



Technische Universität Berlin
M. Sc. in Audiokommunikation und -technologie

Exposé

Untersuchung der Suggestivität von Fahrzeuggeräuschen
im Elektroauto. Zum Einfluss musikalischer Attribute auf
das Fahrverhalten

28. April 2021

Mesud Zaimovic

Matrikel-Nr. 388966

Betreuer: Prof. Dr. Stefan Weinzierl
Dipl. -Ing. Manuel Petersen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Technik	6
3	Methoden	7
3.1	Überprüfung der akustischen Merkmale des Signals	8
3.2	Überprüfung der Klangqualität des Signals	8
3.3	Einfluss des Signals auf das Fahrverhalten	8
4	Timeline	9
	Literatur	10

1 Einleitung

Sound Design konstruiert die Hörbarkeit der Welt und Klänge besitzen Information über die Umgebung in der wir uns befinden. Beim Hören von Geräuschen findet Kommunikation statt. Dies ist bekannt für Sprachlaute, aber dies gilt auch für andere Arten von Geräuschen wie Musik- oder Produktgeräusche. Grundsätzlich kann jedes akustische Ereignis als Signal wahrgenommen werden, über das Information von bestimmten Ereignissen übermittelt wird. Dementsprechend müssen Designentscheidungen auf der Grundlage getroffen werden, wie Hörer Geräusche wahrnehmen und welche Art von Kommunikation während bestimmter Ereignisse stattfindet. Ein geeignetes Sound Design erfordert einen besonderen Fokus bezüglich akustischer bzw. auditiver Kommunikation [8].

Die Wahrnehmung von Produktklängen wird als ein kommunikatives Ereignis kategorisiert. Produktgeräusche wurden lange Zeit als etwas sekundäres betrachtet oder manchmal auch als ungewollte Störgeräusche. In anderen Worten, der Klang eines Produktes wurde als etwas angesehen welches keine große Rolle bzw. Relevanz für das Produkt hatte. Mittlerweile spielen die Klänge eine viel größere Rolle [8]. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuggeräusche im Innenraum eines Autos. In der Regel wird wichtige Information, über bestimmte Fahrereignisse, in Form eines Signals vom Auto an den Fahrer gesendet um ihn auf eine bestimmte Fahrtsituation aufmerksam zu machen [7]. Ein Aspekt wäre hier z.B. die Sicherheit. Wird der Sicherheitsabstand im Verkehr nicht eingehalten wird das dem Fahrer durch ein akustisches Ereignis aktiv kommuniziert. Befindet sich der Fahrer außerhalb der Geschwindigkeitsobergrenze, vermittelt das aktive Sound Design auditiv dem Fahrer diese Information und versucht somit das Fahrverhalten des Fahrers positiv zu beeinflussen [10]. Ein wichtiges Merkmal, welches das Elektroauto vom herkömmlichen Auto unterscheidet, ist die minimierte Geräuschemission des Fahrzeugs sowohl Innen als auch Außen. Die zunehmende Verbreitung von Elektroautos eröffnet somit ein großes Feld an Möglichkeiten und Bedarf. Dies stellt jedoch eine große Umstellung für den Fahrer dar [3]. Dadurch rückt der auditive Informationsaustausch in der Fahrerkabine noch stärker in den Vordergrund als zuvor und der Einfluss dieser auf den Fahrer ist dementsprechend von hohem Interesse [15].

Da die Umstellung auf Elektrofahrzeuge ein neues Kapitel in der Automobilindustrie bedeutet, wird man diesbezüglich mit einigen Hindernissen konfrontiert. Man hat bisher keine Erfahrungen machen können bezüglich der Hörbarkeit von Elektroautos und muss sich komplett neuen Herausforderungen stellen. Daher sind Klangqualitätsziele schwer zu bestimmen und festzulegen. Dadurch, dass der allgemeine Lautstärkepegel in modernen Autos viel niedriger ist als in der Vergangenheit, steigen die Bedürfnisse und Anforderungen der Kunden ständig. Der Störpe-

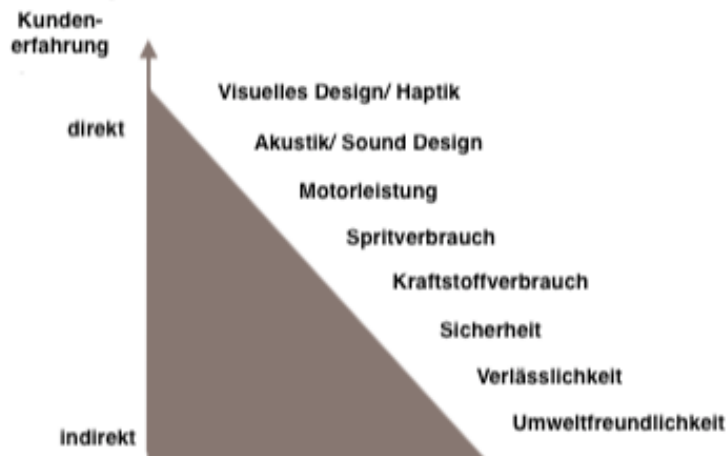


Abbildung 1: Einfluss von Fahrzeugmerkmalen aus Sicht der Kundenerfahrung

gel einer bestimmten Schallquelle oder eines störenden Geräuschereignisses in einer Fahrzeugkabine hängt nur sehr begrenzt mit dem Schalldruckpegel zusammen. Vielmehr bestimmen seine psychoakustischen Eigenschaften das subjektive Empfinden von Störung und Belästigung der Schallquelle. Weitere wichtige Faktoren in diesem Zusammenhang wären der Zeitpunkt seines Auftretens und die Plötzlichkeit des Geräusches. Darüber hinaus sind Begriffe mit positiven Assoziationen wie akustischer Komfort, Klangqualität und wahrgenommene Kraft, ohne die Verwendung von fortgeschrittenen psychoakustischen Parametern sehr schwer zu ermitteln [5].

Insgesamt muss man sich in Bezug auf das Sound Design mit einer Vielzahl von Fahrsituationen, Betriebs- und Umgebungsbedingungen auseinandersetzen. Nicht nur Leerlaufgeräusche (Innen und Außen), Geräusche mit konstanter Geschwindigkeit, Reifen-Straßengeräusche unter Berücksichtigung unterschiedlicher Straßenverhältnisse, Windgeräusche und andere Betriebsgeräusche spielen eine wichtige Rolle, sondern auch spontan auftretende Quietsch- und Rasselgeräusche sind zu berücksichtigen [5]. Dies sind alle Faktoren die für eine ausführliche psychoakustische Analyse erforderlich wären.

Im Zuge dieser auditiven Umstellung für Elektroautos, bietet es sich an das Potential der Beeinflussung des Fahrverhaltens durch auditive Signale in der Fahrerkabine genauer zu untersuchen. Der Rahmen dieser Arbeit sollte die Möglichkeiten erforschen das Fahrverhalten der Fahrzeugführer zu verbessern. Mit Hilfe eines dafür speziell erzeugten Klanginhalts sollen dem Fahrer unterbewusst Signale über die jeweilige Fahrsituation übermittelt werden. Man möchte erfahren welche Einflüsse die verschiedenen Komponenten des Klanginhalts beim Fahrer haben und wie sich

diese auf das Fahrverhalten auswirken.

In Bezug auf die Geräusche in der Fahrzeugkabine eines Elektroautos scheint die Entwicklung und konzeptionelle Ausrichtung des Sound Designs völlig offen zu sein. Von der Betonung und Optimierung des vorhandenen Elektromotors bis zur vollständigen künstlichen Erzeugung eines virtuellen Motorgeräuschs ist alles erlaubt [6].



Abbildung 2: Verschiedene strategische Richtungen hinsichtlich des Sounddesigns des Fahrzeuginnenraums von Elektrofahrzeugen

Im Bereich des akustischen Komforts wird es eine Herausforderung sein, relevante psychoakustische Parameter und Größen zu erfassen und deren Bedeutung in Bezug auf die Klangqualität von Elektrofahrzeugen zu bestimmen. Eine Hauptaufgabe besteht insbesondere darin, Analysemethoden zu finden und zu entwickeln die es ermöglichen spektrale und zeitliche Muster innerhalb des neuen Elektrofahrzeugschalls zuverlässig zu identifizieren. Tonkomponenten sind von besonderer Bedeutung und müssen mit der Wahrnehmung der Klangqualität in Beziehung gesetzt werden. Aufgrund der zunehmenden Reduzierung des Schalldruckpegels in der Fahrerkabine, wird der Schalldruckpegel selbst als akustische Komponente immer unwichtiger. Vielmehr müssen psychoakustische Parameter, die eng mit der Wahrnehmung der Klangqualität verbunden sind, als Zielwerte verwendet werden.

2 Stand der Technik

Active Sound Design ist ein akustisches Konzept, welches in Kraftfahrzeugen verwendet wird, um den Klang innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs zu beeinflussen. Das Design besteht häufig aus einer aktiven Geräuschkontrolle welches versucht, mit einem synthetischen Fahrzeugklang, bewusste und unbewusste akustische Wahrnehmungszustände zu optimieren. Um die Geräusche sowohl Innen als auch Außen entsprechend zu modifizieren, orientiert man sich normalerweise dabei an den Betriebszustand des Motors, der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Pedalposition und der Fahrzeugvibration etc. [16]. Variationen von dem Active Sound Design hängen davon ab welche Variablen zur Konzipierung des Designs in Betracht gezogen werden. Diese Variationen umfassen:

- **Passive Klangerzeugung**
- **Passive und aktive Klangerzeugung**
- **Vibrationsakustische Klangerzeugung**
- **Synthetische Klangerzeugung**

Für das Elektrofahrzeug steht die synthetische Klangerzeugung klar im Vordergrund. Die Geräuschemissionen sind beim Elektroauto auf ein Minimum reduziert, daher befasst man sich überwiegend mit der synthetischen Klangerzeugung. Die passive Klangerzeugung übermittelt Signale die vom Motor stammen, bei der Aktiven handelt es sich um Verstärkung des Abgaseingangs um das Außengeräusch des Farzeugs zu verbessern (nicht relevant für das Elektroauto) [1].

Verschiedene Forschungen und Studien im Bereich der Verkehrspsychologie deuten darauf hin, dass das akustische Feedback in der Fahrerkabine das Fahrverhalten beeinflussen kann [2]. Dementsprechend untersucht das suggestive Sound Design das Potential den Fahrer unterschwellig auf einer emotionalen Ebene insofern zu beeinflussen, damit die Fahrweise optimiert werden kann [11]. Dabei wurde von Petersen et al. ein Sound Design entwickelt welches zum einen auditiv die Dynamik und den Betriebszustand eines Automatikschaltgetriebes simuliert. Dabei können die Schaltstufen frei wählbar an verschiedene Parameter geknüpft werden, da keine optimalen Betriebspunkte eines Verbrennungsmotors vorhanden sind. Und zum anderen ein Fahrzeugsound der auf einem Sheppard-Risset Glissando basiert, bei dem die Dissonanz des Akkords mit sinkendem Sicherheitsabstand zunehmen soll. Hierdurch soll die Bedrohlichkeit der Fahrtsituation unterschwellig wahrgenommen werden und somit eine Vergrößerung des Sicherheitsabstandes provozieren.

3 Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit soll das suggestive Sound Design nun erweitert und der Einfluss auf den Fahrer genauer untersucht werden. Hierzu wird in einem ersten Schritt ein geeigneter Klanginhalt identifiziert und es wird versucht diesen an eine Reihe an emotionalen Parametern zu knüpfen. Hierdurch soll überprüft werden, mit welcher Klangerzeugung lassen sich bestimmte Emotionen beim Fahrer hervorrufen. In der Filmmusik wird seit Jahren damit gearbeitet bei bestimmten Szenen eine gewünschte Emotionalität beim Zuschauer hervorzurufen [13]. Dies macht man primär mit Hilfe von musikalischer Unterstreichung. Es soll mittels Audio Feature Extraction eine Untersuchung von mehreren musikalisch unterlegten Filmszenen erfolgen. Filmszenen die visuell bestimmte Emotionalitäten ausdrücken. Dabei muss der emotionale Charakter der Szene identifiziert und der begleitende Klanginhalt auf seine musikalischen Komponenten untersucht werden. Diese Informationen zu verknüpfen sollte schließlich in den entsprechenden musikalischen Komponenten resultieren, die es ermöglichen verschiedenste Emotionen hervorzurufen. Eingesetzt in den Sound Generator des Fahrzeugs sollen diese musikalischen Attribute im weiteren Verlauf auf den Umstand überprüft werden inwiefern diese den Fahrer in einer Fahrtsituation beeinflussen können.

In einem weiteren Schritt gilt es den Klanginhalt zu klassifizieren. Dabei ist es wichtig objektiv definierbare Parameter zu bestimmen, die sich auf die menschliche Wahrnehmung beziehen. Die Bewertung eines Schallereignisses durch den Wahrnehmenden wird durch zahlreiche Parameter beeinflusst [4].



Abbildung 3: Parameter, die anhand des menschlichen Gehörs für die Klassifizierung von Schall relevant sind

3.1 Überprüfung der akustischen Merkmale des Signals

Da man sich bei der Klangerzeugung nicht nur nach dem Schalldruckpegel orientieren kann, muss das Signal auf die entsprechenden psychoakustischen Parameter untersucht werden. Das Signal wird dabei in einem Hörversuch auf folgende Parameter untersucht:

- Lautheit
- Schärfe
- Rauigkeit
- Schwankungsstärke
- Tonalität

Dies sind subjektive Empfindungsgrößen die den Charakter eines Hörereignisses beschreiben. Zudem sollten noch Wahrnehmungsschwellen und der räumliche Eindruck ermittelt werden.

3.2 Überprüfung der Klangqualität des Signals

Parameter finden und festlegen, die eine Aussagekraft für die wahrgenommene Qualität des Klinginhalts haben. Mögliche Parameter wären: sanft, scharf, tief, laut, rein, ruhig, harmonisch, angenehm, flach, mächtig, glatt, stumpf, metallisch, rau, schrill, soft, unrein, unangenehm, schwach, harsch [14].

3.3 Einfluss des Signals auf das Fahrverhalten

Um diesen Effekt überprüfen zu können muss das Signal in einer Fahrsituation mit Versuchspersonen getestet werden. Dabei ist es wichtig die Entscheidungen die der Fahrer in der jeweiligen Situation trifft erfassen und auswerten zu können. Ohne großen Zeit- und Kostenaufwand in Anspruch nehmen zu müssen, erscheint so ein Versuch unter realen Bedingungen kaum ausführbar zu sein. Daher müsste man auf Alternativen zurückgreifen. Eine davon wäre am IPEK (Institut für Produktentwicklung - Fahrzeug- und Akustikprüfzentrum) in Karlsruhe. Dort wird eine VR Validierungsumgebung entwickelt die sich anbietet einen solchen Versuch mit Probanden durchzuführen [12]. Man würde verschiedene Fahrsituationen mittels VR simulieren und dazu das suggestive Sound Design in Verbindung mit der Fahrsituation abspielen. Des Weiteren könnte man den Test mit einem zusätzlichen Kontrollparameter ausstatten in Form von einer Herzfrequenzmessung und diesen in der Evaluierung einbeziehen [9].

4 Timeline

Gantt chart	Apr 21				Mai 21				Jun 21				Jul 21				Aug 21			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Literaturrecherche	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Signalverarbeitung							■	■	■	■	■	■								
Hörversuch									■	■	■	■	■	■						
Datenverarbeitung					■	■	■				■	■	■	■						
Statistische Auswertung													■	■	■	■				
Schreiben						■	■	■					■	■	■	■	■	■	■	■

Eine ungefähre Gliederung der Thesis beinhaltet folgende Punkte:

- Einleitung
 - Motivation/ Hintergrund
 - Forschungslücke
 - Projektkonzept
- Grundlagen
 - Psychoakustik/ Produktgeräusche
 - Fahrzeugakustik
 - Sound Design
- Methoden
 - Signalgenerierung und -verarbeitung
 - Experiment Design
 - Auswertung
- Ergebnisse
 - Analyse der Ergebnisse
 - Diskussion
 - Ausblick

Literatur

- [1] Bodden, M. and Belschner, T. (2014). Comprehensive automotive active sound design-part 1: electric and combustion vehicles. In *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings*, volume 249, pages 3214–3219. Institute of Noise Control Engineering.
- [2] Bringoux, L., Monnoyer, J., Besson, P., Bourdin, C., Denjean, S., Dousset, E., Goulon, C., Kronland-Martinet, R., Mallet, P., Marqueste, T., et al. (2017). Influence of speed-related auditory feedback on braking in a 3d-driving simulator. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 44:76–89.
- [3] Fagerlönn, J., Sirkka, A., Lindberg, S., and Johnsson, R. (2018). Acoustic vehicle alerting systems: Will they affect the acceptance of electric vehicles? In *Proceedings of the Audio Mostly 2018 on Sound in Immersion and Emotion*, pages 1–7.
- [4] Genuit, K. (2004). The sound quality of vehicle interior noise: a challenge for the nvh-engineers. *International journal of vehicle noise and vibration*, 1(1-2):158–168.
- [5] Genuit, K. (2011). Particular importance of psychoacoustics for sound design of quiet vehicles. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 2011, pages 2908–2914. Institute of Noise Control Engineering.
- [6] Genuit, K. and Fiebig, A. (2011). Vehicle acoustics and sound design in the course of time. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*.
- [7] Horswill, M. S. and Plooy, A. M. (2008). Auditory feedback influences perceived driving speeds. *Perception*, 37(7):1037–1043.
- [8] Jekosch, U. (2005). Assigning meaning to sounds—semiotics in the context of product-sound design. In *Communication acoustics*, pages 193–221. Springer.
- [9] Nardelli, M., Valenza, G., Greco, A., Lanata, A., and Scilingo, E. P. (2015). Recognizing emotions induced by affective sounds through heart rate variability. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 6(4):385–394.
- [10] Nees, M. A. and Walker, B. N. (2011). Auditory displays for in-vehicle technologies. *Reviews of human factors and ergonomics*, 7(1):58–99.
- [11] Petersen, M., Behrendt, M., Heizmann, L., and Albers, A. (2020). Suggestive sound design based on virtual gears. Technical report, SAE Technical Paper.

- [12] Reinemann, J., Hirschter, T., Mandel, C., Heimicke, J., and Albers, A. (2018). Methodische unterstützung zur produktvalidierung in ar-umgebungen in der frühen phase der pge-produktgenerationsentwicklung. *Design for X. Beiträge zum*, 28.
- [13] Steffens, J. (2020). The influence of film music on moral judgments of movie scenes and felt emotions. *Psychology of Music*, 48(1):3–17.
- [14] Swart, D. J., Bekker, A., and Bienert, J. (2018). The subjective dimensions of sound quality of standard production electric vehicles. *Applied Acoustics*, 129:354–364.
- [15] Zeitler, A. and Zeller, P. (2006). Psychoacoustic modelling of sound attributes. Technical report, SAE Technical Paper.
- [16] Zeller, P. et al. (2009). *Handbuch Fahrzeugakustik*, volume 2. Springer.