

Die Wirkung von Syntheseparametern auf Wahrnehmungsgrößen bei der aktiven Klanggestaltung im Fahrzeug

Mirko Djukić¹, André Fiebig², Andreas Herweg³

¹ HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, Deutschland, Email: mirko.djukic@head-acoustics.de

² Technische Universität Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, Email: andre.fiebig@tu-berlin.de

³ HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, Deutschland, Email: andreas.herweg@head-acoustics.de

Einleitung & Motivation

„Active Sound Design“ (folgend: ASD) bzw. die aktive Wiedergabe von synthetischen Geräuschanteilen ist eine Methode und Anwendung, die in der Fahrzeugakustik seit einigen Jahren verstärkt eingesetzt wird und im Zuge der zunehmenden Elektrifizierung vermehrt angewendet und diskutiert wird (exemplarisch in[1, 2, 3]). Als Ziel wird die Optimierung der wahrgenommenen Produktqualität und des Fahrkomforts angestrebt. Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit elektrifizierter Fahrzeuge wird die Verwendung synthetischer Antriebsgeräusche zur Pflicht, sodass eine ausreichende Warnwirkung für Fußgänger und andere Verkehrsteilnehmer gewährleistet wird[4, 5].

Entsprechend dem Sender-Empfänger-Modell nach Shannon[6] stellt die Anwendung ASD einen auditiven Informationsaustausch dar. Demzufolge kann ASD neben einer aktiven Gestaltung der Sound Quality auch die Mensch-Maschine-Kommunikation maßgeblich beeinflussen und sollte auch in dieser Hinsicht gestaltet und parametrisiert werden. Folglich ergeben sich Fragestellungen, die sich mit der Empfindung von Fahrzuständen auseinandersetzen und untersuchen, wie diese mittels ASD manipuliert und optimiert werden können. Darüber hinaus kann die wissenschaftliche Auseinandersetzung der Psychoakustik klären, ob Modelle abgeleitet werden können, um die Parametrisierung und Generierung von synthetischen Geräuschen zu unterstützen.

Der folgende Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Vorgehensweise einer solchen wissenschaftlichen Auseinandersetzung. Im Rahmen der Studie wurden Zusammenhänge zwischen dem Syntheseparameter der Tonhöhe und der wahrgenommenen Geschwindigkeit untersucht. Hierbei wurden erste Erkenntnisse gewonnen, wie sich der Grad der Tonhöhenänderung für verschiedene Schallereignisse auf die empfundene Geschwindigkeit auswirkt.

Geräuschmodell & Syntheseparameter

Ein modernes ASD erzeugt seinen Klang meist in Abhängigkeit diverser Eingangsparameter. Der Zusammenhang zwischen Eingangsparametern und resultierendem Klang wird durch das Geräuschmodell definiert. Die akustische Wiedergabe kann mit verschiedenen Audiosynthese-Verfahren umgesetzt und folgendermaßen eingeordnet werden: Additive Synthese (Addition von Sinus-Schwingungen[7, S. 12f]), Subtraktive Synthese (Filterung von Rauschsignalen[7, S. 250fff]),

Wavetable-Synthese (Synthese fester Wellenformen[7, S. 29fff]) und Granularsynthese (Synthese fester und kurzer Wellenformen[7, S. 34]).

Die Eingangsparameter eines Geräuschmodells müssen hinsichtlich der Verwendung skaliert und angepasst werden, da die Syntheseverfahren durch Frequenz, Phase sowie weiterer technischer Parameter definiert werden. Ziel ist es, die Fahrzeugzustände, beispielsweise die der Geschwindigkeit oder Pedalstellung, gestalterisch zu applizieren. Die Gestaltung entsprechend der gesamten akustischen Wahrnehmung erfordert jedoch einen hohen Grad der Abstraktion. Für die Beurteilung von Fahrzeuggeräuschen und den damit verbundenen Anforderungen der Zielgeräuschdefinition eignen sich perzeptive Kriterien, die über technische Parameter der Audiosynthese hinausgehen, wie zum Beispiel Spannung, Besonderheit, Verbrauch, Komfort, Angenehmheit oder Sportlichkeit (Auswahl aus[8]). Darüber hinaus spielen für elektrifizierte Fahrzeuge weitere Parameter, wie die akustische Wahrnehmbarkeit der Geschwindigkeit und Beschleunigung, eine besondere Rolle. Psychoakustische Studien können die Wechselwirkungen der technischen und perzeptiven Parameter zusammenführen und Erkenntnisse darüber gewinnen, wie die Zusammenhänge der Reize und Empfindungen im Interesse einer optimierten Mensch-Maschine-Kommunikation erfolgen.

Studie: Grad der Tonhöhenänderung zur empfundenen Geschwindigkeit

Um die Bewegungsanalogie des Fahrzustandes zu übermitteln[9, S.163ff] kann die Tonhöhe als Syntheseparameter des Geräuschmodells verwendet werden. Mit der Zu- und Abnahme der Fahrzeuggeschwindigkeit kann die relative Geschwindigkeitsänderung akustisch kommuniziert werden. Im Folgenden soll dieser Parameter für verschiedene Signalformen durch folgende Hypothesen untersucht werden:

- H1 Das Verhältnis zwischen dem Grad der Tonhöhenänderung und der empfundenen Geschwindigkeitsänderung ist unabhängig von der Grundtonhöhe des synthetischen Signals.
- H2 Das Verhältnis zwischen dem Grad der Tonhöhenänderung und der empfundenen Geschwindigkeitsänderung steht in Abhängigkeit zur spektralen Bandbreite des Basisgeräusches.
- H3 Ein spezifischer Grad der Tonhöhenänderung wird

mit einer spezifischen Geschwindigkeitsänderung assoziiert.

H4 Das Verhältnis zwischen dem Grad der Tonhöhenänderung und der empfundenen Geschwindigkeitsänderung ist unabhängig von der Dauer des Änderungsvorgangs.

Versuchsdesign

Innerhalb des Hörversuchs wurden ausschließlich synthetische Stimuli verwendet. Die Durchführung erfolgte mittels kalibrierter und entzerrter Wiedergabe innerhalb einer leisen Umgebung (Hörstudio).

Zur Bewertung des Grades der Tonhöhenänderung in Abhängigkeit der empfundenen Geschwindigkeit wurde die Hörversuchsmethodik folgendermaßen implementiert:

- Die Versuchsperson wird gebeten, sich in die Fahrer-Situation eines PKW zu versetzen.
- Der akustische Stimulus beginnt mit einer konstanten Tonhöhe für 3 Sekunden.
- Anschließend startet die lineare Tonhöhenzunahme.
- Die Versuchsperson soll durch Tastendruck bestätigen, wann die zu bewertende Zielgeschwindigkeit erreicht wird.

Versuchspersonen wurden instruiert keine Bewertung abzugeben, falls die Zielgeschwindigkeit verpasst oder nicht erreicht wurde. Wurde keine Bewertung abgegeben, wurde der Durchgang wiederholt. Erfolgte auch in der Wiederholung keine Bewertung, wurde der Durchgang entsprechend gekennzeichnet und mit dem nächsten Stimulus fortgesetzt. Das Versuchsdesign wurde mittels „SQala API“ innerhalb „SQala“ [10] umgesetzt.

Geräuschmodell & Stimuli

Das entwickelte Geräuschmodell konnte mittels „Wavetable-Synthese“ Audiodaten in Dauerschleife abspielen. Diese Methode erlaubt es, die Tonhöhe für beliebige Audiodaten pro Audiosample zu manipulieren, indem die Wiedergabegeschwindigkeit der Audiowiedergabe reguliert wird. Die Steuerung erfolgt mit einer Rechteckfunktion in Abhängigkeit der Audiodateilänge, die pro Audiosample in der Frequenz eingestellt werden kann. Die synthetischen Audiodaten wurden mittels „Python“ [11] erzeugt. Das Geräuschmodell wurde innerhalb der Audiosyntheseumgebung „Pure Data“ [12] umgesetzt, wodurch eine Echtzeit-Synthese möglich war.

Für den Hörversuch wurde der maximale Grad der Tonhöhenänderung auf den Faktor 4 festgelegt. Die Zunahme der Tonhöhe erfolgt für jeden Stimulus linear und die Wiedergabedauer, bis der Maximalwert erreicht wird, variiert mit 10s, 15s und 20s.

Es wurden Audiodaten für die Signalformen Sinus (folgend: sin), 1/3-Oktavband-Rauschen (folgend: tbn), Oktavband-Rauschen (folgend: obn) und Multisinus (folgend: mus) erzeugt, dessen Grundtonhöhen für die Frequenzen 160 Hz, 315 Hz und 630 Hz variieren. Die Grenz-

frequenzen der Rauschsignale entsprechen der Norm [13] und die Flankensteilheiten wurden auf die 4. Ordnung (Butterworth) gestellt. Das Multisinussignal setzte sich aus acht Sinusschwingungen zusammen, die im harmonischen Abstand zur Grundtonhöhe stehen. Die Amplituden der Schwingungen wurden relativ zur Grundschwingung folgendermaßen festgelegt: Grundton 0 dB, 1. Harmonische -3 dB, 2. Harmonische -9 dB, 3. Harmonische -9 dB, 4. Harmonische -18 dB, 5. Harmonische -18 dB, 6. Harmonische -24 dB, 7. Harmonische -21 dB.

Der gesamte Schalldruckpegel wurde für alle 12 Audiodaten auf den konstanten (bzw. gemittelte Schalldruckpegel für die Rauschsignale) von 64 dB skaliert. Die kalibrierte Audiowiedergabe erfolgt mit dem Wiedergabegerät „labP2“ [14] und dem Kopfhörer „HD650“ [15].

Zur Versuchsdurchführung

In einer Hörversuchssitzung wurden 36 randomisierte Stimuli pro Versuchsperson wiedergeben. Für alle Signalformen und Grundtonhöhen, sowie der Signaldauer von 10 Sekunden, erfolgte die Bewertung der Geschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h (24 Varianten). Ausschließlich für die Signalform sin wurde außerdem die Signaldauer mit 15s und 20s variiert (12 Varianten). Zu Beginn des Hörversuchs erfolgte eine Trainingssitzung mit drei Stimuli, deren Ergebnisse nicht evaluiert wurden. Insgesamt nahmen 34 Personen an der Studie teil, die nach Selbstauskunft ein normales Hörvermögen aufweisen. Eine Sitzung dauerte ca. 15 Minuten. Insgesamt wurden zwei Sitzungen nacheinander mit einer kurzen Pause durchgeführt und somit 72 Bewertungen pro Person erhoben.

Ergebnisse & Auswertung

Die Übersicht aller Ergebnisse der Grade der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor) für die Wiedergabedauer von 10 Sekunden sind in Abbildung 1 für 160 Hz, in Abbildung 2 für 315 Hz, in Abbildung 3 für 630 Hz und die Ergebnisse in Abhängigkeit der Signaldauer (ramp_time) für sin in Abbildung 4 dargestellt. Die Messergebnisse weisen beim dem statistischen Test nach D’Agostino keine Normalverteilung auf, sodass zur Überprüfung der Hypothesen die statistischen Verfahren nach Wilcoxon für zwei Gruppen und nach Kruskal-Wallis für mehr als zwei angewendet wurden. Als post-hoc Test wurde die Methode nach Dunn, sowie die p-Wert-Korrektur nach Bonferroni verwendet.

Die Darstellungen zeigen Boxplots, in denen der Median als waagerechter Strich, der Kasten als Interquartilsabstand, die Linie als maximal 1,5-facher Interquartilsabstand sowie darüber hinaus hinterlegte Punkte als Ausreißer dargestellt sind. Eine Versuchsperson hat in 2 nicht wiederholten Fällen und in einem wiederholten Fall keine Bewertung abgegeben. Aufgrund der sehr geringen Anzahl wurden diese Messergebnisse mit dem Maximalwert 4 bewertet und in die Statistik eingeschlossen.

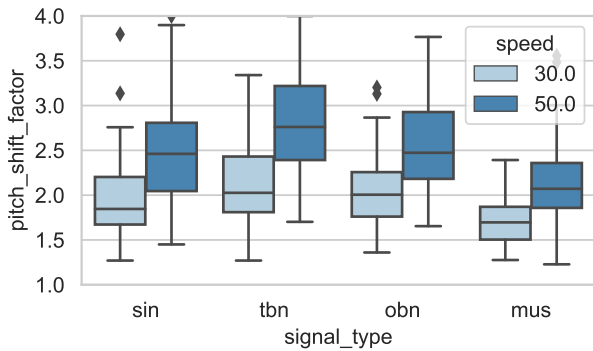


Abbildung 1: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 34 Versuchspersonen in Abhängigkeit der Signalform (signal_type) und empfundenen Geschwindigkeit (speed, hell: 30 km/h, dunkel: 50 km/h) für die Wiedergabedauer von 10s und der Grundtonhöhe von 160Hz

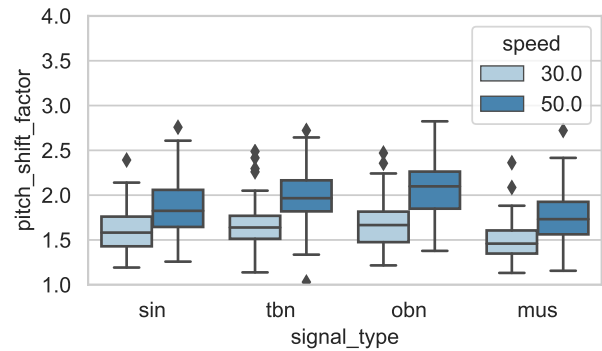


Abbildung 3: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 34 Versuchspersonen in Abhängigkeit der Signalform (signal_type) und empfundenen Geschwindigkeit (speed, hell: 30 km/h, dunkel: 50 km/h) für die Wiedergabedauer von 10s und der Grundtonhöhe von 630Hz

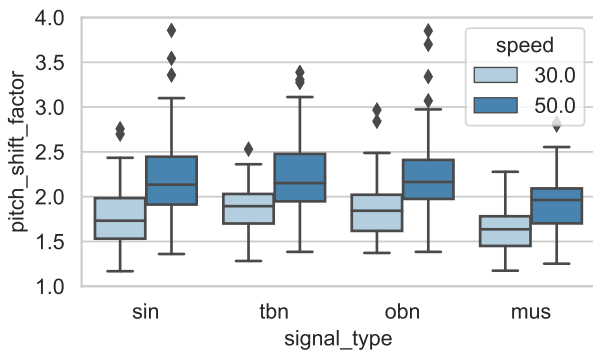


Abbildung 2: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 34 Versuchspersonen in Abhängigkeit der Signalform (signal_type) und empfundenen Geschwindigkeit (speed, hell: 30 km/h, dunkel: 50 km/h) für die Wiedergabedauer von 10s und der Grundtonhöhe von 315Hz

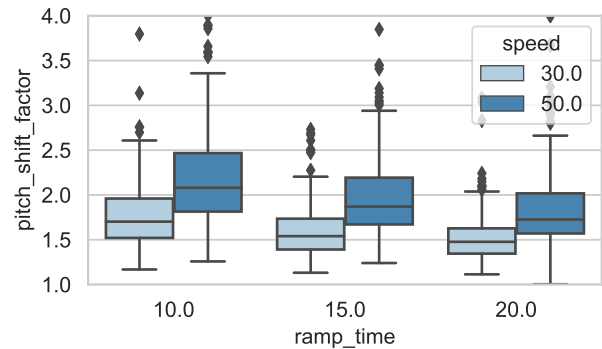


Abbildung 4: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 34 Versuchspersonen in Abhängigkeit der Wiedergabedauer (ramp_time in Sekunden) und empfundenen Geschwindigkeit (speed, hell: 30 km/h, dunkel: 50 km/h) für die Signalform sin

H1: Abhängigkeit der Grundtonhöhe

Beim Vergleich der Messergebnisse in Abhängigkeit der Grundtonhöhe und der empfundenen Geschwindigkeit zeigen sich über alle Signalarten zusammengefasst signifikante Unterschiede ($p < 0.001$). Mit der Zunahme der Grundtonhöhe sinkt die Bewertung der empfundenen Geschwindigkeit.

H2: Abhängigkeit der Signalbandbreite

Beim Vergleich der Signalbandbreite ergibt sich für alle Signalarten zusammengefasst kein eindeutiges Ergebnis. Die Verteilungen nach Signalarten unterscheiden sich hoch signifikant. Jedoch zeigt sich nach post-hoc Test und p-Wert Korrektur nur zwischen mus und den anderen Signalformen ein signifikanter Unterschied. Darüber hinaus ist ausschließlich der Vergleich der Verteilungen tbn und obn nicht signifikant. Insgesamt deuten die Ergebnisse an, dass die Bewertungen der empfundenen Geschwindigkeit für Rauschsignale höher ausfallen, als für diejenigen Signale nach additiver Synthese.

H3: Spezifische Geschwindigkeiten

Der zusammengefasste Vergleich in Abhängigkeit der zur bewertenden Geschwindigkeit zeigt hoch signifikante Unterschiede. Mit der Erhöhung des Grades der Tonhöhe steigt die empfundene Geschwindigkeit signifikant an.

H4: Abhängigkeit der Wiedergabedauer

Die Untersuchung der Wiedergabedauer zeigt, dass mit der Zunahme der Wiedergabedauer die Bewertung des Grades der Tonhöhe sinkt. Der statistische Test weist allerdings auf, dass sich die Verteilungen zwischen der Wiedergabedauer von 10s und 20s signifikant unterscheiden ($p < 0.001$). Die zu definierende Rampe der Tonhöhenänderung scheint einen Einfluss auf die Bewertung des Grades der Tonhöhenänderung zu haben (je langsamer die Tonhöhe ansteigt, desto früher wird der benötigte Grad der Tonhöhenänderung für eine spezifische Geschwindigkeit erreicht). Dieser Aspekt muss für künftige Untersuchungen berücksichtigt werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Rampe der Tonhöhenänderung entweder zu schnell oder zu lang-

sam in der Darbietung eingestellt wurde. Dieser Effekt kann möglicherweise auf das passive Versuchsdesign zurückzuführen sein.

Diskussion

Die Interquartilsabstände sowie die Streuungen deuten an, dass die Bewertung der empfundenen Geschwindigkeit für Versuchspersonen im psychoakustischen Labor-kontext schwierig ist. Allerdings zeigen sich konsistente Ergebnisse beim Vergleich der Sitzungswiederholungen. Grundsätzlich konnten über die beiden Wiederholungen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Für Stimuli mit 15s und 20s Wiedergabedauer wurden die Zielgeschwindigkeiten früher erreicht als erwartet. Aufgrund von Erfahrungswerten über die Dauer eines durchschnittlichen Beschleunigungsvorgangs könnte hier ein Widerspruch zwischen der Tonhöhenänderung und der erwarteten Geschwindigkeit entstehen. Dies könnte ein Grund für abweichende Bewertungen darstellen.

Schlussfolgerungen & Ausblick

Die Studie zeigt, dass die empfundene Geschwindigkeit für verschiedene Signalarten reproduzierbar erfasst werden konnte. Des Weiteren konnte die empfundene Geschwindigkeit in Abhängigkeit ausgewählter Parameter aktiv manipuliert werden. Im durchgeführten Laborkontext ergibt sich für die empfundenen Geschwindigkeiten bei 30 km/h und 50 km/h ein Wertebereich der Tonhöhen-Faktoren von ca. 1,5 bis 3. Dabei sind die Grundtonhöhe und die spektrale Bandbreite relevante Einflussgrößen. Darüber hinaus ist ein zeitlicher Einfluss der Wiedergabedauer für die Bewertung der empfundenen Geschwindigkeit erkennbar.

Zusätzlich sind weiterführende Untersuchungen notwendig, ob sich die beobachteten Ergebnisse in einem aktiven Versuchsdesign validieren lassen. Durch eine mögliche Erweiterung des Kontextes können Schlussfolgerungen getroffen werden, ob sich diese Zusammenhänge auf das Fahrverhalten auswirken können. Weitere Studien in virtueller Realität oder „in situ“ wären hier nötig. Sollten sich die beobachteten Zusammenhänge im Rahmen solcher Studien als valide bestätigen, wäre eine Modellierung der empfundenen Geschwindigkeit für die ASD Entwicklung denkbar.

Danksagung

Es sei den 34 Mitarbeitern für Ihre Studienteilnahme herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Küppers T.; Biermann J.W. (2011): Zielgeräuscentwicklung von Elektrofahrzeugen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2011. DEGA. Berlin (D)
- [2] Zeitler A.; Liebing R.; Kerber S. (2010): Sounddesign im Dienste der Wahrnehmbarkeit von leisen Fahrzeugen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2010. (DEGA). Berlin (D)
- [3] Genuit K.; Fiebig A. (2012): Die Relevanz der Psychoakustik für die E-Mobility. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2012. (DEGA). Berlin (D)
- [4] United Nations (UN Regulation No. 138 Revision 1): Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. 16.11.2017
- [5] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA): Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141, Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles. 12.02.2018
- [6] Shannon C. E.(1948): A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal 27 (3 & 4): 379–423, 623–656.
- [7] Puckette M. (2007): The Theory and Technique of Electronic Music (Draft). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., URL: <http://msp.ucsd.edu/techniques/v0.11/book.pdf>
- [8] Altinsoy M.E.; Jekosch U. (2012): The Semantic Space of Vehicle Sounds: Developing a Semantic Differential with Regard to Customer Perception. In: JAES 60 (1/2), S. 13–20.
- [9] Genuit K. (Hg.) (2010): Sound-Engineering im Automobilbereich. Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. 1. Aufl. Berlin Heidelberg (D): Springer Verlag.
- [10] HEAD acoustics GmbH: Datenblatt SQala - ArtemiS SUITE Jury Testing Module. März 2019, URL: https://www.head-acoustics.com/downloads/de/artemis/D5050_SQala_g.pdf
- [11] Python Software Foundation: The Python Language Reference, Release 3.7.0, 27.06.2018, online verfügbar unter URL: <https://docs.python.org/release/3.7.0/download.html>
- [12] Puckette M: Pd Documentation (version 0.47.1), URL: http://msp.ucsd.edu/Pd_documentation/index.htm
- [13] American National Standard (ANSI S1.11-2004): Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters. 19.02.2004
- [14] HEAD acoustics GmbH: Datenblatt labP2 (Code 3732). 05.2016, URL: https://www.head-acoustics.com/downloads/de/labP2/D3732_labP2_g.pdf
- [15] Sennheiser electronic GmbH & Co. KG: HD 650 Bedienungsanleitung. 2016, URL: https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/4636/HD650_Manual_11_2016.pdf