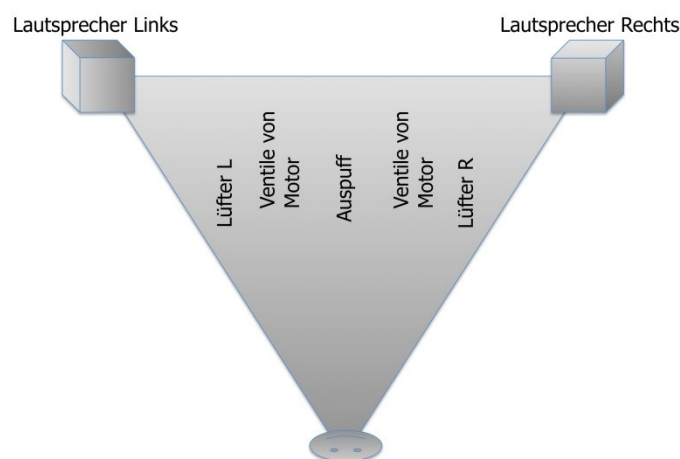


Abbildung 11: Stereobild des Traktorsounds aus Sicht des Zuhörers

Der Schnitt ist für ein solches Audio File so anzugehen, dass man mit Überschuss arbeitet. Die Devise lautet, nicht zu viel wegzuschneiden – aufgetrennt wird somit wie folgt:

- Motorstart-Sound: Den Start des Anlassvorgangs plus ein Stück der Grunddrehzahl ausschneiden.
- Motorstopp-Sound: Ein Stück Vorlauf mit Grunddrehzahl beibehalten sowie den gesamten Abschaltvorgang erfassen.
- Angesteuerte Motordrehzahlstufe: Immer den vorangestellten Be- oder Entschleunigungsvorgang des Motors, ausgehend von der vorigen Drehzahlstufe plus die gesamte neue Drehzahlstufe, in einem Stück ausschneiden.

Anschließend erfolgt das „Bouncen“ aller durch das Schneiden entstandenen Regionen zu einzelnen Audio Files. „Bouncen“ bezeichnet den Vorgang, welcher aus mehreren Quell-Tonspuren ein Summen-Audio File erzeugt und kann, wie in diesem Fall zur Erzeugung der Samples nötig, über einen bestimmten Bereich definiert werden.

Zum Verständnis: Ein Sample ist in aller Regel ein Audio-Schnipsel mit einer kleinen Wiedergabezeit und stellt kein vollständiges Musikstück dar. Die hier entstandenen Samples werden anschließend in HALion 5 eingepflegt, sodass sie als eine Einheit – als Sampler-Instrument – vorliegen.

6.3.1.6. Ein Sampler-Instrument macht Motorsound

Je nach Anzahl der Audio Files können diese, wie bereits in Unterkapitel 6.3.1.1. auf Seite 35 beschrieben, auf 128 Tasten und bis zu 128 Velocity-Stufen (Anschlagsstärke) verteilt werden. Da jedoch die Lautstärke eines Audiofiles in Abhängigkeit zur Anschlagsstärke steht, nimmt seine wiedergegebene Lautstärke mit fallendem Velocity-Wert automatisch ab. Dies bedeutet, platziert man ein Sample auf einer geringeren Velocity-Stufe als auf Wert 127 so erklingt dieses automatisch in Lautstärkepegel-reduzierter Form. Daher muss für jedes betroffene Audio File jener Pegel durch Verstärkung in der Sampler Software intern aufgeholt werden. Dies ist abschließend per Gehör zu prüfen. Da im Fall des Traktor-Sounds mehr Audio-Samples zur Verfügung stehen als Samples auf eine Velocity-Ebene passen, können nur einige der Samples auf der Velocity-Ebene 127 Platz finden. Der Großteil der Drehzahl-Samples liegt jedoch eine Ebene darunter, auf Velocity-Stufe 126 auf. Die Verteilung über die Breite, heißt über die Einzeltöne, also die Tasten des Sampler-Instruments, wurden daher auf der Velocity-Ebene 126 einmal voll ausgenutzt. Somit sind alle Tasten von 1-128 in dieser Ebene belegt, siehe Abbildung 12.

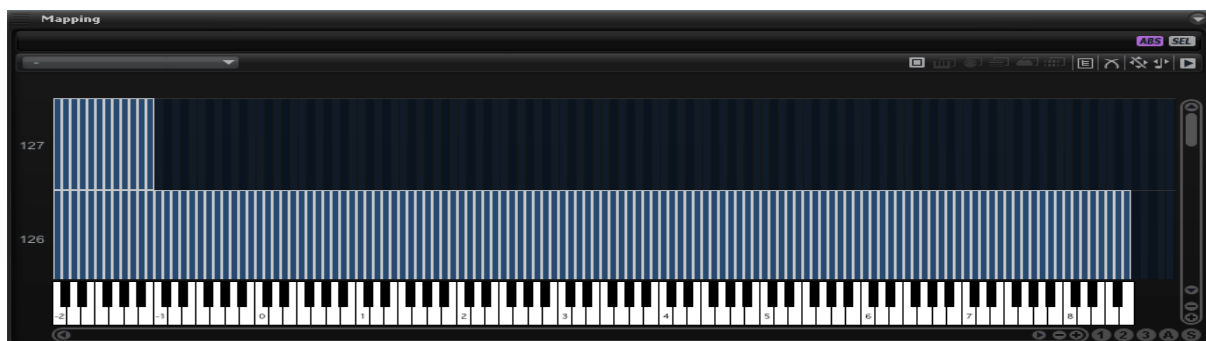


Abbildung 12: Mapping von Traktor-Samples auf Velocity-Wert 126 und 127, sowie Verteilung über alle 128 Tasten

So können alle Samples untergebracht werden. Doch wie bereits erwähnt, ist darauf eine Prüfung des Lautstärkepegels zwischen Ebene 127 und 126 nötig.

6.3.1.7. Das Loop-Verfahren (Schleifen-Wiedergabe)

Für einen kontinuierlichen Drehzahlton kommt das Loop-Verfahren in jedem Sample zum Einsatz. Bei diesem Verfahren gilt zu beachten, dass beim „Loopen“ (Schleifen-Wiedergabe) innerhalb jedes Samples und beim Übergang von Sample zu Sample sehr auf Unhörbarkeit zu achten ist. Es dürfen keine markant herausstechenden Klangereignisse innerhalb solch einer Sound-Schleife vorkommen, da anderenfalls sofort erkannt wird, dass sich das Audio File in Loop-Wiedergabe befindet. Gute Längen bei der Aufnahme von Motorsound-Samples sind, nach den hier gewonnenen Beobachtungen, zehn Sekunden und mehr. So hat man genügend Audiomaterial, um das menschliche Gehör „auszutricksen“. Aber auch wenn keine herausstechenden Klangereignisse, wie z. B. „Knackser“ oder „Windploppen“, im Audiomaterial vorhanden ist, kann dennoch ein Enttarnen des bestehenden Loops drohen. Hierfür sind wiederholende Mikro-Klangstrukturen verantwortlich. Je enger der Loopbereich daher gesteckt ist, desto deutlicher treten sie in den Vordergrund, da die Wiederholungsrate zügiger verläuft. Die genannte Größe – Looplängen $\geq$ zehn Sekunden – aus der Tontechnikvorlesung des Studiengangs Audiovisuelle Medien der Hochschule der Medien, kurz HdM, und die damit verbundene Angabe, dass das menschliche Gehör Schleifen dieser Zeiteinheit, unter genannten Voraussetzungen, nicht mehr erkennt, kann unterstrichen werden. Jedoch lässt das Audiomaterial eines Motor-Sounds auch kürzere Schleifendauern von fünf bis sieben Sekunden zu.

Bei diesem Verfahren – dem Aneinanderreihen von Samples, um Drehzahlveränderung flüssig zu generieren – kommt es im Überblendevorgang zu Flange-Effekten. Dies wird durch sehr ähnliche Frequenzen, enthalten in den Wellenformen der überlappenden Audio Files, während des Überblendeprozess verursacht. Dabei verschieben sich die beiden nicht exakt gleichen Wellenformen gegeneinander.

Man findet jedoch per Austesten für den Kurvenverlauf der Cross-Fade-Funktion eine beinahe unhörbare Lösung – einstellbar im Menü „Envelope“ von HALion 5. Im Falle aller Traktor-Samples erwies sich die Kurvenform aus Abbildung 13 als Optimum.

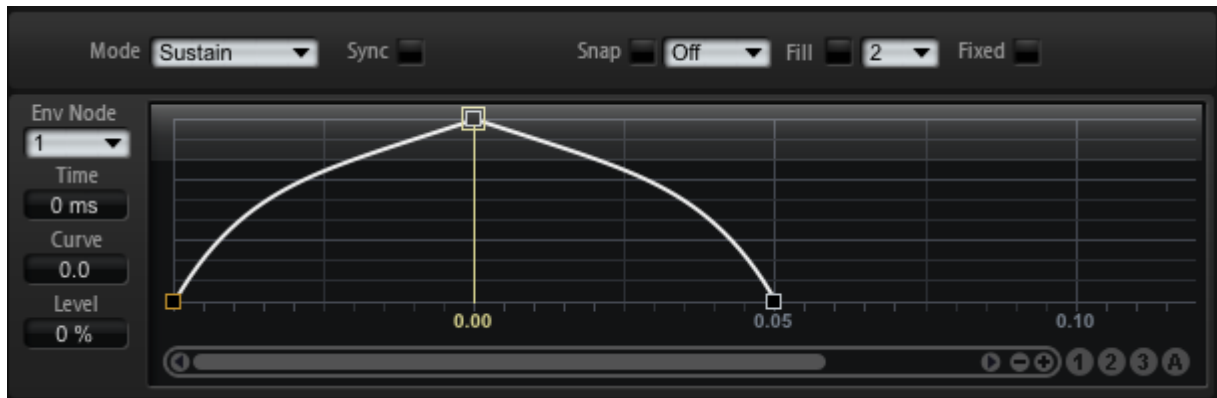


Abbildung 13: Hüllkurve des Traktorsounds in HALion 5. Die linke Hälfte zeigt die „Attack“-Kurve, Die rechte Hälfte zeigt die „Release“-Kurve.

Das hier beschriebene Verfahren setzt ein aufeinanderfolgendes „Abfeuern“ von Samples voraus, um eine bündige Klangkette zu erzeugen. Auf diesem Prinzip aufbauend können nun auch zwei oder mehr Audio Files gleichzeitig „abgefeuert“ werden. Tauscht man nun die vielen Samples, wie im Fall des Traktors, durch selbst kreierte Sounds aus, so kann ein völlig eigener Klang entstehen. Der dabei im Rahmen dieser Arbeit neue entworfene Klang erinnert an das Flugschiff „Nebuchadnezzar“ aus dem Film „Matrix“ von 1999 und ist auf Basis eines Oszillators entstanden.

6.3.2. Methode 2 – Klangmodulation per Pitch Bend

Alternativ zu dem Verfahren, den Motor-Sound per Aneinanderreihen von Sample-Stufen zu modulieren, besteht auch die Möglichkeit, die sogenannte Sampling Rate, auch als Abtastrate bekannt, eines Audio Files während der Wiedergabe zu verändern. Dadurch erzeugt man einen Pitch-Effekt, d. h. die Tonhöhe dieses Audio Files wird im Verhältnis zur ursprünglichen Abtastrate verändert. Eine beschleunigte Abtastrate führt in Relation zur originalen zu einem höheren, ein Verlangsamen zu einem tieferen Ton. Diese Veränderung der Sampling Rate wird in Echtzeit ausgeübt. Aliasfrequenzen entstehen dabei nicht. Denn durch eine Abtastratenkonvertierung wird das gepitchte Audio File auf die fest vorgegebene Taktfrequenz des Audio-Ausgangs eingepasst. Wie groß dabei die Tonhöhenverschiebung, auch Pitching genannt, sein soll, kann in Halbtonschritten von +/- 24 Halbtönen und in +/- 100 Cent in HALion 5 frei gewählt werden. Ein Halbton besteht grundsätzlich aus 100 Cent-Schritten. So ist ein noch feineres Einstellen über den Cent-Bereich innerhalb des Halbtons möglich. In jenem Fall geht die Verschiebung im Cent-Bereich also maximal um einen Halbton höher oder niedriger.

Im Rahmen dieser Thesis wird unter dieser Klangmethode immer nur ein Sample in HALion angesteuert. Eine Überlagerung von Klängen wäre jedoch auch denkbar. Die für diese Methode verwendeten Sounds sind in Eigenkreation auf Basis von eigenen Audio Files und unter Nutzung von Effekten beim Abmischen entstanden.

6.3.3. Vergleich der beiden Klangmodulationsmethoden

Das Pitching per Pitch Bend-Funktion ist deutlich einfacher und zu realisieren. Es ist nur eine Audio File und zugehöriges Pitching zur Tonhöhenveränderung nötig, um ein Beschleunigen und Entschleunigen eines Motors zu simulieren. Der Klangcharakter eines solchen Sounds wirkt jedoch durch das Pitching schnell unnatürlich, vergleicht man diesen mit dem Klang eines realen Verbrennungsmotor. So könnte sich empfehlen für dieses Verfahren Klänge zu entwickeln, welche noch nicht bekannt sind und eine Klangstruktur besitzen, die nicht direkt an einen Verbrennungsmotor erinnern.

Das deutlich realistischere Sounderlebnis kann man nach jedoch dem beschriebenen Verfahren der Klangmodulation per Sample Mapping, beschrieben in Methode 1 (siehe ab Seite 35), erzielen. Da alle wiedergegebenen Sound-Stufen vom echten Klang eines Verbrennungsmotors abstammen. Diese Methode fordert allerdings einen deutlich erhöhten Zeit- und Kosten-Aufwand.

6.4. GIGABOX-Steuerung – Die Logik hinter dem Soundprocessing

Die beiden eben beschriebenen Klangerzeugungsmethoden sollen nun von außen über die GIGABOX Gate FR Extended angesteuert werden, um Motorgeräusche in Abhängigkeit von entsprechender Fahrsituation des Quads erklingen zu lassen. Daneben sollen die unterschiedlichen Motorklänge auch frei auswählbar sein, denn Vielseitigkeit ist generell ein Plus und bietet hinsichtlich der Präsentation auf Messen eine größere Attraktion. Weiter soll sich alles einfach starten, stoppen, und zwischendurch gerne auch einmal stummschalten lassen, denn schließlich ist das Elektro-Quad ein Experimentierfahrzeug. Obendrein würde im Falle eines MIDI-„Notenhängers“, eine Notausfunktion sinnvoll sein, um so den festhängenden Ton abzustellen.

Realisierbar wird dies, indem die GIGABOX den Gesamtdatenstrom des CAN-Buses nach Steuerbefehlen, welche für das Sound Processing nötig sind, filtert. Grundsätzlich stehen

jedem Teilnehmer eines solchen Netzwerks alle Nachrichten zur Verfügung. Doch wie im Falle der hier verwendeten GIGABOX, möchte nicht jeder Teilnehmer auch alle Nachrichten umsetzen. Daher ist beim Empfang der Nachrichten eine Filterung vorgeschaltet. Zu Erinnerung (siehe auch Unterkapitel 5.3. auf Seite 20 und 21) – das Filtern der CAN-Nachrichten gelingt über die entsprechenden Identifier jeder CAN-Nachricht. Der Identifier ist eine Datensequenz zu Beginn jeder CAN-Message, und erlaubt jedem Teilnehmer spezifisch auf diese zu reagieren. So kann man die relevanten von den nicht relevanten Nachrichten trennen. Zu lösen ist dies über die Programmierung der GIGABOX Gate FR Extended. Die von ihr beachteten Informationsquellen sind daher:

- Das Daumengas des Quads,
- Der Drehzahlbereich aller vier Elektromotoren,
- Das zum Quad zugehörige Tablet PC; genauer, nur die Befehle dessen „E-Quad App“,
- Die am Quad verbauten Display Buttons,
- Der System-Ein- und -Ausschaltbefehl.

6.4.1. Funktionsauswahl durch Tablet PC und Display Buttons

Um das Sound-System in seinen Funktionen anzusteuern, dient als primäre Eingabeoberfläche ein bereits erwähntes Tablet PC. Für dieses wurde eine „E-Quad App“ von der Abteilung Mobile Solutions GIGATRONIK Stuttgart, entwickelt und darin das weitere Untermenü „Sound“ eingepflegt. Dieses Untermenü bietet nach definierten Vorgaben des hier entstandenen Sound-Systems, folgende Grafikfunktionen:

- Starten,
- Stoppen,
- Stummschalten,
- Einen Volumeregler
- Eine „Not-Aus“-Funktion für etwaige Klanghänger, um diese zurückzusetzen.
- Eine Programmwahl der verschiedenen Motor-Sounds.

Die eben genannten Funktionen wurden als solche umgesetzt (siehe Abbildung 14) und waren nun mit dem Sound-System zu vereinen.

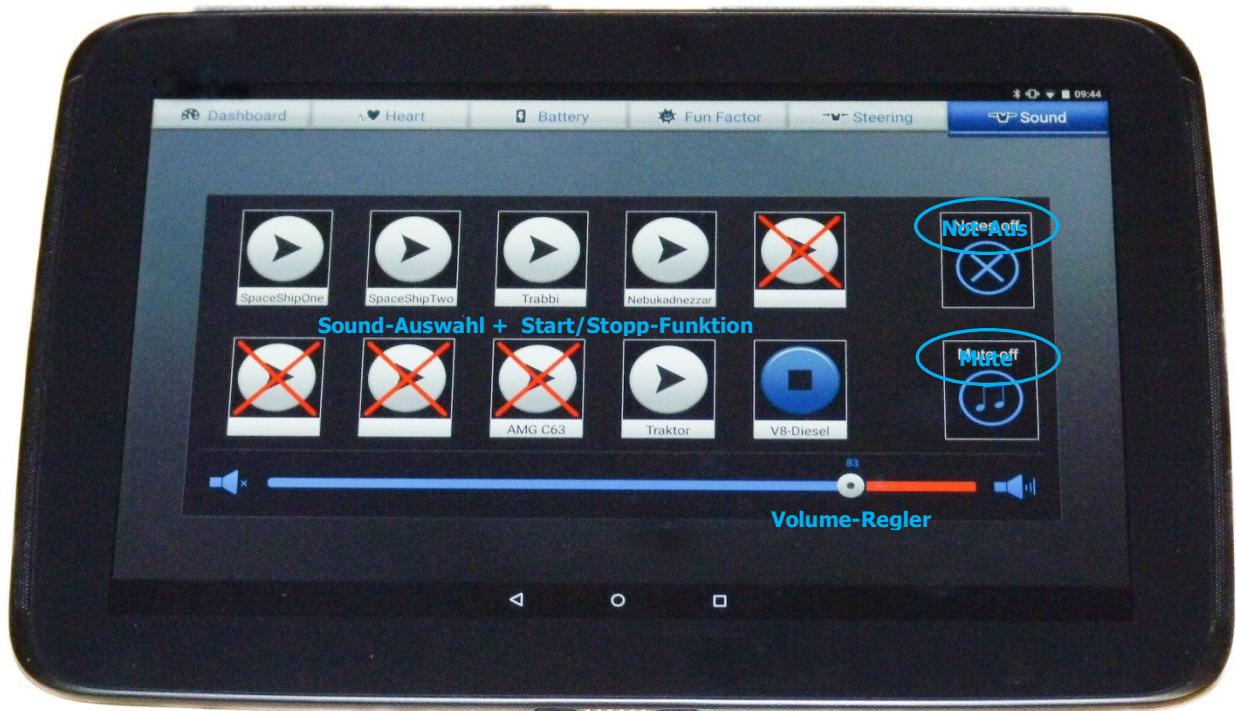


Abbildung 14: Tablet PC – „E-Quad App“

Um den Datentransfer zu ermöglichen baut das Tablet PC mit dem Quad eine Verbindung per Bluetooth auf. Dazu ist im Quad eine weitere Bluetooth-fähige GIGABOX verbaut, über welche wiederum Nachrichten in das CAN-Bussystem des Quads eingespeist und von hier auch empfangen werden.

Für den Fall, dass diese Verbindung jedoch abbricht, sollte der Sound in seinen Grundfunktionen direkt am Quad steuerbar sein. Dafür eignen sich drei linker Seite am Tacho zu findende Knöpfe, die sogenannten „Display Buttons“, siehe Abbildung 15.



Abbildung 15: „Display-Buttons“ am Tacho des Quads

Hält man diese lange gedrückt, gibt ein jeder dieser Knöpfe definierte Befehle über das CA-Netzwerk ab. Sie werden wie nachfolgend beschrieben von der für den Sound zu steuernden GIGABOX ausgewertet.

Button-Funktionen:

Button 1 – Start/Stop des Motor-Sounds

Button 2 – Sound-Wahl in einer Endlosschleife

Button 3 – Stummschalt-Funktion, falls man beispielsweise kurz mit jemanden sprechen möchte, im Hintergrund der Sound jedoch weitelaufen soll (für Messezwecke).

Jedes lange Betätigen eines solchen Knopfes setzt den aktuellen Aktionszustand der GIGABOX um einen Schritt weiter. So muss beispielsweise für das Starten des Sounds einmal lang gedrückt werden. Gleiches gilt um das Abschalten des Spunds auszulösen.

6.4.2. Vertiefung – MIDI-Datenprotokoll

Um nun das interne Signal Processing der GIGABOX veranschaulichen zu können, muss zuvor noch einmal das MIDI-Datenprotokoll genauer betrachtet werden. Bisher wurde geklärt, dass eine MIDI-Nachricht aus bis zu drei Byte-Worten bestehen kann, um eine Aktion in HALion auszulösen. Diese drei Bytes definieren sich in ein Status-Byte und bis zu zwei Daten-Bytes. Der Informationsgehalt jedes Bytes ist auf die ersten sieben Bit beschränkt, da das achte Bit, das „Most Significant Bit“ (MSB), als Erkennungsbit dient. Ist der Wert „1“ in diesem Bit gesetzt, so wird das Byte als Status-Byte erkannt. Im anderen Fall erfolgt die Erkennung als Daten-Byte.

Das Status-Byte selbst ist in seiner Bedeutung noch einmal hälftig geteilt. Jene Hälfte mit dem Least Significant Bit (LSB), dem Bit mit der niedrigsten Wertigkeit (0 oder 1), ist für die Kanalanwahl zuständig. So können mit den ersten vier Bit dieses Bytes 16 Kanäle angesteuert werden, von Wert null bis Wert 15. Die zweite Hälfte des Status-Bytes, welche korrekter Weise jedoch ohne das MSB zu betrachten ist, dient der Bestimmung, welche Art von Nachricht gerade versendet werden soll, z. B. ein „Note-On“-Befehl, genannt „Channel-Voice-Kennung“. [\[70\]](#) [\[71\]](#)

Auf dieser Basis kann die Funktionsausführung der GIGABOX nun weiter beschrieben werden.

6.4.3. Start-Funktion

Um einen Sound zu starten oder zu stoppen hat man dank der beiden Eingabeoberflächen die Wahl zwischen der E-Quad App mit Sound-Menü und dem ersten Display Button. Sendet eine der beiden Eingabeoberflächen den Befehl zum Anschalten, so übermittelt die GIGABOX per UART den „Note-On“-Befehl, welchen HALion mit zugehörigem Audio Sample verknüpft. Dieser Sound wird nun so lange wiedergegeben bis ein „Note-Off“-Befehl folgt.

Der „Note-On“-Befehl ist wie folgt definiert:

- Statusbyte – Channel-Voice-Kennung + Kanal,
- Datenbyte 1 – welche Note wurde angewählt,
- Datenbyte 2 – welche Anschlagsstärke ist hinterlegt.

Diese Datenstruktur Struktur gilt ebenfalls für den „Note-Off“-Befehl.

In Abhängigkeit von der Programmwahl wird nach Auslösen des Start-Sounds automatisch entweder eine Pitch Bend-Kurve gefahren, um das Anlassen jenes Sound zu simulieren, oder der Anlass-Sound wird automatisch von der Grunddrehzahl abgelöst, die als Audio Sample hinterlegt ist.

6.4.4. Steuersignale der verschiedenen Modi zur Klangerzeugung

Je nach dem in welchem Fahrmodus sich das Quad gerade befindet, beispielsweise „Park“, „Neutral“, „Reverse“ oder „Drive“, wird von der GIGABOX entweder das Daumengas oder die Drehzahl der Motoren zum Verändern des Sounds berücksichtigt. Beim Parken ist es das Daumengas, im Fahren die Motorendrehzahl. Dabei liefern die Motoren eine Nachrichtauflösung von 16 Bit und das Daumengas eine Auflösung von 8 Bit. Diese Vorgabe muss mit der jeweiligen Sound-Erzeugungsart und den hinterlegten Samples einzeln abgestimmt sein, da sich hier bisher keine hundertprozentige Vereinheitlichung wegen individuellen Sounds finden lässt.

Auf das Allgemeine heruntergebrochen, lassen sich jedoch die beiden Sound-Erzeugungsmodi „Tonmodulation per Pitch Bend und per Sample-Stufen“ ableiten und demnach eine Bit-Wandlung entwickeln.

6.4.4.1. Klangerzeugung im Pitch Bend-Mode

Das Pitching wird über den von MIDI definierten Pitch Bend-Befehl realisiert. Der Wertebereich dieses Befehls geht über die normale Auflösung von 128 Werten einer MIDI-Note hinaus. Es stehen 16.384 Werte im Pitch Bend-Befehl zur Verfügung. Dies kann nur durch ein Zusammenfassen beider Daten-Bytes realisiert werden. Die beiden Daten-Bytes dieses Befehls sind im Pitch Bend-Befehl daher als eine Einheit zu betrachten, auch wenn die Übertragung nach wie vor durch zwei einzelne Datenbytes plus vorangestelltes Statusbyte definiert ist. So ergibt sich bei der Verarbeitung des Befehls keine 7 Bit-, sondern eine 14 Bit-Wertigkeit. Hiermit sind deutlich feinere Abstufungen im Klang erzielbar und stellen sich dem Gehör als flüssige Veränderung dar. In manchem Fall kann es sein, dass ein Sampler diese Datengenauigkeit nicht zu verarbeiten vermag, da er dafür nicht ausgelegt ist. Dann wird das „Least Significant Byte“, also das erste übertragene Datenbyte nach dem Statusbyte, ignoriert. Einen tieferen Einblick zu eben Besprochenem und damit zu MIDI allgemein kann man unter diesen Quellen [\[82\]](#) [\[83\]](#) sowie auch unter [\[70\]](#) [\[71\]](#) bekommen.

Im Falle des Parkmodus des Elektro-Quads werden die 8 Bit-Nachrichten des Daumengases auf das „Most Significant Byte“ der Pitching-Nachricht heruntergebrochen, und im Falle des fahrenden Zustands findet eine Umwandlung von 16 Bit (Drehzahl der Motoren) auf 14 Bit (Pitch Bend-Befehl) statt.

6.4.4.2. Klangerzeugung im Sample Mode

Wie bereits bekannt, werden die Samples im zugehörigen Programmmodus von der GIGABOX nacheinander angespielt, um eine kontinuierliche Veränderung der Motordrehzahl zu suggerieren. In Abhängigkeit von der 16 Bit- oder 8 Bit-Auflösung (je nach Fahrmodus) muss diese Auflösung schlussendlich auf die hinterlegte Anzahl an Samples heruntergebrochen werden. Damit verteilt sich der Wertebereich beider Fahrmodi gleichmäßig über den gesamten Sample-Bereich eines jeden Sound-Programms, welches per Sample-Wiedergabe „seine Drehzahl“ verändert.

6.4.5. Stopp-Funktion

Im Falle eines Sounds, der per Pitch Bend-Befehl angesteuert ist, um in Abhängigkeit von der Fahrsituation dynamisch zu reagieren, wird per „Note-Off“-Befehl ein Ausklang geschaffen. Ist hingegen ein Sound-Programm angewählt, das auf Basis von einer Vielzahl

an Samples die Drehzahlveränderungen darstellt, folgt der Abschaltvorgang jenes aufgenommenen Motors per Erklingen dieses Samples.

Für beide Programmarten stellt die GIGABOX abschließend sicher, dass der Sound auch wirklich im entsprechenden Sound-Programm abgeschaltet ist. Sie sendet dazu den sogenannten „All Notes Off“-Befehl, ein speziell für MIDI entwickelter Befehl, der alle Noten abschaltet, welche möglicherweise noch nicht abgestellt wurden.

6.4.6. Not-Aus

In der Not-Aus-Funktion kann der „All Notes Off“-Befehl gezielt manuell ausgelöst werden, um alle gerade angespielten MIDI-Noten in einem MIDI-Kanal abzuschalten. Er ist immer nur für einen der MIDI-Kanäle gültig.

Diese Funktion ist, wie eben schon genannt, auch in die Stopp-Sequenz der Sound-Steuerung eingearbeitet, sodass auch ohne Betätigen des „Not-Aus“-Buttons in der „E-Quad App“ ein Notenhänger über den Display Button 1 korrigiert werden kann.

6.4.7. Stummschaltung – „Mute“

Die Stummschaltung ist in das Sound-System eingebettet, um die Vorführung an einem etwaigen Messestand zwischendurch unterbrechen zu können, ohne jedoch den Sound-Wiedergabevorgang vollständig abzuschalten. Springt man, während ein Sound gestartet, jedoch per Mute-Knopf stumm geschaltet ist, zu einem anderen Sound-Programm, wird für dieses automatisch der Zustand des Mute-Knopfes beachtet und ebenfalls stummgeschaltet. Deaktiviert man die Mute-Funktion, so kann der Sound erneut erklingen. Die Logik der GIGABOX setzt damit jedes angewählte Sound-Programm auf den hier definierten Zustand. Der dazu verwendete MIDI-Befehl ist jener des „Damper Pedal on / off“, zu Deutsch „Dämpfer Pedal an / aus“ [83]. Dieser Befehl kennt nur zwei Zustände. Damit ist er perfekt für die Mute-Funktion geeignet und kommt daher zur Anwendung. Allerdings muss er anfangs einmal der Mute-Funktion in HALion 5 über die Möglichkeit des Zuweisens von MIDI-Steuerbefehlen beigebracht werden und ist anschließend per Default-Einstellung dauerhaft zu verankern.

6.4.8. Lautstärkeregelung

Für das Volume gibt es generell einen festen MIDI-Befehl. Doch dieser zeigte in HALion keine Wirkung. Da jedoch das Modulationsrad bei der hier kombinierten Audioanwendung ungenutzt bleibt, können die zugehörigen MIDI-Steuerdaten der Modulation für das Volume verwendet werden. Nach dem Zuweisen dieser Daten an den entsprechenden Volume-Fader kann diesen die GIGABOX ebenfalls kontrollieren. Da jedes Sound-Programm seinen eigenen Kanalzug besitzt, bedarf es einer Einzelzuweisung in jedem Kanalzug. Dies gilt übrigens auch für die Mute-Funktion. Wie bei der Mute-Funktion ist auch hier ein anschließendes Verankern in den Standard-Einstellungen nötig.

6.4.9. Sound-Wechsel

Um einen Sound wechseln zu können, muss die GIGABOX zunächst überprüfen, ob aktuell ein Sound wiedergegeben wird und welches Sound-Programm aktuell genutzt ist. In Abhängigkeit davon schaltet die GIGABOX entweder den alten Sound ab und startet den neu gewählten oder sie führt diesen Vorgang im Hintergrund aus, ohne jedoch den neuen Sound zu starten.

6.4.9.1. Auswahl per Tablet PC

Im Falle der E-Quad App ist die Programmwahl mit der Start- / Stopp-Funktion kombiniert. Wählt man hier ein Programm aus, startet der Sound automatisch. Um den Sound erneut zu stoppen, muss lediglich auf selbiges Sound-Wahlfeld gedrückt werden. Das Wahlfeld wechselt dabei sein Wiedergabe-Symbol vom bekannten „Play“-Pfeil zu einem „Stopp“-Quadrat (siehe Abbildung 14 auf Seite 49). Wechselt man an der Sound-Menü der App während der Wiedergabe das Programm durch einfaches Antippen eines anderen Sound-Programms, springt automatisch der neue Sound an und die grafische Bedienoberfläche aktualisiert die beiden Symbole entsprechend.

6.4.9.2. Auswahl per Display Button

Bei Verwendung des Display Buttons operiert die Start- / Stopp-Funktion von der Sound-Programmwahl getrennt. Daher kann ein Sound im „Schritt für Schritt“-System durchlaufen und damit angewählt werden. Ist man am letzten Sound dieser Kette angelangt und drückt nun den Button erneut, gelangt man automatisch zum ersten Motorklang zurück. So schließt

sich der Kreis, da man nun die Schleife der Sound-Programmwahl einmal komplett durchlaufen hat.

Allgemein lässt sich daher festhalten, dass die Logik nicht etwa in den Display Buttons oder gar dem Tablet PC implementiert ist. Nein, alleine die GIGABOX leistet diese Arbeit. In ihr wird somit auch unterschieden, ob der Befehl zur Änderung des Sounds vom Tablet PC oder vom Display Button stammt.

6.5. Energiemanagement

In Zusammenarbeit mit der Abteilung Komponentenentwicklung bei GIGATRONIK Stuttgart wurde das Energiemanagement folgendermaßen gelöst. Der GIGABYTE BRIX™ Pro fordert in Einzelspitzen einen gemessenen Maximalstrom von 3,6 Ampere und generell eine Versorgungsspannung von 19 Volt. Aus diesem Grund entschied sich GIGATRONIK, einen sogenannten DC / DC-Wandler, also einen Gleichspannungs-zu-Gleichspannungs-Wandler, dauerhaft direkt an einen der fünf Lithium-Ionen-Akkupacks (48 Volt) des Elektro-Quads anzuschließen. Allerdings ist diesem DC / DC-Wandler eine elektrische Schaltung vorangestellt, die dafür sorgt, dass im abgeschalteten Zustand des Quads auch der Wandler abgeschaltet ist. Ferner ist in ihr ein Verzögerungsglied verbaut, welches das vollständige Trennen vom 48 Volt Bordnetz auf rund zwei Minuten hinauszögert. Grund hierfür ist, dass das Elektro-Quad immer wieder unvermittelt abschaltet. Da dies auf einen Schlag geschieht, würde der PC hart abgeschaltet werden, und dies kann im ungünstigen Fall dessen Speichermedium beschädigen. Also muss sichergestellt sein, dass der BRIX™ Pro sauber heruntergefahren werden kann. Für diesen Vorgang wurde daher in der elektrischen Schaltung die oben genannte Nachlaufzeit festgelegt.

Der Nachlauf löst aus, sobald an der sogenannten „Klemme 15“ keine Spannung mehr anliegt. Die Klemme 15 ist in Fahrzeugen als Klemme für die Zündung bekannt und so definiert. Gleichzeitig erhält die GIGABOX ein Abschaltsignal über CAN und verzögert den Abschaltbefehl für den PC um 1,5 Minuten. Wird innerhalb dieser Zeit das Quad erneut gestartet, setzt sich der Abschaltprozess zurück und das Sound-System gibt das Starten für die Motor-Sounds erneut frei.

Im Falle, dass das Quad nicht neu gestartet wird, folgt nach Überschreiten der 1,5 Minuten das Abschalten des BRIX™ Pro. Schaltet man während dieser Abschaltphase des BRIX™ Pro das Quad wieder ein, kann der BRIX erst nach vollständigem Herunterfahren erneut von der GIGABOX geweckt werden.

Ist das System vollständig aus, so wird es beim nächsten Start des Quads wieder mit Spannung versorgt. Auf diese Spannungsversorgung reagieren alle Komponenten im Sound-System und starten automatisch. Jedoch benötigt der Sound-Rechner mit 45 Sekunden am längsten. Daher lässt die GIGABOX erst nach Ablauf dieser Zeit eine Ansteuerung von außen zu. Ist das System vollständig hochgefahren, signalisiert es mit einem entsprechenden Sound seine Bereitschaft.

6.6. Das Betriebssystem des BRIX™ Pro

Wie unter Kapitel 6.2.2 auf Seite 31 erwähnt, erhielt Apple's Mac OS X für dieses Projekt noch einmal entscheidende Relevanz. Nach erstem Installieren und Nutzen von Windows 7 in Verbindung mit HALion 5, trat auf diesem Betriebssystem ein nicht einfach zu lösendes Problem auf. Das verwendete USB-MIDI-Interface wurde nur in etwa neun von zehn Fällen beim PC-Start sauber in HALion erkannt. Anderenfalls war es mit größerem Aufwand manuell einzupflegen. Dies ist für den Betrieb auf Messen ein ernstes Problem, da vor Ort damit zu rechnen ist, dass kein Monitor, keine PC-Maus und kein eingewiesenes Personal vorhanden sein würde. So folgte nach einigen Tests die Erkenntnis, dass das Problem im Bereich zwischen Windows 7 und HALion liegt. Ein weiterer Test konnte wiederum zeigen, dass Mac OS X in Verbindung mit HALion 5 die USB-MIDI-Hardware nach jedem Start zuverlässig erkannte. Damit war klar, ein Rechner mit Mac OS X würde die Lösung sein. Doch um weitere Kosten zu sparen, war mein Vorschlag, den vorhandenen BRIX™ Pro in einen sogenannten „Hackintosh“ umzuwandeln. Ein „Hackintosh“ ist ein gewöhnlicher PC, auf dessen Basis das Mac OS X-Betriebssystem installiert ist.

Dieser Vorschlag wurde in die Tat umgesetzt und war erfolgreich. Jedoch stieg damit die Startzeit des Systems inklusive der von HALion auf insgesamt 45 Sekunden an. Unter Windows 7 betrug sie gerade einmal 27 Sekunden. Ein Preis, mit dem man in diesem Prototypenstadium auskommen und zufrieden sein kann. Für ein zukünftiges Endverbraucherprodukt wäre diese Startzeit jedoch inakzeptabel hoch.

Für die Klangwiedergabe wird, wie unter Abschnitt 6.2.1. auf Seite 30 erwähnt, der am GIGABYTE Brix vorhandene 3,5"-Miniklinke-Ausgang in Stereo verwendet. Dies erfordert wiederum eine Endstufe, die mit diesem PC auf einfachem Wege verbunden werden kann.

6.7. Endstufe AMPIRE MBM 100.2

Schnell war klar, dass eine Endstufe verbaut sein sollte, die so energieeffizient wie möglich arbeitet, für den Messestand eine möglichst laute Wiedergabe bietet, und ebenfalls jedoch eine kompakte und leichte Bauform besitzt.

Weiter musste sie mit dem Bordnetz des Quads zusammenpassen, sodass hier nicht noch ein weiterer DC / DC-Wandler nötig würde. Dies führte zu dem Schluss einer Class-D Endstufe auf Zwei-Kanal-Basis, betrieben mit einer im Fahrzeugbereich üblichen Versorgungsspannung von 12 Volt.

Class-D Endstufen der aktuellen Generation bieten Wirkungsgrade bis über 90 %, wobei die Signalverstärkung über das Schalten von Transistoren und vorangestelltem Komparator nach dem Prinzip der Puls-Weiten-Modulation fungiert. Dafür wird das Audiosignal mit einer hochfrequenten Säge- oder Dreiecks-Wellenform am Komparator verglichen, wodurch dieser entscheidet, ob dessen Ausgang an oder abgeschaltet ist. Die Zeit, wie lange dieser Ausgang den an- oder abgeschalteten Zustand annimmt definiert am Ende die Pulsweite des Signals.

Abschließend ist eine Filtereinheit gesetzt die das pulsweitenmodulierte und verstärkte Signal in Wechselspannung zurückwandelt [84].

Nach Preis-/Leistungsvergleichen fiel die Entscheidung auf das Modell „MBM 100.2“ der Firma AMPIRE. Aus all den Funktionen, welche diese Endstufe bietet (siehe Abbildung 16), sind der Input mit seinen beiden Chinch-Buchsen, das Verstärkungspotentiometer („LEVEL“) sowie der „BASS BOOST“ interessant. Die „CROSS OVER“-Einstellung bleibt unverändert auf der mittleren Position „FULL“. Abbildung 17 verdeutlicht noch einmal den Frequenzgang der Endstufe mit allen möglichen Filter-Funktionen, welche an ihr einstellbar sind. Wobei nicht angegeben wird, unter welcher Last dieser Frequenzgang ermittelt wurde. Die Filter arbeiten nach nebenstehendem Abbild mit einer Flankensteilheit von 12dB pro Oktave. Dies entspricht einem Filtertyp 2. Ordnung. Das Audiosignal bekommt die Endstufe letztlich über ein „Stereo-Miniklinke auf 2x Mono-Chinch“-Kabel geliefert. So sind für das Soundprojekt grundlegende Eckdaten der MBM 100.2 Endstufe [87]:

- 10-16 Volt Betriebsspannung
- Automatisches An- und Abschalten, gesteuert durch die Versorgungsspannung
- 2x Mono Chinch-Eingang für Audiosignale
- 2x 70 Watt Ausgangsleistung bei einer Impedanz von 4 Ohm
- Potentiometer für die Verstärkung von 0,2 – 6 Volt

MBM100.2



Abbildung 16: AMPIRE MBM 100.2 Endstufe [85]

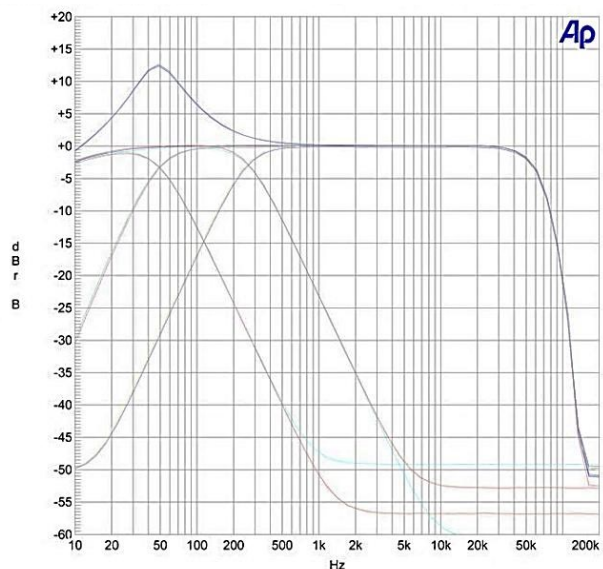


Abbildung 17: Frequenzgang AMPIRE MBM 100.2 Endstufe [86]

Damit ist klar, dass die Prototypenbasis durchgehend keine symmetrische Audio-Signalführung haben wird, denn auch der Signalweg von Verstärker zu Lautsprecherbox ist unsymmetrisch gewählt. Betrachtet man jedoch den Fahrzeugbereich, dann sind unsymmetrische Signalwege für analoge Audioübertragung eine gängige Lösung, jedoch sicher nicht die Beste. Erst ein Langzeittest wird zeigen können, wie sich das Sound-System gegenüber der elektromagnetischen Verträglichkeit verhält. Jener kann im Rahmen dieser Bachelorarbeit jedoch nicht erbracht werden. Zum schlussendlichen Erzeugen der Schallwellen fehlt nun noch die Lautsprecherbox.

6.8. Aufbau der Lautsprecherbox

Die Lautsprecherbox lässt sich in zwei Bereiche einteilen. In Gehäuse und Tontreiber.

Für die Dimensionierung beider Komponenten war das Platzangebot im Quad zu prüfen. Dabei lag es nahe, den Sound gezielt nach vorn abzugeben, da dies in den meisten Fällen die bestimmende Fahrtrichtung sein würde um Verkehrsteilnehmer zu warnen. Somit ist der höhenreiche Frequenzanteil generell nach vorn gerichtet, und damit hinter dem Quad deutlich abgeschwächt zu erwarten. Andere Frequenzen würden sich jedoch wegen der generellen Abhängigkeit von Wellenlänge zu Gegenstandsgröße, um das Quad und das Gehäuse

der Lautsprecherbox beugen. Daher kann mit

genügend Restschall, aus mitten- und tieffrequenten Schallanteilen, auch noch hinter dem Quad gerechnet werden. Aus Aspekten der Sicherheit und dem zusätzlichen Schutz durch die Fahrzeugkonstruktion sowie mangels Platz am Quad, bot sich daher als beste Option der ehemalige Stauraum des Kühlers unter der Verkleidung in der Fahrzeugschnauze an.

Für diesen Stauraum musste nun die optimale Dimensionierung von Tontreibern und Lautsprechergehäuse gefunden werden (siehe Abbildung 18 oder 22 auf Seite 65).



Abbildung 18: Volumenvermessung des Stauraums in der Schnauze des Quads. Ehemaliger Platz des Kühlers.

6.8.1. Tontreiber

Bei der Wahl der Tontreiber besteht die Anforderung der Spritzwasserresistenz. Aus diesem Grund sucht man am sinnvollsten im Marine-Bereich, dem Boot- und Schiffsbau, nach einer für das Quad passenden Lösung. Sie soll das Maximum an Schalldruckpegel und einen akzeptablen Klang ermöglichen. Dabei ist der Kostenfaktor als Gegengewicht zu beachten.

Die einzig sinnvolle Lösung bot eine Treiber-Variante, die in ihrem Datenblatt leider keine Auskünfte über Frequenzgang und dB_{SPL} -Level gibt. Dies sind die Treiber der Firma MB Quart mit Modellbezeichnung „NKA 116“, einem Koaxial-System. Aus anderer Quelle konnte jedoch ermittelt werden, dass dieser Tontreiber-Typ folgende Parameter erfüllen soll [88]:

- 25 mm (1") titanbeschichteter Hochtöner
- 165 mm (6,5") Polypropylen Tieftöner
- Übertragungsfrequenz von 40-32000 Hz
- Übergangsfrequenz 4500 Hz (Flankensteilheit: 12 dB/Oktave)
- 140 Watt Spitzenleistung
- 70 Watt (RMS)
- Impedanz 4 Ohm
- Empfindlichkeit 90 dB (2,5 W/1m)

Nach der oben angegebenen Empfindlichkeit lässt sich erkennen, dass diese Treiber eine erhöhte Leistung fordern um in einem Meter Abstand den gemessenen Schalldruckpegel von 90 dB zu erzeugen. Üblicherweise wird ein solcher Kennschalldruck mit „XX“ dB (**1W**/1m) und nicht mit (**2,5 W**/1m) angegeben. Dies bedeutet mit der Angabe (1W/1m) würden die NKA 116 ~86 dB abgeben, was eine geringere Empfindlichkeit der Treiber impliziert (Berechnung wie folgt: $10 \log(2,5\text{W}/1\text{W}) = 3,979 \text{ dB} = \sim 4 \text{ dB} \rightarrow 90 \text{ dB} - 4 \text{ dB} = 86 \text{ dB}$). So lässt sich mit diesem Endstufen-Lautsprecherpaket ein maximaler Schalldruckpegel von $\sim 104,5 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ in 1 Meter Abstand rechnerisch erzeugen ($10\log(70\text{W}) + 86\text{dB} = 104,5\text{dB}$). Am aufgenommenen Traktor war zum Vergleich am Auspuff in ca. 25-30 cm Abstand ein gemessener Maximal-Schalldruckpegel von $103 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ zu verzeichnen. Da die Abstandsverdopplung zu einer Schallquelle nach dem $1/r$ -Gesetz ca. -6 dB pro Entfernungsverdopplung bedeutet, wäre im Umkehrschluss für das NKA-116-Lautsprecher-System in etwa 25 cm Abstand ein voraussichtlicher SPL-Pegel von 116,5 dB bei Volllaussteuerung zu erwarten (Berechnung nur für einen 2-Wege-Koaxial-Tontreiber). Demnach müsste und könnte auf Wunsch das Sound-System bei Volllaussteuerung sogar

noch lauter als der Traktor sein.

Für ein von der EU erlaubtes AVAS würde hier jedoch die Geräuschpegelgrenze, gemessen in dB(A) von Abbildung 2 aus Kapitel 4 auf Seite 10, einzuhalten sein.

Wegen der dortigen Messangabe in dB(A) kann jedoch kein reeller Vergleich zu den hier ermittelten 104,5dB_{SPL} gezogen werden. dB(A) gibt einen bewerteten Messpegel aus, der annähernd dem menschlichen Hörempfinden (siehe dazu auch „Kurven gleicher Lautstärke“) nachgebildet ist und als Filterkurve auf gemessene Werte einwirkt. Mit dieser Filterkurve ergeben sich automatisch frequenzabhängig geringere Messwerte. Es lässt sich jedoch vermuten, dass das hier verbaute Sound-System für diese Vorgaben der EU deutlich überdimensioniert ist.

Für Messepräsentationen ist diese Überdimensionierung jedoch genau richtig, um jene Besucher vor Ort zu beeindrucken.

6.8.2. Lautsprechergehäuse

Das Lautsprechergehäuse bedarf einer Maßanfertigung, um die beste Lösung gegenüber klanglichen Anforderungen, dem Platzverhältnis und der Montagesituation am Elektro-Quad zu bieten.

6.8.2.1. Konstruktion

Vor der Konstruktion war bereits entschieden, dass das Gehäuse eine geschlossene Bauform haben musste, um die Tontreiber und deren Elektronik gegen Spritzwasser zu schützen. Nach Ausmessen des Stauraums in der Schnauze des Quads, konnte eine Bauform für die optimale Ausnutzung des verfügbaren Volumens gefunden werden. Die Abbildung 19 und 20 zeigt CAD-Darstellungen des Gehäuses mit montierten Tontreibern aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

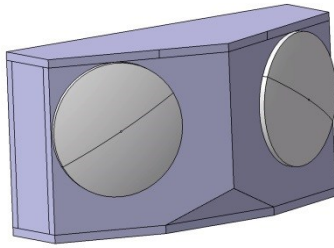


Abbildung 19: Isometrische CAD-Darstellung der Gehäusefront

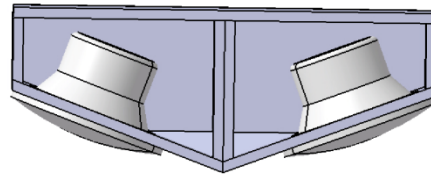


Abbildung 20: CAD-Darstellung der Gehäusedraufsicht

Wie man auf den beiden vorangestellten Abbildungen erkennen kann, soll die Front des Gehäuses keilförmig gestaltet sein. Dies ist folgenden Faktoren zuzuschreiben:

1. Eine maximale Ausnutzung des gegebenen (Luft-) Volumens soll erzielt werden.
2. Ein vergrößerter Öffnungswinkel bezüglich der Klangwiedergabe soll geboten sein, um vor dem Quad eine größere Fläche mit höheren Frequenzen abzudecken.
3. Eine erhöhte Flexibilität bezüglich der Platzierung der Treiber; Grund hierfür ist, dass die Höchtöner der Treiber weitestgehend freie Sicht nach vorne haben müssen, da es bei drohender Verdeckung, durch massive Kunststoffteile an der Front anderenfalls zur Bedämpfung und Verfärbung hoher Frequenzanteile kommt. Dies sollte so weit als möglich vermieden werden. Es gilt hier, das gesetzmäßige Verhalten von Wellenlänge zur Größe des in Ausbreitungsrichtung befindlichen Objekts zu beachten. In diesem Fall also die Kunststoffverkleidung der Quadschnauze.
4. Eine asymmetrische Gehäuseform verringert zudem unerwünschte stehende Wellen innerhalb des Gehäuses.

Bezüglich der Materialwahl war wegen der günstigen Bearbeitungsmöglichkeiten die Wahl von Holz sinnvoll. Auch ist im Lausprecherbau darauf zu achten, dass Maßnahmen gegen Durchtrittschall von Innen- zur Außenseite des Gehäuses vorgenommen sind. Zudem muss das Mitschwingen des Gehäuses weitestgehend unterdrückt werden, da sich sonst ungewollte Resonanzen ausbilden. Im negativen Fall führen die beiden genannten Punkte zu einer Beeinträchtigung, bzw. Verfärbung des am Tontreiber erzeugten Klangs. Daher ist die Materialstärke so dick wie möglich zu wählen. Jedoch verliert man so, im Fall des hier konstruierten Gehäuses, durch dickere Wände an eingeschlossenem Luftvolumen, was die klangliche Ausbildung des Basses verschlechtert. Denn das Gehäuse selbst müsste idealerweise größer werden, um ein gleiches Luftvolumen fassen zu können. Das ist wegen begrenztem Platzangebots im Quad nicht möglich. So wurden die Einzelteile mit einer

Materialstärke von 15 mm durch einen Schreiner angefertigt, wobei das verwendete Holz aus Rotbuche-Multiplex (extrem verwindungssteif) bestand. Leider ließ sich im Vorfeld, mangels Angaben von Seiten des Treiber-Herstellers, kein Wert für das Äquivalentvolumen „ V_{AS} “ des Tontreibers (z. B. angegeben mit 81 Litern) finden, welches als Basis für die Ermittlung der Einbauresonanzfrequenz „ f_c “ und der Einbaugüte „ Q_{TC} “ des Lautsprechersystems als Grundlage dient. Dennoch konnte dank der Tontechnik 3-Vorlesung im Studiengang Audiovisuelle Medien der HdM folgendes geschlussfolgert werden:

- Nach der Formel $f = \frac{(n * c)}{(2 * d)}$ lassen sich die Teilresonanzen des Gehäuses als Moden (n) für parallel zueinander verlaufende Wände bestimmen, welche über rechte Winkel miteinander verbunden sind (f=Frequenz in 1/s; n=Mode 1, 2, 3...; c=Schallgeschwindigkeit in m/s; d=Abstand zwischen den Wänden in Meter). So finden sich die ersten drei Moden jeweils für die Höhe und Breite des Gehäuses. Eine Berechnung von Resonanzfrequenz für die Tiefe des Gehäuses ist mit der hier genannten Formel nicht ermittelbar, da die Wände nicht parallel zueinander liegen.

$f = \frac{(n * c)}{(2 * d)}$	Höhe = 0,19 m	Breite = 0,18 m
Mode 1	903 Hz	953 Hz
Mode 2	1805 Hz	1906 Hz
Mode 3	2708 Hz	2858 Hz

Diese Berechnungen zeigen, dass sich in den oberen Mitten und unteren Höhen beider Gehäusehälften jene genannten Resonanzen ausprägen sollten.

- Das umschlossene Luftvolumen pro Gehäuseseite, würde ohne Abzüge von verbautem Dämmmaterial (Material: Damping 10 (selbstklebend)) und den verbauten Treibern etwa 3 Liter betragen. Da die Tontreiber wegen ihrer Bauform und das zusätzliche Dämmmaterial jedoch einiges an Luftvolumen verdrängen würden, sollte pro Gehäuseseite ein um wenigsten 20 % geringeres Volumen bedacht sein. So kommt man auf ca. 2,6 Liter eingeschlossenes Luftvolumen. Das zusätzliche Dämmmaterial ist nötig um Durchtrittschall und Gehäuseresonanzen zu bedämpfen.
- Für das Einbauvolumen (umschlossenes Luftvolumen) wird vom Hersteller für optimalen Klang jedoch ein Volumen von 3,5 - 8 Liter angegeben [89]. Doch wegen

besagtem Platzmangel im Quad, kann dieses Volumen schlichtweg nicht erzielt werden, da beide Treiber in der Front einzubauen sind – ein Nachteil mit dem gelebt werden muss. Daher ist mit einem großen Wert in Sachen Einbaugüte „ Q_{TC} “ wegen kleinem Luftvolumen, zu rechnen, und bedeutet, dass die tiefen Frequenzen magerer ausfallen sollten und eine deutliche Überhöhung im oberen Bass- oder Mittenbereich zu erwarten ist.

Vorgriff:

Betrachtet man Abbildung 27 (siehe Seite 67) wird tatsächlich deutlich erkennbar, dass sich Überhöhungen sowohl im oberen Bass (Bass: 20 - 250Hz) als auch im mittleren Teil des Mittenfrequenzband (Mitten: 250 - 1000Hz) ausprägen. Eine genaue Aussage darüber, welche dieser beiden Überhöhungen dem geringen Luftvolumen des Gehäuses zuzuschreiben ist, kann jedoch mangels nötiger Eckdaten nicht eindeutig getroffen werden.

Doch bevor ein genauerer Blick auf die Erstellung und Analyse des Frequenzgangs des Sound-Systems folgt, soll zuvor das hier beschriebene Unterkapitel 6.8.2. des Lautsprechergehäuses, mit nun folgendem Abschnitt der Fertigung, abgeschlossen werden.

6.8.2.2. Fertigung

Nach Erhalt der Einzelteile von der Schreinerei der Firma HSB Bauteile GmbH folgte der Gehäusezusammenbau. Detaillierter Bauplan und Bilder über den Zusammenbau sind im Anhang zu finden. Zur Veranschaulichung der hier beschriebenen Schritte mögen dennoch einige wenige Bilder folgen.

Die einzelnen Teile des Gehäuses wurden mit 3,5 x 35 mm Schrauben verschraubt (siehe Abbildung 21). Anschließend folgte eine Passprobe in der Schnauze des Elektro-Quads (siehe Abbildung 22).



Abbildung 21: Verschrauben des Lautsprechergehäuses

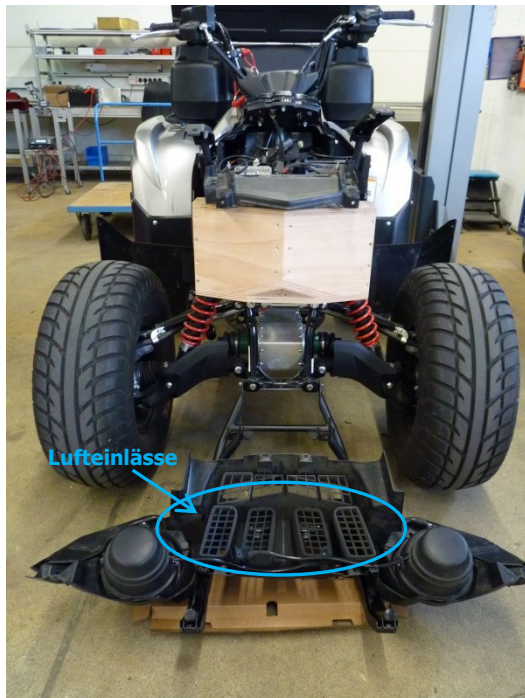


Abbildung 22: Passprobe Lautsprechergehäuse am Elektro-Quad

Im selben Zug wurde die Kontur der Lufteinlässe an der Front (siehe Abbildung 22) per Stift auf das dahinter platzierte Lautsprechergehäuse übertragen. Der Grund hierfür ist, wie bereits beschrieben, dass die Hochtöner von Kunststoffteilen nicht verdeckt werden sollen (siehe Abbildung 23).

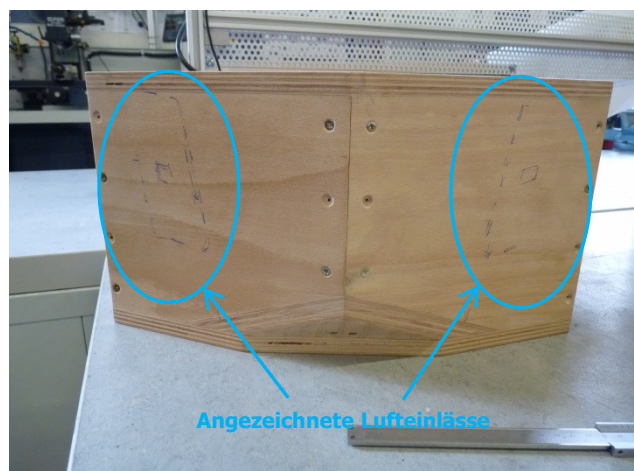


Abbildung 23: Lautsprechergehäuse mit angezeichneten Lufteinlässen

Es folgte das Aussägen der Öffnungen für den Einsatz der Tontreiber, das Einsetzen des Dämmmaterials, das Ausstechen und Verleimen der Kabeldurchführungen. Darauf das Versiegeln von entstandenen Löchern mit Polyester-spachtelmasse sowie das Lackieren des Gehäuses in drei Anstrichvorgängen mit schwarzer Lackfarbe, um letztlich auch das Holz vor Witterung zu schützen. Abschließend wurde die Verlotung der internen Elektronik, der Steckeranschluss sowie die Montage an das Quad von einem GIGATRONIK-Mitarbeiter vorgenommen. Es gelang, die Tontreiber so in das Gehäuse zu platzieren, dass die Hochtöner letztlich zu mehr als zwei Dritteln von Kunststoffteilen unverdeckt bleiben (siehe Abbildung 25). Mit Reflexionen und Verfärbungen, welche durch die kanalartige Bauform der Frontschürze entstehen, kann man sich arrangieren. Da ohnehin ein Sound-Equalizing wegen der ungünstigen Voraussetzung des Lautsprechergehäuses vor Ort von Nöten war, konnten auch die durch die Kanalisierung des Klangs an der Frontschürze entstehenden Verfärbung, in unangenehmen Frequenzbereichen, gut behandelt werden. Das Klang-Equalizing ist eine Funktion, die neben anderen Effekten, in HALion 5 einzelnen in jedem Sound-Programm festlegbar ist, und dort als Standard-Einstellung umgesetzt und verankert wurde.

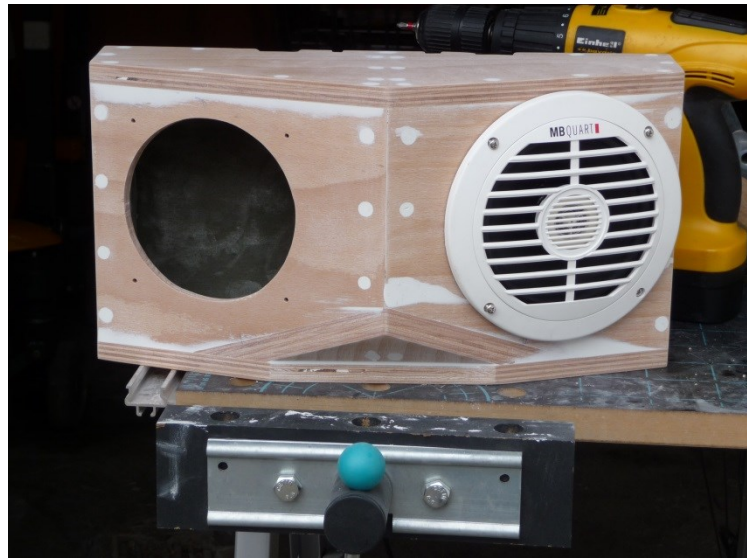


Abbildung 24: Lautsprechergehäuse mit verspachtelten Löchern & verbautem Dämmmaterial & probeweise angebrachtem NKA 116 Treiber



Abbildung 25 – Frontschürze Quad mit Blick auf Lautsprecher links

6.8.3. Frequenzgang des Sound-Systems

Zur Frequenzgangmessung des Lautsprechers wird die MBM 100.2 Endstufe wie folgt eingestellt. Das Level-Potentiometer auf 1 Uhr drehen. „BASS BOOST“ und alle Filter so einstellen, dass diese keinen Einfluss auf das Quellsignal über die Endstufe nehmen. Darauf ein „Weißes Rauschen“ auf das Sound-System ausgeben und zuvor in einem Meter Abstand auf der gemittelten 0°-Achse zu den Lautsprechermembranen ein Mikrofon mit Kugelrichtcharakteristik um z. B. den Nahbesprechungseffektes auszuschließen.

Hierfür wurde ein NT55 aus dem Hause RØDE MICROPHONES (siehe Abbildung 26) (Low-Cut: „off“) eingesetzt. Das vom Mikrofon abgegebene Audiosignal zeichnete ein H6-Audio-Recorder der Firma ZOOM Corporation auf und wurde in Logic Pro 9 der Firma Apple Inc. mit dem Analyzer des dortigen Linear Phase EQ analysiert (siehe Abbildung 27). Es soll drauf hingewiesen sein, dass der Frequenzgang leider in einer akustisch nicht optimierten Halle aufgezeichnet wurde, und diese daher anteilig das Messsignal verfälschte.



Abbildung 26: NT55 Frequenzgang

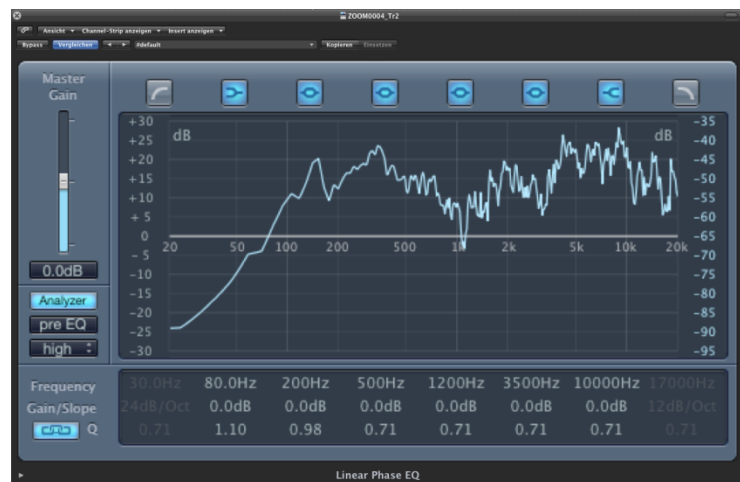


Abbildung 27: Frequenzgang des Sound-Systems

Doch wie zu erwarten war zeigt der Frequenzgang aus Abbildung 27 deutlich, dass der Bass des Lautsprechersystems schwächelnd ausgeprägt ist. Ebenso sind beispielsweise bei rund 170 Hz, 1,1 kHz oder gar bei 3,5 kHz starke Pegelbrüche von 10 dB und mehr zu verzeichnen. Jene über den Frequenzbereich doch sehr ausgeprägten Amplitudenschwankungen – besonders im Hochtonbereich – lassen vermuten, dass dies auf qualitativ mangelhafte Tontreiber, doch besonders auf Auslöschungen, verursacht durch Kanalisierungs- und Abschattungs-Effekte in der Schnauze des Quads, zurückzuführen ist.

6.9. Das akustische Warnsystem auf einen Blick (Signalfluss-Diagramm)

Abschließend an den Hauptteil dieser Bachelor-Thesis soll hier ein Gesamtüberblick über den Aufbau und Signalfluss des von mir entwickelten Sound-Systems gegeben werden. Tablet PC und Display Buttons dürfen daher nicht gelistet werden und sind folgerichtig im Signalfluss-Diagramm von Abbildung 28 auch nicht aufgeführt.

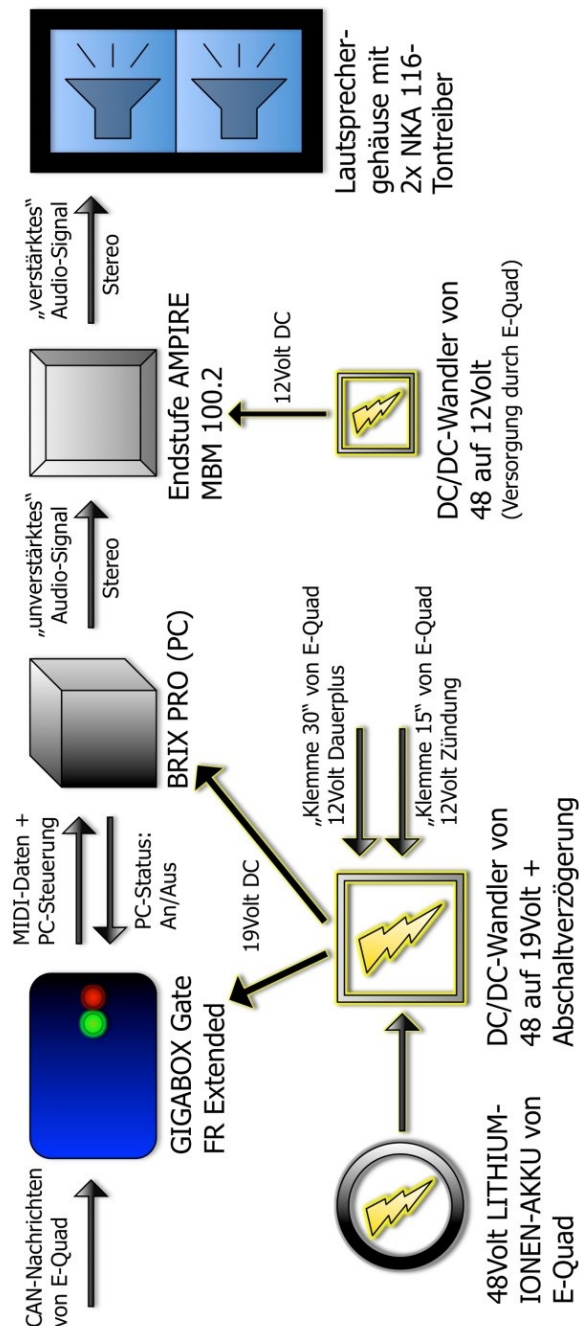


Abbildung 28: Aufbau und Signalfluss des Sound-Systems

7. Zusammenfassung

Nach heutigem Stand wird die Einführung von akustischen Warnsystemen bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen in Form des Acoustic Vehicle Alerting Systems mit Sicherheit kommen. In den USA und besonders in der EU ist dafür gesorgt. Bereits heute bieten Hersteller entsprechende Soundlösungen an oder haben entsprechende Entwicklungen vorangetrieben. Beispielsweise hat AUDI im Rahmen des „R8 E-Tron“-Projekts ein Soundmodul entwickelt [90]. BMW bietet bereits heute schon ein sogenanntes „akustisches Fußgängerwarnsystem“ zum Aufpreis in den Sonderausstattungen seiner Elektroflotte, bestehend aus i8 und i3, an [91]. Automobilzulieferer wie z. B. Delphi [92], Harman [93] [94], ECTUNES [95] [96] oder Brabus [97] [98] [99], haben Klanggeneratoren entwickelt. Aufgrund dieser Nachforschungen, konnten Sounds gehört werden, die jedoch nur teilweise überzeugend klangen und in Filmen zum Teil nachvertont waren, womit eine bessere Klangqualität suggeriert wird und damit kein Einblick in das tatsächliche Klangbild am Fahrzeug gegeben ist. Schlussfolgern lässt sich dennoch – um das Gehör generell zufriedenzustellen und um eine hohe Akzeptanz bei Fahrzeughaltern sowie Verkehrsteilnehmern zu sichern, muss der Sound Spaß machen und großartig klingen, auch wenn man es aus Geschmacksgründen nicht jeder Person recht machen kann.

An dieser Stellschraube setzt das im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelte AVA-System an. Man sollte sich den Sound auswählen können und ihn in ausgezeichneter Klangqualität zu hören bekommen. Dieses Ziel wurde umgesetzt. Das Sound-System stieß bei den Mitarbeitern der Firma GIGATRONIK auf großen Gefallen und bereitete ihnen sichtlich Freude. Damit ist bewiesen, dass solch ein Sound-System die Emotionen der Menschen positiv erreichen kann.

Aus Gesprächen mit Fahrzeughaltern von elektrischen Fahrzeugen kann weiter abgeleitet werden, dass der Wunsch nach einem akustischen Warnsystem tatsächlich besteht. Denn sie haben nach eigenen Angaben besonders mit dem Problem zu kämpfen, dass Fußgänger, wie ursprünglich gewohnt, nun nicht mehr von selbst aus dem Weg gehen. Diese würden das Fahrzeug entweder gar nicht oder erst sehr spät herannahen hören und sich teilweise sogar erschrecken, wenn plötzlich dicht hinter ihnen ein Auto fährt. Aus eigener Erfahrung lässt sich zudem berichten, dass man als Fahrer eines solchen Fahrzeugs mit erhöhter Sorgfalt darauf achten muss, von unaufmerksamen Verkehrsteilnehmern nicht in einen Unfall

verwickelt zu werden. Ein solches AVAS ist daher eine sinnvolle Maßnahme.

Durch das Zusammenspiel der verbauten Komponenten gelang es, ein akustisches Warnsystem zu schaffen, dessen Funktionen weit über das geforderte Maß der Europäischen Union hinausreicht und den Zuhörer im positiven Sinne emotional erreichen kann. Eine Besonderheit ist dabei die flexible und multifunktionale Befehlsannahme des Sound-Systems, die weit über einen simplen, von der EU geforderten Ein- / Aus-Schalter hinausgeht. So sind gleich zwei eigenständige Eingabeoberflächen beteiligt. Zum Einen die per Bluetooth mit dem Quad verbundene „E-Quad App“ eines Tablet PCs, wodurch eine umfangreiche Sound-Ansteuerung im Menü-Punkt „Sound“ ermöglicht wird, und zum Anderen die als Absicherung eingebundenen Knöpfe am Tacho des Elektro-Quads. Diese beiden Oberflächen bieten Funktionen wie Start / Stopp, Sound-Programmwahl, Stummschaltung und zusätzlich am Tablet PC die Volume-Regelung plus eine separat wählbare Notaus-Funktion. Ferner reagiert das System auf den gewählten Fahrmodus und sucht sich daran angepasst die entsprechende Datenquelle zur Berechnung der „Drehzahlhöhe“ des Sounds. Die Besonderheit hierbei ist, dass sich der Sound auch im „geparkten“ und „neutralen“ Modus per Datenabgriff des Daumengases im Ansprechverhalten realitätsnah wiedergeben lässt. In den Fahrmodi „Reverse“ und „Drive“ regelt er sich synchron über die Drehzahl der Elektromotoren des Elektro-Quads. Als besonderes Highlight für Fahrzeughersteller bietet das hier entwickelte akustische Warnsystem die Möglichkeit, jeden erdenklichen Motorklang zu erzeugen und lässt damit eine individuelle Abstimmung auf den persönlichen Geschmack des Endkunden zu. Als großer Pluspunkt kann dabei der wiedergegebene Motorklang von einem echten Motor abstammen und muss nicht künstlich nachgeahmt werden. Dies steigert nach firmeninternen Beobachtungen deutlich die Akzeptanz eines solchen System.

Als Abrundung des praktischen Teils dieser Bachelor-Thesis findet sich im Anhang unter der Bezeichnung „Video – SOUND for ELECTRIC and HYBRID vehicles“ ein Kurzfilm. Dieser dient der Veranschaulichung von Sound-Beispielen als auch Funktionen, welche in dieser Thesis im Unterkapitel 6.4. beschrieben sind.

8. Ausblick

Als nächste Entwicklungsstufe des hier vorgestellten akustischen Warnsystems bietet sich an, die Komponenten GIGABOX und Sound-Generator (PC) in ein gemeinsames und kompaktes Format zu bringen. So könnte diese Einheit als Produkt, genannt „GigaSoundBox 1.0“, angeboten werden und durchaus die erste Stufe eines erfolgreichen Konzeptes für eine AVAS-Produktpalette bilden.

Ein nachfolgender Schritt könnte die Entwicklung hin zu einem noch besseren Kosten- und Formfaktor darstellen, um schlussendlich ein massenmarkttaugliches Produkt anbieten zu können, das auf große Akzeptanz seitens potenzieller Kunden stößt. Hierfür ist eine Neugestaltung des Gesamtsystems erforderlich, wobei jedoch bereits vorhandene Funktionen des Vorgängers zwingend erhalten werden müssen. Das im Rahmen dieser Bachelorarbeit vorgestellte akustische Warnsystem zeigt mit seiner Möglichkeit, prinzipiell jeden erdenklichen Motorklang zu erzeugen, unter anderem auch neue Wege für künftige Geschäftsmodelle auf. So könnte beispielsweise in Zukunft der Endkunde bei der Bestellung eines Elektrofahrzeugs ein Sound-Paket anfordern, von welchem er schon immer geträumt hat. Bietet der Fahrzeughersteller hier diverse Motorenklänge an und kann damit auf individuelle Wünsche des Kunden reagieren, entstehen ganz neue Geschäftsfelder. So bleibt die Entwicklung in Sachen Sound für Elektro- und Hybridfahrzeuge weiter spannend und vermag die Elektromobilität bei richtiger Umsetzung deutlich zu bereichern. Man kann daher das akustische Warnsystem als Chance für die E-Mobilität sehen, ein weiteres schlagfertiges Alleinstellungsmerkmal gegenüber der Fahrzeugflotte mit Verbrennungsmotor auszubilden.

Eine Tatsache zeichnet sich schon heute ab: Packt man die Konzeption des gesamten Elektrofahrzeugs richtig an, so besteht kein Zweifel mehr, dass die E-Mobilität durchaus in der Lage ist sich gegen etablierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor durchzusetzen. Ein deutliches Zeichen hierfür hat das Tesla MODEL S bereits im Jahr 2013 gesetzt, welches sich in den USA bezüglich der Verkaufszahlen an die Spitze setzen konnte und die Konkurrenz im Oberklasse-Segment mit deutlichem Abstand hinter sich ließ [100] ([4], Min. 33:56 - 34:17). Bleiben Regierungen weltweit weiter fest entschlossen, die E-Mobilität voranzutreiben, so wird der Wandel im größeren Stil auch hierzulande einsetzen, was die Stückzahlen benötigter AVA-Systeme nicht nur im Ausland, sondern auch in der Bundesrepublik Deutschland, ansteigen lässt.

Danksagung

Bedanken möchte ich mich an erster Stelle für die Unterstützung und die Betreuung von Projekt und Thesis durch meinen Erstprüfer an der Hochschule der Medien, Herrn Prof. Oliver Curdt, sowie durch meinen Zweitprüfer und Betreuer bei der Firma GIGATRONIK Stuttgart GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Jochen Lüling.

Weiter gilt mein Dank den GIGATRONIK-Mitarbeitern, welche mir bei Fragen in folgenden Teildisziplinen hilfreich zur Seite standen:

Elektronik – Simon Kunz, Ralf Heim und Andreas Hinner

Mechanik am Elektro-Quad – Simon Kunz

Programmierung der GIGABOX – Florian Klingenstein, Frédéric Hain

Allgemein möchte ich GIGATRONIK Stuttgart für die Möglichkeit danken, dass ich dieses Projekt zum Erfolg führen und hierbei für die Zukunft wertvolle Erfahrungen sammeln durfte. Es hat großen Spaß gemacht!

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] GIGATRONIK Holding GmbH:
Startseite. 2015.
URL: <http://www.gigatronik.com/de/startseite.html>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)

- [2] Wikimedia Foundation Inc.:
Elektroauto. 2015.
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Elektroauto#cite_ref-30
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)

- [3] ELEKTROAUTO News.net; Dipl.-Kfm. Elxnat, Jürgen:
Zur Geschichte des Elektroautos. 2014.
URL: <http://www.elektroauto-news.net/wiki/elektroauto-geschichte>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)

- [4] Zweites Deutsches Fernsehen - Zoom; Ruppert, Peter; Schück, Jo; Strompen, Michael:
Fährt Auto-Deutschland vor die Wand?. 2014.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=buV5Sb_z9KE
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)

- [5] Zweites Deutsches Fernsehen; Koberstein, Hans; Sperling Joe:
Die Leise Revolution - Zukunft Elektroauto (Part 2/3). 2011.
URL (10:00-13:05 min): <http://www.youtube.com/watch?v=rE0619B-N2g>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)

- [6] Tages Anzeiger; Ruch, Peter:
<<Ich sehe mich als einen Katalysator>>. 2010.
URL: <http://www.tagesanzeiger.ch/auto/technik/Ich-sehe-mich-als-einen-Katalysator/story/28255085>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)

- [7] ©2014 BLOOMBERG L.P. ALL RIGHTS RESERVED – Bloomberg TV:
Tesla May Partner With Toyota Again on Electric Car. 2014.
URL (6:05-7:44 min): http://www.bloomberg.com/video/elon-musk-on-tesla-model-s-in-japan-toyota-partnership-D5gAV1CyROOpOuX06irc_A.html
(abgerufen am 30.12.2014)
- [8] Tesla Motors, Inc.:
Bestellung. 2015.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/models/design
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [9] Kranzhoff, M.:
Elektroauto Reichweitentest Ladepark Hilden - "die ams im Härtestest der Realität".
2014.
URL: <http://www.youtube.com/watch?v=Eg4O2AWGBH8>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [10] Tesla Motors, Inc.:
Tesla Unveils Dual Motor and Autopilot. 2014.
URL: http://www.youtube.com/watch?v=FZ6lZJWL_Xk
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [11] Tesla Motors, Inc.; Video Presentation:
Präsentation Model S.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/models/walkthrough/playlist#1
(abgerufen am 2.1.2015)
- [12] TheSpeedRed (YouTube^{DE}):
Elon Musk, CEO and founder of Tesla Motors, introduced Model S. 2011.
URL: <http://www.youtube.com/watch?v=JUFfk7GxEuw>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)

- [13] Tesla Motors, Inc.:
AUFLADEN – Unterwegs. 2015.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/charging#/onthego
(abgerufen am 2.1.2015)
- [14] Tesla Motors, Inc.:
TECHNISCHE DATEN. 2015.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/models/specs
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [15] Tesla Motors, Inc.:
MODEL S. 2015.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/models
(abgerufen am 2.1.2015)
- [16] Daimler AG:
Preisliste S-Klasse. 2014.
URL: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/s-class/w222/advice_sales/pricelist.html
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [17] Tesla Motors, Inc.:
WIE VIEL KANN ICH SPAREN?. 2015.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/goelectric#savings
(abgerufen am 4.1.2015)
- [18] TechnologicVehicles (YouTube^{DE}):
Tesla Model X official reveal. 2012.
URL: <http://www.youtube.com/watch?v=u0I7dByeTt4>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)

- [19] Tesla Schweiz (Community Channel) (YouTube^{DE}):
Tesla Model S - Battery Swap HD Official. 2013.
URL: <http://www.youtube.com/watch?v=H5V0vL3nnHY>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [20] Wikimedia Foundation Inc.:
Well-to-Wheel. 2014.
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Well-to-Wheel>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [21] Wikimedia Foundation Inc.:
Elektromotor. 2014.
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [22] Wikimedia Foundation Inc.:
Verbrennungsmotor. 2014.
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Verbrennungsmotor>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [23] Reidt, Gerhard (YouTube^{DE}):
Lars Thomsen – 2. Erlebnis E-Mobilität Nordhessen. 2014.
URL: <http://www.youtube.com/watch?v=75-l7SztRqw>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [24] ZEIT ONLINE GmbH; Bessiner, Benjamin:
Elektroauto – Daimler setzt große Hoffnungen in den Denza. 2014.
URL: <http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-09/elektroauto-china-denza-mercedes>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [25] WEKA FACHMEDIEN GmbH; Hanisch, C.; Haselrieder, A.; Kwade, A.:
Recycling von Lithium-Ionen-Akkus. 2014.
URL: <http://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/106499/>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF (bestehend aus 4 Teilen) im Anhang)

- [26] manager magazin new media GmbH; Eckl-Dorna, Winfried:
RIESEN-BATTERIEFABRIK – So funktioniert Teslas Gigafactory. 2014.
URL: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/teslas-batteriefabrik-in-nevada-eckdaten-und-risiken-der-gigafactory-a-991750.html>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF (bestehend aus 3 Teilen) im Anhang)
- [27] Tesla Motors, Inc.; Kelty, Kurt:
Tesla's Closed Loop Battery Recycling Program. 2014.
URL: http://www.teslamotors.com/de_DE/blog/teslas-closed-loop-battery-recycling-program
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [28] Mercedes-Benz Passion; Jordan, Markus:
B-Klasse electric drive: Verkaufsfreigabe am 03.11.2014 – unser Blick auf die Vorteile. 2014.
URL: <http://blog.mercedes-benz-passion.com/2014/09/b-klasse-electric-drive-verkaufsfreigabe-am-03-11-2014-unser-blick-auf-die-vorteile-des-fahrzeuges-w242/>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [29] Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft:
Den BMW i3 aufladen. 2014.
URL: http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/i/i3/2013/showroom/charging.html#home_charging
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [30] e-mobil BW GmbH:
LivingLab BW^e mobil – Startseite.
URL: <http://www.livinglab-bwe.de/>
(abgerufen am 4.1.2015 | PDF im Anhang)

- [31] Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH; Schmidt, Boris;
Kostenloses Stromtankstellen – Mit dem Tesla auf dem Highway der Zukunft. 2014.
URL: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/auto-verkehr/kostenlose-%E2%80%A6stellen-mit-dem-tesla-auf-dem-highway-der-zukunft-12758189.html>
(abgerufen am 6.1.2015 | PDF im Anhang)
- [32] Europäisches Parlament:
Abgeordnete wollen gesundheitsschädlichen Fahrzeuglärm senken. 2014.
URL: <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140331ipr41178/html/Abgeordnete-wollen-gesundheitsschädlichen-Fahrzeuglärm-senken>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [33] Japan Automobile Standards Internationalization Center (JASIC):
A Study on Approach Warning Systems for hybrid vehicle in motor mode. 2009.
URL: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2009/wp29grb/ECE-TRANS-WP29-GRB-49-inf10e.pdf>
(abgerufen am 4.1.2015 | PDF im Anhang)
- [34] Zeitungsgruppe Hamburg GmbH; Imhof, Thomas:
Akustik – Auf der Suche nach dem Sound für E-Autos. 2014.
URL: <http://www.abendblatt.de/ratgeber/auto-motor/article124213102/Auf-der-Suche-nach-dem-Sound-fuer-E-Autos.html>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [35] Wikimedia Foundation Inc.:
Electric vehicle warning sounds. 2014.
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_warning_sounds
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [36] National Highway Traffic Safety Administration:
Quiet Vehicles NPRM.
URL: www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Quiet_Vehicles_NPRM.pdf
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)

- [37] Green Car Reports, High Gear Media Inc.; Voelcker John:
Quiet-Car Rules Must Be Delayed, Automakers Say: NHTSA Not Ready. 2014.
URL: http://www.greencarreports.com/news/1093506_quiet-car-rules-must-be-delayed-automakers-say-nhtsa-not-ready
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [38] National Highway Traffic Safety Administration:
Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles. 2013.
URL:
<http://www.nhtsa.gov/search?q=Minimum+Sound+Requirements+for+&x=0&y=0>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang (Titel: Quiet Car_EA))
- [39] National Highway Traffic Safety Administration:
U.S. Department of Transportation Proposes New Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles. 2013.
URL: <http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/DOT+Proposes+%E2%80%A6+Minimum+Sound+Requirements+for+Hybrid+and+Electric+Vehicles>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [40] © Europäische Union; EUR-Lex – Access to European Union law:
Dokument 32014R0540. 2014.
URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014R0540>
(abgerufen am 2.1.2015)
- [41] Europäisches Parlament:
Verordnung (EU) Nr. 540/2014. 2014.
URL: http://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/02/24/EU_22452/imfname_10460655.pdf
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang; Titel: Verordnung des Europäischen Parlaments)

- [42] Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH; Wilms, Jan; Görmann, Michael:
Sound Engineering für Elektroautos – Der Ton macht die Musik. 2010.
URL: <http://www.sueddeutsche.de/auto/2.220/sound-engineering-fuer-elektroautos-der-ton-macht-die-musik-1.53730>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)
- [43] Uhuhuuuuuuuu (YouTube^{DE}):
Mercedes Sound Logo. 2007.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=X0EB_vl4rik
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [44] planpvideo (YouTube^{DE}):
New BMW Sound Logo – Old vs. New. 2013.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qZ7IWJLrxZo>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [45] Ein Eimer Huhn (YouTube^{DE}):
Audi Logo Evolution über die Zeit. 2011.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=8tcvP4dB0Gw>
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [46] Baum Daniel (YouTube^{DE}):
Test des Soundgenerator Renault Clio GT 2014 (german) R Sound Effect RS. 2014.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=XpZ42A-R_34
(abgerufen am 2.1.2015 | Video im Anhang)
- [47] Ford-Werke GmbH:
Ford Fiesta ST – Technologie & Komfort. 2014.
URL: <http://www.ford.de/Pkw-Modelle/FordFiesta-ST/TechnologieundKomfort#primaryTabs>
(abgerufen am 2.1.2015 | PDF im Anhang)

- [48] Hütthig GmbH; all-electronics.de; Vollmer, Alfred:
Elektronik formt Auspuff-Sound. 2012.
URL: <http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/44830/Elektronik-formt-Auspuff-Sound>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [49] Lacko Channel (YouTube^{DE}):
Audi A6 3.0 TDI 313 HP - great sound. 2012.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=DjX6Xh0GK6A>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [50] e-mobil BW GmbH:
URL: http://www.livinglab-bwe.de/wp-content/uploads/2013/08/faq4_kap2abb1_elektromobile-antriebskonzepte11.png
(abgerufen am 4.1.2015)
- [51] Motorvision (YouTube^{DE}):
Mit Wasserstoff in die Zukunft Motorvision zeigt, wie alltag. 2010.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YvzP12fH0sw>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [52] Wikimedia Foundation Inc.:
Hybrid vehicle. 2014.
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle#Parallel_hybrid
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [53] oak media GmbH; Elektromobilität.com:
Schema und Funktionsbeschreibung zum Aufbau eines reinen Elektroautos.
URL: <http://www.elektromobilitaet.com/fileadmin/em/downloads/aufbau-elektroauto-elektromobilitaet-com-beschriftung.jpg>
(abgerufen am 4.1.2015)

- [54] Universität Kassel; Schneider, Dirk:
Praktikum Fahrzeugsysteme – Versuchsunterlagen
URL: <http://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/FSG/Download/Lehre/PFS/can1.pdf>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [55] Lawrenz, Wolfhard; Obermöller, Nils (2011):
CAN: Controller Area Network: Grundlagen, Design, Anwendungen, Testtechnik
Gebundene Ausgabe. 2011.
Verlag: VDE VERLAG GmbH; 5. Auflage.
- [56] Digi-Key Corporation:
CAN Bus Taking a Larger Role in EVs and PHEVs. 2015.
URL: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/aug/can-bus-taking-a-larger-role-in-evs-and-phevs>
(abgerufen am 4.1.2015 | PDF im Anhang)
- [57] Wikimedia Foundation Inc.:
Additive Synthese. 2014.
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Additive_Synthese
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [58] Wikimedia Foundation Inc.:
Subtraktive Synthese. 2014.
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Subtraktive_Synthese
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [59] Wikimedia Foundation Inc.:
FM-Synthese. 2014.
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/FM-Synthese>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)

- [60] Wikimedia Foundation Inc.:
Granularsynthese. 2014.
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Granularsynthese#Anordnung_der_Grains
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [61] Native Instruments GmbH:
KONTAKT 5 – FLEXIBLE AND POWERFUL SAMPLER. 2015.
URL: <http://www.native-instruments.com/de/products/komplete/samplers/kontakt-5/>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [62] Steinberg Media Technologies GmbH:
HALion 5. 2015.
URL:
http://www.steinberg.net/de/products/vst/halion_und_halion_sonic/halion_5.html
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [63] Steinberg Media Technologies GmbH:
Daten & Downloads – Minimale Systemanforderungen. 2015.
URL: http://www.steinberg.net/de/products/vst/halion_und_halion_sonic/daten_downloads.html
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [64] CarTFT.com e.K.:
FleetPC-7 Car-PC (Intel Core i7 2710QE, 2GB RAM, Autostart-Controller, 9-32 V
Automotive Netzteil, GPS, BT, CAN-Bus, 2x LAN) [LÜFTERLOS]
URL: <http://www.cartft.com/catalog/il/1571?gclid=COLK0eTPmsICFW7MtAodhSQAug>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [65] MobilegreekTM (YouTube^{DE}):
Gigabyte Brix Pro Intel Core i7 quadcore Mini PC – Unboxing & Overview [ENG].
2014.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=SCTiCjUbzHs>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)

- [66] GIGA-BYTE Technology Co., Ltd:
GIGABYTE™ BRIX Pro GB-BXi7-4770R. 2015.
URL: <http://www.gigabyte.de/products/product-page.aspx?pid=4888#sp>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [67] Musikhaus Thomann e.K.:
Thomann Midi USB 1x1. 2015.
URL:
http://www.thomann.de/de/thomann_midi_usb_1x1.htm?offid=1&affid=1&subid=274906&subid2=Thomann+Midi+USB+1x1&origin=boost&gclid=CJPw8_32l8ICFbPJtAodVUoAjA
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [68] USB Implementers Forum, Inc.:
Universal Serial Bus (USB)
URL: <http://www.usb.org/home>
(abgerufen am 3.1.2015)
- [69] Podcast ElektroMusik; Hoeldke, Michael:
MIDI-Interface / Datenformat
URL: http://home.snafu.de/hoeldke/Text/MHOnl_MIDI-Datenformat.pdf
(abgerufen am 4.1.2015 | PDF im Anhang)
- [70] Huber, Leonard:
Musical Instrument Digital Interface (MIDI)
Fachbereichsarbeit Informatik. 1998.
URL: <http://www.infoprofessional.net/fba-midi.pdf>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [71] Ackermann, Philipp (1991):
Computer und Musik: Eine Einführung in die digitale Klang- und Musikverarbeitung
Broschierte Ausgabe. 1991.
Verlag: Springer Vienna

- [72] www.mikrocontroller.net; Schwarz, Andreas:
UART
URL: <http://www.mikrocontroller.net/articles/UART>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [73] OrbitalMovies (YouTube^{DE}):
Car sound recording. 2008.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=SDDICBH8LOA>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [74] Gram Bjoern (YouTube^{DE}) :
Forza Motorsport 4 Engine Sound Recording HD. 2011.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=I07SwrI89Hs>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [75] Dynapack International, LLC:
Dynapack Chassis Dynamometers
URL: <http://www.dynapackusa.com/>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [76] Chwee Chua (YouTube^{DE}) :
Forza Motorsport Audio Recording and Dyno Lamborghini Gallardo 2008. 2013.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cgdcV2ODtrg>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [77] Audio Pro Heilbronn Elektroakustik GmbH:
AKG C547 BL. 2015.
URL: <http://www.akg.com/pro/p/c547bl>
(abgerufen am 6.1.2015 | PDF im Anhang)

- [78] EV Electro-Voice, EVI Audio GmbH:
RE20. 2015.
URL: <http://www.electrovoice.com/product.php?id=91>
(abgerufen am 6.1.2015 | PDF im Anhang)
- [79] Georg Neumann GmbH:
Kleinmikrofone Serie 180
URL:
https://www.neumann.com/?lang=de&id=current_microphones&cid=km180_data
(abgerufen am 6.1.2015|PDF im Anhang)
- [80] Schoeps GmbH:
Mikrofonkapsel MK 4. 2015.
URL: <http://www.schoeps.de/de/products/mk4/specs>
(abgerufen am 6.1.2015|PDF im Anhang)
- [81] Shure Distribution GmbH:
BETA 98D/S KOMPAKTES SNARE/TOM KONDENSATORMIKROFON. 2015.
URL: http://www.shure.de/produkte/mikrofone/beta_98d_s
(abgerufen am 6.1.2015|PDF im Anhang)
- [82] Wikimedia Foundation Inc.:
Musical Instrument Digital Interface. 2015.
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Musical_Instrument_Digital_Interface
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [83] MIDI Manufacturers Association Inc.:
MIDI Messages Table 1 – Summary of MIDI Messages. 2014.
URL: <http://www.midi.org/techspecs/midimessages.php#3>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)

- [84] fairaudio - Jörg Dames & Ralph Werner Medien GbR; Werner, Ralph:
Class-D-Verstärker, Schaltverstärker. 2015.
URL: <http://www.fairaudio.de/hifi-lexikon-begriffe/class-d.html>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [85] Raith, Matthias; Hifi-Music:
Ampire MBM100.2-2G (2. Generation)
URL: http://www.hifi-music.de/shop/bilder/produkte/gross/Ampire-MBM1002-2G-2-Generation_b6.jpg
(abgerufen am 4.1.2015)
- [86] Hifi-Music; Raith, Matthias:
Ampire MBM100.2-2G (2. Generation)
URL: http://www.hifi-music.de/shop/bilder/produkte/gross/Ampire-MBM1002-2G-2-Generation_b7.jpg
(abgerufen am 4.1.2015)
- [87] Ampire Electronics GmbH & Co. KG:
AMPIRE Endstufe, 2x 100 Watt, Class D (2. Generation)
URL: <http://www.ampire.de/MBM100-2-2G.htm?shop=ampire&SessionId=&a=article&ProdNr=MBM100.2-2G&t=274&c=20101&p=20101>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [88] Kolumbus GmbH:
MB QUART NKA 116 – 2-Wege-Koaxial-System (Ø 165 mm / 140 W)
URL:
[http://www.kolumbus24.com/Marine_Audio/Hersteller/MB_QUART/MB_QUART_NKA_116 - 2-Wege-Koaxial-System undOslash_165 mm / 140 W i695 3364 0.htm](http://www.kolumbus24.com/Marine_Audio/Hersteller/MB_QUART/MB_QUART_NKA_116_-_2-Wege-Koaxial-System_undOslash_165_mm_/140_W_i695_3364_0.htm)
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)

- [89] MB Quart Entertainment, Maxxsonics USA, Inc.:
MB Quart NKA 116 – Einbauanleitung
URL: http://www.audiodesign.de/downloads/Manuals_MBQUART/NKA116.pdf
(3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [90] AUTO ZEITUNG (YouTube^{DE}):
2012: Audi R8 e-tron Sound – Motorengeräusch aus dem Computer. 2012.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=RUmdWCp0diw>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [91] BimmerToday.de (Jürgen Hiltcher); Benny:
Akustischer Fußgängerschutz: Künstlicher Sound für BMW i3 und i8. 2014.
URL: <http://www.bimmertoday.de/2014/05/22/bmw-i3-i8-akustischer-fussgaenger-schutz-sound-elektroauto/>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [92] Delphi Automotive LLP.:
Security Systems – Delphi Vehicle Sound Generator
URL: <http://www.delphi.com/manufacturers/auto/body-and-security/security/vehicle-sound-generator>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [93] HARMAN Automotive, Harman International Industries, Inc.; HALOsonic™:
HALOsonic™ - NOISE MANAGEMENT SOLUTIONS. 2010.
URL: <http://www.halosonic.de/>
(abgerufen am 3.1.2015)
- [94] PistonHeadsTV (YouTube^{DE}):
Lotus's new Halosonic sound generator. 2009.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=H1CzoqEyACQ>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)

- [95] ECTunes ApS:
Product Videos - ECTUNES Safety and Performance Sound Systems
URL: <http://ectunes.com/p/products/videos>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)
- [96] ECTunesTV (YouTube^{DE}):
ECTunes Introduction. 2011.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=4DDegpZ9erI>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [97] SPIEGEL ONLINE AUTO, SPIEGEL ONLINE GmbH; Pander, Jürgen:
Verkehrssicherheit: Flüsterleise Elektroautos bekommen Krachgenerator. 2009.
URL: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/verkehrssicherheit-fluesterleise-elektroautos-bekommen-krachgenerator-a-661949.html>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang (Soundbeispiele siehe URL))
- [98] AutomobilBlog (YouTube^{DE}):
Brabus Tesla Roadster V8-Sound-Test: Space Sound Generator. 2008.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=j2TofIv30p8>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [99] enjoythesummer (YouTube^{DE}):
Brabus Tesla with Sound-Module. 2009.
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=KpZ6a7Fgc60>
(abgerufen am 3.1.2015 | Video im Anhang)
- [100] ecomento UG:
USA: Tesla Model S ist Oberklasse-Marktführer. 2014.
URL: <http://ecomento.tv/2014/06/10/tesla-model-s-in-usa-oberklasse-marktfuehrer/>
(abgerufen am 3.1.2015 | PDF im Anhang)

Anhang

Siehe Daten-DVD. Auf ihr enthalten sind unter anderem der erwähnte Kurzfilm zum Praxisteil sowie Bilder über die Entstehung des Lautsprechersystems und der größte Teil aller hier gelisteten Quellen.