

**Sounddesign für E-Mobility: Die Emotionalität
eines Sportwagens durch ein Sounddesign
darstellen**

Bachelorarbeit

im Studiengang
Audiovisuelle Medien

vorgelegt von

Julian Burgschweiger

Matr.-Nr.: 28898

am 19. Februar 2019

an der Hochschule der Medien Stuttgart

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Uwe Schulz

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Julian Burgschweiger, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Sounddesign für E-Mobility: Die Emotionalität eines Sportwagens durch ein Sounddesign darstellen“ 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 ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es zwei Sounddesigns zu entwerfen: Eins, das auf einem Verbrennungsmotor basiert und eins, das komplett frei entworfen ist. Dabei sollen beide Sounddesigns die Emotionalität eines Sportwagens transportieren. Dazu wurde folgende Forschungsfrage gestellt: Wie lässt sich die Emotionalität, die ein Sportwagen im Sound transportiert, durch ein Sounddesign umsetzen? Damit die nötigen Grundlagen vorhanden sind, wurden zuerst das menschliche Gehör und die Wahrnehmung erläutert, um anschließend aufzuzeigen, wieso es wichtig ist, ein Fahrzeug zu hören. Um die Forschungsfrage schließlich zu beantworten, wurden verschiedene Klänge von Sportwagen auf ihre psychoakustischen Faktoren analysiert. Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe von *Max/MSP* eine Software entwickelt, die das Sounddesign erlebbar macht. Dazu wurde ein Anforderungsprofil erstellt, das beschreibt, welche Faktoren umgesetzt werden müssen, damit das Sounddesign optimal erlebbar ist. Im anschließenden Kapitel werden Grundlagen der Sound-Synthese erläutert, damit im darauffolgenden Kapitel die verschiedenen Sounddesigns erstellt werden können. Abschließend werden die Sounddesigns in einem Hörversuch evaluiert, um herauszufinden, ob sie die gewünschte Emotionalität transportieren. Dabei wurde festgestellt, dass es für die Probanden einfach war das bekannte Geräusch eines Verbrennungsmotors auf die Sportlichkeit zu untersuchen. Bei einem neuartigen Geräusch ist dagegen noch keine Verbindung zu einem Sportwagen vorhanden.

Abstract

The objective of this bachelor thesis is to construct two different sound designs: One, which is based on a combustion engine and one, which is freely designed. Both sound designs should evoke the emotionality of a sports car. The following research question was asked: How can you design a sound, which evokes the same emotionality as a sports car? To do this, the basics of the human hearing and perception had to be explained, so that one can understand why it is important to hear a vehicle. To answer the research question eventually, different sounds of sports cars have been analyzed for their psychoacoustic factors. The next step was to develop a software with *Max/MSP*, which

makes the sound design come alive. In order to do that certain requirements have been defined. These requirements describe which factors must be implemented to make the sound design immersive. In the next chapter the basics of sound synthesis have been outlined, so that subsequently the sound designs could be constructed. At the end, these sound designs have been evaluated with a listening test. The result of these tests was, that the participants of this test had no problems to see whether the sound design of the combustion engine was sporty. With a new kind of noise however, there is no connection to a sports car.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnitt durch das menschliche Ohr (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 115).....	11
Abbildung 2: Kurven gleicher Lautstärke nach Fletcher und Munson (Friesecke, 2014, S. 126).....	14
Abbildung 3: Spektrogramm einer Beschleunigung im Bereich von 0 bis 7 kHz.....	23
Abbildung 4: Spektrogramm der Beschleunigung (links) im Vergleich mit dem Leerlauf (rechts) im Bereich von 40 bis 100 Hz	24
Abbildung 5: Spektrogramm Leerlauf im Bereich 100 bis 1,6 kHz	24
Abbildung 6: Spektrogramm Beschleunigung im Bereich 100 Hz bis 2 kHz.....	25
Abbildung 7: Sinusschwingungen im Grundtonbereich des Fahrzeugsounds	26
Abbildung 8: Anstieg der Lautstärke und der Frequenzanteile im Höhenbereich zwischen 3 und 12 kHz	27
Abbildung 9: Verschiedene Fahrsituationen (Engler, Hofmann, Mikus, & Hirle, 2015, S. 505).....	29
Abbildung 10: Screenshot Haupt-Patcher	31
Abbildung 11: Screenshot startsequence	31
Abbildung 12: Screenshot idle-Patcher	32
Abbildung 13: Screenshot accerlerate-Patcher	33
Abbildung 14: Screenshot calculate speed Patcher	34
Abbildung 15: Screenshot brake-Patcher	35
Abbildung 16: Screenshot stopsequence-Patcher.....	36
Abbildung 17: FMOD Studio <i>engine</i> Ansicht ohne Audiodateien.....	38
Abbildung 18: Gegenüberstellung elementarer Schwingungsformen (Wikipedia, 2008)	43
Abbildung 19: ADSR-Hüllkurve (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 111). ..	45
Abbildung 20: Oszillator innerhalb von <i>Massive</i> . Die farbigen Nummern und Balken sind Modulationsquellen (Zahlen), oder Bereiche (Balken). (Native Instruments, 2006, S. 10)	48
Abbildung 21: Screenshot Massive	48
Abbildung 22: MIDI-Zuweisung innerhalb des Main-Patchers.....	50
Abbildung 23: Detailansicht eines CC-Routings. Momentan wird der Wert 45 aus der CC-Nummer 24 gesendet. Die Parameter im scale Objekt bedeuten: Skaliere den Bereich 0-60 auf den Bereich 5-50.....	50
Abbildung 24: Spektrogramm des Leerlauf-Geräuschs im Bereich 0 bis 2 kHz.....	53
Abbildung 25: Spektrogramm einer "Testfahrt" im Bereich 0 bis 10 kHz	54

Abkürzungsverzeichnis

ADSR.....	<i>Attack, Decay, Sustain, Release</i>
API.....	<i>Application Programming Interface</i>
CC.....	<i>Control Change</i>
DAW.....	<i>Digital Audio Workstation</i>
FM.....	<i>Frequenzmodulation</i>
Hz.....	<i>Hertz</i>
kHz.....	<i>Kilo Hertz (1000 Hz)</i>
LFO.....	<i>Low Frequency Oscillator</i>
MIDI.....	<i>Musical Instrument Digital Interface</i>
MSP.....	<i>Max Signal Processing</i>
NVH.....	<i>Noise-Vibration-Harshness</i>

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	2
Kurzfassung	3
Abstract	3
Abbildungsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Grundlagen	11
2.1 Der Hörsinn des Menschen	11
2.1.1 Der Aufbau des Ohres	11
2.2 Grundlagen der auditiven Wahrnehmung	13
2.2.1 Schallereignis und Hörereignis	13
2.2.2 Hörbereich des menschlichen Gehörs.....	14
2.2.3 Anpassung und Maskierung	15
2.2.4 Unterscheidungsschwelle für Tonhöhen.....	15
2.2.5 Konsonanz und Dissonanz	16
3 Gründe, warum es wichtig ist ein Auto zu hören	17
3.1 Sicherheitsaspekt.....	17
3.1.1 Außenraum.....	17
3.1.2 Rückmeldung für den Fahrer.....	18
3.2 Sound Branding	19
4 Der Klang eines Sportwagens	20
4.1 Zusammensetzung des Klangs eines Sportwagens	20
4.1.1 Unterschied Geräusch und Klang	20
4.1.2 Psychoakustik	21
4.1.3 Noise, Vibration, Harshness	22
4.1.4 Analyse einer Sportwagenfahrt mit Hilfe eines Spektrogramms.....	23
5 Geeignete Techniken, um den Klang eines Sportwagens durch ein Sounddesign nachzubilden	28
5.1 Anforderungsprofil	28
5.2 Über Max/MSP	30
5.2.1 Umsetzung in Max/MSP	30

5.3	FMOD.....	37
5.3.1	Vorgehensweise in FMOD Studio.....	37
5.4	Vergleich der Implementierungen	39
6	Grundlagen Sound-Synthese.....	41
6.1	Additive Synthese	41
6.2	Subtraktive Synthese	41
6.3	FM-Synthese.....	42
6.4	Wavetable-Synthese.....	42
6.5	Oszillator.....	42
6.6	LFO.....	43
6.7	Filter.....	44
6.8	Verstärker	44
6.9	Hüllkurve.....	44
7	Sounddesign.....	46
7.1	Anforderungen an das Sounddesign	46
7.2	Probleme während der Implementierung	47
7.3	Native Instrument Massive	47
7.4	MIDI CC Zuweisung in Max/MSP	49
7.5	Sounddesign eines sportlichen Verbrennungsmotors	51
7.5.1	Das Leerlaufgeräusch	51
7.5.2	Die Beschleunigung	52
7.5.3	Analyse des Sounddesigns.....	52
7.6	Sounddesign eines sportlichen Elektroautos	54
7.6.1	Leerlaufgeräusch	54
7.6.2	Die Beschleunigung	55
7.6.3	Analyse des Sounddesigns.....	55
8	Hörversuche mit Probanden	57
8.1	Ergebnisse des Sounddesigns eines Verbrennungsmotors.....	57
8.2	Ergebnisse des Sounddesigns des Elektrofahrzeugs	58
8.3	Anmerkung zu den Hörversuchen.....	59
9	Fazit	60
10	Quellenverzeichnis	62

1 Einleitung

Die Zahl der Elektroautos in Deutschland steigt seit 2012 stark an (KBA, & Aral, 2018). Doch das liebste Spielzeug des Deutschen hat ein großes Problem: Es ist entweder zu laut oder zu leise. Genau in diesem Spannungspunkt steht der Sound eines Sportwagens. Dieser muss einerseits laut, kraftvoll, dynamisch und sportlich sein und andererseits will niemand den Lärm in den Innenstädten haben. Elektrisch betriebene Fahrzeuge bieten hier ein großes Potenzial diese Spannung aufzulösen. Im Gegensatz zu einem Fahrzeug mit konventionellem Verbrennungsmotor, erzeugen elektrisch angetriebene Fahrzeuge kaum Schallemissionen. So kann man die Innenstädte von der Lärmquelle Nummer Eins befreien. Dem entgegen steht aber die Gefahr, die leise Fahrzeuge für ihre Umgebung darstellen. Passanten, Radfahrer, Kinder und sehbehinderte Menschen sind oftmals auf das akustische Signal eines Fahrzeugs angewiesen, um rechtzeitig reagieren zu können. Zusätzlich dazu macht der Klang eines Fahrzeugs auch einen Teil seines Erlebnisses aus. Egal ob knatternde Harley oder dröhnender Porsche: Ohne Sound macht das Autofahren nur halb so viel Spaß. Das Aufbrüllen des Motors beim Gas geben. Das sanfte Schnurren im Leerlauf. Diese Bildsprache zeigt eindeutig, dass Klang uns bewegt.

An dem Punkt setzt diese Arbeit an. Das Ziel ist es, zwei verschiedene Sounddesigns zu entwerfen: Eins auf Basis eines Verbrennungsmotors und eins, das versucht die Emotionalität zu transportieren, ohne die konventionellen Sounds zu generieren. Wie lässt sich die Emotionalität, die ein Sportwagen im Sound transportiert, durch ein Sounddesign umsetzen? Das ist die Frage, die ich mir vor der Arbeit gestellt habe.

Dazu wird zuerst auf die Grundlagen des menschlichen Gehörs und die auditive Wahrnehmung von Schall eingegangen. Im Anschluss daran wird erläutert, wieso es wichtig ist, ein Auto zu hören. Dabei wird einerseits auf den Sicherheitsaspekt für die Umwelt eingegangen und andererseits die emotionale Bedeutung des Sounds erklärt. Denn mit einem Sportwagen verbinden wir immer auch den dazugehörigen Klang.

Im Anschluss werden verschiedene Sportwagen in ihrem Klang analysiert, um herauszuarbeiten, was einen sportlichen Fahrzeugsound ausmacht. Dazu wird aber erst ein Blick auf die psychoakustischen Faktoren geworfen, die die Wahrnehmung des Sportwagens beeinflussen und der Unterschied zwischen einem Geräusch und einem Klang definiert.

Um die Emotionalität des Sounddesigns dabei weiter zu steigern, wird mit *Max/MSP* eine Software entwickelt, die durch Controller-Eingaben ein Gas- und Bremspedal simuliert. Dazu wird eine Anforderungsanalyse erstellt, die klärt, welche Punkte die Software alles erfüllen muss. Zum Vergleich wird dann versucht das Ganze auch in *FMOD Studio* zu implementieren.

Vor dem Erstellen der Sounddesigns werden die Grundlagen der Sound-Synthese erläutert. In diesem Zuge werden verschiedene Arten der Synthese besprochen und die gängigen Parameter eines Synthesizers erklärt.

Im Anschluss daran wird zuerst einer Anforderungsanalyse erstellt, die klärt welche Faktoren das Sounddesign erfüllen muss. Weiterhin wird auf Probleme der Implementierung eingegangen und der verwendete Synthesizer *Massive* von Native Instruments kurz vorgestellt. Danach wird noch die MIDI Zuweisung zwischen *Max/MSP* und *Massive* erläutert.

Das Sounddesign gliedert sich in zwei verschiedene Teilbereiche: Das Sounddesign, das einen Verbrennungsmotor nachbildet, und das Sounddesign, das auf die konventionellen Sounds verzichtet. In den Kapiteln wird jeweils erläutert wie das Leerlauf- und Beschleunigungsgeräusch designt wurde, um es anschließend zu analysieren und mit dem Sound eines Sportwagens zu vergleichen.

Am Ende der Arbeit werden Hörversuche erläutert, die zeigen sollen, ob die verschiedenen Sounddesigns das Ziel, dieselbe Emotionalität wie ein Sportwagen zu transportieren, erreicht haben.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die wesentlichen Grundlagen aufgebaut werden, damit die Arbeit als Ganzes verstanden werden kann. Dabei wird zuerst auf den Hörsinn des Menschen eingegangen und der Aufbau des Ohres besprochen. Im Anschluss werden dann wahrnehmungspsychologische Grundlagen des Hörorgans erläutert.

2.1 Der Hörsinn des Menschen

2.1.1 Der Aufbau des Ohres

Das Ohr ist das Sinnesorgan, welches sowohl für die Wahrnehmung des Schalls, als auch für das Gleichgewicht zuständig ist. Dabei lässt sich das Ohr in drei Abschnitte unterteilen:

- Das Außenohr
- Das Mittelohr
- Das Innenohr

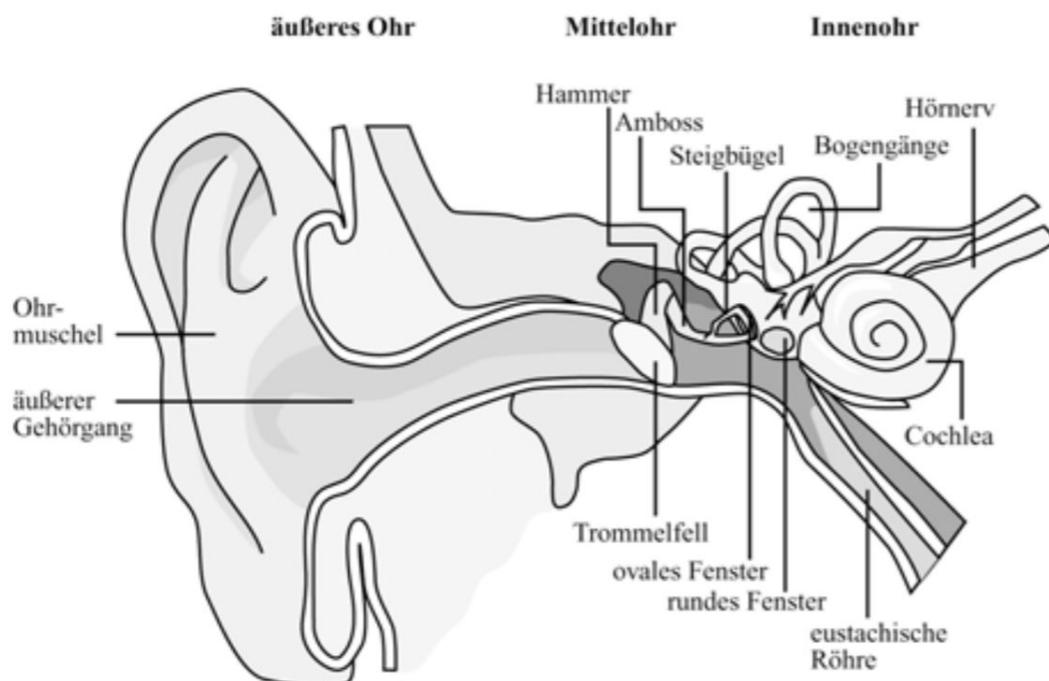


Abbildung 1: Schnitt durch das menschliche Ohr (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 115)

Das Außenohr dient als Verknüpfung zwischen dem Ohr und dem äußeren akustischen Feld sowie der Umwandlung der Luftschwingungen zu mechanischen Schwingungen. Es besteht aus der Ohrmuschel sowie dem äußeren Gehörgang. Dabei bilden die vielen Erhebungen und Vertiefungen innerhalb des Ohres akustische Resonatoren, die zur Bestimmung der Schallrichtung genutzt werden (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 115).

Das Mittelohr besteht aus dem Trommelfell, den Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss, Steigbügel), dem ovalen Fenster und der eustachischen Röhre. Der Schall erreicht durch den im Außenohr liegenden Gehörgang zunächst das Trommelfell, welches die Schwingungen an den angewachsenen Hammer weitergibt. Dieser transportiert die mechanische Schwingung wiederum an den Amboss und zuletzt leitet dieser die Schwingung an den Steigbügel weiter. Der Steigbügel ist über das ovale Fenster mit dem Innenohr verbunden. Die Gehörknöchelchen sind nicht nur direkt aneinander befestigt, sondern werden auch von Muskeln in ihrer Position gehalten. Diese Muskeln dienen als natürlicher Schutz vor zu hoher Lautstärke, da sie eine zu große Auslenkung der Gehörknöchelchen verhindern. Dies erklärt auch die Dumpfheit, die man empfindet, nachdem man ein lautes Konzert oder eine Diskothek besucht hat. Die eustachische Röhre verbindet dabei das Mittelohr mit dem Rachenraum, um einen Druckausgleich zu gewährleisten. Dies ist notwendig, da das Mittelohr bis auf die eustachische Röhre ein abgeschlossener Raum ist (Friedrich, 2008, S. 30-31).

Im Innenohr findet die Wandlung der mechanischen Bewegung zu einem elektrischen Signal statt. Dies geschieht in der Cochlea, die aufgebaut ist wie eine knöcherne Schnecke. In dieser Schnecke befindet sich das Corti'sche Organ, das einem mit Endolymphe gefüllten Schlauch entspricht. Hier befindet sich die Schnittstelle zwischen den mechanischen Bewegungen der Gehörknöchelchen und den elektrischen Nervensignalen in der Hörschnecke. Dabei leitet die Lymphflüssigkeit die Schwingungen, die über das ovale Fenster eintreten, weiter. Durch diese Bewegung wird auch die Flüssigkeit innerhalb des Corti'schen Organs zum Schwingen gebracht. Die auf der Basilmembran sitzenden feinen Härchen kann man sich dabei wie „eine über einen weiten gestimmten Frequenzbereich gestimmte Harfe“ (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 117) vorstellen. Diese Härchen zerlegen die ankommende Schwingung,

ähnlich einer Fourier-Analyse, in ihre einzelnen Bestandteile. Werden die Härchen durch eine Schwingung in Bewegung gebracht, melden die an den Haarfortsätzen gelegenen Hörzellen einen Reiz und der Hörnerv leitet dieses Signal zum Gehirn (Friedrich, 2008, S. 31).

Diese komplette Kette an Ereignissen, vom Auftreffen des Schalls bis zur Wandlung in ein elektrisches Signal, wird als Schallereignis bezeichnet. Im folgenden Kapitel wird auf den Unterschied zwischen dem Schallereignis und dem Hörereignis eingegangen.

2.2 Grundlagen der auditiven Wahrnehmung

2.2.1 Schallereignis und Hörereignis

Das Schallereignis lässt sich physikalisch eindeutig beschreiben. Jedem Ereignis können messbare Attribute wie die Frequenz, Schalldruckpegel, Spektrum und die Position der Quelle zugeordnet werden. (Görne, 2017, S. 35). Das Hörereignis ist dagegen eine Empfindung und kann nicht durch physikalisch messbaren Größen beschrieben werden. Sollen die Empfindungen der Hörereignisse umschrieben werden, werden oft ungenaue Beschreibungen wie laut, leise, spitz, hell oder dunkel verwendet. Wenn man aber definitive Aussagen über ein Hörereignis treffen will, so muss man Aussagen von Versuchspersonen auswerten und miteinander vergleichen. So kann man die empfundene Lautstärke in Abhängigkeit von Frequenz und Schalldruckpegel angeben. Dabei werden in den Versuchen die nicht berücksichtigten Reizgrößen konstant gehalten und mit Sinustönen und Rauschen gearbeitet, da Musik durch Melodie oder Wort oft auch Träger einer Emotion ist (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 118-119). Für die subjektive Lautstärke ergeben diese Versuche die Kurven gleicher Lautstärke (vgl. Abbildung 2).

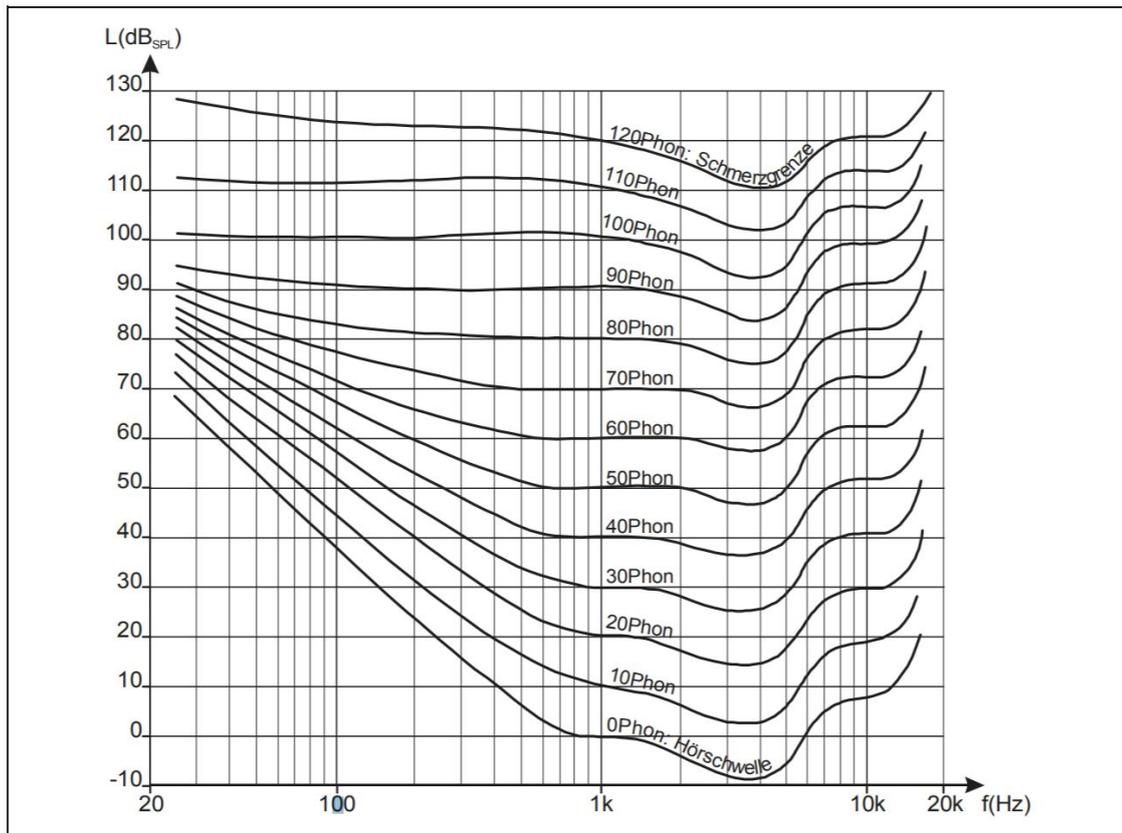


Abbildung 2: Kurven gleicher Lautstärke nach Fletcher und Munson (Friesecke, 2014, S. 126)

Bei den Kurven gleicher Lautstärke fällt deutlich eine Überhöhung der Empfindlichkeit im Bereich zwischen 2 und 4 kHz auf. In diesem Frequenzbereich reagiert das Gehör des Menschen besonders empfindlich auf eintreffende Schallereignisse. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass besonders im Tieftonbereich zwischen 20 und 150 Hz ein großer Schalldruckpegel nötig ist, damit ein Ton als laut empfunden wird.

2.2.2 Hörbereich des menschlichen Gehörs

Der Frequenzbereich, in dem ein Mensch Geräusche und Töne wahrnehmen kann, erstreckt sich von 16 Hz bis 20 kHz. Dabei ist jedoch die obere Grenze in der Wahrnehmung von hohen Frequenzen abhängig vom Alter. Mit steigendem Alter wird die Fähigkeit, Töne in den oberen Frequenzbereichen wahrzunehmen, zunehmend schlechter.

Die Wahrnehmung der Frequenzen erfolgt logarithmisch. So ist zum Beispiel das Auflösungsvermögen zwischen 10 und 20 kHz genauso fein wie zwischen 1000 und 2000 Hz (Friesecke, 2014, S. 117).

Diese recht große Bandbreite zwischen 16 Hz und 20 kHz lässt sich in einzelne Frequenzbereiche unterteilen, um zu beschreiben was gehört wird. Sie werden für diese Arbeit wie folgt definiert:

- Der Bassbereich, zwischen 16 und 120 Hz.
- Der Grundtonbereich/Tiefmitten, zwischen 120 und 400 Hz.
- Die Mitten zwischen 400 Hz und 1 kHz.
- Die Hochmitten zwischen 1 kHz und 2.5 kHz.
- Die Höhen zwischen 2.5 kHz und 6 kHz.
- Und der Superhochtonbereich von 6 kHz bis 20 kHz.

Für diese Frequenzbereiche gibt es allerdings keine allgemeingültige Definition, da die Übergänge fließend sind.

2.2.3 Anpassung und Maskierung

Ähnlich wie sich das Auge an verschiedene Helligkeitsgrade in der Umgebung anpassen kann, passt sich das Gehör an einen mittleren gerade herrschenden Schallpegel an. Dies ist eine Maßnahme der menschlichen Wahrnehmung, um die Datenflut, die das Gehirn durch die Ohren erreicht, zu reduzieren (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 123-124). So wird durch ein lautes akustisches Ereignis die Hörschwelle eines zweiten Schallsignals umso mehr erhört, je näher sich die akustischen Reize im Frequenzgang liegen. Diesen Effekt nennt man Simultanmaskierung.

Zusätzlich dazu, gibt es noch die Vor- beziehungsweise Nachmaskierung. Diese kann damit erklärt werden, dass die Basilarmembran nach einer großen Auslenkung nicht augenblicklich wieder in ihre Ruheposition zurückkehrt, sondern langsam ausschwingt. So braucht das Gehör nach einem lauten akustischen Ereignis eine bestimmte Erholungszeit in den Frequenzen des lauten Schallsignals, um wieder die volle Empfindlichkeit zu erlangen. Diese Erholungszeit ist abhängig vom Schallpegel und kann bis zu 100 ms betragen (Raffaseder, 2002, S. 93).

2.2.4 Unterscheidungsschwelle für Tonhöhen

Ähnlich der Maskierung bei der Lautstärke eines Schallsignals führt nicht jede Differenz zweier Grundfrequenzen zu einem wahrnehmbaren Tonhöhenunterschied. So beträgt

die gerade wahrnehmbare Differenz in der Tonhöhe zweier Schallsignale unter 1 kHz ungefähr 1 Hz. Diese kann aber im Tieftonbereich auf 0,1 Hz sinken und steigt oberhalb von 5 kHz sehr stark an. Im Superhochtonbereich über 10 kHz ist die Unterscheidung von Tonhöhen beim Menschen fast gar nicht mehr ausgeprägt. So sind besonders komplexe Wellenformen mit vielen Obertönen schwerer in ihrer Tonhöhe zu unterscheiden (Raffaseder, 2002, S. 96). Dabei muss man auch beachten, dass die Frequenzauflösung bei einer momentanen Änderung der Tonhöhe besser ist, als wenn sie langsam verändert wird. Dieses Auflösungsvermögen ist bei momentaner Tonänderung bis zu 30 Mal besser als von langsamen Tonänderungen (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 118).

2.2.5 Konsonanz und Dissonanz

Zwei unterscheidbare Frequenzen, die zum selben Zeitpunkt klingen, werden als Intervall bezeichnet. Ein Intervall kann dabei als konsonant, wohlklingend, glatt und angenehm oder dissonant, spannungsvoll, rau und eher unangenehm beschrieben werden. Dies hat vor allem in der dramaturgischen Gestaltung eines Sounddesigns Relevanz. Der Übergang zwischen Konsonanz und Dissonanz ist dabei fließend und von vielen Faktoren, wie der Kultur oder den individuellen Hörgewohnheiten abhängig (Raffaseder, 2002, S. 99). Dabei muss beachtet werden, dass das Ohr Intervalle, die nicht sauber gespielt werden „zurechthören“ kann. Dabei werden die zwei Frequenzen auf die korrekte Tonhöhe zurechtgerückt (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 118).

3 Gründe, warum es wichtig ist ein Auto zu hören

In diesem Kapitel wird erläutert, warum es wichtig ist, dass ein Fahrzeug einerseits von Passanten, wie Fußgängern und Radfahrern, und andererseits vom Fahrenden sowie den Insassen akustisch wahrgenommen wird. Dabei wird zuerst auf den Sicherheitsaspekt eingegangen, da man die Entfernung und die Geschwindigkeit von motorisierten Fahrzeugen schon mit dem Hörorgan einschätzen kann. Weiterhin kann das Fahrverhalten mit dem Sounddesign eines Fahrzeugs beeinflusst werden. Danach wird auf das Sound Branding eingegangen, da ein Sportwagen sich sportlich anfühlen muss, um Emotionen zu wecken.

3.1 Sicherheitsaspekt

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Sicherheit im Außenraum, sprich alles außerhalb des Autos, eingegangen und anschließend wird erläutert, wie die akustische Rückmeldung den Fahrer beeinflusst.

3.1.1 Außenraum

Ein wichtiger Punkt für die Verkehrssicherheit ist, dass Fahrzeuge akustisch wahrgenommen werden können. Dabei ist es elementar, dass näherkommende Fahrzeuge nicht überhört werden, um Gefahren zu vermeiden. Es gibt drei Komponenten, die das Fahrzeuggeräusch beeinflussen:

- Das Antriebsgeräusch
- Das Rollgeräusch (Reifen/Fahrbahn)
- Das Windgeräusch

Das Verhältnis dieser drei Komponenten ist stark geschwindigkeitsabhängig. So bestimmt bei Geschwindigkeiten von über 100 km/h vor allem das Windgeräusch die Außenwahrnehmung des Fahrzeugs. Im Bereich zwischen 30 und 100 km/h dominiert das Rollgeräusch die Wahrnehmung und im Bereich von 0 bis 30 km/h überwiegt das Antriebsgeräusch des Motors (Tschöke & Witzel, 2013, S. 789-790).

Dies zeigt, dass besonders im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und 30 km/h eine Wahrnehmbarkeit des Antriebsgeräusches gewährleistet sein muss. So kann das Risiko

einer Kollision bei Ausfahrten, Spielstraßen oder in der Stadt minimiert werden. Eine besonders gefährdete Risikogruppe stellen dabei blinde/sehbehinderte Menschen und Kinder dar (Bräunl, 2012, S. 1-2). Deswegen fordern Blindenverbände auch einen akustischen Dauerton (Tschöke & Witzel, 2013, S. 790-791).

Im Kontrast zur Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugen steht dabei die Lärmemission, die nicht nur Stress begünstigt, sondern auch zu einer Vielzahl von Krankheiten führen kann (Babisch, 2011, S. 28-29). Daher muss überlegt werden, ob anstelle eines akustischen Dauertons lieber ein Warnsignal, ähnlich einer Fahrradklingel, abgespielt werden soll, um sich bei Passanten bemerkbar zu machen. So kann besonders durch die Elektrifizierung des Antriebs von Stadtbussen, Müllfahrzeugen und sonstigen mobilen Arbeitsgeräten, die besonders häufig im niedrigen Geschwindigkeitsbereich fahren, eine deutliche Verringerung des Lärmpegels innerhalb von Städten erzielt werden (Tschöke & Witzel, 2013, S. 790)

Dabei ist auch zu beachten, dass laut einem Gesetzesentwurf der EU ab Juli 2019 elektrische Fahrzeuge ein akustisches Warnsignal abgeben, das nicht nur auf die unmittelbare Anwesenheit eines Fahrzeugs Rückschluss gibt, sondern auch auf das Fahrverhalten hinweisen soll (Schoenebeck, 2018). Das ist wichtig, damit unterschieden werden kann, ob das Fahrzeug am Beschleunigen ist, abbremst oder mit konstanter Geschwindigkeit fährt.

3.1.2 Rückmeldung für den Fahrer

Das Sounddesign eines Elektrofahrzeugs nimmt erheblichen Einfluss auf den Fahrstil. So verändert sich der Fahrstil augenblicklich, sobald sich der Sound des Elektrofahrzeugs ändert (Akustikentwicklung vor neuen Aufgaben, 2011, S. 528-529). Durch diese Wechselwirkung lässt sich der Fahrer in seinem Fahrstil beeinflussen, was genutzt werden kann, um ein sichereres Fahrverhalten zu ermutigen. Autofahrer sind an ein akustisches Feedback ihrer Fahrweise gewöhnt. So klingen die Beschleunigung und das Abbremsen komplett unterschiedlich, was zusätzlich zu dem haptischen und visuellen, einen akustischen Reiz bietet, um das Fahrzeug und das Fahrverhalten einschätzen zu können. Deswegen hatten Fahrer von Elektrofahrzeugen Probleme dabei, die zulässige Höchstgeschwindigkeit einzuhalten, da ihnen das Motorengeräusch fehlte (Pilgerstorfer, et al., 2013, S. 43-44).

3.2 Sound Branding

Ein Fahrzeug ist in erster Linie auch ein Produkt, das verkauft werden soll. Egal ob elektrisch angetrieben oder mit einem konventionellen Motor: Motorsportfans und auch manche Laien können ein vorbeifahrendes Auto am Antriebsgeräusch erkennen. Steiner schreibt dazu:

Sound Design transportiert sowohl Informationen über die vielfältigen Funktionen und deren gewünschte Ausführung, als auch emotionale Aspekte, die intuitiv und unmittelbar die Identifikation mit dem Produkt und letztlich die Kaufentscheidung beeinflussen. *(Steiner, 2018, S. 151-152)*

Daraus folgt, dass im Fehlen des Antriebsgeräuschs bei Elektrofahrzeugen auch ein wesentliches Kaufargument für oder gegen das Fahrzeug liegt. Wenn man sich einen Sportwagen kauft, dann möchte man auch akustisch einen Sportwagen fahren. Der Kunde soll am Fahrgeräusch des Sportwagens die Marke und den Typ des Fahrzeugs feststellen können (Leppert, 2010). Dafür betreiben die Hersteller von Premiummarken wie BMW oder Porsche großen Aufwand. So mache bei einem Sportwagen „die Emotion 100% aus“ (Steiner, 2018, S. 145). Dabei können die verschiedenen Soundattribute mit Wörtern wie „sportlich“, „luxuriös“ oder „kraftvoll“ beschrieben werden (Biermayer, Thomann, & Brandl, 2001, S. 524-526). Im nächsten Kapitel wird darauf eingegangen, wie verschiedene Klänge und Geräusche die Wahrnehmung eines Sportwagens beeinflussen.

4 Der Klang eines Sportwagens

In diesem Kapitel wird erläutert, wie sich der Klang eines Sportwagens zusammensetzt. Dazu wird auf den Unterschied zwischen Geräusch und Klang eingegangen und weitere Faktoren für die Wahrnehmung wie Lautheit, Tonalität, Rauheit und die Schärfe von Schallereignissen diskutiert. Anschließend wird der Sound eines Sportwagens mit Hilfe eines Spektrogramms betrachtet und seine einzelnen Bestandteile analysiert.

4.1 Zusammensetzung des Klangs eines Sportwagens

Um zu verstehen wie sich der Klang eines Sportwagens zusammensetzt, wird im Folgenden zuerst der Unterschied zwischen einem Geräusch und einem Klang geklärt. Danach werden psychoakustische Merkmale eines Klangs erläutert, um anhand dieser das Spektrogramm eines Sportwagens zu beurteilen.

4.1.1 Unterschied Geräusch und Klang

Grundsätzlich können alle akustischen Wahrnehmungen in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. Der reine Ton (die regelmäßige Schwingung)
2. Das Rauschen (den Zufallsprozess)

Der reine Ton ist dabei die Basis aller Signale, die die Wahrnehmung und das Empfinden von Tönen bestimmter Tonhöhen auslösen. Das Tonsignal ist dabei deterministisch. Das heißt, dass der Signalverlauf in der Vergangenheit das Signal in der Zukunft bestimmt (Görne, 2017, S. 55). So bestimmt zum Beispiel der Anschlag einer Gitarrensaite die Tonhöhe, Lautstärke und das Ausschwingverhalten derselben. Der Sinus ist dabei das „perfekt deterministische[s] Signal“ (Görne, 2017, S. 55). Im Gegensatz dazu steht das Rauschen, das die makroskopische Summe vieler mikroskopischer Einzelschallereignisse ist (Görne, 2017, S. 55-56). Jedes Schallereignis kann so einen tonalen (deterministischen) Anteil und in einen Rausch-Anteil (stochastischen) unterteilt werden. Dabei erzeugt das Rauschen keine tonale Empfindung, hat aber trotzdem eine Klangfarbe und Textur.

Die tonalen Anteile eines akustischen Signals kann man weiterhin in verschiedene Tonhöhen unterteilen. Dazu nutzen wir die visuellen Metaphern hoch und tief, was dem Bass- und dem Höhenbereich eines Tonsignals entspricht (Görne, 2017, S. 60).

4.1.2 Psychoakustik

Mit der Wirkung dieser physikalischen Variablen und den resultierenden psychischen Empfindungen beschäftigt sich die Psychoakustik (Zeller, 2018, S. 252). Als psychoakustische Parameter haben sich bisher die

- Lautheit
- Tonalität
- Rauigkeit
- Schärfe

etabliert (Genuit, 2010, S. 53-54). Dabei beschreibt die Lautheit das subjektive Empfinden der Lautstärke in Abhängigkeit der Frequenz, berücksichtigt aber auch die Maskierung innerhalb des Gehörs (Zeller, 2018, S. 256-257). Die Einheit der Lautheit ist *son*. Dabei wurde definiert, dass 1 *son* einem 1kHz Ton von 40dB entspricht. Die Lautheit ist dabei eine Verhältnisskala. Doppelt laut empfundene Signale haben demnach 2 *son* (Genuit, 2010, S. 54). Die Lautheit ist dabei „die wichtigste Empfindungsgröße, wenn die Lästigkeit von Geräuschen beurteilt werden soll“ (Zeller, 2018, S. 255-256).

Die Tonalität eines Klangs beschreibt den Anteil von tonalen, schmalbandigen Komponenten eines akustischen Signals (Genuit, 2010, S. 54). Dabei wird die Tonhöhe eines Tons durch seine Frequenz bestimmt (Zeller, 2018, S. 258). Es muss aber beachtet werden, dass das menschliche Ohr die Fähigkeit hat, einen ursprünglichen Grundton zu rekonstruieren. Ein Signal mit den Komponenten 50+100+150+200+250 Hz erzeugt also die gleiche Tonhöhenempfindung wie ein Sinus Signal mit 50 Hz (Görne, 2017, S. 60-61). Die Frequenz der tonalen Anteile eines Klangs ändert dabei auch die Wirkung des Geräusches. Während tieffrequente Brumm- oder Dröhngeräusche als besonders lästig wahrgenommen werden können (Zeller, 2018, S. 259), können Klänge im gleichen Frequenzbereich auch Kraft und Souveränität vermitteln (Zeller, 2018, S. 435-436).

Die Rauheit eines Geräuschs tritt besonders bei frequenz- oder amplitudenmodulierten Klängen hervor. Dabei wird die Rauigkeit in der Einheit *asper* angegeben. Ein *asper* entspricht einem 1kHz Sinus Ton, der mit einer Modulationsfrequenz von 70 Hz und einem Modulationsgrad von 1 amplitudenmoduliert ist. Dies entspricht 2 Sinustönen von 1000 Hz und 1070 Hz, die, bei gleicher Lautstärke, gleichzeitig wiedergegeben werden (Maschke & Fastl, 2016, S. 10-11). Bei Fahrzeugen ist die Rauheit ein besonders wichtiges Merkmal für die Sportlichkeit (Maschke & Fastl, 2016, S. 12).

Die Schärfe eines Klanges hängt von der Frequenzzusammensetzung ab. Grundsätzlich werden dabei Klänge mit einem höheren Frequenzspektrum als schärfer wahrgenommen. Die Schärfe wird dabei in *acum* angegeben und ein *acum* entspricht einem Rauschen mit einer Bandbreite von 160 Hz um 1kHz bei 60 dB SPL (Maschke & Fastl, 2016, S. 9). In einem Sounddesign kann die Schärfe eines Klanges eingesetzt werden, um die bildliche Schärfe zu verdeutlichen (Görne, 2017, S. 115).

4.1.3 Noise, Vibration, Harshness

Ein besonderer Punkt bei der Wahrnehmung von Fahrzeugen ist die taktile Wahrnehmung von Schwingungen, auch Vibroakustik oder NVH (Noise-Vibration-Harshness) genannt (Tschöke & Witzel, 2013, S. 786). Dabei umfasst der Begriff Noise-Vibration-Harshness drei verschiedene Frequenzbereiche:

- Vibration: Schwingungen bis 20Hz, die vor allem über den Körper des Fahrers gefühlt werden.
- Harshness: Schwingungen im Bereich von 20 bis 50Hz, die sowohl taktil als auch akustisch wahrgenommen werden können.
- Noise: Schwingungen, die nur akustisch wahrnehmbar sind. (Tschöke & Witzel, 2013, S. 787)

Im Gegensatz zu klassischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren haben elektrisch angetriebene Fahrzeuge einige Vorzüge sowie Nachteile bei der NVH Gestaltung. Dabei ist vor allem die „tonale Geräuschcharakteristika“ und die kaum vorhandene „Fahrzustandsrückmeldung“ zu nennen (Ruschmeyer, 2010, S. 320). Ein gutes Sounddesign muss diese Probleme lösen, um als Sportwagen überzeugen zu können.

4.1.4 Analyse einer Sportwagenfahrt mit Hilfe eines Spektrogramms

Um den Klang eines Sportwagens zu untersuchen, wurde einerseits die Software *Project Cars 2* (Slightly Mad Studios LTD, 2017) und andererseits Innenraumaufnahmen von verschiedenen Sportwagen verwendet. Dabei wurde der Sound einer Testrunde in der Software aufgenommen und von dieser Audiodatei ein Spektrogramm erstellt. Ein Spektrogramm entspricht einer Kurzzeit-Fourier-Transformation mit einer bestimmten Fensterlänge, in der das Signal auf sein Spektrum untersucht wird. Diese Fensterlänge wird in Millisekunden angegeben und muss je nach Signal sinnvoll gewählt werden (Meyer, 2017, S. 199-200).

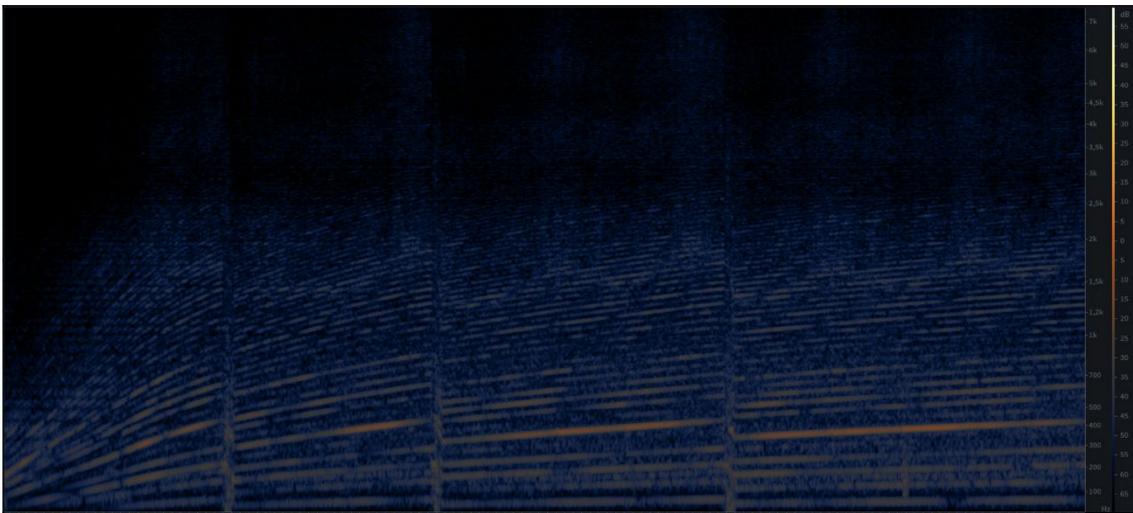


Abbildung 3: Spektrogramm einer Beschleunigung im Bereich von 0 bis 7 kHz

In diesem Spektrogramm verweisen die Helligkeit und Farbe auf die Lautstärke des Signals. Deutlich zu erkennen sind orangene Linien, die, wenn man sie isoliert betrachtet, einzelne tonale Komponenten des Signals darstellen. Wenn man die Beschleunigung aus dem Leerlauf (ganz links im Bild) betrachtet, fällt auf, dass der Ton von ungefähr 100 Hz auf 500 Hz ansteigt und bei jedem Gangwechsel um ungefähr 100 Hz abfällt. Der Gangwechsel ist in Abbildung 3 deutlich durch die vertikalen Linien zu erkennen. Auffallend ist auch, dass das Signal aus sehr vielen Obertönen besteht und mit Zunahme der Motorlast immer mehr hochfrequente Anteile dazu kommen. Zusätzlich dazu steigt die Lautstärke auch proportional zu der Motorlast an.

Um weitere Bestandteile des Sounds zu analysieren, wurde die Audiodatei in drei unterschiedliche Frequenzbereiche geteilt:

- Den Bassbereich

- Den Grundtonbereich und den Mitten
- Die Höhen

Beim Vergleich vom Leerlaufgeräusch mit der Fahrt fällt auf, dass der Leerlauf eine wesentlich basslastigere Frequenzverteilung hat. Dies entsteht hauptsächlich dadurch, dass das Leerlaufgeräusch kein tonales Fundament hat, sondern eher geräuschhaft ist.

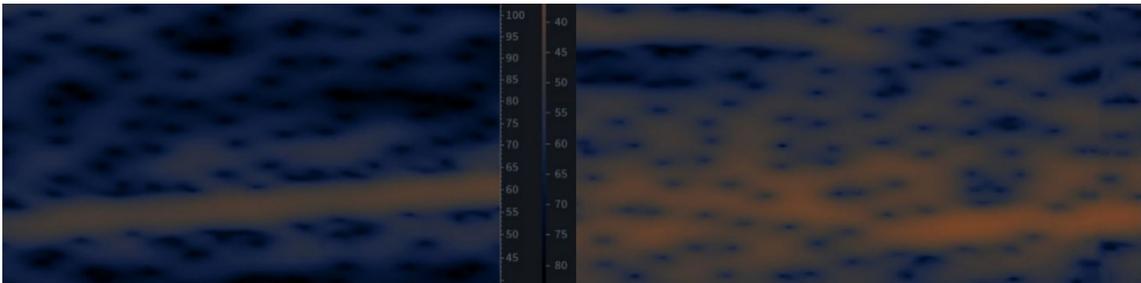


Abbildung 4: Spektrogramm der Beschleunigung (links) im Vergleich mit dem Leerlauf (rechts) im Bereich von 40 bis 100 Hz

Durch diesen häufigen Wechsel in der Frequenz bekommt das Leerlaufgeräusch eine gewisse *Rauheit*, die sportlich wahrgenommen wird (vgl. Kapitel 4.1.2).

Im Mittenbereich ist im Leerlauf dagegen fast nur ein Rauschen wahrzunehmen, das keinerlei tonale Komponenten besitzt.

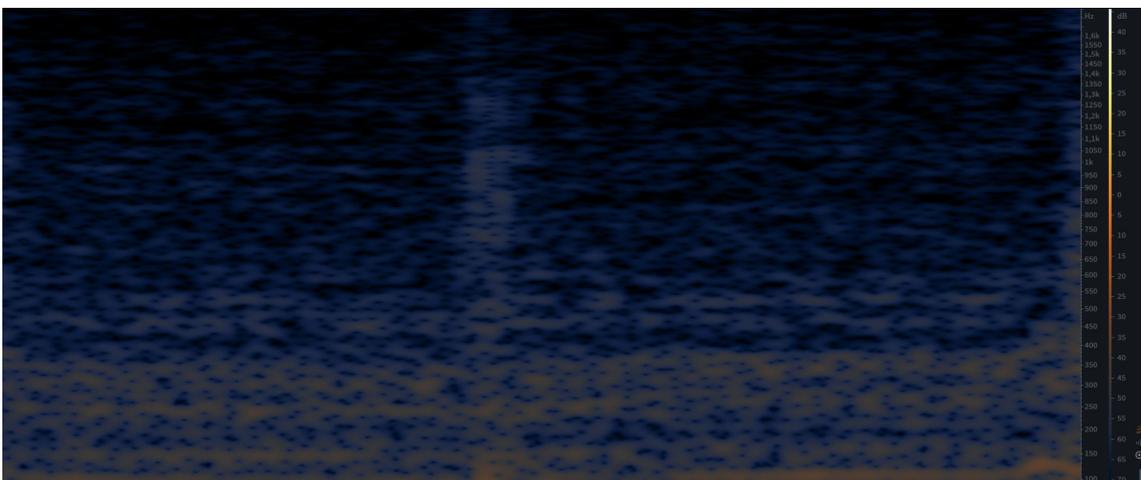


Abbildung 5: Spektrogramm Leerlauf im Bereich 100 bis 1,6 kHz

Die Frequenzverteilung des Rauschens ist dabei vorläufig im Bereich zwischen 100 und 400 Hz. Dadurch wirkt das Leerlaufgeräusch kaum *scharf*. Bildlich ausgedrückt erscheint das Rauschen eher *sanft* und *weich*. Im Bereich der Höhen findet man im Leerlauf kaum Signalanteile, die zum Gesamtsound beitragen. Daher kann dieser vernachlässigt werden.

Beim Beschleunigen steigt der Basston des Motors an, wie es auch in *Abbildung 3: Spektrogramm einer Beschleunigung* zu sehen ist, um dann beim Gangwechsel wieder auf seine vorherige Frequenz abzufallen. Das Rauschen, das im Leerlauf im Bassbereich zu hören war, verschwindet fast vollkommen (vgl. *Abbildung 44*) während der Beschleunigung und tritt nur kurz während des Gangwechsels wieder auf.

Besonders interessant ist der Grundton- und Mittenbereich während der Beschleunigung. Die einzelnen tonalen Komponenten steigen parallel in ihrer Tonhöhe an und nehmen proportional zur Motorlast an Lautstärke zu. Dabei bestimmt vor allem der deutlich leisere Ton zwischen 165 und 216 Hz den empfundenen Grundton, obwohl der tonale Anteil im Signal zwischen 330 und 430 Hz deutlich lauter ist. Dies liegt an der Fähigkeit des Menschen, Grundtöne zu rekonstruieren (vgl. Kapitel 4.1.2). Interessant ist hier auch der Anstieg der Anzahl der Obertöne innerhalb des oberen Mittenbereichs. Der Sound klingt bei bloßer Betrachtung der Mitten schon fast wie ein ansteigender Akkord.

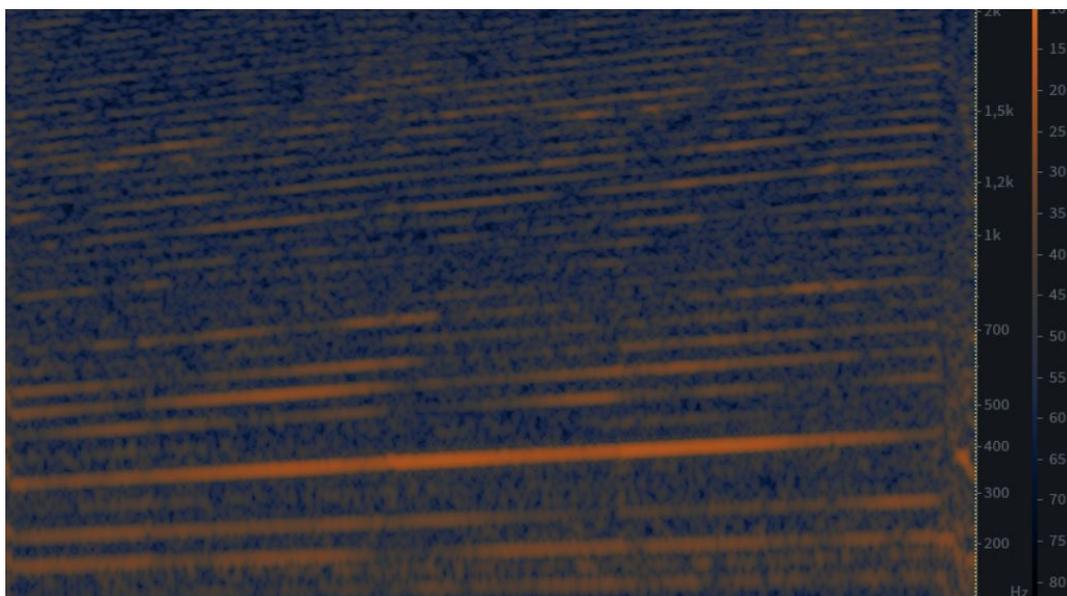


Abbildung 6: Spektrogramm Beschleunigung im Bereich 100 Hz bis 2 kHz

Im Spektrogramm (*Abbildung 6*) der Beschleunigung erkennt man deutlich die ansteigenden tonalen Komponenten und die Zunahme der Obertöne. Das Frequenzspektrum verschiebt sich so weiter in Richtung *höhenlastig*, was die Schärfe des Klangs erhöht. Diese *Schärfe* im Klang trägt dazu bei, dass der Motor als sportlich

empfundener wird. Die Schnelligkeit eines Sportwagens kann so auch durch die *Schärfe* im Sound dargestellt werden (vgl. 4.1.2).

Bei der genaueren Untersuchung der tonalen Komponenten im Grundtonbereich wurde festgestellt, dass es sich hauptsächlich um Sinusschwingungen handelt. Dazu wurde mit dem Spektrogramm-Editor *iZotope RX7* eine tonale Komponente von dem Rest des Sounds isoliert und gesondert betrachtet. Im Anschluss wurde dann in die Wellenform hineingezoomt, bis die Grundschiwingung zu sehen war (vgl. Abbildung 7). Dieses Vorgehen wurde auch mit den anderen tonalen Komponenten wiederholt. Dabei ergaben sich für jede tonale Komponente des Signals ähnliche Ergebnisse.

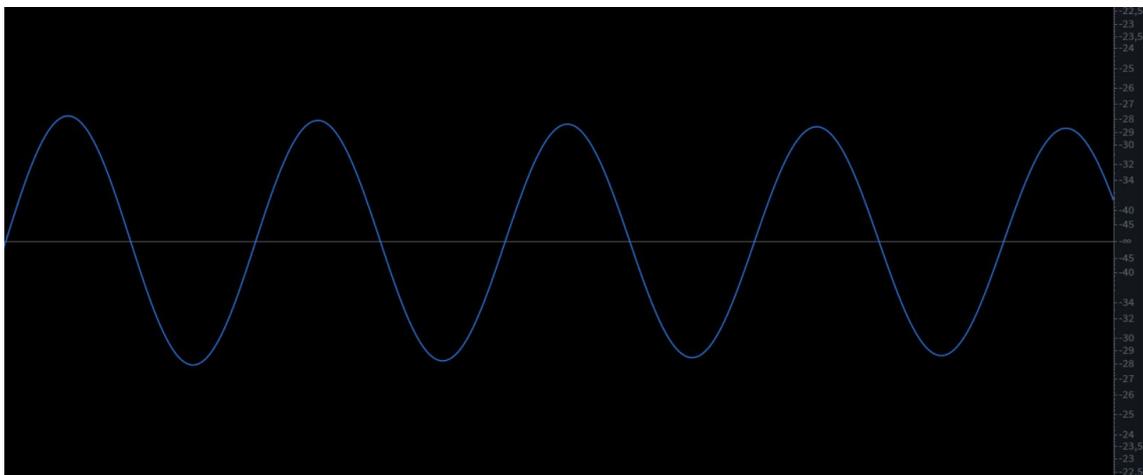


Abbildung 7: Sinusschwingungen im Grundtonbereich des Fahrzeugsounds

Im Bereich der *Höhen* ist vor allem ein Rauschen wahrnehmbar, das je nach Motorlast in der Frequenz und der Lautstärke ansteigt. Eine hohe Motorlast heißt in dem Fall eine hohe Intensität des Rauschens. Das Rauschen gleicht dabei von der Frequenzverteilung einem weißen Rauschen im Bereich von 3,5 kHz bis 10 kHz. Besonders der Anstieg der Intensität des Rauschens im Bereich zwischen 2 und 4 kHz führt zu einer deutlichen Wahrnehmung des Geräusches. Das Ohr reagiert in diesem Frequenzbereich am empfindlichsten, deshalb (vgl. Kapitel 2.2.1) führt dies zu einer sehr guten

Wahrnehmung der Geschwindigkeit und des Fahrzeugzustands.

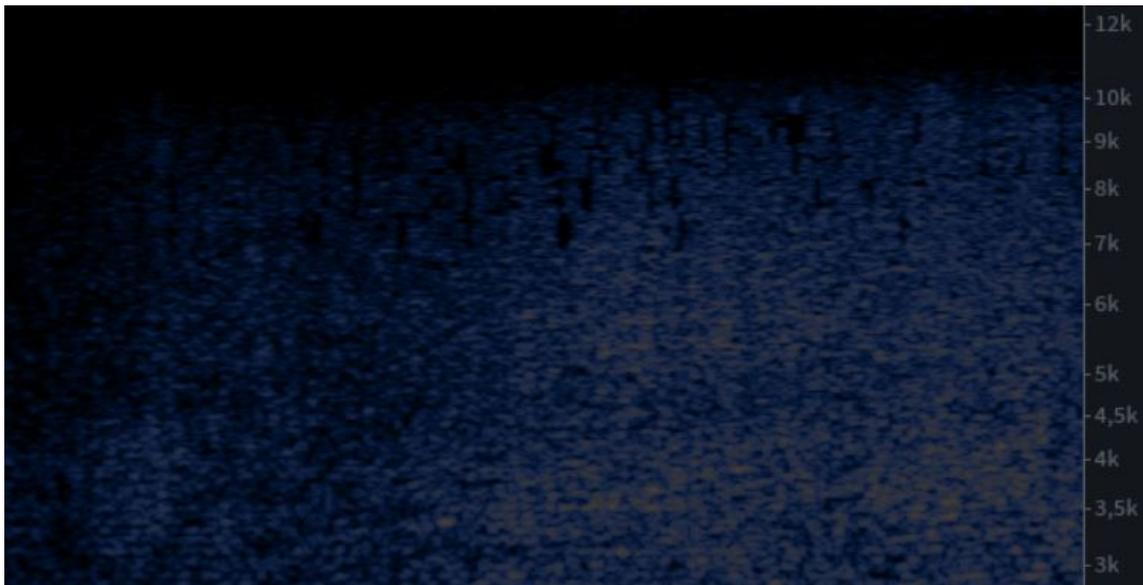


Abbildung 8: Anstieg der Lautstärke und der Frequenzanteile im Höhenbereich zwischen 3 und 12 kHz

Im Spektrogramm (vgl. Abbildung 8) fällt dieser Anstieg der Intensität des Rauschens deutlich auf. Besonders im Bereich zwischen 3 und 4 kHz kommen sehr viele Rauschanteile hinzu. Durch diese Verlagerung des Frequenzspektrums gewinnt der Sound im höheren Motorlast-Bereich deutlich an *Schärfe* und Wahrnehmbarkeit.

Abschließend lässt sich festhalten, dass hauptsächlich die Summe der tonalen Bestandteile für den Sound eines Sportwagens verantwortlich ist. Das zeigte sich nicht nur in den hier gewählten Spektrogrammen und Aufnahmen, sondern auch in den anderen untersuchten Motorgeräuschen. Folgende Fahrzeuge wurden dabei untersucht:

- Porsche 911 GT3 RS (Slightly Mad Studios LTD, 2017), Spektrogramme hier abgebildet.
- Mercedes-AMG A45 4MATIC (Slightly Mad Studios LTD, 2017)
- BMW 1 Series M Coupé (Slightly Mad Studios LTD, 2017)
- Porsche 911 RSR 2017 (AUTOhebdo, 2017)
- Lamborghini Huracan (AutoTopNL, 2016)

5 Geeignete Techniken, um den Klang eines Sportwagens durch ein Sounddesign nachzubilden

In diesem Kapitel wird zuerst ein Anforderungsprofil an ein Sounddesign für einen E-Motor erstellt und daraufhin zwei verschiedene Herangehensweisen besprochen, mit denen es möglich ist, ein Sounddesign interaktiv und erlebbar zu machen. Im ersten Teil wird die graphische Entwicklungsumgebung *Max/MSP* von Cycling '74 genutzt, um einen interaktiven Motor nachzubilden, der durch Controller Eingaben gesteuert werden kann. Im zweiten Teil wird mit der auf Sampling basierenden Middleware *FMOD* von Firelight Technologies Pty versucht dasselbe zu erreichen. Im abschließenden Punkt werden diese zwei Techniken miteinander verglichen, um die Vor- und Nachteile der Lösungen herauszuarbeiten.

5.1 Anforderungsprofil

Damit das virtuelle Sounddesign bestmöglich erlebbar gemacht werden kann, wird zuerst ein Anforderungsprofil erstellt, dem das Sounddesign folgen muss. Für die Erlebbarkeit des Sounddesigns werden folgende Punkte definiert:

- Es muss einen Start/Stopp Knopf geben, um das virtuelle Sounddesign zu starten, beziehungsweise zu beenden.
- Die Geschwindigkeit muss sich über ein Gaspedal und ein Bremspedal regeln lassen.
- Es findet keine Gangschaltung statt.
- Der virtuelle Motor muss zu jeder Zeit eine akustische Rückmeldung über die Geschwindigkeit geben.
- Reifenabrollgeräusche und Windgeräusche werden vernachlässigt.
- Es muss eine Startsequenz oder einen Startsound geben, der dem Fahrer Rückmeldung gibt. Dasselbe gilt für die Stoppsequenz.
- Das Leerlaufgeräusch des virtuellen Motors darf erst nach Beendigung der Startsequenz zu hören sein.
 - Das Beschleunigungsgeräusch darf erst abgespielt oder erzeugt werden, nachdem der Motor im Leerlauf zu hören ist.

- Die Stoppsequenz kann nicht aus voller Geschwindigkeit gestartet werden.

Nachdem das Anforderungsprofil geklärt wurde, wurde eine typische Autofahrt in verschiedene Stadien unterteilt:

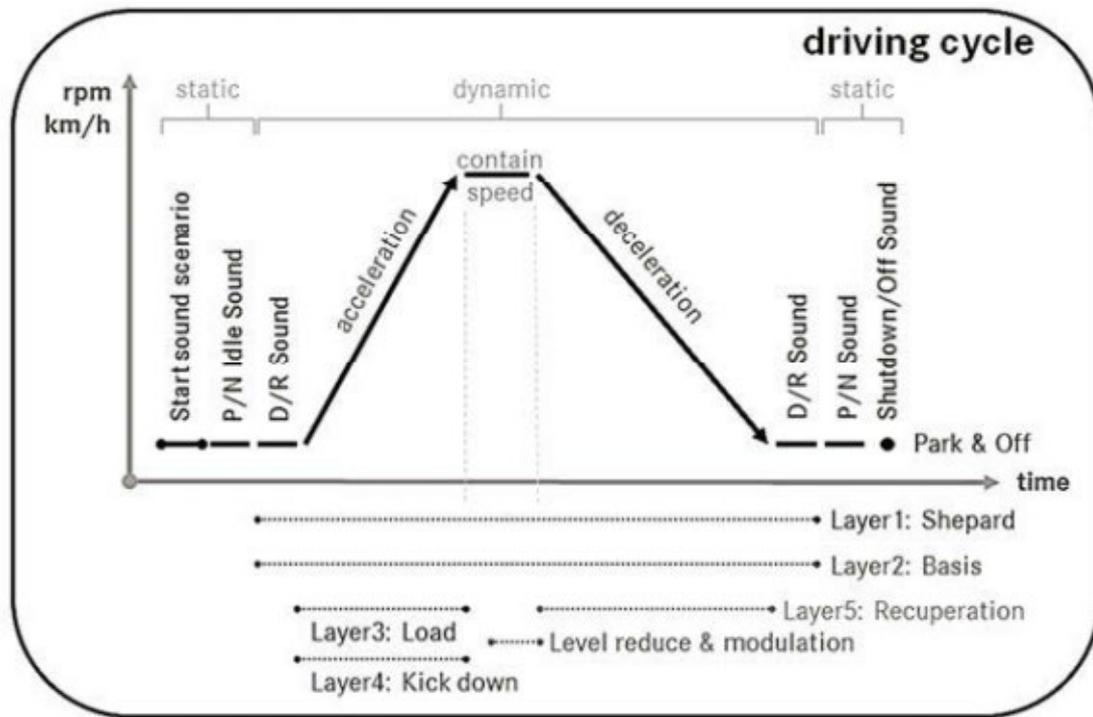


Abbildung 9: Verschiedene Fahrsituationen (Engler, Hofmann, Mikus, & Hirrle, 2015, S. 505)

Die Abbildung zeigt, welche verschiedenen Situationen umgesetzt werden müssen, um eine realistische Autofahrt zu simulieren:

- Die Start/Stopp Sequenz
- Das Leerlauf (Idle) Geräusch
- Die Beschleunigung
- Das Halten der Geschwindigkeit
- Das Abbremsen

Dabei müssen auch jeweils verschiedene Soundebenen im Sounddesign berücksichtigt werden (vgl. Engler, Hofmann, Mikus, & Hirrle, 2015, S. 505).

In den folgenden Kapiteln wird zuerst die Herangehensweise in *Max/MSP* und dann in *FMOD* erläutert, um diese fünf Fahrsituationen mit einem Sounddesign simulieren zu können.

5.2 Über Max/MSP

Max/MSP ist eine graphische Entwicklungsumgebung, die auf die Echtzeitbearbeitung von MIDI und Audio ausgelegt ist. Dabei arbeitet *Max/MSP* datenstromorientiert, das heißt, dass die einzelnen MSP (Max Signal Processing) Module miteinander verknüpft werden können, um Signale, Werte oder Variablen auszutauschen. Die Verknüpfungen werden dabei visuell mit sogenannten Patch Cords dargestellt. *Max/MSP* kann dabei mit einer Vielzahl von Controller Typen umgehen, was eine hohe Flexibilität ermöglicht.

5.2.1 Umsetzung in Max/MSP

In *Max/MSP* wurde in einzelnen Patchern gearbeitet. In einem Patcher werden Funktionsteile der Programmierung logisch zusammengefasst. Zuerst wurde ein Haupt-Patcher erstellt, der als allgemeine Steuerung des Sounddesigns dient und alle weiteren Funktionen zusammenfasst. In diesem wurden dann fünf Patcher erstellt, die die verschiedenen Fahrsituationen anhand von MIDI Eingaben simulieren. Der Haupt-Patch enthält dabei nur den Start/Stopp Button sowie die Controller-Zuweisung für den Synthesizer, der den Sound dynamisch anhand der Parameter erzeugt.

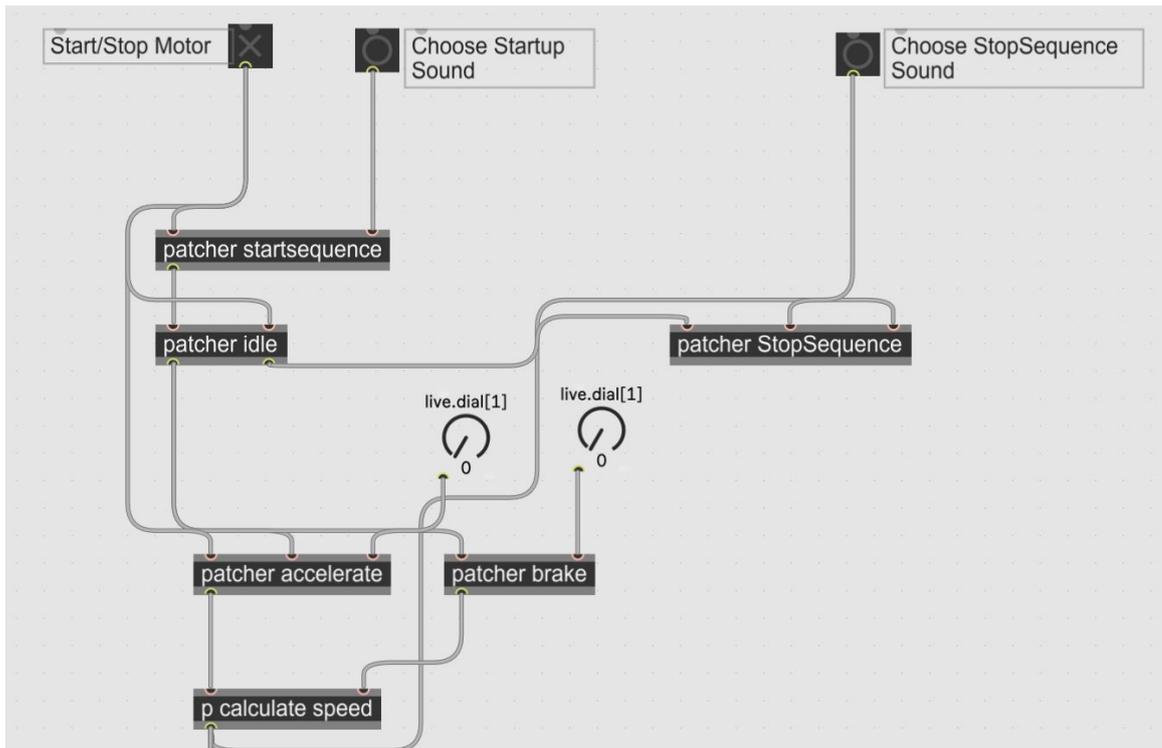


Abbildung 10: Screenshot Haupt-Patcher

Dabei wurde auch eine Funktion eingebaut, die den Bedienenden den Start sowie Stoppsound frei wählen lässt, um größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten. Der Zustand des virtuellen Motors kann hier mit einem Toggle-Objekt auf aktiv (1) oder inaktiv (0) gestellt werden. Wenn der Toggle auf aktiv geschaltet wird, sendet das Objekt eine 1 aus dem Outlet und aktiviert so den Patcher *startsequence*. Dieser spielt dann den zuvor gewählten Startsound ab.

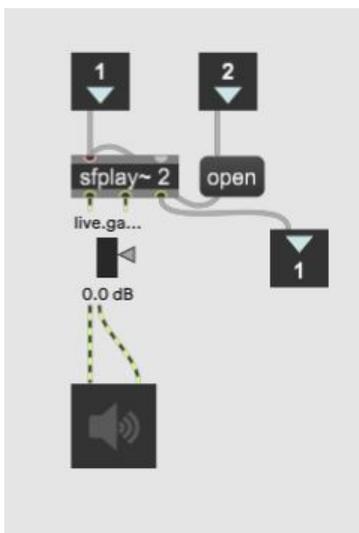


Abbildung 11: Screenshot startsequence

Sobald der Startsound abgespielt wurde, sendet das *sfplay* Objekt einen Bang aus seinem zweiten Outlet, um den *idle* Patcher zu aktivieren. Dieser Bang löst ein Message Objekt aus, das eine MIDI Note erzeugt, die mit einer Anschlagstärke von 127 aus einem zuvor definierten MIDI-Port ausgegeben wird. Somit ist sichergestellt, dass das Leerlaufgeräusch erst startet, wenn der Startsound abgespielt wurde. Die Höhe der Note lässt sich hier über den ersten Wert in der Liste bestimmen, die Anschlagstärke über den zweiten Wert.

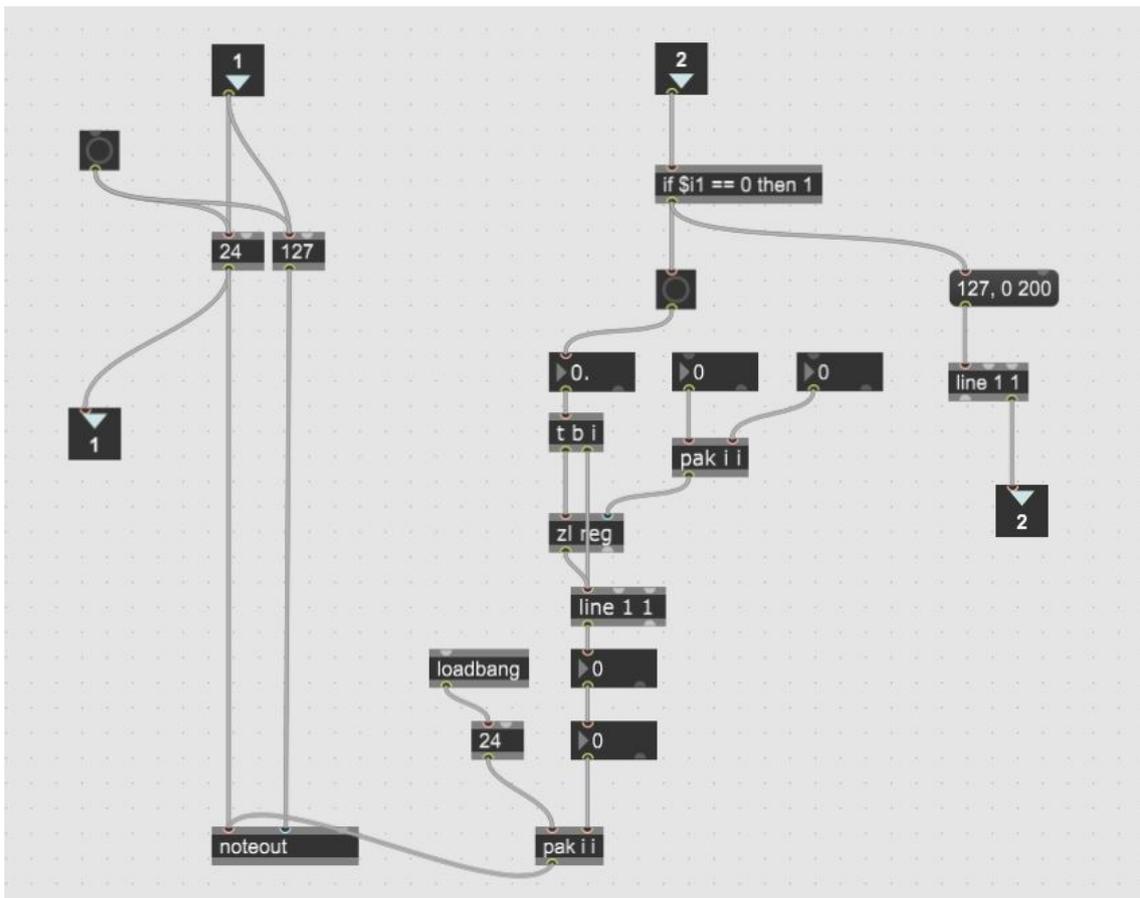


Abbildung 12: Screenshot idle-Patcher

Sobald eine Note den *idle* Patcher gestartet hat, wird der *accelerate* Patcher freigeschaltet. Der Status des *idle* Patters wird mit einer einfachen if-Bedingung abgefragt, die ein Gate Objekt entweder öffnet (bei aktivem Leerlaufgeräusch) oder schließt (bei der Deaktivierung des Toggle-Objekts im Haupt-Patcher). Der *accelerate* Patcher sendet dann, je nach Position des virtuellen Gaspedals, MIDI-Control Messages an den Synthesizer, der so seinen Sound ändert, um dem Fahrer Rückmeldung über die Geschwindigkeit zu geben.

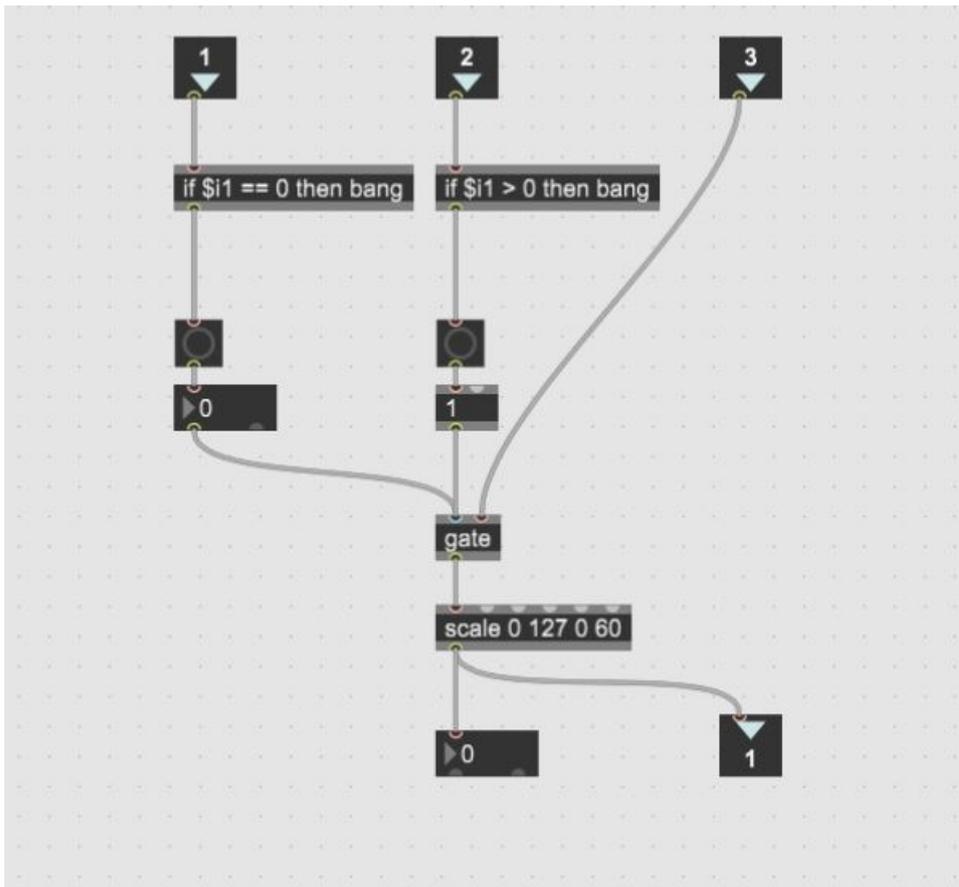


Abbildung 13: Screenshot accerlerate-Patcher

Damit das Bremsen nicht im Leerlauf möglich ist, wurde ein Hilfspatcher *calculate speed* entwickelt, dessen Aufgabe es ist, eine virtuelle Geschwindigkeit zu errechnen. Diese virtuelle Geschwindigkeit ist nur eine Hilfsgröße und hat dabei nichts mit der tatsächlichen Geschwindigkeit zu tun. Sie errechnet sich über den Wert des simulierten Gaspedals in Zusammenhang mit dem aktuellen Wert des Bremspedals sowie in Abhängigkeit der Zeit. Der Vorteil dieser Methode ist, dass auch die negative Beschleunigung simuliert werden kann, die ein Fahrzeug erfährt, wenn kein Pedal gedrückt wird. Dazu wird vom aktuellen Wert des Gaspedals der momentane Wert des Bremspedals abgezogen. Der resultierende Wert wird dann in Abhängigkeit seiner Größe stetig vermindert, um die vorher erwähnte negative Beschleunigung eines Fahrzeugs zu simulieren. Dazu wurde das *line* Objekt in *Max/MSP* genutzt, das in Abhängigkeit einer bestimmten Zeit stetig von einem Ursprungswert zu einem Zielwert interpoliert. Die Zeit und der Ursprungswert sind dabei von der zuvor berechneten Geschwindigkeit abhängig. Gleichzeitig meldet der *calculate speed* Patcher auch die

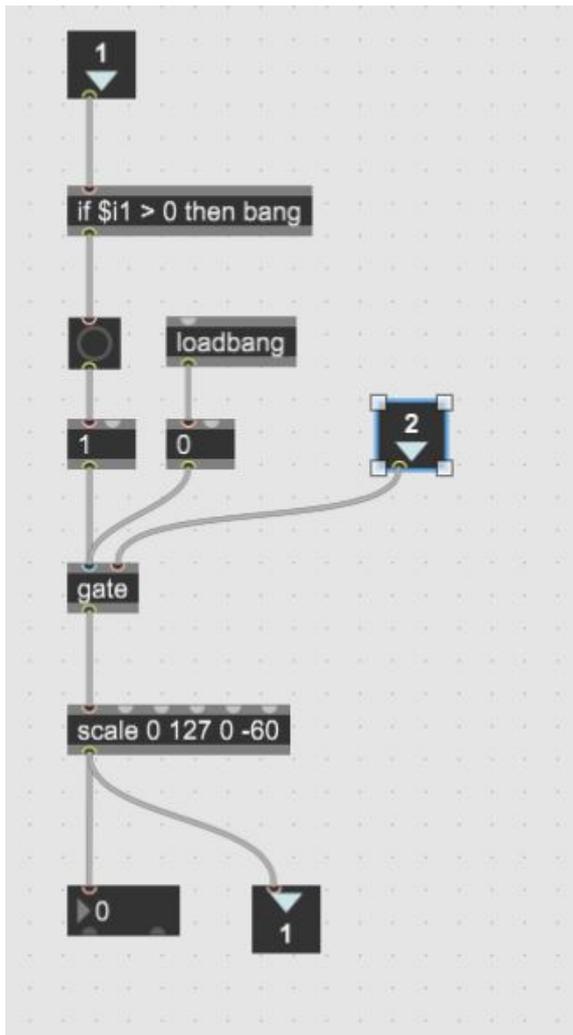


Abbildung 15: Screenshot brake-Patcher

Bei der Deaktivierung des Toggles im Haupt-Patcher passieren dann mehrere Dinge gleichzeitig:

- Im Patcher „idle“ wird ein note-off MIDI Befehl gesendet, der die Klangerzeugung des Synthesizers beendet.
- Im Patcher „StopSequence“ wird der Stoppsound abgespielt.
- Die Patcher „accelerate“ und „brake“ werden deaktiviert.

Damit das Leerlaufgeräusch nahtlos in den Stoppsound übergeht, wird im Patcher „idle“ der Note-Off Befehl nicht direkt gesendet, sondern die Anschlagsstärke der Note über 300 ms etappenweise verringert. Der Stoppsound setzt dabei schon nach 200 ms ein, um einen flüssigen Übergang zu gewährleisten.

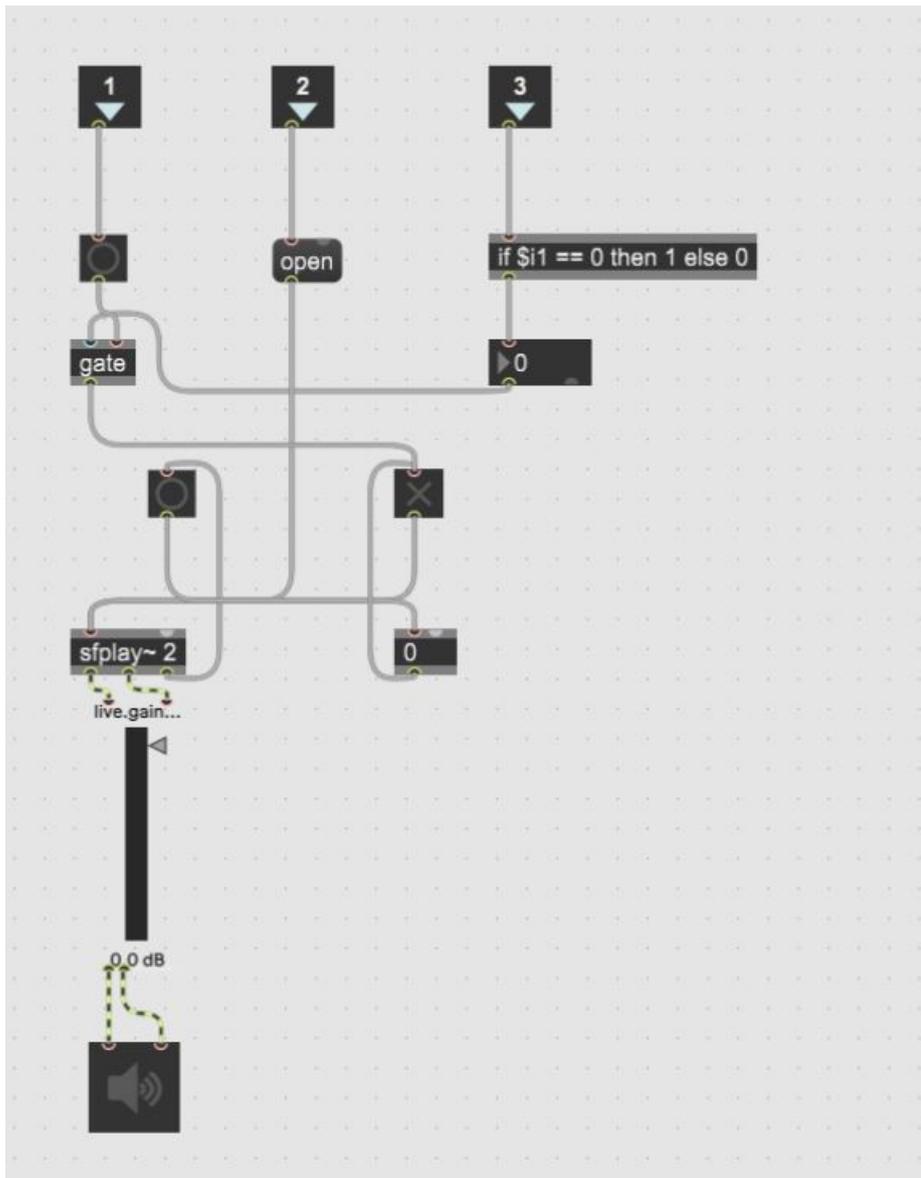


Abbildung 16: Screenshot stopsequence-Patcher

Um den Sound nun zu erzeugen, wurde ein MIDI-Out erstellt, der zu dem MIDI-In eines Synthesizers geroutet wurde. Theoretisch bietet *Max/MSP* auch die Möglichkeit, den Sound innerhalb des Programms zu generieren. Davon wurde aber in dieser Programmierung abgesehen. Da im Synthesizer viele verschiedene Parameter gleichzeitig gesteuert werden müssen, die MIDI Implementierung aber nur einen Controller pro veränderbaren Wert erlaubt, wird die virtuelle Geschwindigkeit auf die nicht belegten MIDI-CC Nummern 14 bis 31 geroutet (vgl. Abbildung 22).

Am Ende der Programmierung wurde dann das Anforderungsprofil mit der Programmierung verglichen und es konnte so festgestellt werden, dass alle Anforderungen erfüllt wurden.

5.3 FMOD

FMOD ist eine Middleware Software Lösung, die auf einem ähnlichen Konzept aufbaut wie eine DAW. Dabei gliedert sich *FMOD* in drei verschiedene Technologien:

- *FMOD Studio*: Eine Software zum Erstellen, Mischen und Bearbeiten von Audio Dateien.
- *FMOD Studio* run-time API: Die Anwendungsschnittstelle, die mit *FMOD Studio* kommuniziert.
- *FMOD Studio* low-level API: Eine weitere Anwendungsschnittstelle als Stand-Alone Software.

In diesem Kapitel wird dabei nur die Umsetzung in *FMOD Studio* erläutert und nicht auf die Anwendungsschnittstellen eingegangen (FMOD, 2019).

5.3.1 Vorgehensweise in FMOD Studio

Als erstes wurde in *FMOD Studio* ein 3D-Event mit dem Namen *engine* erstellt, in dem die ganzen Sounds abgerufen werden sollen. *FMOD Studio* arbeitet objektbasiert. Das heißt, dass bestimmte Parameter (Zeit, Entfernung, eigene Parameter) Audiodateien starten oder stoppen. Aus diesem Grund wurden zuerst die Parameter definiert, die den Sound steuern sollen. Dabei wurde überlegt, dass die in Kapitel 5.1 angesprochenen Fahrsituationen als Auslöser für verschiedene Sounds herhalten könnten. Dieser Gedanke wurde aber verworfen, da *FMOD Studio* auf einzelnen Audiodateien basiert. Somit müsste bei jeder Änderung des Sounds die Audiodatei neu hineingeladen werden. Die Software erzeugt zwar den Sound dynamisch anhand der Parameter, ist aber bei weitem nicht so flexibel wie eine DAW. Deshalb wurden andere Parameter eingeführt:

1. Die Drehzahl von 0 bis 5000.
2. Die Motorlast von 0 bis 1.



Abbildung 17: FMOD Studio *engine* Ansicht ohne Audiodateien

Die Drehzahl beschreibt dabei die Umdrehungen pro Minute des Motors, und die Motorlast die verrichtete Arbeit. Zusätzlich wurden zwei weitere 3D-Events mit dem Namen *engine-start* und *engine-stop* erstellt, die den im Anforderungsprofil geforderten Start beziehungsweise Stopp Sound abspielen. Im 3D-event *engine* wurde dann eine Audio Spur erstellt, auf der die Sounds liegen (vgl. Abbildung 17) *FMOD Studio* bietet hier die Möglichkeit, verschiedene Audio-Events auf eine Spur zu legen, was die Automation von Effekten vereinfacht. Um die Automationsdaten schon vor der Implementierung der Audiodateien einzutragen, wurden die gewonnenen Daten aus Kapitel 4.1.4 verwendet:

- Der tonale Anteil im Signal steigt mit der Drehzahl in der Tonhöhe.
- Der Rauschanteil steigt mit Höhe der Drehzahl an.
- Das Leerlaufgeräusch hat kaum bis keine tonalen Signalanteile.

Der Ausgangspunkt aller Automationen war dabei eine Drehzahl von 1000, bei der das Leerlaufgeräusch abgespielt werden sollte. Unterhalb einer Drehzahl von 1000 sollte dabei der Sound tiefer werden und oberhalb von 1000 in der Tonhöhe ansteigen. Dies wurde mit einem automatisierten Pitch-Shifter realisiert, der den Sound zwischen 1000 und 0 Umdrehungen pro Minute um 20 % nach unten und zwischen 1000 und 5000 um 6 % nach oben pitcht.

Um die Lautstärke des Rauschanteils bei steigender Drehzahl zu erhöhen, wurde eine zweite Audiospur erstellt, auf der weißes Rauschen liegt. Dieses kann dynamisch mit einer Lautstärke-Automation geregelt werden. Zusätzlich wurde das Rauschen mit

einem Equalizer stark in seinem Frequenzgang beschnitten. Der Equalizer öffnet sich in den Höhen, sobald die Drehzahl zunimmt. Die Motorlast wird über einen einfachen Equalizer simuliert, der das Signal bei hoher Motorlast in den Tiefen anhebt. Zusätzlich zu diesen Automationskurven wird noch die Verzerrung automatisiert. Dabei steigt die Verzerrung proportional zur Drehzahl an, um die *Rauheit* des Sounds zu verstärken.

Zusammengefasst sind folgende Merkmale des Sounds von der Drehzahl abhängig:

- Die Tonhöhe
- Der Rauschanteil
- Die *Schärfe*
- Die *Rauheit*
- Die Lautstärke

Folgende Merkmale sind von der Motorlast abhängig:

- Die Tiefen

Um den Sound zu beeinflussen, muss *FMOD Studio* und die dazugehörigen Soundevents entweder in eine Spiele-Engine implementiert werden oder über den Parameter-Regler in der Software gesteuert werden. *FMOD Studio* erlaubt dabei aber keine externen Controller Eingaben.

5.4 Vergleich der Implementierungen

Sowohl *FMOD Studio*, als auch *Max/MSP* bieten Möglichkeiten, um einen Sound interaktiv zu gestalten. Dabei bringen beide Programme Vor- und Nachteile in ihrer Arbeitsweise mit sich, die in diesem Kapitel geklärt werden sollen.

Max/MSP bietet, durch die Möglichkeit seine Programmierung frei zu erstellen, keinerlei Einschränkungen in der Parameterauswahl. Auch Bedingungen, auf die eine Handlung folgt, lassen sich leicht durch verschiedene MSP Objekte realisieren. So kann die Änderung eines Parameters nicht nur eine, sondern zahlreiche andere Werte beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist die in Kapitel 5.2.1 eingeführte *virtuelle Geschwindigkeit*, die der Summe verschiedener Parameter entspricht. Die Parameter können sich auch gegenseitig beeinflussen. *FMOD Studio* kann auch Parameter

einbinden. Diese können sich aber nicht gegenseitig beeinflussen. Weiterhin ist es nicht möglich, in *FMOD Studio* if-Bedingungen zu realisieren.

Ein weiterer großer Vorteil von *Max/MSP* ist die Möglichkeit, das Programm mit externen Controllern zu steuern. So lässt sich das ganze Sounddesign interaktiv erleben. *FMOD Studio* unterstützt keine externen Controller zu Steuerung der Parameter.

Ein großer Vorteil von *FMOD Studio* gegenüber *Max/MSP* sind die integrierten Effekte. Allgemein ist der Aufbau von *FMOD Studio* sehr nahe an eine klassische DAW angelehnt, wodurch man sich schnell zurechtfindet. Auch die Automation funktioniert ähnlich wie in gängigen DAWs. *Max/MSP* ist dagegen eine grafische Entwicklungsumgebung, in die man sich erst einarbeiten muss.

Der größte Vorteil von *Max/MSP* hingegen liegt darin, dass der Sound dynamisch anhand der Parameter erzeugt wird. Es entfällt das Herausrechnen einzelner Audiospuren, da der Sound sofort mit den Parametern angepasst werden kann. *FMOD Studio* erzeugt den Sound auch dynamisch, benutzt aber im Gegensatz zu *Max/MSP* Audiodateien als Grundlage und arbeitet somit auf Basis von einzelnen Samples.

Viele der Nachteile, die *FMOD Studio* einzeln betrachtet hat, sind im Zusammenhang mit einer Spiele-Engine nicht mehr vorhanden. Dabei übernimmt *FMOD Studio* nur die Soundgenerierung anhand der Werte, die die Spiele-Engine übermittelt. In der Spiele-Engine lassen sich dann auch einfache if-Bedingungen und komplexere Programmstrukturen entwickeln. Wenn man das Anforderungsprofil aus Kapitel 5.1 betrachtet, erfüllen beide Programme die aufgelisteten Punkte. Weil *Max/MSP* aber mit externen Controllern einfach zu bedienen ist, wurden die Sounddesigns in Kapitel 7 damit umgesetzt.

6 Grundlagen Sound-Synthese

In diesem Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten der Sound-Synthese besprochen. Hierzu wird zuerst auf verschiedene Synthese Möglichkeiten eingegangen und grundlegende Begriffe erläutert. Im Anschluss wird geklärt, welche Art der Sound-Synthese für das Sounddesign eines Elektrospornwagens genutzt wurde und warum.

6.1 Additive Synthese

Die additive Synthese macht sich zu Nutze, dass jede beliebige periodische Schwingung sich aus einer Summe von Sinusschwingungen zusammensetzt (Magnus, Popp, & Sextro, 2016, S. 155). Dadurch lässt sich jede Schwingung durch Addition von beliebig vielen Sinusschwingungen erzeugen (Friedrich, 2008, S. 71-72). Die additive Synthese bietet dabei einen direkten und detaillierten Zugriff auf jede Frequenzkomponente des Klangs (Raffaseder, 2002, S. 234). Der große Nachteil dabei ist, dass für eine beliebig komplexe Schwingung eine sehr große Anzahl an Tongeneratoren benötigt werden (Friedrich, 2008, S. 72).

6.2 Subtraktive Synthese

Die subtraktive Synthese arbeitet im Gegensatz zur additiven Synthese nicht mit der Addition einzelner Sinusschwingungen, sondern mit Filtern, die bestimmte Frequenzen einer Schwingung entweder verstärken oder absenken. Dazu werden hauptsächlich besonders obertonreiche Schwingungen wie der Sägezahn oder das Rechteck benutzt (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 106-107). Dabei kommt die subtraktive Synthese mit einer kleinen Anzahl an Parametern aus und es ist deshalb einfach, den gewünschten Klang zu gestalten (Raffaseder, 2002, S. 234-235). Der Nachteil hierbei ist aber der geringe Einfluss auf das Obertonspektrum, da dieser immer von der Grundwelle abhängig ist (Friedrich, 2008, S. 72). Die subtraktive Klangsynthese hat allerdings eine große Bedeutung für die elektronische Musik, da „alle analogen Synthesizer der ersten Stunde – darunter zum Beispiel der berühmte Moog-Synthesizer“ (Raffaseder, 2002, S. 235) auf diesem Prinzip basieren.

6.3 FM-Synthese

Bei der FM-Synthese wird auf die „Trägerfrequenz eine weitere Schwingung aufmoduliert“ (Friedrich, 2008, S. 72). Diese Schwingen befinden sich dabei im Gegensatz zu einem LFO im hörbaren Bereich. Durch die Frequenzmodulation entsteht im Spektrum des Klangs eine Vielzahl von neuen Obertönen. Auf diese Weise ist es möglich, mit nur zwei Oszillatoren ein komplexes Spektrum und damit einen interessanten Klang zu gestalten. Da es aber keine anschaulichen Zusammenhänge zwischen den Parametern gibt, ist das Programmieren eines Sounds mit einem großen Aufwand und Einarbeitungszeit verbunden. Diese aus der Nachrichtentechnik bekannte Frequenzmodulation wurde vor allem durch eine Reihe Synthesizer der Marke Yamaha in den 1980er Jahren bekannt. (Raffaseder, 2002, S. 236).

6.4 Wavetable-Synthese

Bei der Wavetable-Synthese werden fertige, zuvor erstellte digitale Schwingungen von einem Speicher abgerufen und dann durch additive und/oder subtraktive Nachbearbeitung verfälscht (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 106). Meistens werden so entweder 32 oder 64 Wellenformen in einer *Wavetable* zusammengefasst. Der Oszillator kann nun innerhalb dieser *Wavetable* herumspringen und so lebendige Klänge erzeugen. Diese Sprünge können, je nach Anordnung der einzelnen Wellenformen innerhalb der *Table*, fließende oder auch experimentelle, sprunghafte Klänge erzeugen (Raffaseder, 2002, S. 235).

6.5 Oszillator

Unter einem linearen oder harmonischen Oszillator versteht man in der Bauteilphysik eine elektronische Schaltung, die ohne Eingangssignal ein kontinuierliches Sinussignal mit einer konstanten Amplitude produziert (Wangenheim, 2007). Dabei kann ein Oszillator durch folgende Größen beschrieben werden:

- Die Frequenz f gibt die Geschwindigkeit an, mit der der Oszillator schwingt und beeinflusst damit direkt die wahrgenommene Tonhöhe. Die Einheit der Frequenz ist Hertz (Hz).

- Die Amplitude A bezeichnet den Ausschlag des Signals und ist für die Lautstärke verantwortlich.
- Die Phase ϕ bezeichnet den „momentanen Punkt der Oszillation auf dem Einheitskreis“ (Bartolomey & Höfert, 2018, S. 1).

Oszillatoren können aber nicht nur Sinusschwingungen erzeugen, sondern auch:

- Dreieckschwingungen
- Sägezahnschwingungen
- Rechteckschwingungen

Dabei ist die Dreieckschwingung eine dem Sinus sehr ähnliche Schwingung, enthält aber zusätzlich zum reinen Ton noch alle ungeraden Harmonischen der Grundfrequenz der Schwingung. Die Sägezahnschwingung hat im Gegensatz dazu Maxima an allen ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz und die Rechteckschwingung enthält alle ungeraden Vielfachen der Grundfrequenz (Bartolomey & Höfert, 2018, S. 1-3).

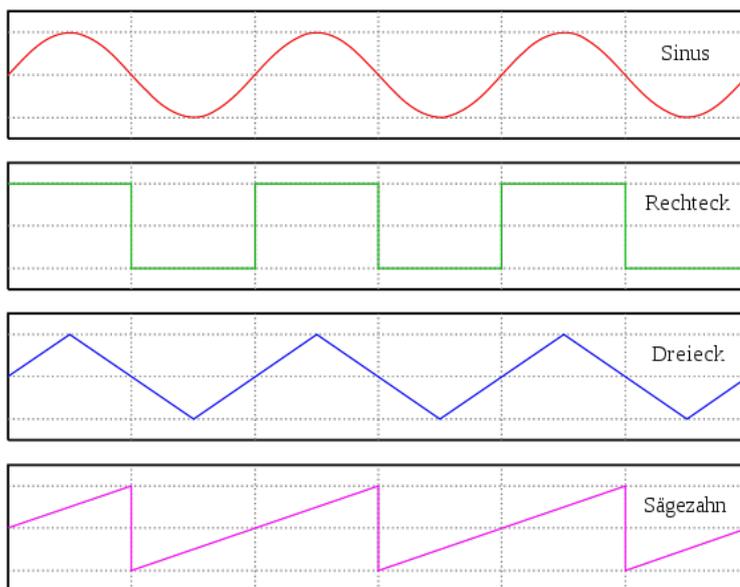


Abbildung 18: Gegenüberstellung elementarer Schwingungsformen (Wikipedia, 2008)

6.6 LFO

Ein LFO (Low-Frequency-Oscillator) moduliert das Signal meist mit einer Schwingung zwischen 20 und 50 Hz. Dabei kann eine Vielzahl von Parametern wie die Amplitude, die Frequenz oder ein Filter moduliert werden. Falls die Frequenz des LFOs dabei im hörbaren Bereich liegt, tritt ein Effekt wie bei einer FM-Modulation auf. Das heißt, dem

Signal werden unerwünschte Nebenfrequenzen beigemischt (Bartolomey & Höfert, 2018, S. 8-9). Moduliert man einen Oszillator entsteht ein Vibrato. Bei der Modulation der Amplitude entsteht ein Tremolo (Friedrich, 2008, S. 76).

6.7 Filter

Der Begriff „Filter“ beschreibt in der Tontechnik ein System, welches zur Anhebung und Absenkung bestimmter Frequenzen dient. Dabei kann zwischen

- Tiefpass-,
- Hochpass-,
- Bandpass-,
- Bandsperr-,

Filtern unterschieden werden (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 683). Je nach Filtertyp übernimmt dieser verschiedene Funktionen. Der Tiefpass-Filter lässt nur tiefe Frequenzen und ein Hochpass-Filter nur hohe Frequenzen passieren. Der Bandpass-Filter ist eine Reihenschaltung eines Tiefpass- und eines Hochpass-Filters und der Bandsperr-Filter eine Parallelschaltung eines Hochpass- und eines Tiefpass-Filters. Jeder Filter besitzt eine Grenzfrequenz und eine Flankensteilheit als Parameter. (Friedrich, 2008, S. 265).

6.8 Verstärker

Der Verstärker beeinflusst den Pegelverlauf des Schallsignals. Dabei verändert er nicht nur die Lautstärke des Klangs, sondern auch den Gesamtcharakter. Wird beispielsweise ein Rauschsignal langsam verstärkt und dann wieder abgesenkt, erinnert das entstehende Geräusch an ein Meeresrauschen. Wird die Lautstärke bei demselben Rauschsignal sehr schnell von maximal auf minimal geändert, entsteht ein Signal, das wie eine Snare-Drum klingt (Raffaseder, 2002, S. 228).

6.9 Hüllkurve

Bei der Hüllkurven-Modulation werden einzelne Segmente des Signals in *Attack*, *Decay*, *Sustain*, *Release* (*ADSR*) unterteilt. Dabei beschreibt *Attack* die Zeit, die ein Signal

braucht, um auf seine maximale Amplitude anzuschwellen. *Decay* bezeichnet man als die Dauer, die das Signal braucht, um auf seinen *Sustain*-Wert zurückzufallen. *Sustain* wird nicht mit der Zeit beschrieben, sondern mit der Amplitudenhöhe und *Release* ist die Zeit, die das Signal braucht, um abzuklingen. Auslöser der Hüllkurve ist dabei oft ein Gatesignal, dass bei einer MIDI-Note dem Tastendruck entspricht und bei einem Audiosignal oft ein Transient ist (Raffaseder, 2002, S. 232).

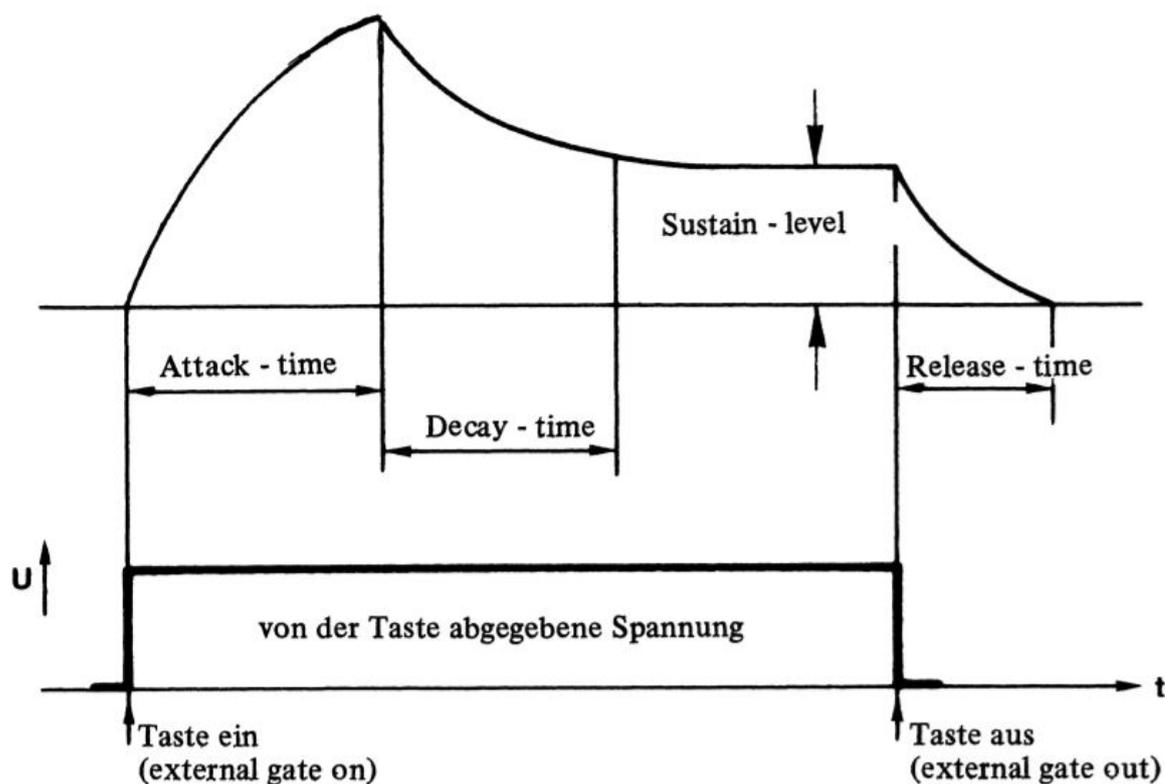


Abbildung 19: ADSR-Hüllkurve (Dickreiter, Dittel, Hoeg, & Wöhr, 2014, S. 111).

7 Sounddesign

In diesem Kapitel wird Stück für Stück ein Sounddesign mit Hilfe des Synthesizers *Massive* von Native Instruments erstellt. Dazu wird zuerst in einer Anforderungsanalyse geklärt, wie das Sounddesign klingen soll. Um dieses Anforderungsprofil dann umzusetzen, wird ein Synthesizer programmiert, der mit Hilfe von *Max/MSP* gesteuert wird. Am Schluss werden die Anforderungen mit dem erstellten Sounddesign verglichen, um zu überprüfen ob das Sounddesign ähnlich einem Verbrennungsmotor klingt.

7.1 Anforderungen an das Sounddesign

Um zu überprüfen, ob das Sounddesign ähnlich wie ein Verbrennungsmotor klingt, wurden folgende Punkte definiert. Dabei wurden die Spektrogramme aus Kapitel 4.1.4 zu Rate gezogen:

- Im Leerlauf finden sich kaum tonale Anteile wieder.
- Während der Beschleunigung nehmen die tonalen Anteile in der Frequenz sowie in der Lautstärke zu.
- Der Klang wird mit steigender Geschwindigkeit lauter.
- Die tonalen Anteile bestehen überwiegend aus Sinusschwingungen.
- Das Rauschen nimmt während der Beschleunigung stetig zu.
- Die Gangschaltung wird vernachlässigt:
 - Somit wird ein Zyklus einer Beschleunigung betrachtet.
 - Und daraus folgend das Abbremsen.
- Die Schärfe und Rauheit des Klangs nehmen bei der Beschleunigung zu.
- Die tonalen Anteile des Signals liefern Rückschluss über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

Zusätzlich gelten für das Sounddesign eines Elektromotors folgende Kriterien:

- Das Geräusch darf höchstens geringe Ähnlichkeit zu einem Verbrennungsmotor haben.

- Es muss trotzdem die gleichen Informationen vermitteln wie der Sound eines Verbrennungsmotors.
- Es muss besser wahrnehmbar sein als ein Verbrennungsmotor.

7.2 Probleme während der Implementierung

Während der Implementierung wurde festgestellt, dass die Auflösung der MIDI Noten von 7-Bit unerwünschte Effekte hat. Besonders bei der Veränderung des Pitch-Werts gehen die Töne nicht fließend ineinander über, sondern springen von einem Ton zum nächsten. Diese Sprünge sind auch deutlich im Spektrogramm sichtbar. Um das Problem zumindest teilweise zu lösen, wurde ein LFO mit einer mittleren Frequenz auf den Pitchwert aufmoduliert, der diesen um einen Halbton nach oben oder unten verschiebt. Dadurch treten weniger dieser Treppen auf. Idealerweise regelt man den Pitch aber durch einen Controller mit einer besseren Auflösung. Leider versteht die Software *Massive* keine 14-bit MIDI Werte. Es wurde deswegen versucht, nach der Aufnahme die Werte zu interpolieren, um das Ergebnis fließender zu gestalten.

7.3 Native Instrument Massive

Die Funktionsweise des Synthesizers, der zur Klanggestaltung genutzt wurde, wird hier kurz erläutert. *Massive* ist ein *Wavetable* Synthesizer der Firma Native Instruments. Er bietet drei Oszillatoren, einen Modulationsoszillator, einen Rauschgenerator, zwei verschiedene Filter sowie Möglichkeiten integrierte Effekte einzubinden. Das Routing ist frei wählbar und jeder Parameter kann mit LFOs oder Hüllkurven moduliert werden. Jeder der drei Oszillatoren besitzt die Regler:

- *Wt-Position*, für die Wavetable Position.
- *Intensity*, mit 3 verschiedenen Modi:
 - *Spectrum*, der Regler reduziert die höherfrequenten Obertöne in der ausgewählten Wellenform. So lässt sich aus einem Rechtecksignal ein Sinus formen.
 - *Bend* Modi, der Regler verändert die Ablesegeschwindigkeit der Wellenform.

- *Formant*, der Regler verändert die Transposition der Wellenform-Formanten.

- *Amp*, für die Ausgangslautstärke des Oszillators.

(Native Instruments, 2006, S. 38-42)



Abbildung 20: Oszillator innerhalb von *Massive*. Die farbigen Nummern und Balken sind Modulationsquellen (Zahlen), oder Bereiche (Balken). (Native Instruments, 2006, S. 10)



Abbildung 21: Screenshot *Massive*

7.4 MIDI CC Zuweisung in Max/MSP

Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, wurden die MIDI CC-Nummern von 14 bis 31 dazu benutzt, den Synthesizer *Massive* zu steuern. Bei der Zuweisung der Parameter ergaben sich dabei aber nur 11 verschiedene CC-Nummern, die benutzt wurden. Deswegen wurden nur die CC-Nummern 14 bis 24 in den Synthesizer geroutet.

Da MIDI immer die volle 7-Bit Auflösung benutzt, die Parameter aber nicht über den gesamten Wertebereich verändert werden sollen, wurde in *Max/MSP* das *scale* Objekt (vgl. Abbildung 23) verwendet. Dieses weist dem Bereich von 0-60 (Wert der in Kapitel 5.2.1 als *virtuelle Geschwindigkeit* festgelegt wurde) einen anderen Wertebereich zu. So wird zum Beispiel der Wertebereich des Pitches auf 51 bis 75 skaliert.

Die CC-Nummern wurden wie folgt zugewiesen:

- 14, 15, 21, 22 und 23 steuern die Tonhöhe des Synthesizers.
- 16 regelt die Lautstärke des Rauschens.
- 17, 18, 19 und 20 regeln die Lautstärke der Obertöne.
- 24 regelt den Höhenanteil des Rauschens.

Diese Zuweisung wird beim Start des Patchers mit Hilfe eines *loadbang* Objekts geladen. Dieses sendet beim Start einen Bang aus, der Messages triggert, die die CC-Nummern zuweisen. Zur Kontrolle wurden zwischen den Patch-Cords noch virtuelle Regler eingefügt, die ein schnelles Verändern des Sounds über den kompletten MIDI-Wertebereich ermöglichen.

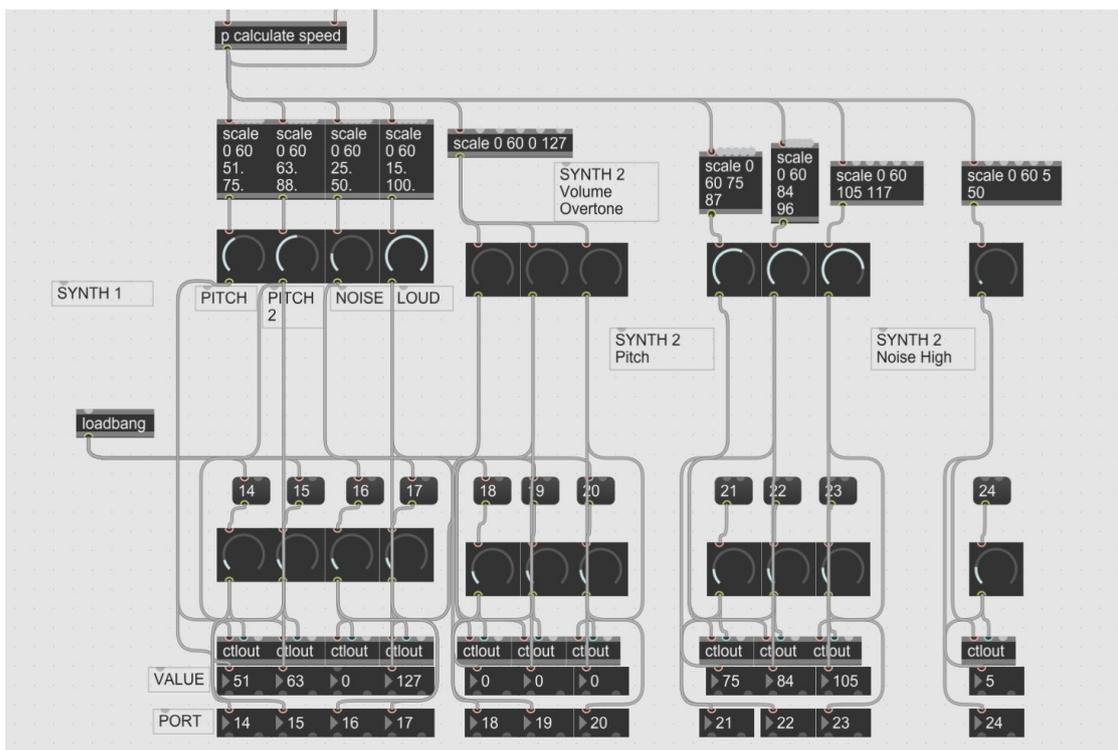


Abbildung 22: MIDI-Zuweisung innerhalb des Main-Patchers

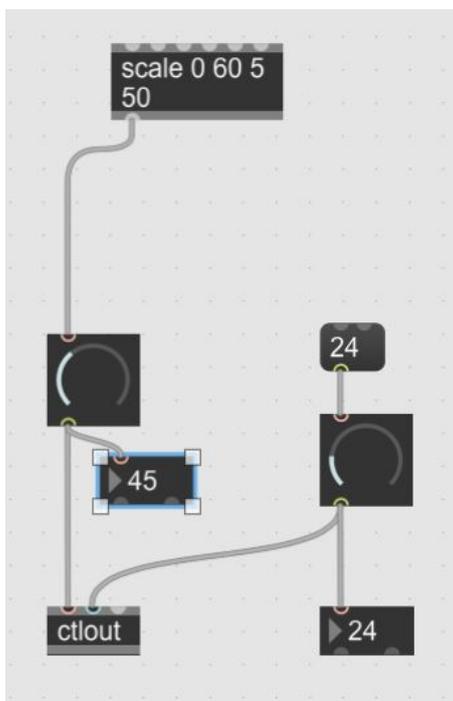


Abbildung 23: Detailansicht eines CC-Routings. Momentan wird der Wert 45 aus der CC-Nummer 24 gesendet. Die Parameter im scale Objekt bedeuten: Skaliere den Bereich 0-60 auf den Bereich 5-50.

7.5 Sounddesign eines sportlichen Verbrennungsmotors

In den folgenden Kapiteln wird das Sounddesign erläutert und analysiert. Dabei wird zuerst auf das Leerlaufgeräusch eingegangen und der erzeugte Sound beschrieben. Anschließend wird erklärt wie der Klang der Beschleunigung designt wurde, um abschließend das Sounddesign mit Hilfe eines Spektrogramms zu analysieren.

7.5.1 Das Leerlaufgeräusch

Das Leerlaufgeräusch besteht aus insgesamt 3 Oszillatoren und einem Rauschgenerator. Der erste Oszillator erzeugt dabei einen tiefen Sinuston bei ungefähr 46 Hz, der Kraft vermitteln soll. Der Oszillator ist dabei mit einem LFO in seiner Tonhöhe um einen Halbton moduliert, was ein gewisses Wummern im Tieftonbereich erzeugt und so die Illusion von Bewegung vermittelt.

Der zweite Oszillator ist für das *Knattern* des Motors zuständig und liefert die Rauheit, damit der Grundsound schön sportlich wahrgenommen wird. Der Oszillator erzeugt eine *smooth square* Wellenform, also eine Rechteckschwingung mit abgerundeten Ecken. Der *Intensity* Regler von *Massive* steuert dabei, ähnlich einem Filter, die Obertöne. Die Frequenz ist dabei so tief gewählt, dass einzelne Schwingungen wahrnehmbar sind. So entsteht bei jedem Übergang von einem Maximum zu einem Minimum ein wahrnehmbares Klick-Geräusch, das wie das *Knattern* eines Motors klingt. Der *Intensity* Regler ist hier durch einen LFO moduliert, damit das *Knattern* nicht zu regelmäßig klingt.

Der dritte Oszillator erzeugt die tonale Komponente im Signal und ist im Leerlauf nur sehr leise zu hören. Er erzeugt dabei eine Rechteckschwingung, aus der im Leerlauf die Obertöne gefiltert werden, damit eine Sinusschwingung entsteht. Mit steigender Geschwindigkeit wird der *Intensity* Regler geöffnet, um mehr Obertöne zuzulassen. Dadurch bekommt das Signal einerseits mehr tonale Komponenten und andererseits steigt durch die Änderung im Frequenzspektrum die *Schärfe*. Die Tonhöhe, die Lautstärke und der *Intensity* Regler werden dabei von *Max/MSP* gesteuert und sind abhängig von der *virtuellen Geschwindigkeit*.

Der Rauschgenerator erzeugt ein Brownsches Rauschen, das mit steigender Geschwindigkeit in seinem Frequenzspektrum moduliert wird. So kommen immer mehr hochfrequente Anteile im Signal dazu, sobald die *virtuelle Geschwindigkeit* ansteigt.

Dieses Rauschen wird durch denselben LFO moduliert wie das *Knattern* im zweiten Oszillator. Damit wird das Rauschen als Teil des Motors wahrgenommen.

7.5.2 Die Beschleunigung

Um dem Fahrer eine Rückmeldung über die Beschleunigung zu vermitteln, wird ab dem Zeitpunkt, an dem der Fahrer das Gaspedal drückt, eine zweite Instanz von *Massive* aktiviert. Deren Aufgabe ist es die tonalen Komponenten des Beschleunigungsgeräuschs zu erzeugen.

Dazu erzeugen die drei Oszillatoren von *Massive* eine Rechteckschwingung, bei der der *Intensity* Regler und der die Verstärkung von der Geschwindigkeit abhängig sind. Bei steigender Geschwindigkeit öffnet sich der *Intensity* Regler und das ursprüngliche Sinussignal wird immer mehr zu einem Rechtecksignal. Dadurch kommen weitere Obertöne hinzu, die das Frequenzspektrum in den Höhen anreichern, um damit die *Schärfe* und Wahrnehmbarkeit des Klangs zu steigern.

Der Rauschgenerator der zweiten Instanz von *Massive* erzeugt weißes Rauschen, das von einem LFO in seinem Frequenzspektrum moduliert wird. Weiterhin wird das komplette Frequenzspektrum, inklusive den modulierten Frequenzanteilen, durch die Geschwindigkeit nach oben verschoben, um die Schärfe des Sounds noch deutlicher zu steigern.

Der Fahrende hat also nicht nur die tonalen Anteile des Signals, die ihm Rückmeldung über die Geschwindigkeit geben, sondern auch das Frequenzspektrum und die Lautstärke des Rauschens.

7.5.3 Analyse des Sounddesigns

Zur Analyse des Sounddesigns wurde eine „Testfahrt“ und das Leerlaufgeräusch als Audiodatei aufgenommen und davon ein Spektrogramm erstellt, um es mit den Spektrogrammen aus Kapitel 4.1.4 zu vergleichen.

Das Leerlaufgeräusch des Sounddesigns hat, ähnlich wie das Leerlaufgeräusch in Abbildung 4: Spektrogramm der Beschleunigung (links) im Vergleich mit dem Leerlauf (rechts) im Bereich von 40 bis 100 Hz, die meiste Energie im Bereich zwischen 0 und 100 Hz. Allgemein sind wenig tonale Komponenten enthalten und im Mittenbereich ist das

Knattern des Motors zwischen 200 und 500 Hz gut sichtbar. Das Sounddesign wirkt, wie das Leerlaufgeräusch aus Kapitel 234.1.4 wenig *scharf*, durch sein tiefenlastiges Fundament aber kraftvoll und sportlich. Im Gegensatz zum aufgenommenen Leerlaufgeräusch, ist das Frequenzspektrum tiefer. Wohingegen das im Kapitel 4.1.4 diskutierte Leerlaufgeräusch noch deutliche Rauschanteile oberhalb von 1 kHz hat, finden sich im Leerlaufgeräusch des Sounddesigns keine Signalanteile oberhalb von 1 kHz (vgl. Abbildung 24).

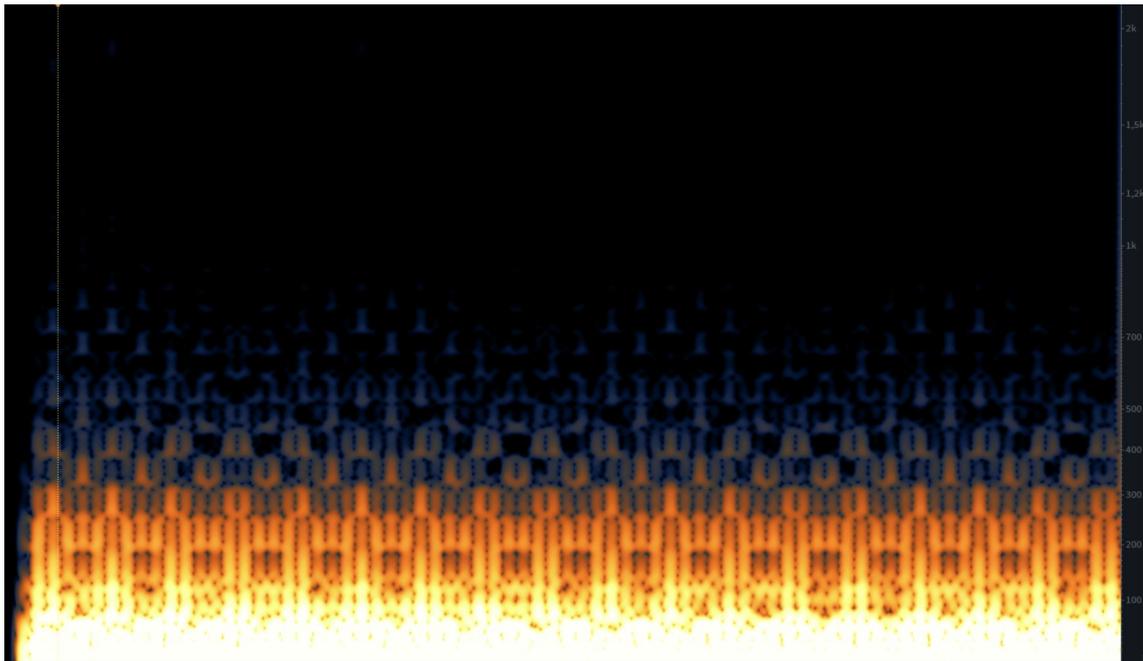


Abbildung 24: Spektrogramm des Leerlauf-Geräuschs im Bereich 0 bis 2 kHz

Das erste das bei Betrachtung des Spektrogramms der „Testfahrt“ auffällt, ist der treppenartige Anstieg der Beschleunigung. Dies ist auf die im Kapitel 7.2 beschriebenen Probleme der Implementierung zurückzuführen. Die 7-Bit Auflösung der MIDI CC-Nummern reicht nicht aus, um einen glatten Anstieg der Tonhöhe zu erreichen. Als zweites fällt der Anstieg der Kurven auf. Im Gegensatz zu Spektrogramm aus Kapitel 4.1.4, in dem der Anstieg der Tonhöhe logarithmisch ist, steigen die Töne im Sounddesign linear an. Dies ist auf den Controller, der benutzt wurde, um das Sounddesign zu steuern, zurückzuführen. Dieser gibt lineare Werte aus. Da ein Verbrennungsmotor am oberen Ende seines Leistungsspektrums nicht so stark beschleunigt, fällt dort die Kurve zum Ende der Beschleunigung hin ab. Im Sounddesign steigt sie dagegen linear an bis der maximale Wert erreicht ist.

Ansonsten kann der Verlauf der Kurven als ähnlich beschrieben werden. Mit steigender Beschleunigung nimmt zu Anzahl an Obertönen zu. Weiterhin erhöht sich die *Schärfe* durch die steigenden Rauschanteile im Signal (vgl. Abbildung 25).

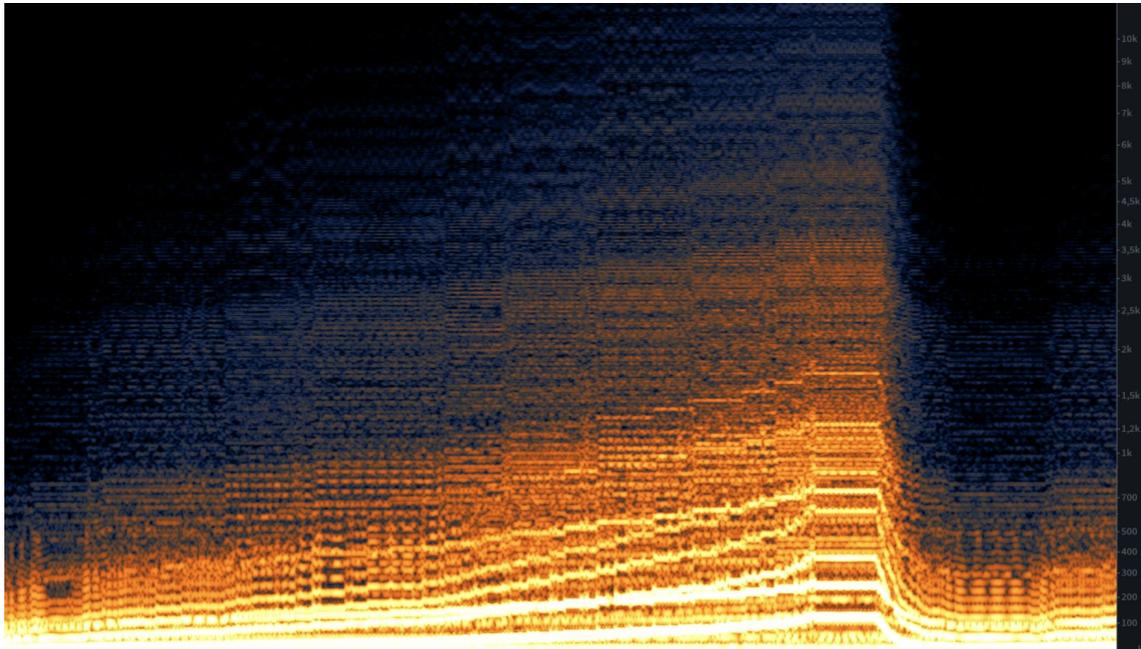


Abbildung 25: Spektrogramm einer "Testfahrt" im Bereich 0 bis 10 kHz

7.6 Sounddesign eines sportlichen Elektroautos

Im den folgenden Kapiteln wird das Sounddesign erläutert und analysiert. Dabei wird zuerst auf das Leerlaufgeräusch eingegangen und der erzeugte Sound beschrieben. Anschließend wird erklärt wie der Klang der Beschleunigung designt wurde, um abschließend das Sounddesign mit Hilfe eines Spektrogramms zu analysieren.

7.6.1 Leerlaufgeräusch

Das Leerlaufgeräusch besteht aus drei Oszillatoren, deren Verstärker von einem LFO in der Lautstärke moduliert werden. Dabei ist die Frequenz des LFOs abhängig von der *virtuellen Geschwindigkeit*. Steigt diese an, so wird auch die Frequenz des LFOs höher.

Der erste Oszillator generiert ein sehr obertonreiches Rechtecksignal bei ungefähr 60 Hz, das vom *Intensity* Regler schwach in den Höhen beschnitten wird. Durch die Lautstärk modulation entsteht hier ein in der Amplitude schwankender Ton, der durch sein Spektrum sehr gut wahrnehmbar ist. Besonders durch die Obertöne im Bereich

zwischen 2 und 4 kHz, der Bereich, in dem das menschliche Gehör sehr empfindlich ist (vgl. Abbildung 2), können Passanten so den Sound deutlich wahrnehmen.

Der zweite Oszillator wird in seiner Lautstärke vom selben LFO moduliert wie der erste Oszillator. Dabei liefert er aber einen tieferen, weniger *rauen* Ton als der Erste. Das hat den Zweck einen Eindruck von Kraft zu vermitteln und die *Schärfe* des Klangs zu reduzieren.

Der dritte Oszillator ist für das Fundament des Klangs zuständig. Dafür erzeugt er eine tiefe, sinusähnliche Schwingung um 40 Hz. Diese wird nicht in der Lautstärke moduliert.

Im Leerlaufgeräusch wird hier auch der Modulationsoszillator von *Massive* genutzt, der den ersten Oszillator in seiner Phase moduliert. Die Frequenz der Modulation ist dabei abhängig von der *virtuellen Geschwindigkeit*.

7.6.2 Die Beschleunigung

Für die Beschleunigung wurde auch hier eine weitere Instanz des Synthesizers *Massive* erstellt, die tonale Anteile im Signal erzeugt. Dazu wird, eine der Rechteckschwingung ähnliche Schwingung, die *formant square* in ihrer Tonhöhe moduliert. Die Tonhöhe ist dabei abhängig von der *virtuellen Geschwindigkeit*.

Da dieser Oszillator schon eine hohe *Schärfe* und *Rauheit* besitzt, wurde davon abgesehen dem Klang noch Rauschen hinzuzufügen.

Um dem, durch die Auflösung bedingten, Treppeneffekt entgegenzuwirken, wurde noch ein Delay Effekt mit 50% Effektsignalanteil und einer kurzen Verzögerungszeit in *Massive* geladen.

Durch die Modulation des Modulationsoszillators und der Tonhöhe entsteht so ein sehr obertonreiches Signal, das gut wahrnehmbar ist.

7.6.3 Analyse des Sounddesigns

Zur Analyse des Sounddesigns wurde eine „Testfahrt“ und das Leerlaufgeräusch als Audiodatei aufgenommen und davon ein Spektrogramm erstellt. Dabei wird untersucht, ob das Ziel dieses Sounddesigns, einen sportlichen Klang zu erstellen, der sehr gut vom Menschen wahrgenommen werden kann, erfüllt wurde.

Im Spektrogramm (vgl. Abbildung 26) ist deutlich zu erkennen, dass der Sound im Frequenzbereich zwischen 2 und 4 kHz deutliche Signalanteile hat. Dadurch ist das Elektrofahrzeug auch schon im Leerlauf und bei niedrigen Geschwindigkeiten gut von Passanten wahrnehmbar. Diese Frequenzen werden bei der Beschleunigung noch weiter verstärkt.

Die tonalen Anteile sind erst bei der Beschleunigung zu hören und steigen dabei nicht so stark an wie die eines Verbrennungsmotors, sind aber trotzdem deutlich wahrnehmbar.

Durch die Lautstärkemonulationen in den Oszillatoren, die mit steigender Geschwindigkeit ihre Frequenz erhöhen, steigt die *Rauheit* deutlich an.

Um zu überprüfen ob das Sounddesign auch sportlich wahrgenommen wird, werden im nächsten Kapitel Hörversuche durchgeführt.

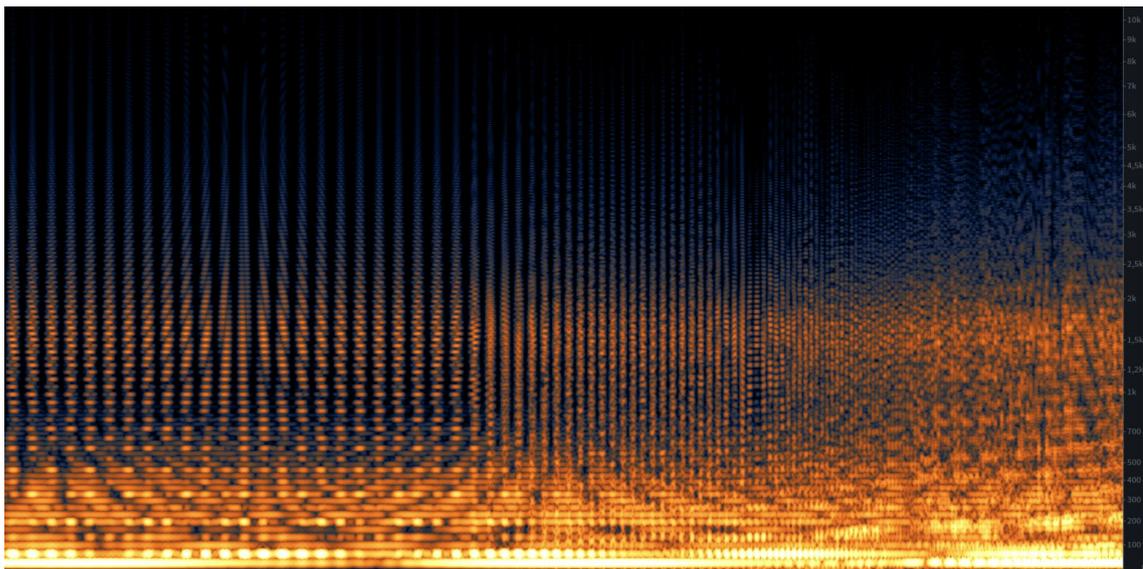


Abbildung 26: Spektrogramm einer "Testfahrt" im Bereich zwischen 0 und 10 kHz

8 Hörversuche mit Probanden

Um die Wirkung des Sounddesign zu testen, wurde ein kurzer Hörversuch mit Probanden durchgeführt. Dieser sollte zeigen, ob der erzeugte Klang realistisch ist und ob er sich sportlich anfühlt. Dabei saßen die Teilnehmer auf einem Stuhl und hatten ein Gas- und ein Bremspedal, sowie einen Start/Stop Knopf vor sich.

Die Aufgabe der Teilnehmer war es, das Fahrzeug zu starten und die Beschleunigung zu erhöhen oder zu verringern. Damit sollte eine Autofahrt simuliert werden. Die Probanden hatten keinen Blick auf den Computer-Monitor, auf dem das Sounddesign lief. Nachdem die Teilnehmer sich mit den Controllern vertraut gemacht hatten, bekamen sie zwei Aufgaben gestellt.

1. Sie sollten einmal vom Leerlauf in die Vollast beschleunigen und anschließend wieder in den Leerlauf zurückkehren.
2. Die Teilnehmer bekamen eine Aufnahme des Sounddesigns vorgespielt und sie sollten anhand dieser die *virtuelle Geschwindigkeit* des Fahrzeugs einschätzen.

Im Anschluss wurde noch ein kurzes unstrukturiertes Interview mit den Teilnehmern durchgeführt, um ihre Eindrücke und Anmerkungen festzuhalten.

Insgesamt wurde der Hörversuch mit 3 Probanden durchgeführt:

1. Männlich, 24 Jahre, Optiker, fährt seit seinem 18. Lebensjahr regelmäßig Auto.
2. Weiblich, 25 Jahre, Studentin, fährt selten Auto.
3. Männlich, 24 Jahre, Ingenieur in der Automobilbranche, leidenschaftlicher Autofahrer, nimmt gelegentlich auch an Testfahrten teil.

Alle Teilnehmer kamen ohne Probleme mit den Controllern zurecht. Auffallend war, dass alle Probanden das Gaspedal deutlich schneller und stärker durchgetreten haben, als sie es bei einer normalen Autofahrt machen würden. Das kann einerseits auf den fehlenden Widerstand und den geringen Weg des Controllers zurückgeführt werden und andererseits mit dem Fehlen des visuellen Reizes zusammenhängen.

8.1 Ergebnisse des Sounddesigns eines Verbrennungsmotors

Alle Probanden merkten an, dass sie die einzelnen Sprünge innerhalb der Tonhöhe deutlich wahrgenommen haben (vgl. 7.2). Vor allem während einer langsamen

Beschleunigung seien diese deutlich hörbar gewesen und haben dadurch ein immersives Erlebnis gestört. Zusätzlich dazu fanden die Teilnehmer es merkwürdig ein Fahrzeug zu „fahren“, ohne dass es einen visuellen Reiz gibt.

Vom Leerlaufgeräusch waren alle Probanden überzeugt, dass es ein sportliches, dynamisches Gefühl vermittele. Im Interview wurden sie befragt, mit welchen Adjektiven sie das Sounddesign beschreiben würden. Folgende Umschreibungen des Sounds wurden dabei genannt: Sportlich, dynamisch, laut, knatternd, aggressiv, kräftig, basslastig, röhrend, digital.

Bei der zweiten Aufgabe, dem Einschätzen der *virtuellen Geschwindigkeit* anhand des Klangs, lagen alle drei Probanden ungefähr richtig und konnten so, nur anhand der akustischen Rückmeldung, den Fahrzeugzustand bestimmen.

8.2 Ergebnisse des Sounddesigns des Elektrofahrzeugs

Wie auch in Kapitel 8.1 erwähnt fanden es die Probanden merkwürdig ohne visuellen Reiz ein Fahrzeug zu „fahren“. Im Gegensatz dazu nahmen die Teilnehmer keinen Treppeneffekt in der Veränderung der Tonhöhe mehr wahr, was an dem verwendeten Delay-Effekt liegen kann. Da die Probanden den Versuchsaufbau aus dem ersten Test schon kannten, kamen alle sofort damit zurecht.

Die Teilnehmer hatten dabei große Probleme einzuschätzen, ob das Sounddesign sportlich klingt oder nicht. Deswegen wurde in einer zweiten Version des Sounddesigns die tonalen Komponenten deutlich verstärkt. Nach dieser Anpassung fanden alle Teilnehmer den Klang deutlich dynamischer und interessanter. Im anschließenden Interview wurde das Sounddesign mit Adjektiven beschrieben wie: futuristisch, dynamisch, interessant, aggressiv, schwebend, kühl.

Beim Einschätzen der *virtuellen Geschwindigkeit* hatten alle Probanden bei der ersten Version des Sounddesigns deutliche Probleme die Geschwindigkeit einzuschätzen. Dies verbesserte sich aber mit Version zwei, bei der sie dann wieder ungefähr richtig lagen.

Allgemein hatten alle Teilnehmer Probleme dieses ihnen nicht bekannte Geräusch mit Adjektiven zu beschreiben. Sie haben es zwar alle als fahrzeugähnlich empfunden, aber keine Verknüpfung mit einem Sportwagen hergestellt.

8.3 Anmerkung zu den Hörversuchen

In beiden Hörversuchen merkten die Probanden an, dass eine taktile Rückmeldung in Form einer Vibration fehle.

Das isolierte Motorengeräusch in Form des Sounddesigns wurde nach einiger Zeit, bei konstanter Geschwindigkeit, als nervig empfunden.

Die drei Teilnehmer kannte ich schon vor dem Test, deswegen ist nicht ausgeschlossen, dass sie mit einem grundsätzlichen Wohlwollen den Sound beurteilt haben. Um ein eindeutiges Ergebnis zu erzielen, müsste man die Hörversuche mit einer größeren Anzahl von Menschen durchführen.

9 Fazit

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es, ein interaktives Sounddesign mit einem dynamisch reagierenden Motoren sound für ein sportliches Elektrofahrzeuge zu entwickeln. Wichtig hierbei war, dass das Sounddesign dieselben Emotionen transportiert wie ein Verbrennungsmotor. Dazu wurde eine Software in *Max/MSP* entwickelt, die Eingaben eines Gas- und Bremspedals in MIDI Werte umwandelt. Diese Werte steuern dann einen Synthesizer, der interaktiv und je nach aktuellem Wert den Sound verändert. Um dem Sound dieselbe Emotionalität zu verleihen, wurden mit Hilfe eines Spektrogramms verschiedene Sportwagen auf ihren Sound untersucht. Die dabei gewonnene Erkenntnis, dass sich die Sportwagen vor allem in ihrer Tonalität unterscheiden, wurde daraufhin auf das Sounddesign angewandt. Aber auch andere psychoakustische Faktoren spielen eine Rolle bei der Wahrnehmung eines Sportwagens: Die *Rauheit*, die *Schärfe*, das Frequenzspektrum sowie die Lautstärke und die angesprochene Tonalität sind bei jedem Sportwagen unterschiedlich. Die Zusammensetzung des Sounds kann deswegen als etwas Ähnliches wie ein Fingerabdruck bezeichnet werden.

All diese Erkenntnisse wurden sich zu Nutze gemacht, um die Sounddesigns zu gestalten. So wurden die Klänge darauf ausgelegt dieselben Faktoren wie ein Verbrennungsmotor zu erfüllen. Durch die Interaktivität des Sounddesigns und in den Hörversuchen konnten außerdem noch weitere Erkenntnisse gewonnen werden. So ist der Sound zwar maßgeblich am Fahrerlebnis beteiligt, durch den Körper werden aber auch andere Schwingungen wahrgenommen, die die Emotionalität beeinflussen. Eine Verbesserung dieser Hörversuche wäre deswegen denkbar, indem man einen Low Frequency oder Subwoofer Kanal zu einem Bass-Shaker sendet, der dann in Zusammenhang mit dem Sound ein taktilen Feedback gibt.

Weiterhin wurde festgestellt, dass das Motorengeräusch ohne das Reifenabrollgeräusch schnell eintönig werden kann. Der Sound des Fahrzeugs wird also auch immer in Zusammenhang mit seiner Umgebung wahrgenommen.

Da die bisherigen Hörversuche alle mit dem Kopfhörer oder einfachen Stereolautsprechern durchgeführt wurden, wäre es interessant dieses Sounddesign in einem Fahrzeug zu testen. Auch die Platzierung der Lautsprecher innerhalb des Fahrzeugs

konnte in dieser Arbeit nicht untersucht werden und wäre ein interessantes Forschungsgebiet für die Zukunft.

Positiv auf das Sounddesign hat sich die interaktive Steuerbarkeit der Parameter gemacht, wodurch die Teilnehmer der Hörversuche ein immersives Erlebnis hatten.

In der Zukunft muss auch die Möglichkeit diskutiert werden, nach außen einen anderen Klang wie nach innen abzuspielen. Während innerhalb von Städten so durch situationsspezifische Alarmsignale eine Menge Lärm vermieden werden kann, sollte der Fahrer ein dauerhaftes akustisches Feedback zu seiner Geschwindigkeit und dem Fahrzeugzustand bekommen.

Im Vergleich zwischen *Max/MSP* und *FMOD Studio* hat *Max/MSP* eine deutlich größere Flexibilität in der Anwendung. Das Programm eignet sich nämlich nicht nur zum Steuern von externen Synthesizern, sondern kann auch selbst Schwingungen generieren und diese dynamisch verändern oder modulieren.

Abschließend kann die Forschungsfrage beantwortet werden, indem man diese verschiedenen Erkenntnisse in einen Zusammenhang bringt: Der Mensch verbindet den Sound eines Sportwagens mit ebendiesem, weil er ihn gelernt hat. Man kann aber wesentlichen Bestandteile des Sounds extrahieren und auf ein Sounddesign anwenden, um ähnliche Ergebnisse bei Testhörern zu erzielen. Das Sounddesign muss dabei nicht unbedingt wie ein Verbrennungsmotor klingen, solange es die Kernkomponenten berücksichtigt.

10 Quellenverzeichnis

- Akustikentwicklung vor neuen Aufgaben. (11. 07 2011). *Automobiltechnische Zeitschrift*. doi:<https://doi.org/10.1365/s35148-011-0123-z>
- AUTOhebdo. (08. 08 2017). TRACK TEST NEW Porsche 911 RSR 2017 onboard AUTOhebdo [Video]. Abgerufen am 10. 02 2019 von <https://www.youtube.com/watch?v=O0tNdhmU1Qo>
- AutoTopNL. (06. 08 2016). Lamborghini Huracan POV Test Drive Acceleration FI Exhaust Sound [Video]. Abgerufen am 10. 02 2019 von <https://www.youtube.com/watch?v=PDHQNYARUAI>
- Babisch, W. (01 2011). Quantifizierung des Einflusses von Lärm auf. *Sonderdruck aus: UMID: Umwelt und Mensch – Informationsdienst*.
- Bartolomey, A., & Höfert, H. (2018). Proseminar Computer and Music--Synthesizer.
- Biermayer, W., Thomann, S., & Brandl, F. K. (2001). Zielgerichtetes Brand Sound Design mit neuen Entwicklungswerkzeugen. *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, 103, 520-530.
- Bräunl, T. (01. 11 2012). Synthetic engine noise generation for improving. Abgerufen am 06. 02 2019 von The REV Project: <http://therevproject.com/publications/uwa/J2012-IJVS-Synthetic%20engine%20noise%20generation%20for%20improving%20electric%20vehicle%20safety-Braunl.pdf>
- Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., & Wöhr, M. (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Engler, O., Hofmann, M., Mikus, R., & Hirle, T. (2015). Mercedes-Benz SLS AMG Coupé Electric Drive NVH development and sound design of an electric sports car. In M. Bargende, H.-C. Reuss, & J. Wiedemann (Hrsg.), *15. Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 1295-1309). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

- FMOD. (04. 02 2019). *FMOD Documentation*. Von FMOD:
<https://www.fmod.com/resources/documentation-studio?page=welcome-to-fmod-studio.html> abgerufen
- Friedrich, H. J. (2008). *Tontechnik für Mediengestalter: Töne hören-Technik verstehen-Medien gestalten*. Springer-Verlag.
- Friesecke, A. (2014). *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Genuit, K. (2010). *Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Springer-Verlag.
- Görne, T. (2017). *Sounddesign: Klang Wahrnehmung Emotion*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- KBA, & Aral. (03 2018). *Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2018*. Von Statista - Das Statistik Portal:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/> abgerufen
- Leppert, B. (04. 01 2010). *Autor Motor und Sport*. Von <https://www.auto-motor-und-sport.de/reise/sound-design-warum-motoren-klingen-wie-sie-klingen/> abgerufen
- Magnus, K., Popp, K., & Sextro, W. (2016). *Schwingungen: Grundlagen--Modelle--Beispiele*. Springer-Verlag.
- Maschke, C., & Fastl, H. (2016). Schallwirkungen beim Menschen. In G. Müller, & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Meyer, M. (2017). *Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter*. Springer-Verlag.
- Native Instruments. (2006). *Massive Benutzerhandbuch*. Berlin.
- Pilgerstorfer, M., Runda, K., Conter, M., Gatscha, M., Pumberger, A., Müller, A., . . . Koniszewki, D. (07 2013). *drivEkustik: Fahrverhalten in und akustische Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen*. Abgerufen am 05. 02 2019 von

- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (AT):
https://www.bmvit.gv.at/verkehr/strasse/sicherheit/fonds/vsf/downloads/27_endbericht_drivekustik.pdf
- Raffaseder, H. (2002). *Audiodesign*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Ruschmeyer, S. (2010). *Herausforderungen bei der NVH-Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Abgerufen am 07. 02 2019 von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA): http://pub.dega-akustik.de/DAGA_2010/data/articles/000327.pdf
- Schoenebeck, G. (06. 02 2018). *Ingenieur.de*. Abgerufen am 06. 02 2019 von <https://www.ingenieur.de/technik/forschung/unueberhoerbar-elektroautos-bekommen-kuenstlichen-sound/>
- Slightly Mad Studios LTD. (09 2017). Project Cars 2. 1.7.1.1. (Bandai Namco, Hrsg.) Von <https://www.projectcarsgame.com/explore/> abgerufen
- Steiner, P. (2018). *Sound Branding: Grundlagen akustischer Markenführung*. Springer-Verlag.
- Tschöke, H., & Witzel, F. (04. 09 2013). 16. Akustik von Pkw mit elektrifizierten Antrieben. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, S. 789-790.
doi:<https://doi.org/10.1007/s35146-013-0231-2>
- Wangenheim, L. (2007). *Aktive Filter und Oszillatoren: Entwurf und Schaltungstechnik mit integrierten Bausteinen*. Springer-Verlag.
- Wikipedia. (23. 01 2008). *Schwingung*. Von Wikipedia:
https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingung#/media/File:Waveforms_de.svg
abgerufen
- Zeller, P. (2018). *Handbuch Fahrzeugakustik* (Bd. 3). Springer.
doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-18520-6>