

*Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien*

---

# Active Sound Design für Elektrofahrzeuge

Klangsynthese von Elektromotorgeräuschen

*Vorgelegt am 30.11.2018*

*Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt*

*an der Hochschule der Medien in Stuttgart*

*Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell*

*zur Erlangung des akademischen Grades*

*vorgelegt von Nico Dachtler*

*„Bachelor of Engineering“*

*Matrikelnummer: 25713*



## Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Nico Dachtler, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Active Sound Design für Elektrofahrzeuge – Klangsynthese von Elektromotorge-räuschen“ 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 \_\_\_\_\_

## Abstract

Conventional internal combustion engine vehicles get accompanied by environment friendly drive concepts. With the emerging electrification of the vehicles, new task areas and focuses arise within the range of vehicle development. Such as one important acoustical source is missing for electric vehicles. The long-established sound of the combustion engine is omitted. Not only due to security aspects there is a need of a synthetic sound concept. The driver wants a dynamic feedback on the current speed. Regarding the topic of electromobility a rethinking has to occur concerning the engine sound and a new approach particularly for the subject vehicle acoustics in association with synthetic sounds, has to be found. Therefore, a completely new sound backdrop has to be designed.

The presented bachelor thesis contains a research that reveals how electric vehicles can possibly sound. On top of that, a sound concept for a electric vehicle will be introduced. Based on current research papers and psychoacoustical factors the requirements for the synthetic sound will be adjusted. At first several principles will be explained. In the process the characteristics of human hearing and the sense of perception will be outlined. Afterwards the topic psychoacoustics and its phenomena will be discussed. Furthermore, the basics of the three-phase motor and battery development will be explained. In the third chapter the term Sound Design will be classified historically and defined in general. Subsequently the topic automotive Sound Design, which is linked to the subject of perception, will be presented. Prior to the practical part in which the engine sound will be designed, a few important terms regarding the workflow with software Synthesizers will be explained. After the conclusion, an outlook in terms of future legislation will follow.

## Kurzfassung

Zu den klassischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kommen neue umweltfreundliche Antriebskonzepte hinzu. Mit der neu entstehenden Elektromobilität ergeben sich neue Aufgabebereiche und Schwerpunkte im Bereich der Fahrzeugentwicklung. So entfällt bei Elektrofahrzeugen eine wichtige akustische Quelle. Der längst etablierte Klang des Verbrennungsmotors fällt weg. Diesen Klang gilt es nicht nur aufgrund von sicherheitstechnischen Aspekten durch einen synthetischen Sound zu ersetzen. Der Fahrer möchte auch ein dynamisches Feedback zur gefahrenen Geschwindigkeit. Für das Thema Elektromobilität muss ein Umdenken hinsichtlich des Motorenklangs stattfinden und eine neue Herangehensweise speziell zum Thema Fahrzeugakustik in Verbindung mit synthetischen Sounds gefunden werden. Es muss also eine völlig neue Klangkulisse gestaltet werden. Nun stellt sich die Frage wie künftige Elektrofahrzeuge klingen sollen.

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wird untersucht wie ein Elektrofahrzeug klingen kann, außerdem wird ein eigenes Klangkonzept für ein Elektrofahrzeug vorgestellt. Anhand von aktuellen Entwicklungen und psychoakustischen Faktoren werden die Anforderungen auf den synthetischen Motorenklang angepasst. Zunächst werden einige Grundlagen vermittelt. Dabei wird auf die Besonderheiten des menschlichen Gehörs und der Wahrnehmung eingegangen. Danach werden das Thema Psychoakustik und deren Phänomene aufgearbeitet. Zudem werden die Grundlagen des Drehstrommotors erläutert, sowie Aspekte zur Akkumulatorenentwicklung geklärt. Im dritten Kapitel folgen eine geschichtliche Einordnung und Definition des Begriffs Sound Design. Anschließend wird auf das Thema Klanggestaltung im Automobilbereich eingegangen, welches wiederum im Zusammenhang mit der Wahrnehmung steht. Vor dem praktischen Teil, in dem das Klangdesign des Motors erfolgt, werden einige wichtige Begriffe, die bei der Arbeit mit Softwaresynthesizern wichtig sind, erläutert. Nach dem Fazit folgt ein Ausblick, in dem auf die kommende Gesetzgebung eingegangen wird.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	III
Abstract.....	IV
Kurzfassung.....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XI
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangspunkt der Arbeit .....	3
1.2 Zielsetzung.....	4
2 Grundlagen.....	5
2.1 Das menschliche Gehör .....	5
2.2 Wahrnehmung.....	9
2.3 Psychoakustik .....	11
2.4 Grundlagen Elektromotor.....	20
3 Sound Design.....	23
3.1 Klanggestaltung im Automotive Bereich .....	24
3.2 Klangsynthese.....	31
3.2.1 Oszillator und Filter .....	31
3.2.2 Verstärker.....	32
3.2.3 Modulation.....	32
3.2.4 Echtzeit-Steuerung .....	33
3.2.5 LFO – Low Frequency Oscillator .....	34

3.2.6	Hüllkurvengenerator (Envelope) .....	34
3.2.7	FM-Synthese.....	37
3.2.8	Granularsynthese .....	38
4	Das Klangdesign des Motors .....	40
4.1	Stand der Technik .....	40
4.2	Praktische Umsetzung .....	43
4.2.1	Konzeption des Motorensounds .....	43
4.2.2	Pro Tools Session für das Leerlaufgeräusch .....	45
4.2.3	Klangsynthese des Motorengeräusches bei Leerlauf .....	47
4.2.4	Klangsynthese des Motorengeräuschs für verschiedene Drehzahlbereiche.....	49
4.2.5	Implementierung in FMOD Studio .....	50
5	Fazit .....	54
6	Ausblick .....	55
7	Quellenverzeichnis .....	57

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Querschnitt durch das Außenohr, Mittelohr und Innenohr.....	
.....(Quelle: Ellermeier & Hellbrück 2008: 42) .....	7
Abb. 2.2 Schematische Darstellung einer Wanderwelle auf der Basilarmembran.....	
.....(Quelle: Lerch, Sessler & Wolf 2009: 193).....	8
Abb. 2.3 Shannon-Weaver Modell (Quelle: eigene Darstellung nach Görne 2017: 25).....	10
Abb. 2.4 Hörbereich des menschlichen Gehörs (Quelle: Zeller 2012: 192) .....	12
Abb. 2.5 Kurven gleicher Lautstärke nach DIN 226-2003.....	
.....(Quelle: Lerch, Sessler & Wolf 2009: 195).....	14
Abb. 2.6 Standardisiertes Hören über der 20 Hz Schwelle sowie Ergebnisse aktueller.....	
.....verschiedener Untersuchungen bei Frequenzen von und unterhalb 20 Hz.....	
.....(Quelle: Moller & Pedersen 2004).....	15
Abb. 2.7 Amplitudengänge der Bewertungsfilter (Quelle: Lerch, Sessler & Wolf 2009: 485).....	16
Abb. 2.8 Anhebung der Wahrnehmbarkeitsschwelle (Quelle: Lerch 2008: 861).....	17
Abb. 2.9 Signalformen von Klängen und Geräuschen (Quelle: Raffaseder 2010: 58).....	18
Abb. 2.10 Prinzip Drehstrommotor (Quelle: Zeitlauf Antriebstechnik) .....	22
Abb. 3.1 Wahrnehmungsmodell nach Goldstein.....	
..... (Quelle: eigene Darstellung nach Zeller 2012: 7 .....	25
Abb. 3.2 Darstellung semantischer Profile für das Innengeräusch in Limousinen und.....	
.....Sportwagen (Quelle: Zeller 2012: 9) .....	26
Abb. 3.3 Geräuschcharakterprofile auf Basis von orthogonalen Wahrnehmungsdimensionen....	
.....(Quelle: eigene Darstellung nach Zeller 2012: 9) .....	27
Abb. 3.4 Prinzip der aktiven Geräuschminderung (Quelle: Lueg 1936: 1) .....	28
Abb. 3.5 Schematischer Ablauf zur Optimierung von Fahrzeuggeräuschen.....	
.....(Quelle: Genuit & Fiebig 2011: 532).....	30
Abb. 3.6 Modulationsmatrix in Reaktor 6 (Quelle: Screenshot aus Reaktor 6) .....	33
Abb. 3.7 ADSR-Hüllkurve (Quelle: Raffaseder 2010: 65).....	35
Abb. 3.8 Hüllkurve vom Retro Synth in Logic Pro X (Quelle: Screenshot aus Logic Pro X) .....	36
Abb. 4.1 Schnittpunkt Nulldurchgang (Quelle: Screenshot aus Pro Tools) .....	46
Abb. 4.2 Modularer Synthesizer in Reaktor 6 (Quelle: Screenshot aus Reaktor 6).....	47
Abb. 4.3 Oszillator Drehzahlsample (Quelle: Screenshot aus Reaktor 6) .....	49

Abb. 4.4 Envelope und LFO Drehzahlsample (Quelle: Screenshot aus Reaktor 6.....	49
Abb. 4.5 Equalizer Motorensamples (Quelle: Screenshot aus Logic Pro X .....	50
Abb. 4.6 Autopitch FMOD Studio (Quelle: Screenshot aus FMOD Studio) .....	51
Abb. 4.7 RPM Event Fades (Quelle: Screenshot aus FMOD Studio).....	52
Abb. 4.8 Distortion Level Automation (Quelle: Screenshot aus FMOD Studio) .....	53

## Abkürzungsverzeichnis

ADSR.....	<i>Attack Decay Sustain Release</i>
ASD.....	<i>Active Sound Design</i>
AVAS.....	<i>Acoustic Vehicle Alerting System</i>
BEV.....	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BTPA.....	<i>binaurale Transferpfadanalyse</i>
BTPS.....	<i>binaurale Transferpfadsynthese</i>
DAW.....	<i>Digital Audio Workstation</i>
dB.....	<i>Dezibel</i>
dB <sub>SPL</sub> .....	<i>Dezibel Sound Pressure Level</i>
EU.....	<i>Europäische Union</i>
EV.....	<i>Electric Vehicle</i>
Hz.....	<i>Hertz</i>
JND.....	<i>just noticeable difference</i>
Kfz.....	<i>Kraftfahrzeug</i>
LFO.....	<i>Low Frequency Oscillator</i>
NVH.....	<i>Noise Vibration Harshness</i>
VCA.....	<i>Voltage Controlled Amplifier</i>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Kategorien von Höreindrücken .....	19
--	----

## 1 Einleitung

Elektrofahrzeuge (EVs) sind bei langsamem Fahrtempo sehr leise. In vielen Fällen sind sich Fußgänger, die sich in unmittelbarer Nähe eines bewegten Fahrzeugs befinden, der potentiellen Gefahr, die durch das Fahrzeug ausgeht nicht bewusst. Dies stellt ein mögliches Sicherheitsrisiko für EVs dar, besonders in Parkhäusern, Parkplätzen oder Ausfahrten<sup>1</sup>. Da sich Fußgänger an den Klang von herkömmlichen Fahrzeugen gewöhnt haben, sind sie im Straßenverkehr aufmerksam. Was passiert jedoch, wenn ein Fahrzeug nicht zu hören ist? Fußgänger wiegen sich fälschlicherweise in Sicherheit. Zwei Hauptgruppen von Fußgängern stehen unter einem erhöhten Risiko. Diese sind Kinder und sehbeeinträchtigte Menschen. Gerade Blinde und Menschen mit einer Sehbeeinträchtigung müssen sich auf hörbare Verkehrszeichen verlassen können<sup>2</sup>. Das höhere Verkehrsrisiko für Kinder und Säuglinge wurde häufig in Studien untersucht. Einer australischen Studie zur Analyse von Kraftfahrzeug bedingten Todesfällen ist zu entnehmen, dass 40% der Verkehrstoten Kinder unter sechs Jahre alt sind<sup>3</sup>. Elektrofahrzeuge, die keinen synthetisch erzeugten Sound von sich geben, könnten dieses Problem noch verschlimmern.

Vor allem in städtischen Gebieten sind die Bewohner permanent einem hohen Lärmpegel ausgesetzt, allem voran der Verkehrslärm. Der aktuelle Wandel in der Automobilindustrie und die damit einhergehende Elektrifizierung der Fahrzeuge könnte den Verkehrslärm stark beeinflussen. Momentan leben rund 55% der Weltbevölkerung in Städten. Dieser Anteil soll bis 2050 auf knapp 70% steigen<sup>4</sup>. Die Einführung der Elektromobilität könnte einige positive Veränderungen für die urbane Umwelt mit sich bringen. Neben den positiven Effekten auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz kann auch eine Steigerung der Lebensqualität hinsichtlich einer Minderung der Lärmbelastigung im urbanen Raum erreicht werden. Jedoch ist Lärm nicht immer unerwünscht. Lärm bzw. Gerä-

---

<sup>1</sup> Quinn, Mitchell & Clark 2014: 1

<sup>2</sup> vgl. Bräunl 2012: 1

<sup>3</sup> vgl. Williamson et al. 2002: 20

<sup>4</sup> UN DESA 2018

sche, die von Fahrzeugen ausgehen, arbeiten auch als Informationsträger und beschreiben damit den Beschleunigungsvorgang, den Bremsvorgang sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit<sup>5</sup>. Bisherige Studien haben gezeigt, dass das Annäherungsgeräusch von Elektrofahrzeugen nicht rechtzeitig wahrgenommen werden kann und daher zusätzliche synthetische Sounds notwendig sind<sup>6 7</sup>. Diese Auffassung vertritt auch die Europäische Union. Deshalb fordert das EU-Parlament in ihrem Gesetzesentwurf ab 1. Juli 2019 ein Warngeräuschgenerator in allen Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen. Dieser soll bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h ein Warnsignal aussenden, das sich an einem Verbrennungsmotor orientiert<sup>8</sup>. Auf den Gesetzesentwurf wird in Kapitel 6 noch näher eingegangen.

Die Eigenschaften eines synthetischen Fahrzeugsounds sollen bezüglich ihrer Wahrnehmbarkeit und Lästigkeit designt werden. Einer Studie des Umweltbundesamtes zu folge, fühlen sich 76% der deutschen Bevölkerung im Wohnumfeld durch Straßenverkehr gestört oder belästigt<sup>9</sup>. Dabei ist anzumerken, dass Lärm ein ernstzunehmender Stressfaktor ist und sich negativ auf die Gesundheit auswirkt. Somit stellt die Wahrnehmung von Lärm ein riesiges Problem dar. Hier beginnt das Sound Design: der künftige Klang von Elektrofahrzeugen wird nicht als fest vorgegeben betrachtet, vielmehr soll er als formbarer Aspekt gesehen werden. Synthetische Klänge für elektrisch betriebene Fahrzeuge sollten hinsichtlich der Wahrnehmung der Hörer, also in erster Linie der Fußgänger designt werden. Der Sound sollte mit dem Ziel eines früh wahrnehmbaren aber auch voraussehbaren Klanges entwickelt werden<sup>10</sup>. Zusätzlich ist es wünschenswert dem Fahrer selbst ein akustisches Feedback zu geben. Denn der dominante Klang des Verbrennungsmotors entfällt in einem EV komplett. Durch einen geeigneten synthetischen Motorklang wird der Fahrer nicht verunsichert und kann dadurch z.B. besser feststellen ob und wie stark das Fahrzeug beschleunigt

---

<sup>5</sup> vgl. Steinbach et al. 2017: 2

<sup>6</sup> vgl. Altinsoy & Landgraf 2014: 89

<sup>7</sup> vgl. Altinsoy 2013: 5

<sup>8</sup> vgl. Ilg 2018

<sup>9</sup> vgl. Umweltbundesamt 2018

<sup>10</sup> vgl. Steinbach et al. 2017: 2

## 1.1 Ausgangspunkt der Arbeit

Das Thema Elektromobilität steht immer häufiger im Fokus öffentlicher Diskussionen. Feinstaubalarm und Fahrverbote zur Verbesserung der Luftqualität, vor allem in der Landeshauptstadt Stuttgart, werden immer häufiger. Nicht nur deshalb gewinnt die Elektromobilität immer mehr an Bedeutung. Auch die Automobilindustrie unterliegt einem tiefen Wandel und bemüht sich mit intensiver Forschung in Richtung Elektrifizierung der Fahrzeuge. Dazu müssen völlig neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte entwickelt werden, denn in 125 Jahren Automobilentwicklung hat sich hinsichtlich der Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen deutlich zu wenig getan. Der Erfolg des gesamten Konzepts Elektromobilität hängt dabei von mehreren Faktoren ab. Zum einen muss für die Einrichtung der nötigen Infrastruktur gesorgt werden. Genauer gesagt, muss das vorhandene Stromnetz weiterentwickelt werden sowie Konzepte für den Aufbau einer Ladefrastruktur erarbeitet werden<sup>11</sup>. Da herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren das klimaschädliche Gas  $CO_2$  ausstoßen und mit einer schwindenden Ressource betrieben werden, rücken alternative Antriebskonzepte in den Vordergrund. Durch den gesellschaftlichen Konsens eines effizienteren Umgangs mit Energie bleibt ein künftiger Wechsel zu alternativen Antriebstechnologien notwendig<sup>12</sup>. Dieser Wechsel wird sich aufgrund einer unsicheren Marktsituation nur langsam bemerkbar machen. Denn bisher sind nur wenige Automobilhersteller in der Lage ein marktreifes Elektrofahrzeug anzubieten. So konnten 2009 weltweit lediglich 100.000 Fahrzeuge, die rein batteriebetrieben sind, abgesetzt werden. Betrachtet man den gesamten Markt, so machen Elektrofahrzeuge lediglich einen Anteil von 0,1% aus. Der Marktanteil von Elektrofahrzeugen hängt weiterhin auch von den vorgegebenen Grenzwerten für  $CO_2$ -Emissionen ab. Würde die Gesetzgebung die allgemeinen Weltklimaziele für den  $CO_2$ -Ausstoß (10g  $CO_2$ /km) berücksichtigen, so würde dies bereits vor 2030 zu einer Dominanz vollelektrischer Antriebstechnologien führen<sup>13</sup>.

---

<sup>11</sup> Kampker, Vallé & Schnettler: 1

<sup>12</sup> Kampker, Deutsdens & Meckelnborg: 15

<sup>13</sup> Kampker, Deutsdens & Meckelnborg: 17

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es durch Analysieren bestehender Lösungsansätze zur Erzeugung synthetischer Elektromotorenklängen einen eigenen synthetischen Motorensound zu entwickeln. Dieser soll sowohl im Innenraum, also für die Fahrzeuginsassen als auch für das Außengeräusch gleich sein. Es wird also wie bei einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor nicht zwischen Fahrgeräusch im Innenraum bzw. Außengeräusch unterschieden. Der synthetische Motorensound soll im Innenraum über Lautsprecher ausgegeben werden und nach außen hin durch spezielle Lautsprecher, die beispielsweise unter der Karosserie oder im Motorraum verbaut sind. Bei der Klangerzeugung sollen psychoakustische Faktoren berücksichtigt werden, so dass im Straßenverkehr ein frühzeitiges Erkennen des Elektrofahrzeugs sichergestellt werden kann. Des Weiteren soll der Motorensound dynamisch zur jeweiligen Motordrehzahl reagieren. Zudem werden zur Klangerzeugung nur Software Synthesizer in Verbindung mit Effekten verwendet.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die zum Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendigen Grundlagen geklärt werden. Zu Beginn wird auf den menschlichen Hörsinn sowie auf die Physiologie des Ohres eingegangen. Dann wird die menschliche Wahrnehmung näher beleuchtet. Daraufhin folgt ein Überblick auf die Psychoakustik und den damit verbundenen Phänomenen. Zuletzt wird das Prinzip des Elektromotors betrachtet.

### 2.1 Das menschliche Gehör

Die Wahrnehmung durch unser Gehör ist ein dominanter Kommunikationssinn. Die Psychologin Eleanor J. Gibson merkt an: *“We don't simply see, we look. The visual system is a motor system as well as a sensory one. When we seek information in an optic array, the head turns, the eyes turn to fixate, the lens accommodates to focus, and spectacles may be applied and even adjusted by head position for far or near looking.”*<sup>14</sup>. Während der visuelle Sinn aktive Bewegungen des Kopfes, der Augen und eine Scharfstellung der Linse erfordert und damit eine aktive muskuläre Steuerung besitzt, verfügt das Gehör über kein vergleichbares muskuläres System. Anders als unser visuelles System arbeitet das Gehör immer und ist damit omnipräsent<sup>15</sup>. Im Gegensatz zu den Augen funktioniert das Ohr motorisch passiv.

Das Gehör des Menschen ist ein hochempfindlicher Empfänger, der Schallwellen mit Frequenzen zw. 16 Hz und 20 kHz verarbeiten kann. Dieser hörbare Bereich kann je nach Alter und Gesundheitszustand erheblich eingeschränkt sein. Die Empfindlichkeitsschwelle für kleine Schalldrücke liegt im Bereich von 1 bis 6 kHz und beträgt ca.  $10^{-5} \text{N/m}^2$ . Das ist etwas mehr als das Doppelte des Schalldrucks, der allein schon durch die Brownsche Molekular-Bewegung der Luftmoleküle entsteht. Dies verdeutlicht nochmals die hohe Sensibilität des menschlichen Gehörs. Schall breitet sich in den luftgefüllten Räumen des Außenohrs, der Ohrmuschel und des Gehörgangs aus. Das Trommelfell, welches zwischen Gehörgang und dem ebenso luftgefüllten Mittelohr liegt wird durch den Schall zur Schwingung angeregt. Die Trichterform der Ohrmuschel bündelt den

---

<sup>14</sup> Eleanor J. Gibson 1988: 5

<sup>15</sup> vgl. Görne 2017: 32f.

auf den Gehörgang eintreffenden Schall und „verstärkt“ den Schall in Form einer Erhöhung der Empfindlichkeit der Schallwahrnehmung<sup>16</sup>.

Das Trommelfell-Gehörknöchelchen-System wandelt nicht nur Luftschwingungen in mechanische Schwingungen zur Anregung des Innenohrs um, sondern bewirkt zudem eine Impedanzanpassung vom luftgefüllten Außenbereich zu dem mit Flüssigkeit gefüllten Raum des Innenohrs. Die Gehörknöchelchen wirken nämlich als Hebelsystem und Impedanz-Transformator, indem sie sehr niedrige mechanische Impedanzen, die am Trommelfell anliegen in sehr hohe mechanische Impedanzen am Innenohr wandeln. Genauer gesagt werden niedrige Kräfte und hohe Auslenkungen (=niedrige Impedanz) am Trommelfell in hohe Kräfte und niedrige Auslenkungen (=hohe Impedanz) transformiert<sup>17</sup>.

Anatomisch ist das Ohr in äußeres Ohr, Mittelohr und Innenohr aufgegliedert. Das äußere Ohr besteht aus Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang. Abgesehen von den Ohrläppchen besteht die Ohrmuschel aus Knorpeln. Das in der Ohrmuschel enthaltene Muskelgewebe ist nur ansatzweise ausgebildet und kann daher nicht, wie aus der Tierwelt bekannt, zur Verbesserung der Ortung eines Schallereignisses verwendet werden. Die durchschnittliche Länge des äußeren Gehörganges beträgt bei einem erwachsenen Menschen 23 mm, wobei der Durchmesser im Schnitt von 6 bis 8 mm reicht.

---

<sup>16</sup> vgl. Lerch, Sessler & Wolf 2009: 190

<sup>17</sup> vgl. Lerch, Sessler & Wolf 2009: 191

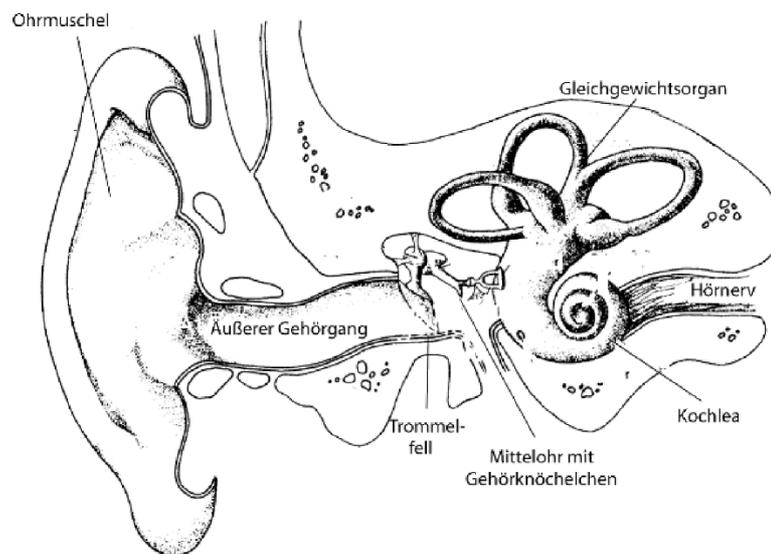


Abb. 2.1 Querschnitt durch das Außenohr, Mittelohr und Innenohr<sup>18</sup>

Zwischen äußerem Gehörgang und Mittelohr befindet sich das Trommelfell. Die Membrandicke ist mit nur 0,074 mm sehr gering, der Membrandurchmesser beträgt ca. 10 mm. Das Mittelohr wird auch als Paukenhöhle bezeichnet. Hierbei stelle man sich einen luftgefüllten Raum vor, welcher über die eustachische Röhre, oft auch Ohrtrumpete genannt, mit dem Rachenraum verbunden ist. Die drei Gehörknöchelchen im Mittelohr heißen Hammer, Amboss und Steigbügel. Sie dienen der Weiterleitung der am Trommelfell eintreffenden Schallwellen bis hin zum ovalen Fenster. Der Hammer ist ca. 9 mm lang, der Amboss etwa 7 mm und der Steigbügel 3,5 mm. Der Steigbügel ist der kleinste Knochen des menschlichen Skeletts. Die Fußplatte des Steigbügels hat eine Fläche von ungefähr 3,2 mm<sup>2</sup>. Die drei Gehörknöchelchen sind gelenkartig miteinander verbunden<sup>19</sup>.

Der Hammergriff ist fest mit dem Trommelfell verwachsen. Die durch ein Schallereignis ausgelösten Schallwellen treffen auf das Trommelfell, welches dadurch zur Schwingung angeregt wird. Die Schwingungen des Trommelfells werden über Hammer, Amboss und Steigbügel weiter zum ovalen Fenster, das mit der Fußplatte des Steigbügels verbunden ist, weitergeleitet. Die Membran des ovalen Fensters bildet einen Verschluss zwischen dem mit Flüssigkeit gefüllten Innenohr hin zum Mittelohr. Die Eustachische Röhre ist das Verbindungsstück zwischen Mittelohr und

---

<sup>18</sup> Ellermeier & Hellbrück 2008: 42

<sup>19</sup> vgl. Ellermeier & Hellbrück 2008: 42

Rachenraum und erlaubt einen Druckausgleich bei Änderungen des statischen Luftdrucks<sup>20</sup>. Solche Druckänderungen, die die Schallwahrnehmung beeinträchtigen können treten z.B. beim Sinkflug eines Flugzeugs auf, denn dabei steigt der Luftdruck in kürzester Zeit rapide an. Das Innenohr besteht aus Cochlea, die zur Schallverarbeitung und die Weitergabe an den Hörnerv zuständig ist, und das Gleichgewichtsorgan<sup>21</sup>. Druckbewegungen am ovalen Fenster des flüssigkeitsgefüllten Innenohrs bewirken Wellen. Diese Wanderwellen laufen entlang der Basilarmembran.

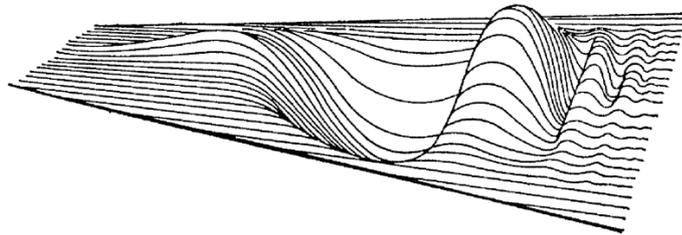


Abb. 2.2 Schematische Darstellung einer Wanderwelle auf der Basilarmembran<sup>22</sup>

Aufgrund der elastischen Eigenschaften der Basilarmembran und den damit einhergehenden Dämpfungseigenschaften entstehen an unterschiedlichen Orten der Basilarmembran Maxima der Wellen. Diese sind wiederum frequenzabhängig. Durch hohe Frequenzen ausgelöste Wanderwellen werden bereits in der Nähe des ovalen Fensters steil. Wellen tieferer Frequenzen bahnen sich ihren Weg weiter in Richtung der Schneckenspitze. Kurz nachdem die Welle ihre maximale Amplitude erreicht hat, fällt bzw. bricht die Welle abrupt ab. Die hier freigesetzte Energie wird von der Basilarmembran ausgebuchtet. Nach diesem Prinzip werden an unterschiedlichen Orten verschiedene Schallfrequenzen abgebildet. Die Dispersion der Frequenz bezeichnet man als Ortstheorie des Hörens<sup>23</sup>.

---

<sup>20</sup> vgl. Ellermeier & Hellbrück 2008: 43

<sup>21</sup> vgl. Lerch, Sessler & Wolf 2009: 191

<sup>22</sup> Lerch, Sessler & Wolf 2009: 193

<sup>23</sup> vgl. Ellermeier & Hellbrück 2008: 48

## 2.2 Wahrnehmung

R. Murray Schafer schreibt: *„When a tree crashes in the forest and knows that it is alone, it sounds like anything it wishes – a hurricane, a cuckoo, a wolf, the voice of Immanuel Kant or Charles Kingsley, the overture to Don Giovanni or a delicate air blown on a Maori nose-flute“*<sup>24</sup>. Damit meint er, solange es niemanden gibt der das Geräusch des umstürzenden Baumes hört, gibt es auch kein Geräusch, denn der Klang des fallenden Baumes ist nur ein Konstrukt unserer Wahrnehmung. In der physikalischen Realität existiert nur ein Schallfeld, also ein Chaos von statischen Luftdruckschwankungen. Die sich ausbreitenden Schallwellen interferieren dabei mit Objekten und überlagern sich mit weiteren zahllosen Schwankungen des Luftdrucks. All das wird noch überlagert vom Hintergrundrauschen der Welt. Wir hören nicht den Schalldruck oder die Kraft, die auf unsere Trommelfelle wirkt, sondern eine Interpretation des Reizes. Dieser wird in seine Einzelteile zerlegt, gruppiert und von nicht relevanten Informationen befreit. Danach wird die Ursache des Reizes geklärt und letztlich als inneres Klangobjekt mit den örtlichen Informationen des Schalls im dreidimensionalen Raum auf eine scheinbare äußere Realität projiziert. Unsere Wahrnehmung wird von Erwartungen und Erinnerungen beeinflusst. Jede bewusste Wahrnehmung ist eine Interpretation, der aus unserer Umwelt empfangenen Sinnesreize<sup>25</sup>.

Im Jahre 1948 stellte der Ingenieur und Mathematiker Dr. Claude E. Shannon an den Bell Laboratories seine Theorie der Nachrichtenübermittlung vor. Ein Jahr später zeigte der Mathematiker Warren Weaver, dass diese Theorie nicht nur mathematisch anwendbar ist, sondern sich auch auf Sozialwissenschaften, Kommunikationswissenschaften und Psychologie adaptieren lässt. Beim sogenannten Shannon-Weaver-Modell der Kommunikation, wird die Information einer Quelle in einem Sender codiert, durch einen Kanal übertragen, beim Empfänger wieder decodiert und schließlich wird die Information zum Ziel, der Senke übertragen<sup>26,27</sup>.

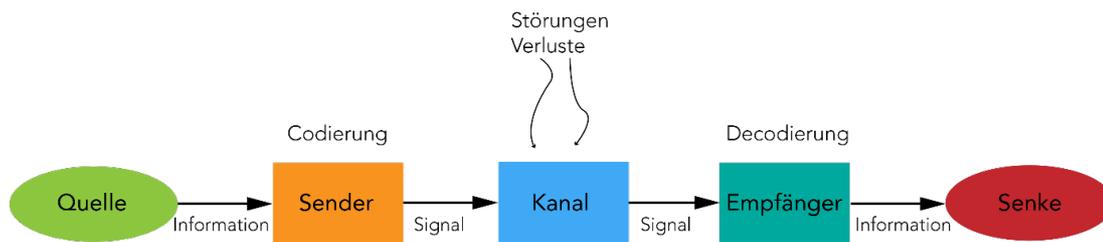
---

<sup>24</sup> Schafer 1977: 24

<sup>25</sup> vgl. Görne 2017: 23

<sup>26</sup> vgl. Shannon & Weaver 1949: 3

<sup>27</sup> vgl. Shannon & Weaver 1964: 7

Abb. 2.3 Shannon-Weaver Modell<sup>28</sup>

Im einfachsten Fall entspricht die Schallquelle dem Sender. Der Kanal entspricht dabei dem Medium Luft, in dem sich der Schall ausbreitet und der Empfänger dem Hörer. Dieses relativ simple Zusammenwirken der einzelnen Komponenten kann sich auch deutlich komplexer gestalten. So wird beispielsweise durch das Aneinanderreihen des einfachen Modells eine akustische Kommunikationskette gebildet. Diese Kette funktioniert nur dann, wenn die zu übermittelnde Information fehlerfrei und unverfälscht vom Empfänger aufgenommen werden kann. Hierbei ist es nicht unbedingt notwendig, dass alle beteiligten Teilkomponenten vollständig fehlerfrei arbeiten. Viel wichtiger ist es, dass alle beteiligten Komponenten optimal aufeinander abgestimmt werden. Lassen sich Verfälschungen im Informationsfluss, die innerhalb der Kommunikationskette entstehen an einer anderen Stelle des Systems rückgängig machen, so können diese toleriert werden. Die wesentliche Aufgabe von Sounddesign ist es, auf welchem Wege auch immer, die Information von einem Sender so gut wie möglich zu einem Empfänger zu übertragen. Je nach Anwendungsgebiet kann dabei eine Vielzahl verschiedene „Sender“ und „Empfänger“ auftreten<sup>29</sup>. Im konkreten Fall von Active Sound Design für Elektromotoren entsprechen die im Fahrzeug verbauten Lautsprecher dem Sender, der Kanal ist sowohl der luftgefüllte Raum, als auch die zur Schwingung angeregte Karosserie. Die Insassen des Fahrzeugs und die anderen Teilnehmer im Straßenverkehr entsprechen dem Empfänger.

---

<sup>28</sup> eigene Darstellung nach Görne 2017: 25

<sup>29</sup> vgl. Raffaseder 2010: 53f.

### 2.3 Psychoakustik

Die Psychoakustik untersucht die Zusammenhänge zwischen den auf das Gehör einwirkenden akustischen Ereignissen und die durch die akustischen Reize ausgelösten Empfindungen. Die Schwierigkeit liegt darin, dass im Gegensatz zu den akustischen Reizen, die allesamt durch objektive physikalische Größen wie Schalldruck, Wellenlänge und Frequenz definiert sind, sich die hervorgerufenen Empfindungen nur durch subjektive Beschreibungen verschiedener Versuchspersonen bestimmen lassen. Dabei ist die akustische Wahrnehmung von der Hörerfahrung des Probanden abhängig und unterschiedlich ausgeprägt. Bei Hörversuchen muss daher zwischen dem Urteil akustischer Laien und Experten klar differenziert werden. In der Praxis bedeutet dies, dass bei akustischen Problemen das Expertenurteil vorrangig ist. Bei Probandenversuchen zur akustischen Zielfindung sollten jedoch auch akustische Laien hinzugezogen werden. So wird sichergestellt zu realistischen Anforderungen zu gelangen<sup>30</sup>.

Luftschallwellen sind für den Menschen nur in einem gewissen Frequenzbereich wahrnehmbar. Zudem ist auch der Schalldruckpegel ausschlaggebend. Der hörbare Frequenzbereich bei einem normal hörenden Menschen liegt zwischen 16 Hz und 16 kHz. Mit zunehmendem Alter sinkt die höchstwahrnehmbare Frequenz auf 8 kHz. Zusätzlich leiden mehr als die Hälfte der über 60-jährigen an einer verminderten Hörfähigkeit im Bereich zwischen 3 kHz und 6 kHz. Bei Frequenzen unterhalb 16 Hz spricht man von Infraschall. Werden Probanden hohe Pegel aus diesem Frequenzbereich eingespielt kann es zu erheblichem Unwohlsein führen. Der Frequenzbereich oberhalb 16 kHz wird als Ultraschall bezeichnet. Besonders bei jüngeren Menschen ist es möglich, dass der Hörbereich um einige kHz in den Ultraschallbereich hineinreicht.

---

<sup>30</sup> vgl. Zeller 2012: 191

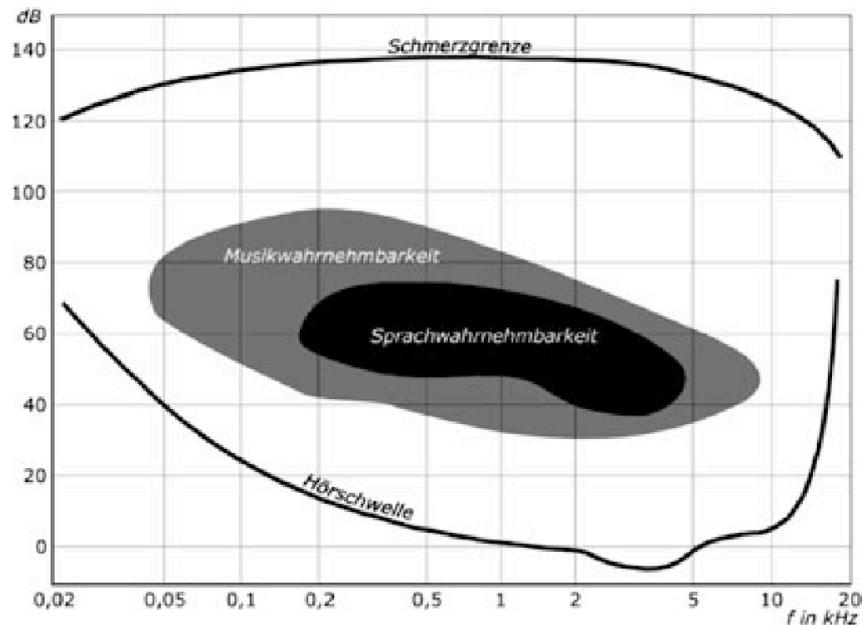


Abb. 2.4 Hörbereich des menschlichen Gehörs<sup>31</sup>

Der minimale Schalldruck, der gerade noch im Auflösungsbereich des Ohrs liegt, bezeichnet man als Hörschwelle und ist stark frequenzabhängig. Wie in Abb. 2.4 zu sehen, liegt bei ca. 4000 Hz die größte Empfindlichkeit. Hierbei liegt der Schwellwert des Schalldrucks bei  $10^{-5} \frac{N}{m^2}$  bzw. bei einem Schalldruckpegel von -3 dB. Die obere Grenze der Hörfläche bezeichnet man als Schmerzgrenze. Charakteristisch für sie ist ein Schalldruck von  $100 \frac{N}{m^2}$  bei 1000 Hz. Dies entspricht einem Schalldruckpegel von 134 dB<sup>32</sup>.

Die Schmerzgrenze, auch Schmerzschwelle genannt, bezeichnet in der Akustik die niedrigste Stärke eines Reizes, bei dem das Gehör schmerzempfindlich reagiert. Da jeder Mensch ein anderes Schmerzempfinden hat, werden in der Literatur Werte zwischen 120 dB und 140 dB als Schmerzgrenze angegeben<sup>33</sup>.

<sup>31</sup> Zeller 2012: 192

<sup>32</sup> vgl. Zeller 2012: 192

<sup>33</sup> vgl. Sengpiel

Die wahrnehmbaren Intensitäten akustischer Ereignisse decken einen sehr großen Bereich von etwa 13 bis 14 Zehnerpotenzen ab. Um zwischen den verschiedenen Schallintensitäten innerhalb dieses Bereichs differenzieren zu können, muss ein neuer Begriff eingeführt werden. Die Abweichung der Intensität zweier Signale kann durch den eben merkbaren Unterschied, welcher als JND (just noticeable difference), oder auch Abstandsempfindung der Lautstärke beschrieben werden. In verschiedenen psychoakustischen Experimenten wurden zur Bestimmung der JND Probanden eine Reihe von Sinustönen vorgeführt, diese sollten dann in ihrer Lautstärke unterschieden werden. Für einen harmonischen Ton mit 1000 Hz und einem Schallpegel von 40 dB<sub>SPL</sub> beträgt der JND ca. 0,8 dB. Dabei steigt die Unterscheidungsschwelle bei tieferen Frequenzen sowie niedrigeren Schallpegelwerten an. Allgemein kann man sagen, dass der Wert der Unterscheidungsschwelle zwischen 0,5 und 1 dB liegt. Dies bedeutet zwei Schallereignisse werden nur dann also unterschiedlich laut wahrgenommen, wenn eine Pegeldifferenz von mindestens 0,5 bis 1 dB vorliegt<sup>34</sup>.

Der Bereich zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze wird als Hörfläche bezeichnet und wird durch Linien gleicher Lautstärke (Isophonen) unterteilt. Der Phon-Wert gibt an, welchen Schalldruckpegel in dB ein Sinuston von 1000 Hz besitzt, der gleichlaut wie das zu bewertende Schallereignis empfunden wird<sup>35</sup>.

---

<sup>34</sup> vgl. Raffaseder 2010: 108

<sup>35</sup> vgl. Zeller 2012: 192

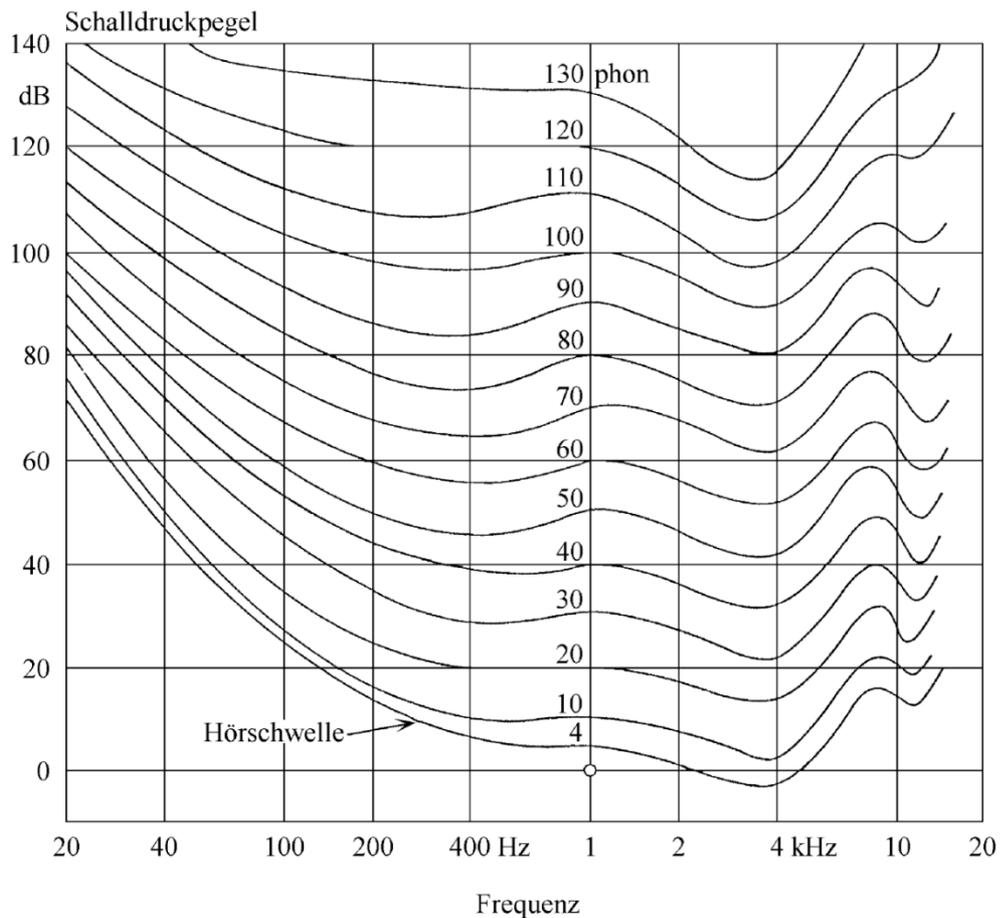


Abb. 2.5 Kurven gleicher Lautstärke nach DIN 226-2003<sup>36</sup>

Beim Messen der Lautstärke von reinen Tönen in Abhängigkeit ihrer Frequenz erhält man die in Abb. 2.5 dargestellten Kurven gleicher Lautstärke. Aus dieser geht hervor, dass das menschliche Gehör im Bereich zwischen 2 und 4 kHz am empfindlichsten ist. Bei tieferen Frequenzen unterhalb von 500 Hz nimmt die Empfindlichkeit allmählich ab, bei Frequenzen von über 10 kHz nimmt sie sehr rasch ab<sup>37</sup>. Das bedeutet, um das gleiche Lautstärkeempfinden hervorzurufen, ist es notwendig dem Gehör bei tieferen Frequenzen die Töne mit einem höheren Schalldruckpegel darzubieten als bei mittleren Frequenzen<sup>38</sup>. Es gibt zwar Belege dafür, dass auch Frequenzen im Bereich des Infraschalls gehört werden können, jedoch ist dies, wie auf Abb. 2.6 zu sehen

<sup>36</sup> Lerch, Sessler & Wolf 2009: 195

<sup>37</sup> vgl. Raffaseder 2010: 109

<sup>38</sup> vgl. Lerch, Sessler & Wolf 2009: 194f.

ist, nur bei sehr hohen Schalldruckpegeln möglich. Zudem ist in diesem Bereich die auditive Wahrnehmung nur schwer von der Wahrnehmung von Vibrationen abzugrenzen<sup>39</sup>.

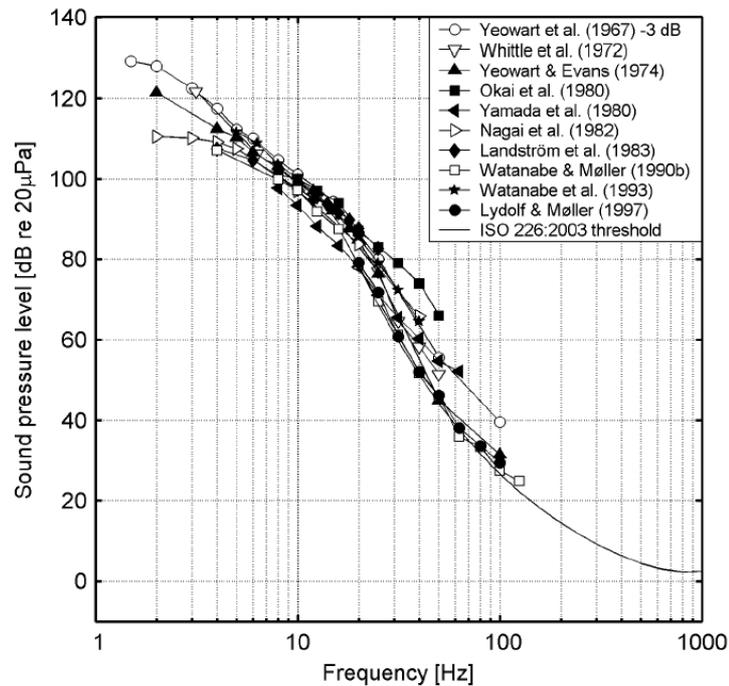


Abb. 2.6 Standardisiertes Hören über der 20 Hz Schwelle sowie Ergebnisse aktueller verschiedener Untersuchungen bei Frequenzen von und unterhalb 20 Hz<sup>40</sup>

Um der Tatsache, dass unterschiedliche Tonhöhen bei gleichem Schalldruck unterschiedlich laut wahrgenommen werden nachzukommen, benutzt man in der Messtechnik sogenannte BewertungsfILTER. Diese Filter sind nach DIN EN 61672-1 genormt und stellen näherungsweise den inversen Kurvenverlauf stark vereinfachter Isophone dar<sup>41</sup>. Die verschiedenen Frequenzbänder werden also einer Dämpfung unterzogen. Dabei entspricht die A-Bewertung dem Verlauf der Isophone im niedrigen Schallpegelbereich (20-40 Phon). Die C-Bewertung nähert sich dagegen an einen hohen Schalldruckbereich an (80-90 Phon). Die nach der frequenzbewerteten Schalldruckpegel werden in dB(A) bis dB(D) angegeben. Wobei sich die D-Bewertung speziell an die

<sup>39</sup> vgl. Møller & Pedersen 2004

<sup>40</sup> Møller & Pedersen 2004

<sup>41</sup> vgl. Ellermeier & Hellbrück 2008: 54

subjektiv empfundene Lästigkeit anpasst. In der Fahrzeugakustik wird fast ausschließlich mit der A-Bewertung gearbeitet<sup>42</sup>. Das A-Filter beinhaltet alle Frequenzen des hörbaren Bereichs. Die A-Filter Kurve stellt in guter Näherung die Umkehrung der Isophone bei 1000 Hz und einem Pegelwert von 30 dB dar<sup>43</sup>.

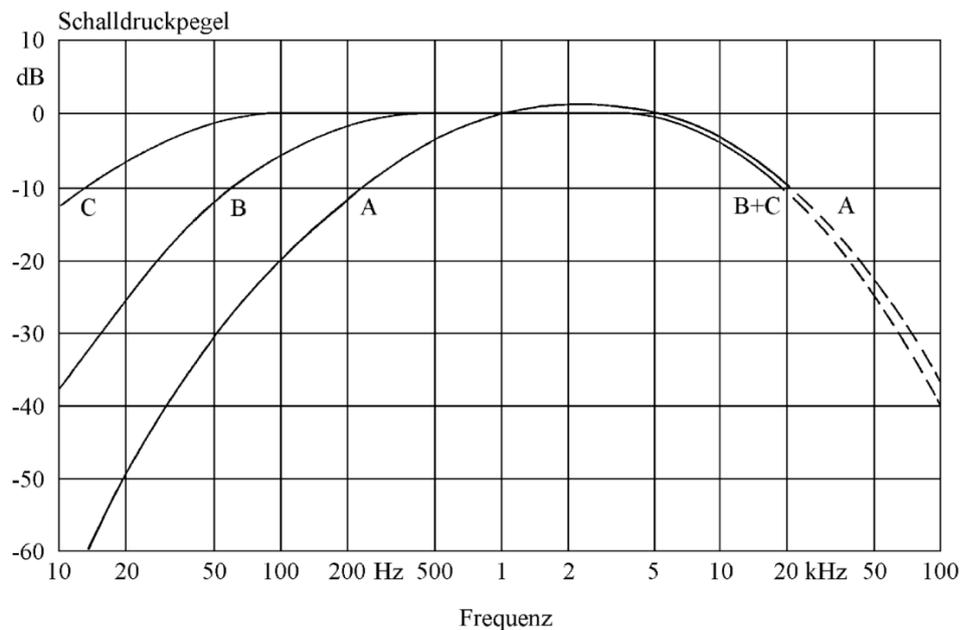


Abb. 2.7 Amplitudengänge der Bewertungsfilter<sup>44</sup>

Sobald ein zweiter Ton anwesend ist, wird die Hörschwelle für einen bestimmten Ton angehoben. Man nennt dies Mithörschwelle. Dieser Verdeckungseffekt kann messtechnisch durch Maskierungsexperimente bestimmt werden. Bei der Messung soll ein schmalbandiger Testton, gleichzeitig mit einem anderen, ebenfalls schmalbandigen Maskierungston herausgehört werden. Bei einer systematischen Veränderung der Frequenz des Testtons, erhält man ein Maskierungsmuster mit relativ steilen Flanken hin zu den niederen Frequenzen. Zu den hohen Frequenzen hin fällt der Pegel eher flach ab.

<sup>42</sup> vgl. Zeller 2012: 192

<sup>43</sup> vgl. Möser 2015: 11

<sup>44</sup> Lerch, Sessler & Wolf 2009: 485

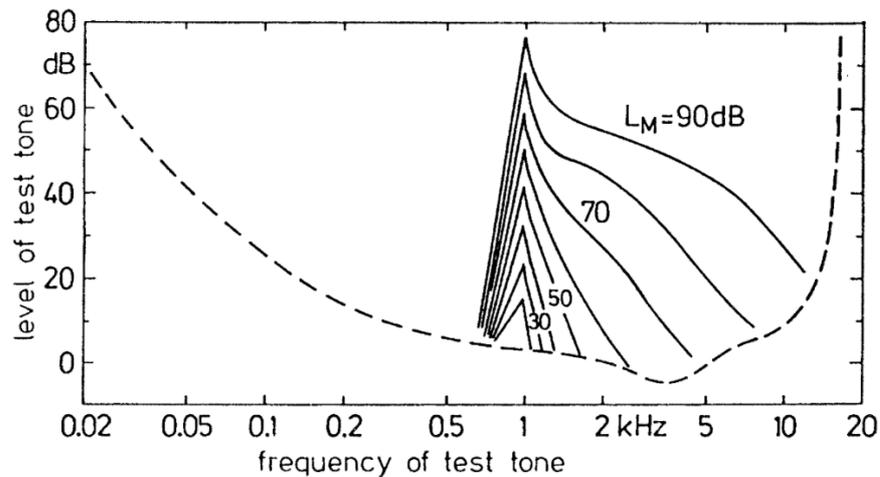


Abb. 2.8 Anhebung der Wahrnehmbarkeitsschwelle<sup>45</sup>

In Abb. 2.8 ist die Mithörschwelle in Anwesenheit eines 1 kHz Tones dargestellt. Aus dieser lässt sich ablesen, dass beispielsweise bei einem Schallpegel von 80 dB ein 2 kHz Ton von 40 dB bereits nicht mehr wahrgenommen werden kann. Man spricht dann von Maskierung. Zudem zeigt die Abbildung, dass solche Verdeckungseffekte hauptsächlich zu höheren Frequenzen hin auftreten. Dies bedeutet tiefe Frequenzen können höherfrequente Geräusche verdecken, sodass diese subjektiv nicht mehr wahrnehmbar sind. Nach dem Abschalten des Maskierers innerhalb eines Zeitraums von ca. 200 ms klingt der Verdeckungseffekt wieder ab (zeitliche Verdeckung). In der Fahrzeugakustik spielt die Verdeckung eine bedeutende Rolle, da das relativ niederfrequente Fahrgeräusch einige unerwünschte hochfrequente Störgeräusche maskieren kann. Dies bedeutet, die Störgeräusche müssen nicht unbedingt unter die Hörschwelle gedrückt werden, da es dank Verdeckung ausreicht, die unerwünschten Geräusche unter den Maskierungspegel zu legen<sup>46</sup>.

Neben der Ruhehörschwelle gibt es auch sogenannte differentielle Wahrnehmbarkeitsschwellen. Diese können als Wahrnehmbarkeitsgrenze für die Änderung einer Reizgröße verstanden werden. Es gilt: Amplitudenänderungen sind wahrnehmbar, sofern sie innerhalb einer Frequenzgruppe 1 dB überschreiten, dies entspricht einer Amplitudenänderung von 12 %. Die Schwelle für Frequenzänderungen liegt bei ca. 0,7 %, wenn die Frequenzen oberhalb von 500 Hz

<sup>45</sup> Lerch 2008: 861

<sup>46</sup> vgl. Zeller 2012: 193

liegen und bei ca. 3,6 Hz bei Frequenzen unterhalb von 500 Hz. Daraus folgt, dass das menschliche Gehör Änderungen der Frequenz deutlich feiner auflösen kann als Amplitudenveränderungen. Die empfundene Klangfarbe des Schalls steht im Zusammenhang mit dem Amplitudenspektrum. Der Phasengang spielt nur eine untergeordnete Rolle, da das menschliche Ohr im freien Schallfeld für Änderungen der Phasenbeziehung im Frequenzspektrum weitaus unempfindlich reagiert<sup>47</sup>.

Liegt kein reiner Sinuston vor, sondern ein Gemisch von Frequenzen, spricht man entweder von Klängen, komplexen Tönen oder Geräuschen. Technische und musikalische Töne sind meistens komplexe Töne. Dies bedeutet, im Spektrum sind neben der Grundfrequenz noch weitere Obertöne enthalten<sup>48</sup>. Bei näherer Betrachtung der Signalform von Geräuschen ist zu beobachten, dass diese im Gegensatz zu Klängen völlig unstrukturiert sind.

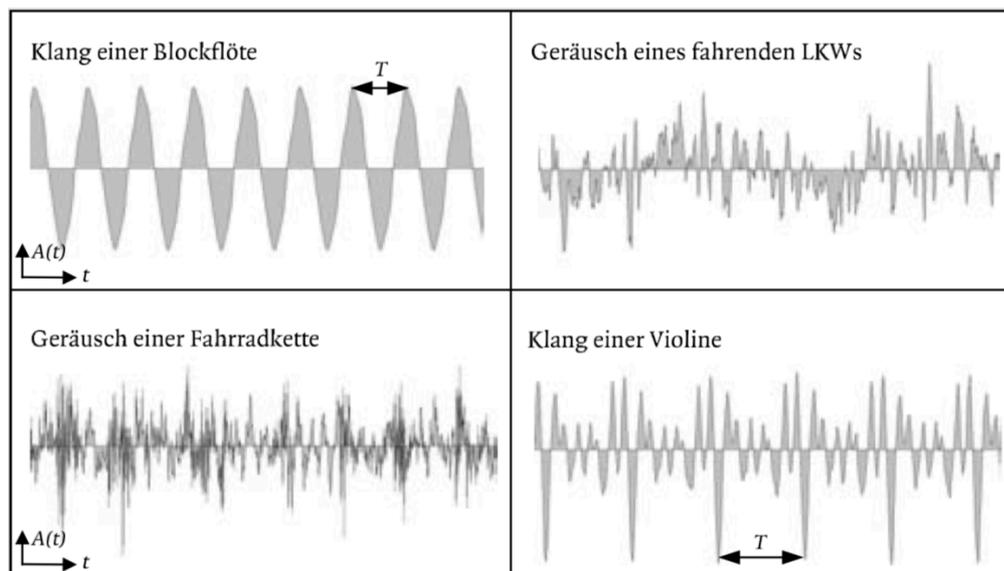


Abb. 2.9 Signalformen von Klängen und Geräuschen<sup>49</sup>

Der Klang einer Blockflöte bzw. Violine weisen in ihrem Signalverlauf gleichförmige wiederholende Abschnitte auf und sind somit periodisch<sup>50</sup>. Klänge bestehen aus verschiedenen Tönen,

<sup>47</sup> vgl. Zeller 2012: 193

<sup>48</sup> vgl. Zeller 2012: 193

<sup>49</sup> Raffaseder 2010: 58

<sup>50</sup> vgl. Raffaseder 2010: 58

deren Tonhöhen in einem bestimmten ganzzahligen Verhältnis zueinanderstehen (z.B. Oktave 1:2). Dagegen besitzen Geräusche ein kontinuierliches Spektrum, welches keinerlei Bezug zu einem Grundton aufweist<sup>51</sup>.

<b>Art</b>	<b>Spektrum</b>	<b>Charakteristik</b>
reiner Ton	eine definierte Frequenz	synthetisch
Tongemisch/Klang	mehrere diskrete Frequenzen	kein festes Frequenzverhältnis
harmonischer Klang	mehrere diskrete Frequenzen	ganzzahliges Frequenzverhältnis
Geräusch	kontinuierliches Spektrum	Rauschen, technische Geräusche
komplexer Ton	beliebige Frequenzen	Gemisch aus Tönen, Klängen und Geräuschen

Tabelle 1 Kategorien von Höreindrücken

---

<sup>51</sup> vgl. Zeller 2012: 194

## 2.4 Grundlagen Elektromotor

Im folgenden Kapitel werden nach einem kurzen geschichtlichen Einstieg in die Elektromobilität einige Grundlagen zum Thema Elektrofahrzeug und Elektromotor beschrieben.

Ende des 19. Jahrhunderts wurde das Automobil entwickelt. Zu dieser Zeit wurde neben dem Ottomotor auch bereits an Elektromotoren gearbeitet. Bereits 1882 stellte Werner Siemens seinen Kutschenwagen mit Elektroantrieb in Berlin vor. Kurze Zeit später wurde auf der Weltausstellung im Jahre 1900 in Paris mit dem „Lohner-Porsche“ ein praxistaugliches Elektroauto vorgestellt. Dieses wurde vom damals 25-jährigen Ferdinand Porsche entwickelt und besaß einen 400 kg schweren Bleiakku, mit dem das Fahrzeug mit maximal 50 km/h auf eine beachtliche Reichweite von 50 km kam. Aufgrund der höheren Reichweite der Ottomotoren, setzen sich diese bekanntermaßen erfolgreich durch<sup>52</sup>.

Ein Meilenstein der Akkumulatoren-Entwicklung war sicherlich die Erfindung des Li-Ionen-Akkus von Sony im Jahre 1991. Damit wurde der Grundstein für die in heutigen Elektrofahrzeugen verbauten Akkus gelegt. Die Firma *TESLA* setzte solche Akkus zu größeren Paketen zusammen, sodass die Kapazität und die elektrische Leistung für die Verwendung in Kraftfahrzeugen ausreichend waren. Grundsätzlich wird aus einem herkömmlichen Kraftfahrzeug ein Elektrofahrzeug, wenn der mechanische Antriebsstrang durch einen Antriebsstrang mit Elektromotor ersetzt wird. Zudem muss der Energiespeicher (beim konventionellen Kfz der Tank) durch einen Akku ersetzt werden<sup>53</sup>.

Da in dieser Arbeit die künstliche Klangerzeugung für Motorgeräusche von Elektromotoren im Vordergrund steht, betrachten wir im Folgenden nur reine Elektrofahrzeuge, welche allein mit (Akku-)Strom fahren. Der Antrieb eines sogenannten Battery Electric Vehicle (BEV) besteht aus Elektromotor, der Leistungselektronik sowie einem Akku bzw. Fahrzeugbatterie<sup>54</sup>.

---

<sup>52</sup> vgl. Karle 2018: 19

<sup>53</sup> vgl. Karle 2018: 20-22

<sup>54</sup> vgl. Karle 2018: 28

Der Elektroantrieb ist energieeffizient, hierbei weisen die in BEVs verbauten Elektromotoren Wirkungsgrade von mehr als 90 % auf, während Verbrennungsmotoren auf maximal 40 % kommen. Und dies wohlbemerkt bei sehr eingeschränkten Drehmoment-Drehzahlbereichen. Des Weiteren können Elektromotoren beim Bremsvorgang des Fahrzeugs elektronisch in einen Generatorbetrieb schalten, dies wiederum erlaubt das Laden des Akkumulators. Man bezeichnet diesen Vorgang als „Rekuperation“<sup>55</sup>.

Da der Elektromotor in Elektrofahrzeugen den in herkömmlichen Fahrzeugen verwendeten Verbrennungsmotor ersetzt, muss der Elektromotor für den Antrieb ausreichend Drehmoment in einem weiten Drehzahlbereich zu Verfügung stellen. Weiter sollte der Antrieb einen hohen Wirkungsgrad haben, ein geringes Volumen und Gewicht sowie die Möglichkeit zu Rekuperation. Wichtig ist auch eine feinfühligere Drehzahl- und Drehmomentsteuerung. Außerdem muss der Motor in verschiedenen Umgebungsbedingungen, beispielsweise hinsichtlich des Temperaturbereichs oder der mechanischen Stoßbelastung, einwandfrei funktionieren<sup>56</sup>. Als Elektromotoren haben sich Drehstrommotoren bewährt. Um das volle Leistungspotential optimal nutzen zu können, werden die Motoren mit vergleichbar hohen Spannungen, wie sie im stationären Drehstromnetz vorhanden sind, betrieben. Das heißt: Die Hochvoltbatterien liefern Spannungen in der Größenordnung von 400 V. Für den Fahrbetrieb ist es notwendig, dass der Drehstrom in seiner Frequenz und Stromstärke veränderlich ist, da über die veränderliche Spannung die Größe des Drehmoments angepasst, und über die Frequenz die Motor-Drehzahl gesteuert wird. Die Drehzahl lässt sich hierbei über einen so großen Bereich steuern, dass das Kfz ohne herkömmliches Schaltgetriebe auskommt. Es werden lediglich ein einstufiges Untersetzungsgetriebe zur Anpassung der Motordrehzahl an die Raddrehzahl, sowie ein Differentialgetriebe zur Verteilung der Antriebskraft auf die Räder benötigt. Die komplette Drehmoment-Drehzahlsteuerung erfolgt allein über das Gaspedal. Da die Li-Ionen Akkus Gleichstrom liefern und die Motoren aber Wechsel- bzw. Drehstrom benötigen, muss noch eine Umsetzung von Gleich- in Wechselstrom erfolgen. Dies geschieht durch die Leistungselektronik, welche als Umrichter oder auch Inverter bezeichnet wird<sup>57</sup>. Das Drehmoment beim Drehstrommotor entsteht durch die Anzie-

---

<sup>55</sup> vgl. Karle 2018: 23

<sup>56</sup> vgl. Karle 2018: 61

<sup>57</sup> vgl. Karle 2018: 29

hungskraft der beiden (Elektro)-Magnete in Stator und Rotor. Hierbei wird bei der Stromversorgung der Spulenwicklungen der Elektromagnete im Stator die „natürliche Rotation“ des Drehstroms ausgenutzt. Dabei werden mindestens drei Spulen im Stator  $120^\circ$  versetzt angeordnet und mit jeweils einer Phase des Drehstromnetzes versorgt. Die  $120^\circ$  Phasenverschiebung der Einzelphasen der Spulen bewirkt im Zusammenspiel mit dem Verlauf des sinusförmigen Stroms und dessen Periodendauer ein umlaufendes Magnetfeld. Der Rotor besitzt ein Gegenmagnet, welches dann dem umlaufenden Magnetfeld folgt.<sup>58</sup>

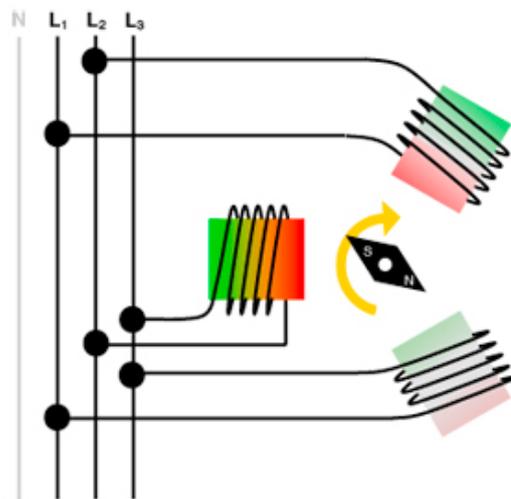


Abb. 2.10 Prinzip Drehstrommotor<sup>59</sup>

---

<sup>58</sup> vgl. Karle 2018: 63

<sup>59</sup> Zeitlauf Antriebstechnik

### 3 Sound Design

In diesem Kapitel werden zunächst einige geschichtliche Aspekte, die zur Definition und Einordnung des Begriffs Sound Design behilflich sein können, geklärt. Daraufhin wird auf die Klanggestaltung im Automotive Bereich näher eingegangen. Zuletzt wird der Begriff Klangsynthese näher beleuchtet.

Der Begriff „Sound Design“ kam in der Filmindustrie während der New Hollywood Bewegung in den späten 1970er Jahren auf. Mit Klanggestalterisch wegweisenden Filmen wie Star Wars (1977) oder Apocalypse Now (1979) und stilprägenden Tongestaltern wie Ben Burtt und Walter Murch entwickelte sich die Selbstverständlichkeit der Filmtongestaltung allmählich zur Kunst. Neben der filmhistorischen Definition kann man Sounddesign auch als angewandte Kunst betrachten, da es neben dem rein künstlerisch-intuitiven auch die rein technisch-handwerkliche Herangehensweise gibt.

Parallel zur Filmtongestaltung entwickelte sich in der Mitte des 20. Jahrhunderts, durch die technischen Fortschritte in der Tonstudioteknik, die elektronische Klangerzeugung sowie die elektroakustische Musik. Das erlaubte eine experimentelle Herangehensweise mit bereits aufgezeichneten, „fixierten“ Klängen, sowie die Gestaltung von Klanglandschaften mit Hilfe von Filter, Hall oder Equalizer<sup>60</sup>. Diese musikalisch-experimentelle Herangehensweise wird u.a. auch in dieser Arbeit zur Erzeugung möglicher Motorenklänge verwendet.

Seit den 1950er Jahren wurden vermehrt musikalische Experimente mit „fixierten“ Klängen durchgeführt. Dabei verwendet man zur Manipulation der Klänge elektroakustische Geräte, wie sie aus der Tonstudioteknik bekannt sind, als musikalische Werkzeuge<sup>61</sup>.

Sound Design ist also im Allgemeinen als das Gestalten von Geräuschen zu verstehen. Diese sollen beim Rezipienten verschiedene Höreindrücke hervorrufen. Die akustischen Signale dienen hierbei als Informationsträger und lösen beim Hören spezifische affektive, sowie kognitive Reaktionen aus. Wie schon lange aus der Musik bekannt, kann diese auf das Unterbewusstsein

---

<sup>60</sup> vgl. Görne 2017: 11

<sup>61</sup> vgl. Görne 2017: 12

wirken und bestimmte Emotionen hervorrufen. Der Informationsträger Musik lässt sich mit verschiedenen musikalischen Elementen wie Melodie, Rhythmus und Klang charakterisieren. Die erwähnte Wirkung auf das Unterbewusstsein gilt nicht nur für Musik, sondern für jeden geeigneten Sound, der neben musikalischen Elementen auch technische Geräusche umfassen kann. Die Möglichkeit durch geeignete Sounds Stimmung zu erzeugen, Emotionen zu wecken und bestimmte Botschaften zu übermitteln, nutzen nicht nur Sounddesigner aus der Filmbranche. Auch in der Automobilindustrie werden mittels geeigneter Sounds, reale Eigenschaften technischer Produkte, auf emotionaler Ebene unterstützt. So soll z.B. das tresorhafte Türschlageräusch die Solidität des Kraftfahrzeugs untermauern<sup>62</sup>.

### 3.1 Klanggestaltung im Automotive Bereich

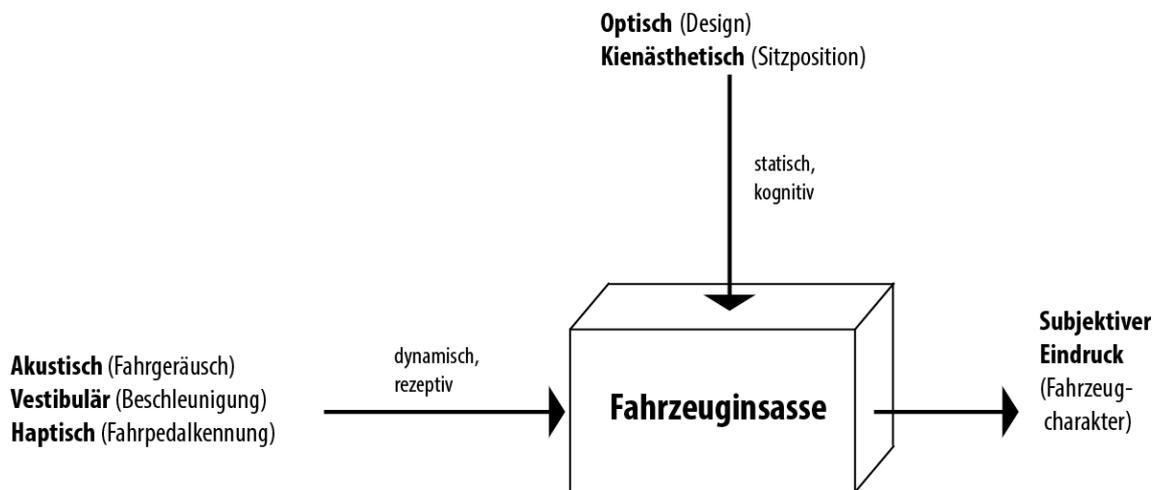
Die gezielte Gestaltung von Fahrgeräuschen spielt in der Entwicklung von Kraftfahrzeugen eine besonders wichtige Rolle. Denn das akustische Feedback des Fahrzeugs ist von ähnlicher Bedeutung wie das optische Design, welches den Fahrzeugcharakter nachhaltig prägt<sup>63</sup>. Das Ziel der Fahrzeugentwickler ist es, den subjektiven Komforteindruck eines Beurteilers, zu objektivieren bzw. quantitativ zu beschreiben. Dieses wird erreicht, indem mittels mathematischer Verfahren Korrelationen zwischen subjektiven Bewertungen und objektiv messbaren Größen hergestellt werden. In diesem Zusammenhang kann man „Objektivierung“ als Modellierung der menschlichen Komfortbeurteilung durch Verknüpfung der objektiven Messwerte mit der Menge der dazu passenden subjektiven Komforturteile beschreiben. Somit entsteht eine Verbindung zwischen den technischen Disziplinen des Fahrzeugingenieurs, über sinnesphysiologische Mechanismen bis hin zur subjektiv psychologischen Reizverarbeitung im menschlichen Hirn. In einem validen Reiz-Wahrnehmungsmodell tragen jedoch in der Regel mehrere unterschiedliche statische und dynamische Reize zu einem subjektiven Wahrnehmungseindruck bei, somit erhöht sich die Komplexität der Themenstellung zusätzlich. Folgende Abbildung veranschaulicht die verschiedenen Auswirkungen auf den Fahrer<sup>64</sup>.

---

<sup>62</sup> Zeller 2012: 207

<sup>63</sup> Zeller 2012: 207

<sup>64</sup> vgl. Zeller 2012: 7

Abb. 3.1 Wahrnehmungsmodell nach Goldstein<sup>65</sup>

Zur mehrdimensionalen Bewertung des Höreindrucks eignet sich die Methode des Semantischen Differenzials, welche sich aus einer Reihe von 7-stufigen Ratingskalen zusammensetzt und als Eigenschafts- bzw. Polaritätsprofil dargestellt wird. Die Skalen sind hierbei mit gegensätzlichen Adjektivpaaren ausgestattet und können sich sowohl auf die objektiven physikalischen als auch die mit einem Geräusch assoziierten emotionalen, subjektiven Bedeutungskomponenten beziehen. Abbildung 3.2 zeigt verschiedene semantische Profile, die während der Beschleunigung in Sportwagen und in Luxuslimousinen, in einem Feldversuch mit geübten Probanden entstanden sind.

---

<sup>65</sup> eigene Darstellung nach Zeller 2012: 7

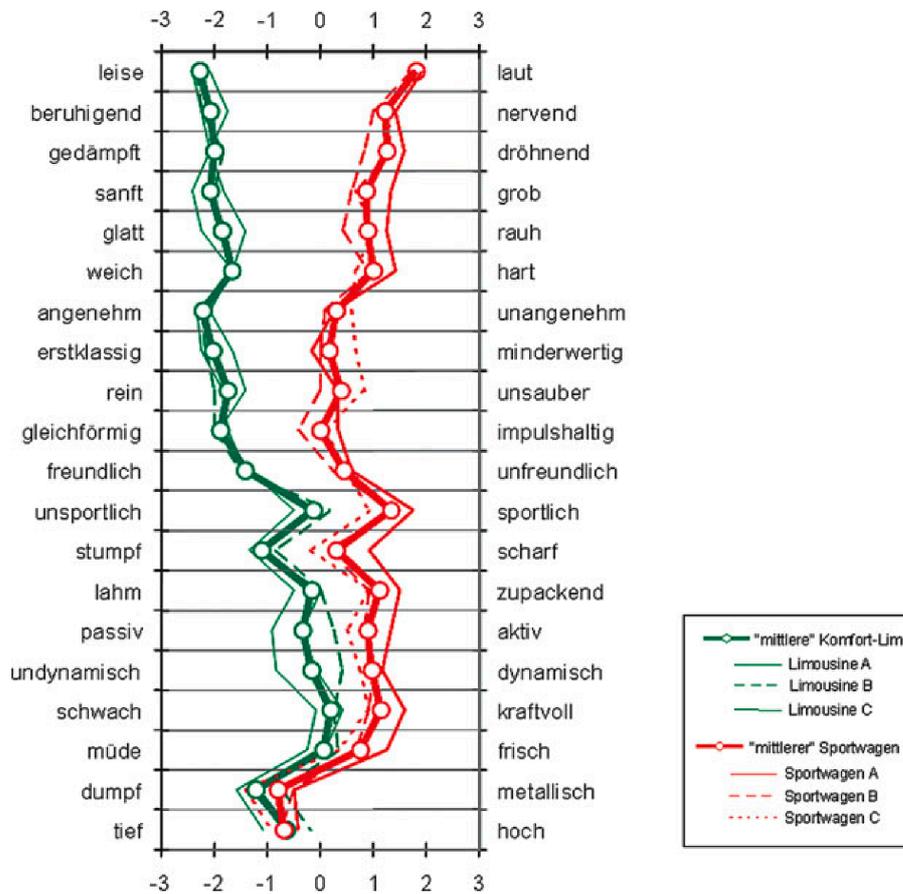


Abb. 3.2 Darstellung semantischer Profile für das Innengeräusch in Limousinen und Sportwagen<sup>66</sup>

Die Semantik in der Adjektivskala ist teilweise bedeutungsredundant, daher versucht man die Zahl der Variablen auf eine überschaubare Menge zu reduzieren. Nach einer statischen Analyse wie der Faktorenanalyse gelangt man zu orthogonalen Dimensionen. Aus dem Beispiel in Abb. 3.2 kann man die vier Komponenten

- Lautheit (z.B. „leiste-laut“, „dröhnend-gedämpft“)
- Dynamik (z.B. „sportlich-unsportlich“, „schwach-kraftvoll“)
- Härte (z.B. „rau-glatt“, „gleichförmig-impulshaltig“)
- Timbre (z.B. „tief-hoch“, „stumpf-scharf“)

<sup>66</sup> Zeller 2012: 9

extrahieren. Die empirisch gewonnenen Adjektivskalen können auf der Grundlage von gewichteten Linearkombinationen dann auf den extrahierten orthogonalen Beschreibungsdimensionen skaliert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine graphische Repräsentation der entstandenen Geräuschcharakterbewertung für drei unterschiedliche Fahrzeugtypen<sup>67</sup>.

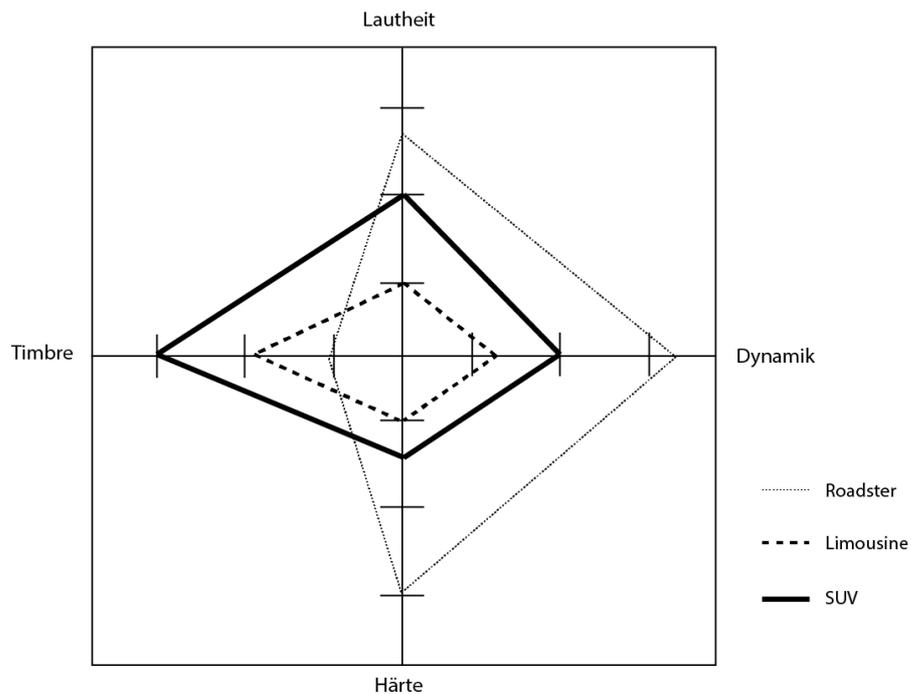


Abb. 3.3 Geräuschcharakterprofile auf Basis von orthogonalen Wahrnehmungsdimensionen<sup>68</sup>

Die Akustik hat sich in Verbindung mit wahrnehmbaren Schwingungen (Noise Vibration Harshness – NVH) als Teilbereich der Fahrzeugentwicklung längst erfolgreich etabliert. Der Sound eines Fahrzeugs vermittelt sowohl Emotionen als auch Leidenschaft, steht für eine hohe Produktqualität und kann eine Marke regelrecht inszenieren. Aus diesen Gründen gewinnt die aktive Klanggestaltung immer mehr an Bedeutung<sup>69</sup>. Selbstverständlich zählt die Prävention von Störgeräuschen im Sinne der aktiven Schwingungs- und Geräuschminderung immer noch zu den Hauptaufgaben in der Fahrzeugakustik. Die Grundidee wurde dazu bereits 1933 in einem Patent von Paul Lueg vorgestellt. Anhand Abbildung 3.4 lässt sich das Grundprinzip der aktiven Schwingungs- und Geräuschminderung gut erläutern. Die Kernaufgabe besteht darin, an mindestens

<sup>67</sup> vgl. Zeller 2012: 9

<sup>68</sup> eigene Darstellung nach Zeller 2012: 9

<sup>69</sup> vgl. Genuit & Fiebig 2011: 530

einem Ort zu dem vorhandenen Schallfeld, ein gegenphasiges Schallfeld „nachzubauen“, so dass sich aus der Überlagerung beider Schallfelder in der Summe Null ergibt.

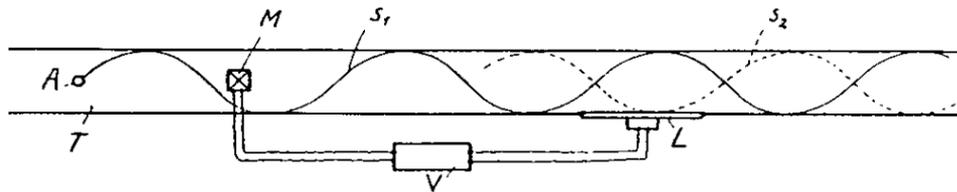


Abb. 3.4 Prinzip der aktiven Geräuschminderung<sup>70</sup>

Das Mikrofon (M) nimmt dabei den Ausgangston ab, dann wird mittels Filter (V) die Amplitude und Phase des gegenphasigen Schallfelds angepasst und schließlich über einen Lautsprecher (L) abgestrahlt. Die Nachbildung des Gegenschalls muss zeitlich kausal geschehen, zudem ist eine hohe Präzision entscheidend. Das bedeutet, dass bei spektraler Betrachtung der Phasenfehler nur einige Grad und der Amplitudenfehler weniger als 1 dB betragen darf<sup>71</sup>.

Neben der Bekämpfung unerwünschter Störgeräusche gilt es auch, Zielgeräusche umzusetzen. Im Zuge dessen kommt Sound Design ins Spiel. Um eine gezielte Veränderung in der Akustik eines Fahrzeugs umzusetzen, kommen Sound-Generatoren in der Ansaugstrecke, aktive Systeme in der Abgasanlage sowie auch mehrkanalige Aktivsysteme in der Fahrgastkabine zur Schallfeldbeeinflussung zum Einsatz. Des Weiteren werden auch Sound-Aktorkonzepte zur Erzeugung relevanter Motorordnungen eingesetzt. Vor allem im Bereich der Elektromobilität stellt das „nicht vorhanden sein“ akustischer Feedbacks ein Problem dar. Deshalb müssen diese völlig neugestaltet werden. Die Notwendigkeit der akustischen Untermalung in neuen Fahrzeugentwicklungen sowohl seitens der Insassen als auch anderer Verkehrsteilnehmer wie z.B. Fußgänger bekommt nochmals eine besondere Dynamik<sup>72</sup>.

Da der Mensch adaptiv hört bleibt das Gehör empfindlich für akustische Auffälligkeiten. Geräusche werden kontextbedingt evaluiert und je nach Situation als angenehm oder unstimmig empfunden. Deshalb ist und bleibt der Kunde kritisch und Thematiken wie NVH und Sound Design

<sup>70</sup> Lueg 1936: 1

<sup>71</sup> Schirmacher 2002

<sup>72</sup> vgl. Genuit & Fiebig 2011: 530

bleiben feste Bestandteile der Fahrkomfortgestaltung<sup>73</sup>. In der Akustikentwicklung müssen eine Vielzahl verschiedener Fahrsituationen abgedeckt werden. Es treten dabei je nach Betriebszustand unterschiedliche Geräusche auf: Im Stand, Antriebsgeräusche bei Konstantfahrt, unter Voll- bzw. Teillast sowie fahrbahnbedingte Reifenabrollgeräusche oder Windgeräusche. Hinzu kommen Funktionsgeräusche von etwaigen Fahrerassistenzsystemen oder Hinweistöne, ebenso wie Knarz- und Quietschgeräusche. Zur Berücksichtigung der Besonderheit des menschlichen Hörens muss binaurale Mess- und Wiedergabetechnik eingesetzt werden, denn nur so können Kundenreaktionen richtig abgeschätzt werden. Neben den subjektiven Einschätzungen kommen auch psychoakustische Analyseverfahren, die wichtige Informationen über zeitliche Struktur, Intensität, spektrale Verteilung und räumliche Verteilung der Schallquellen liefern, zum Einsatz. Dadurch können relevante Geräuschanteile identifiziert werden und Vorschläge zur effektiven Modifikation erarbeitet werden. Eben nur wenn die Ursachen der zu optimierenden Geräuschanteile bekannt sind, werden konstruktive Vorschläge eingebracht. Hierfür hat sich die Transferpfadanalyse als hilfreich erwiesen. Bei diesem Verfahren wird die Quelle vom Übertragungsweg getrennt, womit man eine zuverlässige Identifikation der Ursachen für akustische Probleme und mittels simulierter Modifikation die Abschätzung der Optimierungsmöglichkeiten durchführen kann. Durch die binaurale Transferpfadanalyse (BTPA) und -synthese (BTPS) ist es sogar möglich die Modifikationen zu auralisieren. Hierdurch lassen sich die Maßnahmen hinsichtlich zu Kosten und Nutzen beurteilen. Die Maßnahmen lassen sich dann im Fahrsimulator interaktiv im realitätsnahen Kontext evaluieren. Dies zeigt, dass erfolgreiches NVH und Sound Design aus einer engverzahnten Kette verschiedener fein abgestimmter Arbeitsschritte besteht, und nicht als rein technische Aufgabe verstanden werden sollte<sup>74</sup>.

---

<sup>73</sup> vgl. Genuit & Fiebig 2011: 531

<sup>74</sup> vgl. Genuit & Fiebig 2011: 531-532

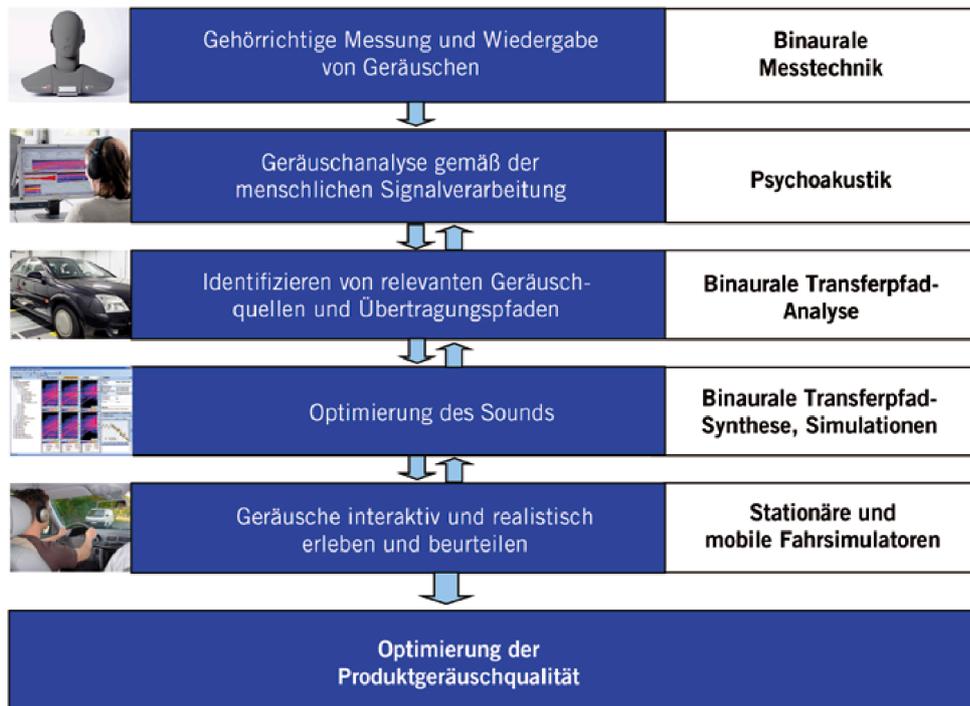


Abb. 3.5 Schematischer Ablauf zur Optimierung von Fahrzeuggeräuschen<sup>75</sup>

---

<sup>75</sup> Genuit & Fiebig 2011: 532

## 3.2 Klangsynthese

In diesem Kapitel werden zunächst die Aufgaben und Anforderungen von elektronischen Klangerzeugern geklärt. Anschließend werden wichtige Grundelemente von Synthesizern erläutert. Zuletzt wird auf einige verschiedene Syntheseverfahren eingegangen.

Die primäre Aufgabe der Klangsynthese besteht darin, komplexe Klangereignisse mit Hilfe elektronischer Mittel zu erzeugen. Eine äußerst präzise Kopie von akustischen Instrumenten aus wirtschaftlichen Gründen ist dabei ein Teilaspekt, jedoch auch die Erschaffung „neuer“ Klänge, die von herkömmlichen Instrumenten nicht erzeugt werden können. Die richtige Anzahl kontrollierbarer, klangbestimmender Parameter ist für das Syntheseverfahren erfolgsbestimmend. Einerseits sollen für den Anwender eine gute Übersicht und Kontrolle der Parameter gewährleistet werden, andererseits muss das klangliche Erlebnis nach Möglichkeit weitestgehend veränderbar sein. Darüber hinaus sollen die klanglichen Veränderungen, die mit der Parameteränderung einhergehen vorhersehbar sein und einen Bezug zur natürlichen Klangentstehung haben. Zudem sollen Synthesizer mehrstimmig spielbar sein, d.h. polyphon und gleichzeitig mehrere verschiedene Klangfarben erzeugen können (Multitimbralität)<sup>76</sup>.

Der Aufbau elektronischer Klangerzeuger kann generell auf eine einfache Grundstruktur zurückgeführt werden. Dieses Unterkapitel widmet sich der Erläuterung der notwendigen Grundbausteine. Die Steuerung bzw. Modulation dieser Grundelemente können über verschiedene Art und Weisen erfolgen. Am besten eignen sich Keyboard, MIDI-Sequenzer aber auch externe Sensoren<sup>77</sup>.

### 3.2.1 Oszillator und Filter

Ein Oszillator erzeugt ein mehr oder weniger obertonreiches Signal. Dieses bestimmt die Grundfrequenz und vielmehr auch den „Klangcharakter“. Da in den meisten Fällen eine Klangfärbung erwünscht ist, kann das vom Oszillator stammende Grundsignal mit Filtern in seiner spektralen

---

<sup>76</sup> vgl. Raffaseder 2010: 213

<sup>77</sup> vgl. Raffaseder 2010: 214

Zusammensetzung modifiziert werden. Dabei kann man zwischen verschiedenen Filtercharakteristiken wählen. Die wichtigsten Parameter sind Grenzfrequenz und Resonanz. Diese können dann im zeitlichen Verlauf variiert werden und bestimmen die resultierende Klangfarbe<sup>78</sup>.

### 3.2.2 Verstärker

Ein steuerbarer Verstärker ermöglicht einen variablen Pegelverlauf des Schallsignals. Dabei variiert nicht nur die Lautstärke, vielmehr wird der Gesamtcharakter des erzeugten Schallereignisses beeinflusst. Entscheidend für die menschliche Wahrnehmung und Kategorisierung von Schallsignalen ist die Anregung eines akustischen Ereignisses<sup>79</sup>. Je nach Anregung des Signals entsteht ein anderer Pegelverlauf und damit verbunden eine spezifische Wahrnehmung des generierten Klanges. Dies soll in nachfolgendem Beispiel verdeutlicht werden: *„Liefert der Oszillator beispielsweise ein rauschförmiges Signal und wird der Verstärker so eingestellt, dass dieses wiederholt langsam ein und ausgeblendet wird, so erinnert das klangliche Ergebnis – eine geeignete Einstellung der Parameter vorausgesetzt – an Meeresrauschen. Wird das Rauschsignal des Oszillators hingegen mit maximaler Amplitude gestartet und dann innerhalb weniger Zehntelsekunde ausgeblendet, so ist das Ergebnis dem perkussiven Schlag auf eine Snare Drum ähnlich.“*<sup>80</sup>

### 3.2.3 Modulation

Um die elektronisch erzeugten Klänge auch während der Wiedergabe möglichst vielseitig zu variieren, werden weitere Steuersignale benötigt. In der Regel werden diese in Form eines geeigneten MIDI-Befehls extern erzeugt. Die Anzahl der möglichen Steuersignale ist hierbei ein wichtiges Qualitätskriterium für den (Software-)Synthesizer. Bei hochwertigen Synthesizern ermöglicht der Klangprogrammierer eine Veränderung eines bestimmten Steuersignals und damit auch welchen Einfluss diese auf den erzeugten Klang haben soll.

---

<sup>78</sup> vgl. Raffaseder 2010: 214

<sup>79</sup> vgl. Raffaseder 2010: 215

<sup>80</sup> Raffaseder 2010: 215



Abb. 3.6 Modulationsmatrix in Reaktor 6<sup>81</sup>

Dies bedeutet, es ist beispielsweise möglich, mit dem Signal eines niederfrequenten Oszillators, die Position im Panorama zu steuern. Die Oszillatorfrequenz bestimmt dann, wie schnell der Klang von links nach rechts und wieder zurückwandert. Grundsätzlich stehen einer bestimmten Anzahl von Steuersignalen verschiedene steuerbare Klangparameter gegenüber. Diese können einander in einer sogenannten Modulationsmatrix (siehe Abb. 3.6) zugewiesen werden. Generell kann die Modulationsintensität für jedes Steuersignal separat festgelegt werden. Dadurch wird bestimmt, in welchem Intervall das entsprechende Steuersignal den Parameter moduliert<sup>82</sup>.

#### 3.2.4 Echtzeit-Steuerung

Da einige Parameter kontinuierlich veränderbar sein sollten, reicht die Tastatur eines MIDI-Keyboards als Eingabequelle nicht aus. Deshalb verfügen viele Keyboards über Räder, die den MIDI-Befehl „Pitch-Shift“ auslösen können. Mit Hilfe des Pitch-Shift-Wheels lässt sich eine gleitende Veränderung der Tonhöhe erzeugen. Mit einem zweiten Rad, dem Modulations-Wheel, kann man beispielsweise die Modulationstiefe eines LFOs (Low Frequency Oscillator) regeln. Jedoch kann der Anwender bei der Klangprogrammierung selbst entscheiden, welche Klangpara-

---

<sup>81</sup> Screenshot aus Reaktor 6

<sup>82</sup> vgl. Raffaseder 2010: 215f.

meter durch welches Rad beeinflusst werden sollen. Zusätzliche Dreh- oder Schieberegler erzeugen einen „Controller-Change“-MIDI-Befehl und können so wiederum andere Parameter des Klangerzeugers verändern<sup>83</sup>.

### 3.2.5 LFO – Low Frequency Oscillator

Zur kontinuierlichen Veränderung eines klangbestimmenden Parameters innerhalb eines regulierbaren Intervalls, kann ein LFO verwendet werden. Dabei gibt die Amplitude des LFOs an, in welchem Ausmaß der betreffende Parameter um seinen Mittelwert schwankt. Die Frequenz des LFOs regelt den Intervalldurchlauf innerhalb einer Sekunde. Diese liegt überwiegend unterhalb des menschlichen Hörbereichs, nämlich zwischen 0 und 20 Hz. Vereinzelt liegt die maximale LFO-Frequenz auch etwas höher und reicht in den hörbaren Bassbereich hinein. Wichtig für den resultierenden Klang ist auch die Wellenform des LFOs. Bei einer Sinus-, Dreieck-, oder Sägezahn-Wellenform erhält man eine kontinuierliche Änderung. Hingegen erfolgt wird bei einer Rechteck- und Puls-Form nur ein Wechsel zwischen zwei Parameterwerten<sup>84</sup>.

### 3.2.6 Hüllkurvengenerator (Envelope)

Um einen einmaligen Änderungsverlauf klangbestimmender Parameter zu bewirken, verwendet man einen sogenannten Hüllkurvengenerator. Die Verstärkung des Signals und der damit verbundene Verlauf der Lautstärke wird zumeist mit einer Hüllkurve gesteuert. Oftmals wird auch die Filterfrequenz durch eine Hüllkurve beeinflusst<sup>85</sup>.

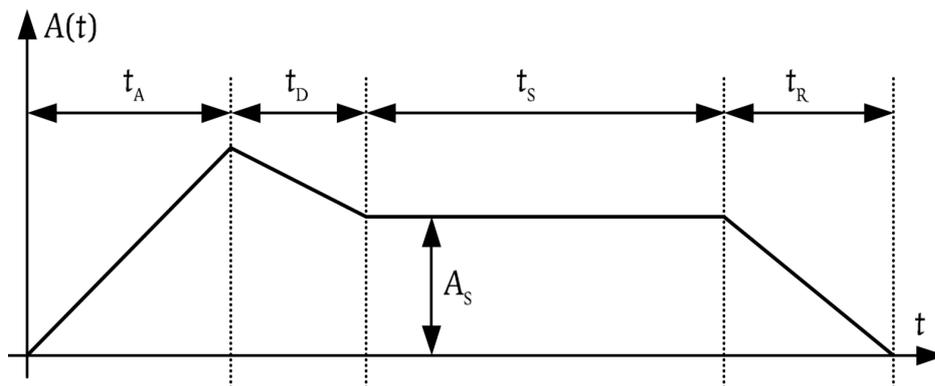
Um die Struktur des Klanges zu erfassen, erfolgt die Beschreibung des zeitlichen Verlaufes im makroskopischen Zeitbereich. Dieser kann von ungefähr 150 Millisekunden, beispielsweise bei einem kurzen, perkussiven Schlag bis zu mehreren Stunden dauern (z.B. bei einer langen Oper, die faktisch auch als akustisches Ereignis aufgefasst werden kann). Die Hüllkurve, die den Amplitudenverlauf eines Schallereignisses beschreibt, kann in vier Phasen unterteilt werden: **Attack**, **Decay**, **Sustain** und **Release**. Man bezeichnet dieses Modell auch als ADSR-Hüllkurve.

---

<sup>83</sup> vgl. Raffaseder 2010: 218

<sup>84</sup> vgl. Raffaseder 2010: 219f.

<sup>85</sup> vgl. Raffaseder 2010: 218

Abb. 3.7 ADSR-Hüllkurve<sup>86</sup>

Dabei bestimmt die Attack-Time  $t_A$  die Dauer der Einschwingphase. Am Ende dieser Phase erreicht die Hüllkurve ihr Maximum. Im Anschluss folgt eine Dämpfungsphase. In dieser klingen die Eigenschwingungen ab. Die Decay-Time  $t_D$  beschreibt die Dauer dieses Vorgangs. Alle Schallsignale, die nur durch eine einmalige Anregung ausgelöst werden enden nach der Decayphase. In der dritten Phase gibt die Sustain-Time  $t_S$  die Dauer der Amplitudenhüllkurve eines Schallsignals an. Man bezeichnet diese auch als Aushaltphase des akustischen Ereignisses. Da sich die Zusammensetzung des Schallsignals nur unwesentlich ändert, kann die Sustain-Phase gut durch das Spektrum dargestellt werden. Das Sustain-Level entspricht  $A_S$ . Zuletzt folgt die Ausklingphase des Schallsignals. Die Dauer dieser Phase wird durch die Release-Time  $t_R$  beschrieben. Die Release-Time wird im Wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt. Einerseits durch die Nachhallzeit des Raumes, welche sich durch folgende Formel berechnen lässt:

$$T_{60} = 0,163 \frac{s}{m} \times \frac{V}{A}$$

mit  $V = \text{Raumvolumen [m}^3\text{]} \text{ und } A = \text{Absorptionsfläche in [m}^2\text{]}$

$$\text{wobei } A = \sum (\alpha_i \times S_i)$$

$\alpha_i = \text{Absorptionsgrad der jeweiligen Teilfläche}$

mit  $S_i = \text{Größe der jeweiligen Teilfläche}$

<sup>86</sup> Raffaseder 2010: 65

andererseits durch die Dämpfung des Schwingungssystems<sup>87</sup>. Auch in elektronischen Klangerzeugern bzw. Software-Synthesizern stehen vierstufige ADSR-Hüllkurven zur Verfügung. Dabei wird die Hüllkurve von einem Gatesignal, in der Regel von einem Tastendruck, getriggert. Der Maximalwert der Hüllkurve wird innerhalb der Attack-Time erreicht. Dieser fällt je nach eingestellter Decay-Time zurück auf das eingestellte Sustain-Level. Nachdem das Gatesignal nicht mehr anliegt, bzw. die Taste losgelassen wurde, erreicht die Kurve die Ausklingphase. Die Dauer dieser Phase wird von der Release-Time bestimmt. Wie bereits erwähnt ist eine vierstufige Hüllkurve nicht für alle Klänge sinnvoll. Da bei perkussiven Klängen die Sustain- und Release-Phase wegfällt, ist eine AD-Hüllkurve ausreichend. Bei dieser entspricht das Sustain-Level gleich null, deshalb können nur Attack- und Decay-Time eingestellt werden. Bei AR-Hüllkurven setzt das Sustain-Level beim Maximalwert, der nach der Attack-Time erreicht wurde an. Aus diesem Grund kann der gesamte Kurvenverlauf durch die Attack- bzw. Release-Time beschrieben werden<sup>88</sup>.

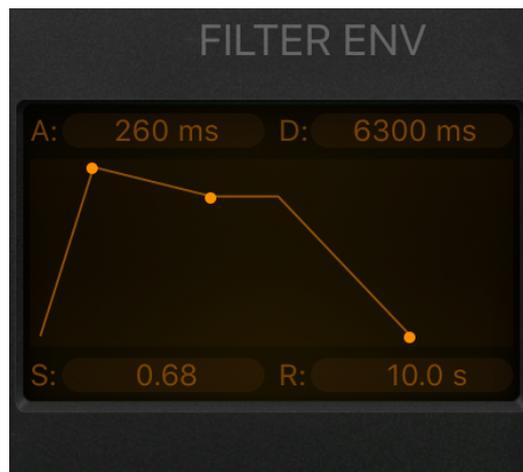


Abb. 3.8 Hüllkurve vom Retro Synth in Logic Pro X<sup>89</sup>

---

<sup>87</sup> vgl. Raffaseder 2010: 64f.

<sup>88</sup> vgl. Raffaseder 2010: 219

<sup>89</sup> Screenshot aus Logic Pro X

### 3.2.7 FM-Synthese

Die aus der Nachrichtentechnik bekannte Frequenzmodulation, die einen entscheidenden Beitrag zur Rundfunkübertragung geleistet hat, wurde in der elektronischen Musik erstmals in den späten 1960er-Jahren von John Chowning genutzt. Das Verfahren setzte sich jedoch erst in den 1980er Jahren durch. Die Firma Yamaha brachte zu dieser Zeit eine Reihe von digitalen Synthesizern auf den Markt, die den Klang der Musik der 1980er-Jahre entscheidend prägte.

Bei der Frequenzmodulation verändert ein Modulationssignal das Trägersignal  $f_T$ . Dies ist vergleichbar mit der Steuerung eines Oszillators durch einen LFO. Der entscheidende Unterschied liegt jedoch darin, dass bei der FM-Synthese auch die Frequenz des Modulationssignals  $f_M$  im hörbaren Bereich liegt. Dabei wird die Stärke der Frequenzmodulation durch den sogenannten Modulationsindex angegeben. Durch die Frequenzmodulation kommt es im Spektrum des Signals  $y(t)$  zur Entstehung neuer Obertöne. Die Amplituden dieser Obertöne sind abhängig vom Modulationsindex  $m$ . Die Frequenzmodulation ermöglicht bereits mit zwei harmonischen Oszillatoren ein relativ komplexes Spektrum, welches wiederum mit einem sehr interessanten Klangbild einhergeht. Wird zusätzlich noch die Frequenz des Modulationssignals moduliert, kann die Wirkung nochmals verstärkt werden. Bereits mit drei Oszillatoren können verschiedene Schaltungsarten realisiert werden. Zudem ist es auch möglich, mit dem Ausgangssignal eines Oszillators, die eigene Frequenz zu modulieren. Der große Vorteil der FM-Synthese besteht darin, dass mit nur wenigen Bauteilen ein breites Spektrum komplexer Klänge und Klangverläufe erstellt werden können. Ein Nachteil der FM-Synthese ist, dass es nicht möglich ist die Zusammenhänge zwischen den technischen Parametern wie Modulationsindex oder Modulationsfrequenz und den damit verbundenen Klangänderungen zu veranschaulichen. Deshalb erfordert die Programmierung eigener Klänge eine gewisse Einarbeitungszeit<sup>90</sup>.

---

<sup>90</sup> vgl. Raffaseder 2010: 222f.

### 3.2.8 Granularsynthese

Das Verfahren der additiven Klangsynthese führt zurück in die Anfangszeit der elektronischen Musik und hatte somit in den 1950er Jahren eine große praktische Bedeutung. Das Verfahren basiert auf den theoretischen Erkenntnissen der Fourier-Analyse. Die Klangerzeugung funktioniert dabei durch additive Überlagerung einer bestimmten Anzahl harmonischer Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen. Jedoch steigt der Rechenaufwand bei diesem Verfahren sehr schnell. Möchte man komplexe Klänge erzeugen, die trotzdem musikalisch verwertbar sind, werden schnell relativ viele Teilschwingungen benötigt<sup>91</sup>.

Aus diesem Grund arbeiten heutige Synthesizer mit einem anderen Syntheseverfahren. Der Softwaresynthesizer Reaktor 6 von Native Instruments verwendet die Granularsynthese. Bei diesem Verfahren wird das Ausgangsmaterial in viele, nur wenige Millisekunden lange Abschnitte unterteilt. Diese bezeichnet man als Grains. Die erhaltenen Grains können dann in beliebiger Reihenfolge zusammengesetzt werden. Um Störgeräusche oder Sprünge im Signal zu verhindern, werden die einzelnen Grains ineinander überblendet. Somit wird sichergestellt, dass man eine „runde“ Signalform erhält<sup>92</sup>.

Mit Hilfe der Granularsynthese ist es möglich die Wiedergabegeschwindigkeit eines Signals zu variieren, ohne dass sich dabei die Tonhöhe ändert. Dies funktioniert indem das Ausgangssignal in mehrere möglichst periodische Abschnitte unterteilt wird. Durch Hinzufügen bzw. Weglassen einzelner Perioden kann dann die Länge des Signals verändert werden. In natürlichen Schallsignalen sind jedoch nur näherungsweise periodische Abschnitte zu finden. Fügt man einzelne Perioden hinzu bzw. lässt man welche weg, kommt es meist zu unerwünschten Nebengeräuschen. Um dieses Problem möglichst gering zu halten, werden die Periodenübergänge nicht einfach eingefügt, sondern angepasst. Wie gut die Anpassung der Übergänge funktioniert ist abhängig von der Art des Ausgangsmaterials. So lassen sich bei flächigen Klängen in der Regel gute Ergebnisse erzielen. Im Gegensatz dazu sind die Anpassungen bei perkussiven Klängen meist hörbar<sup>93</sup>. Ein weiterer Vorteil der Granularsynthese besteht in der Möglichkeit, akustische Ereignisse einzufrieren. Dies bedeutet, es wird ein einzelner Grain fortlaufend wiederholt bzw. in einem Loop

---

<sup>91</sup> Raffaseder 2010: 220f.

<sup>92</sup> Raffaseder 2010: 225

<sup>93</sup> Raffaseder 2010: 196

abgespielt. Dabei bleibt die Tonhöhe konstant. Wie bereits erwähnt können die einzelnen Grains in beliebiger Reihenfolge zusammengesetzt und wiedergegeben werden. Somit ist es auch möglich die Wiedergaberichtung zu ändern. Die Granularsynthese bietet neben den beiden wichtigen Anwendungsgebieten des Pitch-Shifting bzw. Time-Stretching sehr gute Möglichkeiten zur experimentellen Klanggestaltung. Denn bei diesem Syntheseverfahren kann die innere Struktur von Schallereignissen erforscht werden und dabei völlig neu zusammengesetzt werden. Dies ermöglicht eine kreative, experimentelle Herangehensweise bei der Erschaffung synthetischer Motorensounds<sup>94</sup>.

---

<sup>94</sup> Raffaseder 2010: 226

## 4 Das Klangdesign des Motors

In diesem Kapitel wird anfangs auf den Stand der Technik eingegangen. Hierbei werden einige bestehende Lösungsansätze zur Generierung synthetischer Motorensounds präsentiert, bevor der eigene Lösungsvorschlag erläutert wird.

### 4.1 Stand der Technik

Es gibt bereits seit einigen Jahren Sound-Generatoren, die entweder als Aftermarket-System zum Sound-Tuning von herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zum Einsatz kommen, oder zur Serienausstattung von EVs gehören.

Die Lotus Group entwickelte einen speziell auf EVs zugeschnittenen Sound-Generator namens Halosonic. Dieser basiert auf realistischen Motorensounds, jedoch können auch künstliche Sounds verwendet werden. Halosonic ist ein Nebenprodukt der Kooperation mit Tesla Motors, bei welcher der Elektrofahrzeughersteller mit Karosserieteilen für den Tesla Roadster versorgt wird. Einige Hersteller von EVs, darunter General Motors, Nissan, Toyota und Mitsubishi, haben für ihre EVs integrierte künstliche Sound-Systeme entwickelt. Das Besondere daran ist, keiner dieser Sound-Generatoren versucht ein Verbrennungsmotorgeräusch zu reproduzieren. Stattdessen werden nicht-automotive bezogene Warntöne in Betracht gezogen<sup>95</sup>. Beim Mitsubishi i-MiEV erinnert das Beschleunigen eher an einen startenden Jet oder an eine Flugzeugturbine<sup>96</sup>.

In Bräunls Herangehensweise zur Erzeugung eines synthetischen Motorensounds wurde folgendermaßen vorgegangen: Der erste Schritt war es den originalen Motorensound zu sampeln. Dies geschah mit dem REV Lotus, einem Ferrari F350 und einem Aston Martin DB9. Hierfür wurde mit einem hochwertigen Kondensatormikrofon mit Keulen Richtcharakteristik gearbeitet. Dieses wurde 50 cm hinter dem Auspuff des Fahrzeuges platziert. Die Aufnahmen liefen dann durch eine Software-Suite auf einen PC. Die Motordrehzahl wurde beim Aufnehmen für drei Sekunden konstant gehalten. Dieses Verfahren wiederholte man für fortlaufende Drehzahlmessungen von 1500 Umdrehungen pro Minute bis 9000 Umdrehungen pro Minute. Das fertige Motorensound-

---

<sup>95</sup> Bräunl 2012: 2

<sup>96</sup> Sound Capture: Mitsubishi i-MiEV and the Sound of Silence 2018

Synthese-System ist unabhängig von den aufgenommenen Sound-Samples, so kann der Fahrer selbst das Sound-Sample wählen, welches er oder sie präferiert.

Um ein Input-Signal vom Fahrzeug zur Steuerung des generierten Motorensounds zu erhalten bestehen mehrere Optionen. Beispielsweise könnte man die Position des Gaspedals, die aktuelle Geschwindigkeit des Tachometers oder die GPS-bestimmte Geschwindigkeit als Input-Signal verwenden. Bei Bräunls System kommt ein Stromsensor zum Einsatz, der grob mit der Motordrehzahl übereinstimmt, in Ergänzung dazu wird noch die GPS-Geschwindigkeit mit aufgenommen. Diese Vorgehensweise erlaubt eine störgeräuscharme Implementierung des Motor-Sound-Systems. Die Motorensounds werden über einen Verstärker und durch am Fahrzeug montierte wasserdichte Lautsprecher wiedergegeben<sup>97</sup>.

Eine andere Lösung für das Problem der zu leisen Elektrofahrzeuge bietet Nissan mit dem VSP (Approaching Vehicle Sound for Pedestrians) System. Die ersten drei Punkte richten sich nach der japanischen Gesetzesgrundlage:

1. Der Sound muss fahrzeugähnlich klingen
2. Die Tonhöhe verläuft proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit
3. vergleichbare Lautstärke wie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor
4. Der Sound hat ein futuristisches Image
5. leicht wahrnehmbar für Fußgänger (jung und alt) bei verschiedenen Umgebungsgeräuschen, trotz dessen soll eine leise Umgebung für Fahrer und Umwelt gewährleistet werden.

Wie in Kapitel 2.3 bereits angemerkt besitzt das menschliche Gehör bei 4 kHz eine starke Überhöhung in der Empfindlichkeit. Diese Information machte sich Nissan in der Entwicklung des VSP zu nutzen. Deshalb sollte der VSP-Sound ein Maximum zwischen 2 und 5 kHz haben. Weiterhin werden Menschen mit altersbedingtem Hörverlust berücksichtigt. Da diese Schwierigkeiten in der Wahrnehmung von Tönen, die höher als 1 kHz sind, haben, sollte der VSP-Sound ein weiteres Maximum unterhalb von 1 kHz enthalten. Das Umgebungsgeräusch an viel befahrenen Kreuzungen hat ihr Maximum durchweg bei etwa 1 kHz, deshalb sollte der VSP-Sound an den Schultern von 1 kHz, sprich bei etwa 0,6 kHz bzw. 2,5 kHz seinen Höchstwert erreichen. Das Maximum bei

---

<sup>97</sup> Bräunl 2012: 4f.

2,5 kHz ist für die normal Hörenden beabsichtigt, das bei 0,6 kHz für ältere Menschen mit Hörverlust bei hohen Frequenzen. Zuletzt soll es noch eine Senke bei 1 kHz geben, um die Geräuschbelastung für die Umwelt zu minimieren<sup>98</sup>.

---

<sup>98</sup> Tabata 2010: 1f.

## 4.2 Praktische Umsetzung

Zu Beginn des Unterkapitels wird das Grundkonzept für das Klangdesign des Motors erläutert. Danach folgt ein Einblick in die verwendete DAW samt den verwendeten Software-Synthesizern. Zuletzt wird die Postproduktion der einzelnen Klänge und die Einbindung in FMOD Studio beschrieben.

### 4.2.1 Konzeption des Motorensounds

In dieser Arbeit soll ein Soundkonzept für ein Elektrosportwagen erstellt werden. Dies bedeutet, das Klangdesign des Motors soll sowohl kraftvoll als auch sportlich klingen und dazu die Dynamik des Fahrzeugs untermalen. Mit Hilfe verschiedener Software-Synthesizern und einer entsprechenden DAW soll ein Sound erstellt werden, der sowohl einen Wiedererkennungswert hat als auch beim Hörer/Kunden emotionale Begeisterung auslöst. Der fertige Sound soll ein elektronisch anmutendes Fundament haben, jedoch trotzdem nicht allzu futuristisch klingen. Wie vom Gesetzgeber vorgeschrieben, soll man aus der Information des Klanges, entnehmen können, dass es sich um ein Fahrzeug handelt.

Das Soundpaket besteht aus mehreren einzelnen Klängen. Dabei werden die Grundsounds für den Beschleunigungsvorgang in drei Teile unterteilt. Der erste Sound steht für den unteren Drehzahlbereich, der zweite für den mittleren und der dritte für den hohen Drehzahlbereich. Zwischen den verschiedenen Drehzahlbereichen werden dann in FMOD-Studio Übergänge eingefügt. Ohne diese wäre ein glatter Übergang von einem Sample zum Nächsten unmöglich. Dies würde wiederum zu einem nicht kontinuierlichen Beschleunigungsvorgang führen. Da Elektromotoren aber einen sehr großen Drehzahlbereich abdecken und somit kein Schaltgetriebe notwendig ist<sup>99</sup>, wäre eine hörbar un stetige Beschleunigung nicht passend. Durch das geschickte Einfügen von Übergängen erhält man jedoch einen stetigen Beschleunigungsvorgang. Ein weiteres Geräusch, welches als Indikator für den Betriebszustand des Fahrzeugs dient, ist das Leerlaufgeräusch. Das tieffrequente „Wummern“ soll an das Leerlaufgeräusch eines Verbrennungs-

---

<sup>99</sup> Karle 2018: 69

motors erinnern, außerdem soll es das Kraftpotential des Motors untermauern. Man soll merken, dass ab Drehzahl null ein so großes Drehmoment anliegt, dass es das Fahrzeug aus dem Stand heraus beschleunigen kann<sup>100</sup>.

---

<sup>100</sup> Karle 2018: 69

#### 4.2.2 Pro Tools Session für das Leerlaufgeräusch

Im Folgenden wird die Struktur der Pro Tools Session, die zum Erstellen des Leerlaufgeräuschs verwendet wurde beschrieben. Grundsätzlich ist die Struktur sehr simpel gehalten. Zu Beginn wurde eine Instrumentenspur erstellt, in die der Softwaresynthesizer Reaktor 6 eingefügt wurde. Als Ausgang für die Instrumentenspur namens „Reaktor 6 IDLE“ wurde ein Bus gewählt. In diesem Fall der Mono Bus 1. Dann wurde eine Mono Audiospur erstellt, da sich dadurch die Arbeit in der Postproduktion der Spur erleichtert. Die Spur namens „IDLE Loop“ bekommt als Eingang den Mono Bus 1 zugewiesen. Dadurch wird sichergestellt, dass jedes von der „Reaktor 6 IDLE“ stammende Signal bei der Audiospur „IDLE Loop“ anliegt. Ohne dieses Routing müsste man auf dem MIDI-Keyboard eine Taste spielen um bei der Aufnahme ein Signal von Reaktor 6 zu bekommen. Jedoch reicht allein das „Grundgeräusch“, das Reaktor 6 aufgrund der verwendeten Module im Synthesizer ausgibt aus um ein geeignetes Leerlaufgeräusch zu erhalten. Die verschiedenen Module und Einstellungen in Reaktor 6 werden im nachfolgenden Kapitel genau erläutert.

Im weiteren Verlauf der Session muss dann die Mono Audiospur „IDLE Loop“ scharfgeschaltet werden und die Aufnahme in Pro Tools gestartet werden. Die nun erhaltene aufgenommene Wave-Datei muss dann noch bearbeitet werden. Denn im späteren Gebrauch, d.h. im Fahrzeug, soll das Leerlaufgeräusch in einer Schleife wiedergegeben werden. Spielt man die Aufnahme nun in einer Schleife ab, hört man bei jeder Wiederholung der Schleife unschöne Klick- und Knackgeräusche. Diese gilt es zu minimieren bzw. bestmöglichst zu entfernen. Pro Tools bietet dazu die Möglichkeit die Spurhöhe zu vergrößern sowie in die Wellenform hinein zu zoomen. So hat man eine detaillierte Sicht auf die Wellenform und kann so die Nulldurchgänge der Welle auffindig machen.

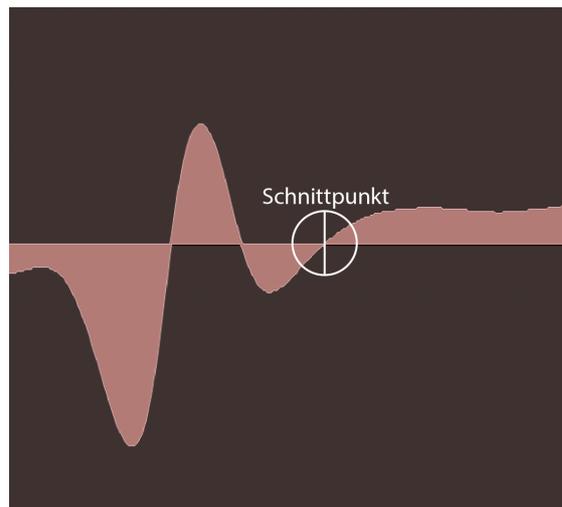


Abb. 4.1 Schnittpunkt Nulldurchgang<sup>101</sup>

Die Aufnahme des Leerlaufgeräuschs wird an jeweils zwei Nulldurchgängen geschnitten. Da das Leerlaufgeräusch kein reiner Ton ist, sondern ein Komplexer Ton (siehe Kapitel 2.3), ist die Wellenform relativ unstrukturiert. Daher gestaltet sich der Schnitt schwerer als angenommen. Sobald das Leerlaufsample in einer Schleife wiedergegeben wurde, konnte man bei genauem Hinören trotzdem noch leise Knack- und Klickgeräusche vernehmen. Um dieses Problem zu lösen wurde die Wellenform auf Ähnlichkeiten in der Signalstruktur untersucht. So wurde für den Anfang und für das Ende des Samples schließlich eine ähnliche Wellenform gefunden und an besagter Stelle geschnitten. Somit blieben die Störgeräusche aus.

---

<sup>101</sup> Screenshot aus Pro Tools

#### 4.2.3 Klangsynthese des Motorengeräusches bei Leerlauf

Das Geräusch, das bei Leerlauf ertönt wurde mit Hilfe von Native Instruments Reaktor 6 realisiert. Hierbei handelt es sich um einen softwarebasierten modularen Synthesizer. Im verwendeten Setup wird mit einem LFO zunächst eine Wellenform mit Dreieckschwingung erzeugt. Die Frequenz des LFO's beträgt 18,32 Hz und wurde nach subjektivem Hörempfinden gewählt. Da das Leerlaufgeräusch durch eine Art tieffrequentes Wummern beschrieben werden soll und nicht zu weich klingen darf, wurde im LFO die Dreieckswellenform ausgewählt. Diese ist nicht ganz so weich wie eine Sinuswelle. Das Ausgangssignal des LFO's führt in einen Step Sequencer. In diesem werden die Notenwerte in vier Schritten variiert. Dies soll dazu dienen, dass das Geräusch nicht zu periodisch bzw. gleichförmig wirkt. Die „Direction“ des Step Sequencers, also die Reihenfolge in welcher die verschiedenen Schritte verlaufen ist auf Ping-Pong gestellt. Das heißt es läuft von links nach rechts durch, wobei sich der erste und letzte Schritt jeweils wiederholen.



Abb. 4.2 Modularer Synthesizer in Reaktor 6<sup>102</sup>

<sup>102</sup> Screenshot aus Reaktor 6

Ausgang 1 und Ausgang 2 des Step Sequencers führen in jeweils einen Oszillator. Beide Oszillatormodule sind identisch und unterscheiden sich nur in ihren Einstellungen. Das erste Oszillatormodul wird mit einer Frequenz von 61,74 Hz betrieben und gibt eine Sinuswellenform aus. Der zweite Oszillator hat eine ungefähr halb so hohe Frequenz mit 32,7 Hz und liefert eine Mischform aus Sinus- und Dreieckwelle. Der Ausgang von Oszillator 1 ist mit dem Eingang für die Frequenzmodulation von Oszillator 2 verbunden. Mit dem Drehregler „FM“ kann dann die Amplitude des Signals, welches am FM Input anliegt geregelt werden. Beide Werte wurden auch hier nach subjektivem Höreindruck eingestellt. Bei Oszillator 1 liegt der Wert bei 0,9 und bei Oszillator 2 bei 4,6.

Neben der Möglichkeit zur Frequenzmodulation der Oszillatorsignale ist es dank einer Verbindung beider Oszillatorenausgänge mit dem Eingang des Moduls „XFade“ möglich nahtlos zwischen beiden Oszillatoren Signalen zu überblenden. Im weiteren Signalfluss kommt ein Filter dazu. Das Filter fungiert als Bandpass und lässt nur Frequenzen um die Cutofffrequenz herum durch. Der Regler „Resonance“ kontrolliert die Amplitude des Signals, das an der Cutofffrequenz anliegt. Der eingestellte Wert liegt bei 65, dadurch erscheinen die harmonischen Schwingungen lauter und präsenter. Dies wiederum führt zu einem vielschichtigen und voluminösen Klangbild. Im Filter wird das bisherige Signal nochmals frequenzmoduliert. So ist das erhaltene Signal im Spektrum betrachtet deutlich komplexer als zu Beginn der Signalkette. Um ein noch „breiteren“ Klang zu erzeugen bietet sich noch die Möglichkeit zusätzlich Feedback hinzu zu geben. Mit dem „Load“ Regler ist es noch möglich das Eingangslevel anzuheben. Der Regler steht bei 75 und verleiht dem Sound etwas mehr Kraft, indem das Signal leicht übersteuert wird. Nachdem das Signal den Filter durchlaufen hat, führt es in ein VCA-Modul (Voltage Controlled Amplifier). Der VCA fungiert im Grunde als Lautstärkereglung. Die Höhe der Kontrollspannung definiert den Signalanteil, der zum Ausgang durchgelassen wird. Um ein Übersteuern in Pro Tools zu verhindern wurde der Wert auf 26,5 gesetzt. Hinter das VCA-Modul wurde noch ein Reverb geschaltet um einen räumlicheren Klang zu erhalten. Ohne den Reverb wäre das Signal zu trocken und zu penetrant. Mit Reverb konnte etwas „Distanz“ zwischen Hörer und dem finalen Leerlaufklang geschaffen werden. Es wurde eine mittlere Raumgröße gewählt, des Weiteren ist im Reverb-Modul ein Hochpassfilter integriert. Das Hochpassfilter wurde so eingestellt, dass hohe Frequenzen im Reverb-Signal etwas gedämpft werden.

#### 4.2.4 Klangsynthese des Motorengeräuschs für verschiedene Drehzahlbereiche

Das Werkzeug der Wahl zum Erzeugen der verschiedenen Drehzahlsamples ist wieder Reaktor 6. Der Synthesizer besteht im Wesentlichen aus drei Bestandteilen. Einem Oszillator, einer Modulationshüllkurve, sowie einem LFO. Als Wellenform wurde im Oszillator eine „Multi-Rechtecksform“ gewählt. Mit dem Parameter „partials“ kann der Anteil von Partialtönen, die zur Klangzeugung verwendet werden bestimmt werden. Die Zahl „02“ die unter dem Parameter „number“ zu finden ist, steht für eine virtuelle Duplizierung des Oszillators.



Abb. 4.3 Oszillator Drehzahlsample<sup>103</sup>

Der Parameter „fund“ steht für den Anteil der Grundfrequenz. Mit dem Regler „beating“ kann der Oszillator zum Pulsieren gebracht werden, dies resultiert in einem verstimmten Klang. Für die Modulationshüllkurve wurde eine relativ kurze Attack-Time gewählt, die Release-Time fällt hingegen eher lang aus. Der LFO arbeitet mit einer Frequenz von 4 Hz.



Abb. 4.4 Envelope und LFO Drehzahlsample<sup>104</sup>

<sup>103</sup> Screenshot aus Reaktor 6

<sup>104</sup> Screenshot aus Reaktor 6

Normalhörende Menschen reagieren bei Frequenzen zwischen 2 und 5 kHz besonders empfindlich, aufgrund der Resonanz des Gehörganges, deshalb wurden die Drehzahlsamples als Vergleich zu den originalen Sounds mit Hilfe eines Equalizers bearbeitet. Ein Drehzahlhochlauf dieser Samples befindet sich ebenso wie die unbearbeiteten Samples auf der DVD. Dabei wurde die Frequenz bei 0,6 kHz angehoben, damit auch ältere Menschen, die höhere Frequenzen zunehmend schwerer hören, den Klang gut wahrnehmen können. Die Senke bei 1 kHz soll die Geräuschbelastung so niedrig wie möglich halten. Das Maximum bei 2,5 kHz sorgt für eine gute Wahrnehmbarkeit für alle normalhörenden Verkehrsteilnehmer, da der Mensch in diesem Frequenzbereich besonders empfindlich hört.



Abb. 4.5 Equalizer Motorensamples<sup>105</sup>

#### 4.2.5 Implementierung in FMOD Studio

FMOD Studio ist ein Programm zum Erstellen von interaktivem Audioinhalten und arbeitet daher eventbasiert. Zu Beginn muss ein neues „Event“ erstellt werden, dieses wird der „Master Bank“ zugewiesen. Jetzt kann im Timeline-Fenster der Parameter „RPM“, der den Drehzahlbereich des Motorengeräuschs abdecken soll, erstellt werden. Der Parameter hat ein Minimum

<sup>105</sup> Screenshot aus Logic Pro X

und Maximum, dieses kann frei definiert werden. In diesem Fall wird ein absoluter Drehzahlbereich gewählt, dies bedeutet von 0-100 %. Nachdem die Sampleloops des Leerlaufgeräuschs sowie der verschiedenen Drehzahlbereiche in das Eventfenster des Parameters RPM eingefügt worden sind, müssen alle Spuren auf den „Loop-Modus“ geschaltet werden. Dies geschieht durch klicken auf den Loop-Button oben rechts im Fenster.

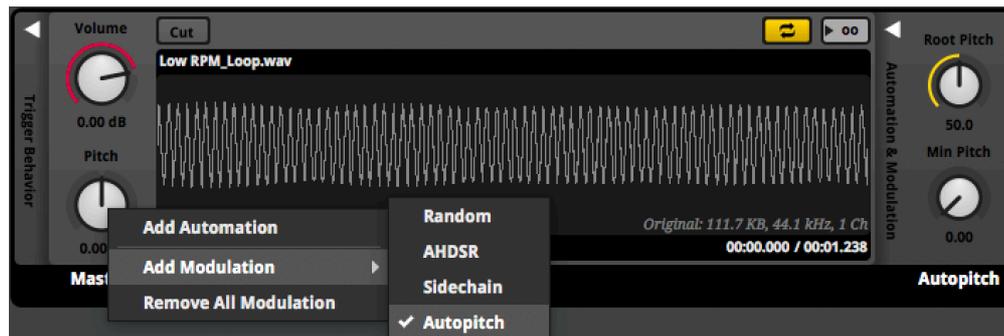


Abb. 4.6 Autopitch FMOD Studio<sup>106</sup>

Nun kann per Rechtsklick auf den Drehregler „Pitch“ auf allen Spuren die Modulation „Auto Pitch“ hinzugefügt werden. Dies funktioniert nur wenn zuvor ein Parameter erstellt wurde, denn Auto Pitch funktioniert nicht zeitbasiert.

Nachdem Autopitch aktiviert wurde, beginnt man mit Hilfe des Drehreglers „Min Pitch“ die Tonhöhe des Samples für den niedrigen Drehzahlbereich so weit zu senken, dass man bei dem RPM-Parameterwert 0 noch ein authentisches Motorengeräusch erhält. Danach folgt die Abstimmung mit dem Sample für den hohen Drehzahlbereich. Hier muss entschieden werden, welche Tonhöhe als Maximum gewählt werden soll. Jetzt kann das Sample für den niedrigen Drehzahlbereich und das für den hohen Drehzahlbereich angeglichen werden. Dazu hört man sich den Klang beider Samples bei einem Parameterwert von 100 an und gleicht die fundamentalen Frequenzen einander an. Dies geschieht indem der „Root Pitch“ des Samples für niedrige Drehzahlen herabgesetzt wird. Analog dazu geht man bei dem Parameterwert 0 vor. Der einzige Unterschied dabei ist, dass das Sample für hohe Drehzahlen im Pitch verändert wird. Und zwar wird mit Hilfe des „Min Pitch“ Reglers ein homogenes Klangbild zwischen den Samples für niedrige bzw. hohe Drehzahlen geschaffen. Jetzt können die verschiedenen Drehzahlbereiche im Parameter RPM abgefahren und kontrolliert werden. Hierbei werden die Spuren jeweils auf „Solo“ geschaltet

<sup>106</sup> Screenshot aus FMOD Studio

und die Sounds verglichen. Da die verschiedenen Samples noch minimal auseinander lagen wurde im „Rootpitch“ des Samples für niedrige Drehzahlen noch etwas feinjustiert. Bisher wurde also das Sample für niedrige bzw. hohe Drehzahlbereiche per Autopitch Modulation angeglichen. Um den Übergang von niedrig zu hoch noch zu verbessern wird nun das Sample für den mittleren Drehzahlbereich eingebunden. Dies geschieht auf die gleiche Art und Weise wie mit den bisherigen Samples. Sobald das Sample für den mittleren Drehzahlbereich eingebunden ist können die verschiedenen Samples auf ihren jeweiligen Bereich im RPM Parameter gezogen werden. Dieses werden dann durch Fades überblendet, um einen weichen Übergang zwischen den verschiedenen Drehzahlbereichen zu gewährleisten.

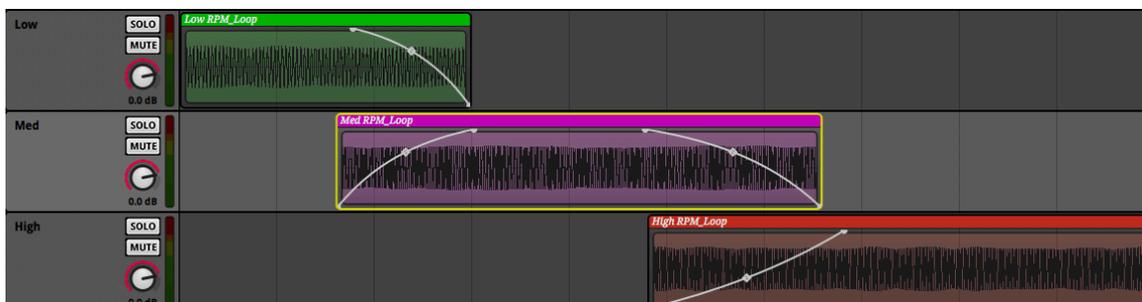


Abb. 4.7 RPM Event Fades<sup>107</sup>

Damit der Motorsound bei steigender Drehzahl lauter wird, wurde eine Lautstärkeautomation für die 3 Spuren erstellt. Zuletzt kommt noch das Leerlaufsample hinzu. Dieses ertönt wenn der RPM Parameter zwischen 0 und 1 steht. Zuerst sollte es nur im Leerlauf zu hören sein. Jedoch hat sich herausgestellt, dass es sich sehr gut als zweiten „Layer“ für den Motorensound verwenden lässt. Deshalb wurde das Leerlauf Sample kopiert. Bei der Kopie wurde wieder die Autopitch Modulation aktiviert. Der Parameter „Min Pitch“ wurde auf den Wert 0,88 gesetzt und der „Rootpitch“ auf 1,50. Somit beginnt das Sample mit einem niedrigeren Pitch als im Original. Auch für die Kopie des Leerlaufsamples, der als unterstützender Sound für alle Drehzahlbereiche umfunktioniert wurde, wird eine Lautstärkeautomation erstellt. Dadurch wird auch dieses Sample bei steigender Drehzahl lauter. Um den Motorensound noch etwas mehr Volumen zu geben, wird auf die Masterspur ein Distortion Effekt gelegt, dieser wird ebenfalls automatisiert.

<sup>107</sup> Screenshot aus FMOD Studio

Bei 0 RPM ist der Effekt quasi nicht aktiv und bei 100 RPM liegt das Distortionlevel bei 32%. Außerdem wurde noch ein Equalizer eingesetzt, der ab Beginn des Samples für hohe Drehzahlen den Bereich um 400 Hz anhebt. Der Equalizer wurde ebenfalls automatisiert und beginnt bei 0dB bei 50 RPM und endet mit +3dB bei 100 RPM.

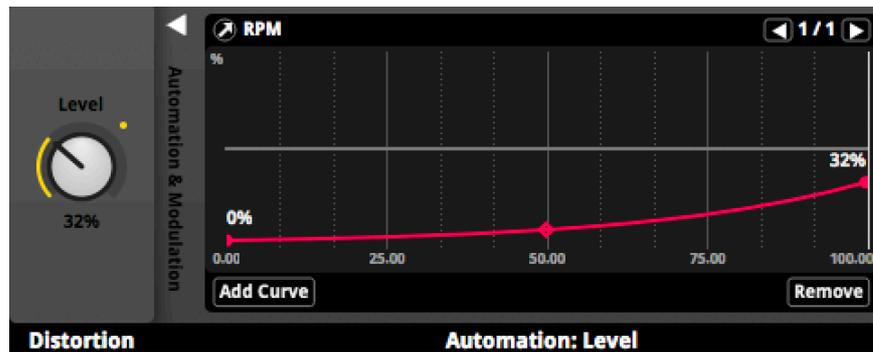


Abb. 4.8 Distortion Level Automation<sup>108</sup>

---

<sup>108</sup> Screenshot aus FMOD Studio

## 5 Fazit

Die Aufgabe dieser Abschlussarbeit war es mittels Software Synthesizern einen dynamisch agierenden Motorensound für Elektrofahrzeuge zu entwickeln. Dieser soll je nach Motordrehzahl einen anderen Sound liefern. Das Grundgerüst der Motorensounds wurde mit Hilfe des modularen Software Synthesizers Reaktor 6 von Native Instruments erstellt. Der erste Gedanke zum veränderlichen Motorensound führte zur DAW Logic Pro X. In dieser wurde zuerst eine MIDI Automation des „Pitch-Wertes“ vollzogen. Da diese Automation jedoch nur auf zeitlichen Werten basiert, wurde die Idee schnell verworfen. Daher musste ein weiteres Programm (FMOD Studio) verwendet werden. Nach dem Erzeugen der Motorensamples mussten diese weiterbearbeitet werden, da diese nur wenige Sekunden lang sind und somit geloopt werden müssen. Dabei mussten die Samples auf Ähnlichkeiten in ihrer Signalform untersucht werden damit beim Schnitt durch den Nulldurchgang keinerlei Störgeräusche zu hören sind. Nach der Postproduktion in Pro Tools konnten die Samples in FMOD Studio implementiert werden. Das Programm arbeitet Event-basiert, wodurch eine dynamische Motoransteuerung ermöglicht wird. Nach der Einarbeitung in FMOD Studio konnte eine Projektstruktur entwickelt werden, die es ermöglicht durch drei verschiedene Samples, die jeweils für einen Drehzahlbereich („Low“, „Med“ bzw. „High“) stehen, ein dynamisch reagierenden Motorsound zu entwickeln. Der Drehzahlparameter könnte im späteren Elektrofahrzeug ganz einfach über das Motorsteuergerät ausgelesen werden. Somit findet sich auch eine eventuelle praktische Anwendung für die Motorensounds. Da die Audio Engine von FMOD Studio noch weitaus mehr bietet, wurde noch ein Equalizer Effekt automatisiert sowie ein Distortioneffekt. Die Effekte sorgen für einen noch authentischeren Klang.

Um den Rahmen der Abschlussarbeit nicht zu überschreiten, konnten einige Faktoren des Active Sound Designs nicht berücksichtigt und untersucht werden: Zum einen die wiedergabeseitige Technik. Das heißt, was für Lautsprecher werden verbaut und wo genau werden diese idealerweise platziert um einen optimalen Klang zu gewährleisten. Außerdem wäre es denkbar den dynamischen Motorensound von mehreren Parametern abhängig zu machen. Beispielsweise könnte noch die Motorlast mit einbezogen werden. Dies würde sich sicherlich positiv auf die Klangvarianz auswirken. Weiterhin könnten die synthetischen Motorensounds mit aufgenommenen Verbrennungsmotorensounds gelayert werden. Dadurch wäre der Klang des Elektrofahrzeugs nicht komplett fremd bzw. neu und man könnte einen Bezug zu den konventionellen Fahrzeugen herstellen.

## 6 Ausblick

Die Meinungen der akustischen Anforderungen beim Elektrofahrzeug sind gespalten. Einerseits erhoffen sich Lärmschützer verkehrslärmarme Innenstädte, andererseits fordern Blindenverbände akustische Warnsignale zur Erhöhung der Sicherheit für Fußgänger<sup>109</sup>. Das Innengeräusch soll zwar den typischen Charakter eines Elektromotors widerspiegeln, jedoch wird auch über eine Individualisierung des Sounds per Knopfdruck nachgedacht. Insbesondere steht das Thema Außengeräusch im Fokus gesellschaftlicher Debatten. Denn um Gefahren aufgrund eines möglichen „Überhörens“ von zu leisen Fahrzeugen zu vermeiden, werden akustische Warnsignale generell befürwortet. Trotzdem gilt es, zeitnah die möglichen „Nebenwirkungen“ eines solchen Vorhabens abzuschätzen<sup>110</sup>. In China und Japan sind bereits Gesetze zur Gewährleistung von Mindestgeräuschpegel für Fahrgeräusche in Kraft getreten. In den USA müssen Elektro- und Hybridfahrzeuge ab 2019 serienmäßig mit einem akustischen Warnsystem Acoustic Vehicle Alerting System – AVAS ausgestattet sein<sup>111</sup>. Auch die EU hat vor dem Hintergrund der besseren Wahrnehmbarkeit von Elektroautos ein Gesetz verabschiedet. Demnach muss laut EU-Verordnung, zum Schutze anderer Verkehrsteilnehmer, in Fahrzeugen mit Elektromotor ein AVAS verbaut sein. Das zum 1. Juli 2019 in Kraft tretende Gesetz schreibt vor: „*Das AVAS muss mindestens im Geschwindigkeitsbereich zwischen dem Anfahren und einer Geschwindigkeit von etwa 20 km/h sowie beim Rückwärtsfahren automatisch ein Schallzeichen erzeugen.*“<sup>112</sup>. Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Reifenabrollgeräusche sowie die Windgeräusche laut genug um Fußgänger von dem herannahenden Fahrzeug zu warnen.

Hinsichtlich der Gesetzgebung bedarf es intelligenter Lösungen sowie seriöser Konzepte, anstatt von überstürztem Aktionismus. Im Hinblick auf die Innengeräusche ist die konzeptionelle Ausrichtung beim Sound Design noch völlig freigehalten. Welche Geräusche müssen in den Vordergrund gerückt werden, bedarf es einer speziellen Gestaltung bestimmter Geräusche oder welche sollen vermieden werden? Wie kann man ein Markenimage authentisch vermitteln? Ziel führend hierbei ist sicherlich nicht eine Aufrechterhaltung eines Elektromotor-Sounds. Allein

---

<sup>109</sup> Schwarzer 2010: 2

<sup>110</sup> vgl. Genuit & Fiebig 2011: 534

<sup>111</sup> vgl. Rogalla 2017

<sup>112</sup> Verordnung (EU) Nr. 540/2014: 46

aufgrund der gewünschten Abgrenzung der verschiedenen Automobilhersteller und der Emotionalisierung bedarf es an vielschichtigen akustischen Ansätzen. Von der Optimierung vorhandener Geräuschquellen bis zur vollständig synthetischen Erschaffung eines Fahrergeräuschs ist vieles denkbar. Als eine neue Herausforderung im Bereich des akustischen Komforts, gilt es Analysen zu entwickeln, die in der Lage sind zuverlässig auffällige zeitliche und spektrale Muster zu identifizieren. Da ein EV grundsätzlich leise ist, verliert der Schalldruckpegel, im Innenraum eines Fahrzeugs als akustischer Indikator, an Bedeutung. Künftig werden also psychoakustische Größen, die mit dem Geräuschqualitätsempfinden korrelieren, als Zielgrößen in den Vordergrund treten<sup>113</sup>. Die aktiven Systeme gestatten eine sehr einfache Gestaltung und Veränderung des Klanges. Dies eröffnet unzählige neue Möglichkeiten im Sound Design. Gegenwärtig wird ASD von Automobilherstellern und Zulieferern in der Entwicklung eingesetzt um definierte Zielgeräusche in Serienfahrzeuge zu integrieren. Damit spannt ASD einen neuen Raum für Gestaltung auf. Verbesserungen im Klang, die bisweilen durch passive Maßnahmen nicht erreichbar waren, sind nun im Bereich des Möglichen. Die Frage nach einem „authentischen“ Motorenklang war vor der Zeit der Elektro- und Hybrid obsolet. Doch in Zeiten von ASD muss diese neu beantwortet werden. Der synthetische Klang des Motors sollte von Parametern wie Last oder Motordrehzahl abhängig sein.<sup>114</sup> Damit stellt die künftige Gestaltung von Fahrzeugklängen aber auch die Integration der aktiven Systeme in die Fahrzeuge eine neue Herausforderung in der Fahrzeugakustik dar.

---

<sup>113</sup> vgl. Genuit & Fiebig 2011: 534

<sup>114</sup> vgl. Schirmacher 2002: 15

## 7 Quellenverzeichnis

- Altinsoy, E. (2013). The detectability of conventional, hybrid and electric vehicle sounds by sighted, visually impaired and blind pedestrians. *inter noise*, (S. 1-5). Innsbruck.
- Altinsoy, E., & Landgraf, J. (August 2014). Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaussengeräuschen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 116(9), S. 82-90.
- Bräunl, T. (2012). Synthetic engine noise generation for improving electric vehicle safety. *International Journal of Vehicle Safety*, 6(1), S. 1-8.
- Das Europäische Parlament, & Der Rat der Europäischen Union. (16. April 2014). VERORDNUNG (EU) Nr. 540/2014 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. April 2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 7. *Amtsblatt der Europäischen Union*, S. 1-65.
- Drehstrommotor - Zeitlauf Antriebstechnik*. (2018). Abgerufen am 14. September 2018 von <https://www.zeitlauf.de/produktinfo/technik/motoren/drehstrommotor.html>
- Görne, T. (2017). *Sounddesign*. München: Carl Hanser Verlag.
- Genuit, K., & Fiebig, A. (Juli 2011). Fahrzeugakustik und Sound Design im Wandel der Zeit. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 113(7-8), S. 530-535.
- Gibson, E. J. (1988). EXPLORATORY BEHAVIOR IN THE DEVELOPMENT OF PERCEIVING, ACTING, AND THE ACQUIRING OF KNOWLEDGE. *Annual Reviews Psychology*, S. 1-41.
- H. Moller, C. P. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health - A Bimonthly Inter-disciplinary International Journal*, 6(23), S. 37-57.
- Ilg, P. (23. Juli 2018). *Zeit Online*. Abgerufen am 8. November 2018 von <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-07/sounddesign-eu-elektroautos-warnsysteme-lautstaerke-pflicht>
- Kampker, A., Deutskens, C., & Meckelnborg, A. (2013). Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität. In *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie* (S. 15-45). Berlin-Heidelberg: Springer-Vieweg.

- Kampker, A., Vallée, D., & Schnettler, A. (2013). *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin-Heidelberg: Springer-Vieweg.
- Karle, A. (2018). *Elektromobilität Grundlagen und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag.
- Lerch, A. (2008). Bitratenreduktion. In S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik* (S. 849-884). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lerch, R., Sessler, G., & Wolf, D. (2009). *Technische Akustik - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lueg, P. (1936). *Vereinigte Staaten Patentnr. 2043416*.
- Quinn, D., Mitchell, J., & Clark, P. (2014). Development of a next-generation audible pedestrian alert system for EVs having minimal impact on environmental noise levels - project eVADER. *inter.noise*, (S. 1-9). Melbourne Australia.
- Raffaseder, H. (2010). *Audiodesign*. München: Carl Hanser Verlag.
- Rogalla, T. (28. August 2017). Fußgängerschutz Elektroautos müssen ab 2019 ein künstliches Motorgeräusch erzeugen. *Berliner Zeitung*. Abgerufen am 9. Oktober 2018 von <https://www.berliner-zeitung.de/berlin/verkehr/fussgaengerschutz-elektroautos-muessen-ab-2019-ein-kuenstliches-motorgeraeusch-erzeugen--28233104>
- Schafer, R. M. (1977). *The Tuning of the World*. University of Michigan: Knopf.
- Schirmacher, R. (2002). Von Der Aktiven Geräuschminderung Zum Active Sound Design. *Fortschritte der Akustik*(28), 8-15.
- Schwarzer, C. M. (16. August 2010). Motorsound aus dem Generator. *ZEIT ONLINE*, 1-2. Abgerufen am 9. Oktober 2018 von <https://www.zeit.de/auto/2010-07/elektroauto-fahrgeraeusch>
- Sengpiel, E. (2018). *sengpielaudio*. Abgerufen am 10. September 2018 von <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallpegel.htm>
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. S. 1-12.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1964). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press.

- Silence, S. C.-M. (kein Datum). *YouTube*. Abgerufen am 22. Oktober 2018 von <https://www.youtube.com/watch?v=vYeSbaa5jqA>
- Steinbach, L., Atamer, S., & Altinsoy, E. (2017). Evaluation of electric vehicle sounds, new concepts regarding speed-dependency and prediction of the warning effect. *173rd Meeting of Acoustical Society of America and 8th Forum Acusticum*, 30, S. 1-14. Boston, Massachusetts.
- Tabata, T., Konet, H., & Kanuma, T. (2010). Development of Nissan Approaching Vehicle Sound for Pedestrians. *0097(11)*, S. 1-6.
- Umweltbundesamt. (12. Juni 2018). Abgerufen am 27. Oktober 2018 von Thema Lärmbelästigung: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkung/laermbelaestigung>
- UN DESA. *Anteil der Bevölkerung in Städten weltweit von 1985 bis 2015 und Prognose bis 2050*. Abgerufen am 12. November 2018 von Statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37084/umfrage/anteil-der-bevoelkerung-in-staedten-weltweit-seit-1985/>
- Weinzierl, S. (2008). Hören - Psychoakustik - Audiologie. In W. Ellermeier, & J. Hellbrück, *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Williamson, A., Irvine, P., & Samantha Sadural. (Juli 2002). Analysis of motor vehicle-related fatalities involving children under the age of six years (1995-2000). *NSW Injury Risk Management Research Centre*, S. 19-36.
- Zeller, P. (2012). *Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien.