

Zur Tonhöhe als Syntheseparameter für die empfundene Geschwindigkeit bei der aktiven Klanggestaltung im Fahrzeug

Mirko Djukic¹, Andreas Herweg²

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

² HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, Deutschland, Email: andreas.herweg@head-acoustics.de

Einleitung & Motivation

Im Zuge der nun in Kraft getretenen verschiedenen Gesetzgebungen zu synthetischen Warngeräuschen für elektrifizierte Fahrzeuge[1, 2, 3] und dem damit verbundenen flächendeckenden Einsatz von „Acoustic Vehicle Alerting Systems“ (folgend: AVAS) steigt exemplarisch die Bedeutung und Notwendigkeit der systematischen und psychoakustischen Auseinandersetzung mit dem Themengebiet „Active Sound Design“ (folgend: ASD). Um auf die „neuen“ und künftigen akustischen Gegebenheiten und Herausforderungen des elektrifizierten und automatisierten Gesamtfahrzeuges einzugehen, ist eine grundsätzliche Betrachtung notwendig, dass sowohl das Außengeräusch, als auch das Innengeräusch berücksichtigt und einen potentiellen Einsatz zur Optimierung und Manipulation der Fahrerlebnisses und der Mensch-Maschine-Kommunikation als Solches untersucht.

Der Grad der Tonhöhenänderung kann dabei aufgrund der Bewegungsanalogie ein Audiosyntheseparameter sein, um die Geschwindigkeit akustisch nachzubilden[4, S.163ff]. In einer bereits durchgeführten Studie[5] konnte nachgewiesen werden, dass selbst unter Laborbedingungen und in einem passiven Versuchsdesign signifikante Präferenzen für verschiedene Zielgeschwindigkeiten erreicht werden, die in Abhängigkeit zur Basistönhöhe und Bandbreite von rein synthetischen Stimuli stehen. Die Ergebnisse zeigen auch eine Abhängigkeit der Steigung für die Tonhöhenzunahme. Dabei wird die Erklärung in Betracht gezogen, dass das Versuchsdesign passiv gestaltet war und die Versuchspersonen auf eine Geschwindigkeit „warteten“ und bei einer zu geringen Steigung die Bewertung zu früh erfolgte. In dem hier vorgestellten Beitrag soll über die Folgestudie berichtet werden, die sich diesem Gegenstand gewidmet hat und dabei ein aktives Versuchsdesign umgesetzt hat.

Studie: Grad der Tonhöhenänderung zur empfundenen Geschwindigkeit im interaktiven Kontext

Die Studie setzt sich mit dem Zusammenhang des Grades der Tonhöhenänderung und der empfundenen Geschwindigkeit auseinander. Ziel ist es, signifikante Zusammenhänge für verschiedene Signalarten und Parametrisierungen zu ermitteln, die unter Laborbedingungen und in einem interaktiven Kontext bestimmt werden. Dabei werden folgende Hypothesen untersucht.

H1 Die Bewertungen der Tonhöhenfaktoren für verschiedene empfundene Geschwindigkeiten ist un-

abhängig von der Wiederholung der Versuchsdurchführung.

H2 Das Verhältnis zwischen dem Grad der Tonhöhenänderung und der empfundenen Geschwindigkeitsänderung ist abhängig von der Grundtonhöhe des synthetischen Signals.

H3 Das Verhältnis zwischen dem Grad der Tonhöhenänderung und der empfundenen Geschwindigkeitsänderung steht in Abhängigkeit zur spektralen Bandbreite des Basisgeräusches.

H4 Ein spezifischer Grad der Tonhöhenänderung wird mit einer spezifischen Geschwindigkeitsänderung assoziiert.

H5 Der Grad der Tonhöhenänderung für eine spezifische Geschwindigkeitsänderung ist unabhängig von der linearen Applikation der Tonhöhenänderung entlang der Geschwindigkeit eines virtuellen Fahrzeuges.

Die Hypothesen drei und vier wurden bereits in der zuvor durchgeführten Studie betrachtet und sie sollen im aktiven Studiendesign wiederholt werden. Anhand den Studienergebnisse ist H2 angepasst und geht nun gleichwohl von einer Abhängigkeit der Basistönhöhe aus. Hypothese fünf beleuchtet die variable lineare Applikation der Tonhöhenänderung entlang der Geschwindigkeit. Um für künftige Studien eine Aussage zu generieren, ob das Antwortverhalten über unterschiedliche Tage stabil reproduzierbar ist und ob folglich ein Design mit nur einer Messwiederholung ausreichend ist, wird die erste Hypothese einbezogen.

Versuchsdesign

Die Versuchsperson soll ein virtuelles Fahrzeug steuern und dabei durch individuelle Beschleunigung und Abbremsung die empfundene Geschwindigkeit bewerten. Die Tonhöhe variiert hierzu linear für verschiedene Schallereignisse entlang der durch das Fahrmodell simulierten Geschwindigkeit. Die Studie wird in einem Hörstudio unter leiser Umgebung mit kalibrierter Wiedergabe via Kopfhörer durchgeführt. Darüber hinaus erfolgt ein rein synthetischer akustischer Stimulus. Der Hörversuch ist folgendermaßen gestaltet:

- Die Versuchsperson wird gebeten, sich in die Fahrer-Situation eines PKW zu versetzen.
- Das virtuelle Fahrzeug befindet sich in Leerlaufgeschwindigkeit und kann durch Betätigung von Pedalen beschleunigt und abgebremst werden (keine Gangauswahl).

- Mit der individuellen Beschleunigung und Bremsung des virtuellen Fahrzeuges nimmt die simulierte Geschwindigkeit und folglich die Tonhöhe linear zu und ab.
- Die Versuchsperson soll durch Tastendruck auf dem Lenkrad bestätigen, wenn die zu bewertende empfundene Geschwindigkeit erreicht ist.

Der Hörversuch wurde in „SQala“ [6] mittels der „SQala API“, sowie mit Programmbestandteilen „H3S“ [7] für das virtuelle Fahrzeug umgesetzt. Als Eingabegeräte wurden die digitalen Lenkrad-/Pedalsysteme „G25“ und „G29“ der Fa. Logitech für sechs Terminals des Hörstudios verwendet, die mit „H3S“ kommunizieren und das virtuelle Fahrzeug in der Geschwindigkeit realitätsnah regulieren. In „H3S“ liegen fünf virtuelle Fahrzeuge vor, wovon der Demo-Datensatz „Sports-car“ für die Versuchsreihe verwendet wurde.

Geräuschmodell & Stimuli

Wie in der bereits zuvor durchgeführten Studie wurde das Geräuschmodell mit Hilfe der Echtzeit-Audiosyntheseumgebung „Pure Data“ [8] unter Anwendung der „Wavetable-Synthese“ [9, S.29ff] realisiert. Der Grad der Tonhöhe ist dabei durch die Manipulation der Wiedergabegeschwindigkeit der Audiodaten so umgesetzt, indem die Tonhöhe in Abhängigkeit beliebiger Eingangsgrößen interaktiv für jedes Audiosample gesteuert werden kann. Die synthetischen Eingangs-Audiodaten wurden in „Python“ [10] erzeugt und in die Echtzeitumgebung eingebettet.

Unter Berücksichtigung der bisherigen Studienergebnisse wurden drei verschiedene Steigungen für die Untersuchung von H5 definiert, die sich nach Gleichung (1) für die Tonhöhenzunahmen folgendermaßen definieren. Dabei wurde für die Tonhöhenfaktoren in Abhängigkeit zur Basis-tonhöhe darauf geachtet, dass bei der Geschwindigkeit von 50 km/h drei lineare Steigungen n pro Stimulus für eine beliebige Eingangsgeschwindigkeit v des virtuellen Fahrzeuges umgesetzt werden: lineare Tonhöhenrampen $n_1 = 1,5$, $n_2 = 2,0$ und $n_3 = 3,0$ bei 50 km/h.

$$\text{Pitchfactor} = (n_x - 1) \cdot \frac{v}{50 \text{ km/h}} + 1 \quad (1)$$

Die Audiodaten als Eingangsparameter entsprechen der Auswahl der vorangegangenen Studie. Die Signalarten wurden auf Sinus (folgend: sin), Oktavband-Rauschen (folgend: obn) und ein Multisinus (folgend: mus), sowie deren Tonhöhen auf die Frequenzen 160 Hz und 315 Hz festgelegt. Die Rauschsignale entsprechen der Norm [11] und die Flankensteilheiten wurden auf die 4. Ordnung (Butterworth) eingestellt. Das Multisinus-signal 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. Anhand der Signalparameter und Steigungen der Tonhöhenänderung

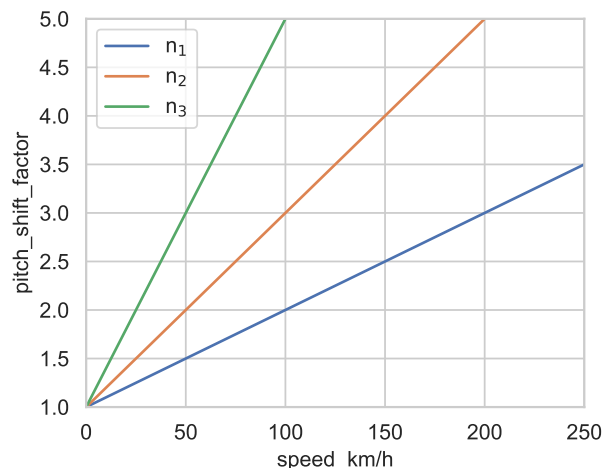


Abbildung 1: Grade der Tonhöhenänderung entlang der Geschwindigkeit nach Gleichung (1)

ergeben sich 36 verschiedene Stimuli. Die gesamte Wiedergabe wurde dabei auf einen auf den konstanten (bzw. für Rauschsignale gemittelten) Schalldruckpegel von 64 dB festgelegt. Das Wiedergabefrontend „labP2“ [12], sowie der Kopfhörer „HD650“ [13] wurden zur kalibrierten Wiedergabe an allen sechs Terminals eingesetzt.

Zur Versuchsdurchführung

Die 36 Stimuli wurden in einer Hörversuchssitzung in zufälliger Abfolge präsentiert und pro Versuchsperson bewertet. Dabei wurde jede der oben genannten Variationen umgesetzt. Der Versuch nahm ca. 20 Minuten Zeit in Anspruch und es konnten bis zu sechs Teilnehmer gleichzeitig in einem Hörstudio eingeladen werden. Zu Beginn des Hörversuchs erfolgte eine Trainingssitzung, indem die Versuchspersonen den Hörversuchsschritt sowie die Bedienung der Lenkräder kennenlernen konnten. An dieser Studie nahmen insgesamt 43 Versuchspersonen teil, die nach Selbstauskunft ein gesundes Hörvermögen aufwiesen. Zur Untersuchung der Hypothese eins nahmen insgesamt 18 Versuchspersonen davon an einer zweiten Hörversuchssitzung teil, indem mindestens ein Tag Abstand zum vorangegangenen Hörversuch lag. Dadurch ergeben sich insgesamt 61 Datensätze (2196 Einzelbewertungen), die für die Analysen der Hypothesen zwei bis fünf, sowie 36 Datensätze für die Hypothese eins herangezogen werden.

Ergebnisse & Auswertung

Die Darstellungen zur Analyse der Hypothesen eins bis fünf sind in den Abbildungen 2, 3, 4, 5 und 6 für die Grade der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor) entlang der Geschwindigkeit und in Abhängigkeit der einzelnen Variablen statistisch aufbereitet. Die statistischen Tests erfolgten in der Gruppierung des jeweils zu analysierenden Parameters. Die Ergebnisse weisen sowohl in der Gesamtheit, als auch nach Geschwindigkeit getrennt, nach Shapiro-Wilk, D’Agostino und Anderson keine Normalverteilung auf, sodass für die weiteren Analysen nicht-parametrische Hypothesentests herangezogen werden. Für den Vergleich von zwei Gruppen wird der

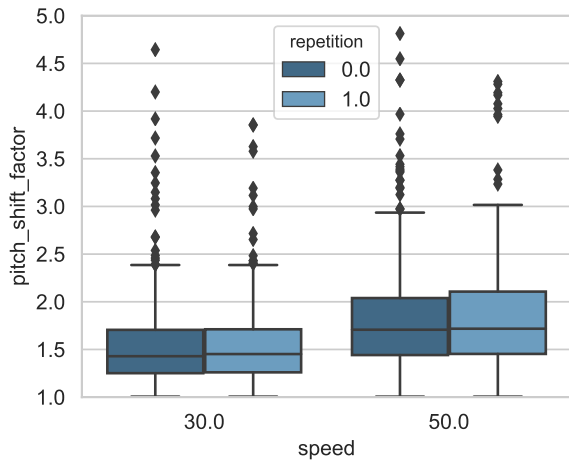


Abbildung 2: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 36 Datensätze in Abhängigkeit der Messwiederholung (repetition) und empfundenen Geschwindigkeit (speed)

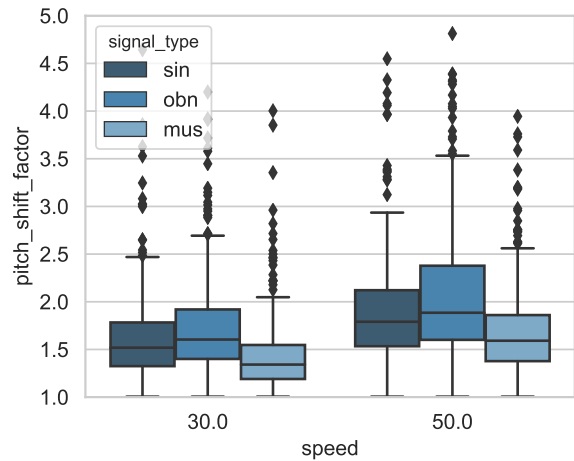


Abbildung 4: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 61 Datensätze in Abhängigkeit der Signalform (signal_type) und empfundenen Geschwindigkeit (speed)

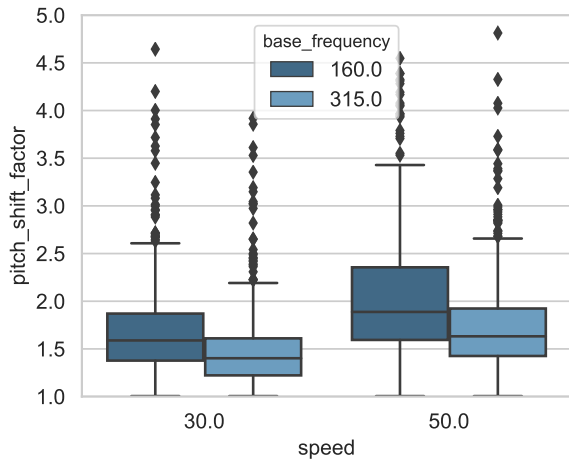


Abbildung 3: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 61 Datensätze in Abhängigkeit der Grundtonhöhe (base_frequency) und empfundenen Geschwindigkeit (speed)

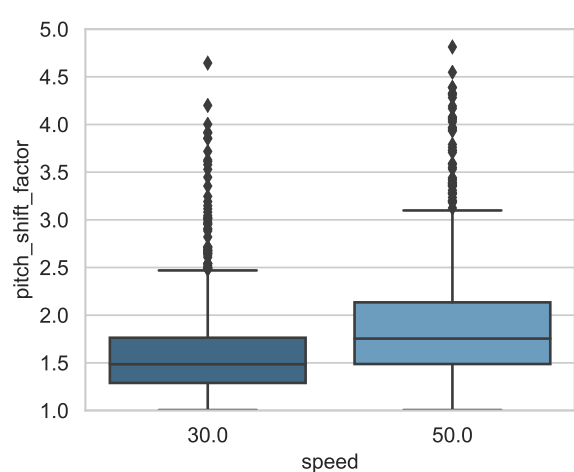


Abbildung 5: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 61 Datensätze in Abhängigkeit der empfundenen Geschwindigkeit (speed) über alle Signalvariationen

Test nach Wilcoxon (für H1, H2 und H4) angewendet und für den Vergleich von mehr als zwei Gruppen wird der Test nach Kruskal-Wallis (H3 und H5) unternommen und ein post-hoc Test nach der Methode von Dunn, sowie eine p-Wert Korrektur nach Bonferroni eingesetzt.

H1: Abhängigkeit der Messwiederholung

Die Auswertung der Ergebnisse von Versuchsteilnehmern, die zweimal am Hörversuch teilgenommen haben, zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchswiederholungen auf ($p = 0.135$). Daher werden für die weiteren statistischen Auswertungen alle 63 Datensätze gleichermaßen mit einbezogen.

H2: Abhängigkeit der Grundtonhöhe

Die Grundtonhöhe zeigt eine hoch signifikante Ausprägung ($p < 0.001$) für die Beurteilung der empfundenen Geschwindigkeit und damit zusammenhängend den

benötigten Grad der Tonhöhenänderung.

H3: Abhängigkeit der Signalform

Die Signalform beeinflusst gleichermaßen hoch signifikant ($p < 0.001$) die Beurteilung der empfundenen Geschwindigkeit für alle drei Signalarten.

H4: Spezifische Geschwindigkeiten

Für die spezifischen Geschwindigkeiten ergeben sich ebenso hoch signifikante Unterschiede ($p < 0.001$) für die Grade der Tonhöhenänderung.

H5: Abhängigkeit der Tonhöhenapplikation entlang der Geschwindigkeit

Die Auswertung der Daten in Abhängigkeit der verschiedenen Applikationen der Tonhöhensteigungen deuten hoch signifikante Unterschiede ($p < 0.001$) an. Mit der Erhöhung der linearen Steigung der Tonhöhe, nimmt die Bewertung des Grades der Tonhöhenänderung zu.

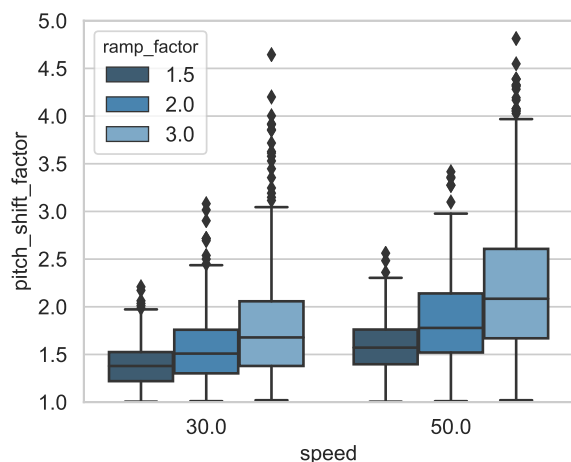


Abbildung 6: Grad der Tonhöhenänderung (pitch_shift_factor): gemittelt für 61 Datensätze in Abhängigkeit der Steigung der linearen Tonhöhenapplikation (ramp_factor) und empfundenen Geschwindigkeit (speed)

Diskussion

Die Hypothesen eins bis vier können anhand der statistischen Auswertungen für diese Versuchsreihe bestätigt werden. Die Ergebnisse der Hypothesen zwei bis vier decken sich mit dem voran gegangen Studienergebnis, sodass sich diese Erkenntnisse sowohl im passiven, als auch im aktiven Design, decken. Basierend auf den Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass das Bewertungsverhalten von Teilnehmern über mehrere Sitzung stabil ist. Für künftige Studien scheinen daher keine umfangreichen Messwiederholungen nötig.

Hypothese fünf kann nicht bestätigt werden. Anscheinend beeinflusst ein weiterer Parameter mit zeitlicher Komponente die Beurteilung der empfundenen Geschwindigkeit und dem benötigten Grad der Tonhöhenänderung. Führt man die statistischen Tests im Detail nach den einzelnen Variablen durch, so zeigt sich eine ausschließlich signifikante Ausprägung zwischen den Steigungen 1,5 und 3 und in vereinzelt Fällen liegt diese zwischen 1,5 und 2 (in 2 von 12 Fällen), sowie zwischen 1,5 und 3 (4 von 12 Fällen) nicht vor. Die Auswertung der Quartil-Abstände deutet darüber hinaus eine Zunahme der „Unsicherheit“ mit der Erhöhung der Steigung an. Zur weiteren Analyse der benötigten Grade der Tonhöhenänderung muss der Kontext im Studiendesign erweitert werden.

Schlussfolgerung & Ausblick

Die Studienergebnisse zeigen signifikante Ausprägungen für den Zusammenhang zwischen der empfundenen Geschwindigkeit und dem benötigten Grad der Tonhöhenänderung für verschiedene Signalarten im interaktiven Versuchsdesign. Die Basistonehöhe, sowie die spektrale Zusammensetzung sind dabei wichtige Faktoren. Diese Informationen decken sich mit den Studienergebnissen im passiven Versuchsdesign. Die Untersuchung der verschiedenen linearen Applikationen der Tonhöhenänderung zeigen für ein virtuelles Fahrzeug ei-

ne signifikante Unterscheidung, sodass bei einem reinen synthetischen akustischen Stimulus weitere zeitliche Komponenten berücksichtigt werden müssen, die eine Wechselwirkung zur empfunden Beschleunigung hervorrufen. Die empfundene Geschwindigkeit ist eine multisensorische und abgeleitete Erfahrung, sodass für weiterführende Analysen der Kontext für das Studiendesign erweitert werden muss. Typische Wind- und Rollgeräusche können den akustischen Stimulus ergänzen oder es kann ein visueller Stimulus als weiterer Parameter eingeführt werden. Anhand dieser getrennten Analysen kann eine Ableitung und Modellierung zum benötigten Grad der Tonhöhenänderung zur Wahrnehmung der empfundenen Geschwindigkeit unternommen werden.

Danksagung

Wir bedanken uns herzlich bei den 43 freiwilligen Teilnehmern für Ihre Studienteilnahme.

Literatur

- [1] 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
- [2] NHTSA: FMVSS No. 141, Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles. 12.02.2018
- [3] GB National Standard (GB/T 37153-2018): Acoustic vehicle alerting system of electric vehicles running at low speed (English Version). 2018
- [4] Genuit K. (Hg.) (2010): Sound-Engineering im Automobilbereich. 1. Aufl. Berlin Heidelberg (D): Springer Verlag.
- [5] Djukic M.; Fiebig A.; Herweg A. (2019): Die Wirkung von Syntheseparametern auf Wahrnehmungsgrößen bei der aktiven Klanggestaltung im Fahrzeug. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2019. DEGA. Berlin (D)
- [6] HEAD acoustics GmbH: Datenblatt SQala - ArtemiS SUITE Jury Testing Module. März 2019
- [7] HEAD acoustics GmbH: Datenblatt H3S - HEAD 3D Sound Simulation System (Code 7007). August 2018
- [8] Puckette M: Pd Documentation (version 0.47.1)
- [9] Puckette M. (2007): The Theory and Technique of Electronic Music (Draft). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [10] Python Software Foundation: The Python Language Reference, Release 3.7.0, 27.06.2018
- [11] American National Standard (ANSI S1.11-2004): Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters. 19.02.2004
- [12] HEAD acoustics GmbH: Datenblatt labP2 (Code 3732). 05.2016
- [13] Sennheiser electronic GmbH & Co. KG: HD 650 Bedienungsanleitung. 2016