

Einflussfaktoren bei der Wahrnehmung von tonalen Komponenten im Fahrzeuginnenraum

Factors influencing the perception of tonal components in the vehicle interior

Jesko L. Verhey, Jan Hots

<http://dx.doi.org/10.25673/103512>

Abstract

The increasing electrification of cars changes the acoustic challenges in the vehicle interior. On the one hand, the sounds of auxiliaries become more prominent, since in cars with electric drives they are no longer masked by the sound of a combustion engine. On the other hand, the quality of the noise emitted by the powertrain changes. For electric drives, the perception of tonal components is key to the psychoacoustic characterisation of the vehicle sound. An important sensation in this context is the magnitude of tonal content, sometimes also referred to as tonalness or tonality. This study presents factors, which influence this sensation. Among others, it is shown how level and number of tonal components affect the magnitude of tonal content, how this sensation changes with age and hearing impairment and how it relates to the pleasantness of a sound.

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen ändern sich auch die akustischen Herausforderungen für den Fahrzeuginnenraum. Zum einen gewinnt die Akustik von Nebenaggregaten an Bedeutung, da das verdeckende Verbrennergeräusch bei elektrischen Antrieben entfällt. Zum anderen ändert sich die Qualität des Antriebsgeräuschs. So tritt die Wahrnehmung von tonalen Anteilen in den Mittelpunkt der psychoakustischen Charakterisierung der Fahrzeuggeräusche. Eine zentrale Empfindungsgröße ist hierbei die Tonhaltigkeit des Signals, d.h. die Wahrnehmung der Stärke des tonalen Anteils. Im vorliegenden Beitrag wird vorgestellt, welche Faktoren einen Einfluss auf diese Empfindung haben. So wird z.B. gezeigt, wie die Anzahl der Komponenten und deren Pegel die Tonhaltigkeit beeinflusst, wie die Tonhaltigkeit sich mit Alter und Schwerhörigkeit ändert und wie die Tonhaltigkeit mit der Angenehmheit der Geräusche zusammenhängt.

1. Einleitung

Die über die letzten Jahrzehnte durch die Europäische Union (EU) sukzessive verschärften Anforderungen an die Abgase führen zu einer zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge. Viele Fahrzeughersteller haben bereits angekündigt, dass sie in den nächsten Jahren nur noch Fahrzeuge mit rein elektrischen Antrieben anbieten wollen

[1]. Durch den Wegfall des Verbrennungsmotors ändert sich auch das Antriebsgeräusch im Fahrzeuginneren. Dieses hat einen Einfluss auf die psychoakustischen Empfindungen, die zur Beschreibung des Höreindrucks im Fahrzeuginneren von Bedeutung sind. Größen wie z.B. Wummern, Brummen und Dröhnen, die für das nieder-tourige Fahren mit einem Verbrennerfahrzeug wichtig sind [2,3], spielen so gut wie keine Rolle bei der Beschreibung des Klangcharakters des Antriebsstrangs eines elektrischen Fahrzeugs. Andere Empfindungen nehmen in Ihrer Bedeutung zu. Eine wesentliche Empfindung für die elektrische Antriebsart ist die Tonhaltigkeit. Diese wurde auch schon bei Verbrennerfahrzeugen genutzt, z.B. im Zusammenhang mit dem Pfeifen eines Turboladers, jedoch ist ihre Bedeutung bei Elektrofahrzeugen deutlich höher.

Die Tonhaltigkeit beschreibt die Wahrnehmung der Stärke des tonalen Anteils eines Signals. In der DIN 45681 [4] ist die Tonhaltigkeit in Deutschland standardisiert. Die Bestimmung der Tonhaltigkeit erfolgt auf Basis des Spektrums. Zunächst werden alle tonalen Komponenten im Geräusch identifiziert und danach ihre Hörbarkeit bestimmt, indem ihr Pegel mit der Mithörschwelle an der Frequenz verglichen wird. Ob eine Komponente als Ton klassifiziert wird hängt von der spektralen Breite der Komponente ab. Die maximal zulässige Bandbreite ist frequenzabhängig angegeben. Deren Werte wurden aus Messungen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe (englisch „pitch strength“, siehe [5]) abgeleitet. Die Komponente mit dem höchsten Pegel über der Mithörschwelle bestimmt die Tonhaltigkeit.

Der vorliegende Beitrag beschreibt unter anderem, wie die Anzahl der tonalen Komponenten die Tonhaltigkeit verändert. Diese Größe wird in der bisherigen Norm nicht als möglicher Einflussfaktor berücksichtigt. Ihr Einfluss auf die Tonhaltigkeit ist Inhalt des folgenden Abschnitts 2.

Ein weiterer Aspekt, der in diesem Beitrag beleuchtet werden soll, ist die Frage, wie die zunehmende Alterung unserer Gesellschaft auch einen Einfluss auf die Wahrnehmung hat. Laut dem statistischen Bundesamt waren im Jahr 2021 18,4 % der Bevölkerung in Deutschland mindestens 65 Jahre alt [6]. Sachsen-Anhalt ist dabei Spitzenreiter mit 27,6 % der Bevölkerung dieses Bundeslandes [7]. Ähnlich häufig sind ältere Menschen in vielen Mitgliedsstaaten der EU [8]. Es ist davon auszugehen, dass dieser Prozentsatz noch zunimmt. Für Deutschland wird zum Beispiel erwartet, dass im Jahr 2050 der Anteil der über Sechzigjährigen auf ein Viertel der Gesamtbevölkerung ansteigt [9].

Mit zunehmendem Alter wird das Hören schlechter. Der Hörverlust ist insbesondere bei hohen Frequenzen [10] sichtbar. So ist die mittlere Hörschwelle von Fünfzigjährigen bei 8 kHz schon mehr als 20 dB über den Bezugsschwellen für junge Normalhörende, d.h. sie haben für diese Frequenz eine beginnende Schwerhörigkeit. Die Dezibelwerte relativ zu diesen Bezugsschwellen werden in dB HL (Hearing Level) angegeben. Gablenz et al. (2020) zeigten in ihrer Kohorte von 3105 Personen, dass über 30 % der männlichen Übersechzigjährigen eine mittlere Hörschwelle mindestens 20 dB HL hatten, 5 % hatten eine Schwelle von 35 dB HL oder mehr [11]. Für die Übersechzigjährigen stiegen die Werte auf 45 % bzw. 15 % an. Bei über achtzigjährigen Männern waren es sogar weniger als 20 %, die eine mittlere Hörschwelle von unter 20 dB HL hatten und mehr als 12 % hatten mittlere Hörschwellen von 50 dB HL oder schlechter. Bei Frauen waren die Prozentsätze etwas geringer.

Unabhängig vom Alter ist Schwerhörigkeit ein weltweites Problem. Die WHO schätzt, dass im Jahr 2050 2,5 Milliarden Menschen schwerhörig sind [12]. Für den Bereich des Sounddesigns im Fahrzeugbereich sollte dieser Umstand nicht unterschätzt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Zielgruppe für den Kauf von Fahrzeugen eine

Schwerhörigkeit aufweist, ist zumindest relativ hoch und wird in Zukunft wahrscheinlich noch steigen. Schon in den Jahren 2012 bis 2021 lag das mittlere Alter von Käufern eines Neuwagens laut Krafftfahrtbundesamt immer über 52 Jahre [13]. Der Einfluss der Schwerhörigkeit auf die Tonhaltigkeit wird in Abschnitt 3 betrachtet.

Bei den elektrifizierten Antrieben treten tonale Aspekte insbesondere bei nichtstationären Fahrsituationen auf. Dieses bedeutet, dass die tonalen Komponenten im Allgemeinen keine konstante Frequenz haben und auch im Pegel schwanken können. Die Besonderheit der Tonhaltigkeit im Fahrzeuginneren wird in Abschnitt 4 beschrieben.

Die Tonhaltigkeit wird im Bereich der Bewertung von Umweltschallen als ein Kriterium genutzt, um die Lärmwirkung zu charakterisieren. Eine hohe Tonhaltigkeit wird hier mit einer erhöhten Lästigkeit, d.h. einer geringeren Angenehmheit verbunden. In der DIN 45681 [4] wird die erhöhte Lästigkeit bei Signalen mit hörbaren tonalen Komponenten dadurch berücksichtigt, dass aus der Tonhaltigkeit ein Pegelzuschlag abgeleitet wird, d.h. ein Pegel, der zum gemessenen Pegel addiert wird. Im Abschnitt 5 dieses Beitrags wird der Zusammenhang Tonhaltigkeit und Angenehmheit näher betrachtet. Die Ergebnisse werden im abschließenden Abschnitt 6 nochmal kurz zusammengefasst.

2. Einfluss von Pegel und Anzahl der Komponenten auf die Tonhaltigkeit

Nach der DIN 45681 [4] wird die Tonhaltigkeit von der tonalen Komponente mit dem höchsten perzeptiven Signalrauschverhältnis in der Frequenzgruppen an der Tonfrequenz bestimmt. Doch wie ist die Tonhaltigkeit, wenn alle Komponenten den gleichen Pegel über der Mithörschwelle aufweisen? Dieser Frage wurde auf dem Motor- und Aggregate-Akustik Symposium 2018 nachgegangen [14]. Dort wurde gezeigt, dass bei gleichem Pegel über der Mithörschwelle der Komponenten die Tonhaltigkeit mit der Anzahl der tonalen Komponenten zunimmt. Ohne explizite Bestimmung der Mithörschwellen der Tonkomponenten wurde dieses bereits durch Vormann und Koautoren [15] gezeigt. In einer aktuellen Studie [16] konnten die Daten von [14] bestätigt werden. Hier wurde untersucht, wie die Tonhaltigkeit für Geräusche mit ein, zwei oder vier tonalen Komponenten von der Anzahl der Komponenten abhängt. Dazu wurde der Pegel von einem 700-Hz Ton so eingestellt, dass die Tonhaltigkeit mit der einer tonalen Komponente die aus entweder ebenfalls einem 700-Hz Ton, einem Zweitonkomplex mit Frequenzen von 350 und 700 Hz oder einem Viertonkomplex mit Frequenzen von 175, 350, 700 und 1400 Hz bestand. Der Pegel dieser tonalen Komponente betrug 8 oder 6 dB oberhalb der individuellen Mithörschwelle. Für beide Pegel zeigte sich ein signifikanter Anstieg der Tonhaltigkeit mit der Anzahl der tonalen Komponenten. Ein Geräusch mit vier Komponenten ist z.B. gleich tonhaltig wie ein Geräusch mit nur einer Komponente, wenn diese Komponente einen etwa 5 dB höheren Pegel als die Komponenten im Tonkomplex hat. Der Pegel oberhalb der Mithörschwelle der Komponenten hatte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

3. Tonhaltigkeit und Schwerhörigkeit

Wie in der Einleitung erwähnt, ist davon auszugehen, dass viele potentielle Kunden nicht mehr normalhörend sind. Um den möglichen Einfluss der Schwerhörigkeit auf die

Tonhaltigkeit zu untersuchen, wurden in [16] Messungen zur Tonhaltigkeit an einer Gruppe mit einer moderaten Innenohrschwerhörigkeit durchgeführt und die Ergebnisse mit denen einer normalhörenden Kontrollgruppe verglichen. Statistisch zeigten sich keine signifikanten Unterschiede der Eingestellten Pegelunterschiede bei gleicher Tonhaltigkeit für die untersuchten Pegel oberhalb der individuellen Mithörschwelle. Bei gleicher Hörbarkeit der sinusförmigen tonalen Komponenten hat eine Innenohrschwerhörigkeit somit keinen Einfluss auf die Tonhaltigkeit. Allerdings zeigte sich ein signifikanter Unterschied in den Mithörschwellen der tonalen Komponenten zwischen den beiden Gruppen. Die Schwerhörenden benötigten jedoch einen im Mittel 5 dB höheren Pegel der tonalen Komponente um diese im Rauschen detektieren zu können. Da die DIN 45681 [4] auf Daten von Normalhörenden aufbaut überschätzt die Norm die Tonhaltigkeit für schwerhörende Versuchspersonen für eine einzelne Komponente. Für eine realistische Vorhersage der Tonhaltigkeit bei schwerhörenden Versuchspersonen muss nur die geänderte Mithörschwelle berücksichtigt werden. Für Tonkomplexe ist wie im vorherigen Abschnitt erwähnt eine Korrektur vorzusehen, die sich aber nicht von der für Normalhörende unterscheidet.

Im Geräuschktrum ist eine tonale Komponente nicht immer als scharfe Linie zu erkennen, sondern hat eine gewisse spektrale Breite. Um in diesen Fällen zu entscheiden, ob es sich um eine tonale Komponente handelt, gibt die Norm eine frequenzabhängige maximal zulässige Bandbreite für eine tonal klingende Komponente an (siehe [4] Abschnitt 5.3.4). Diese Bandbreite ergibt sich aus Messungen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Bandpassrauschen. Generell nimmt bei fester Mittenfrequenz die Ausgeprägtheit der Tonhöhe mit zunehmender Bandbreite ab und bei fester Bandbreite mit abnehmender Mittenfrequenz zu. Die zugrundeliegenden Daten finden sich in Abb. 5.29 in [5]. In [17] wurde der Einfluss der Bandbreite von Rauschsignalen auf die Ausgeprägtheit der Tonhöhe für schwerhörende Versuchspersonen untersucht und mit Daten von Normalhörenden verglichen. Hier zeigte sich zum einen, dass für die untersuchten Bandbreiten der Dynamikbereich der Ausgeprägtheit der Tonhöhe der schwerhörenden Versuchspersonen reduziert war. Zum anderen gaben die schwerhörenden Versuchspersonen bei mittlerer Bandbreite eine signifikant geringere Ausgeprägtheit der Tonhöhe an als die normalhörenden Versuchspersonen.

4. Die besondere Herausforderung bei Fahrzeuginnengeräuschen

Die Herausforderung bei der Bestimmung der Tonhaltigkeit von Innengeräuschen von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antrieben ist, dass die tonalen Komponenten häufig bei dynamischen Fahrzuständen wie beim Hochlauf oder beim Ausrollen hörbar auftreten. In diesen dynamischen Zuständen ändern sich die Frequenzen der tonalen Anteile. Auch der Pegel kann über die Zeit variieren, z.B., wenn die Momentanfrequenz der tonalen Komponente einen Frequenzbereich überschreitet, in dem sich eine Strukturresonanzfrequenz des Fahrzeugs befindet. Doleschal und Koautoren [18] haben mithilfe von künstlichen Geräuschen den Einfluss verschiedener Signalparameter untersucht. Die künstlichen Signale waren an reale Fahrzeuginnengeräusche angelehnt und simulierten einen Hochlauf, ein Ausrollen und ein Hochlauf unter Vollast. Die betrachteten Parameter waren der Pegel und die Anzahl der tonalen Komponenten sowie der Einfluss von zeitlichen Pegelschwankungen. Alle betrachteten Parameter hatten einen Einfluss auf die Tonhaltigkeit. Die Tonhaltigkeit steigt (i) mit dem Pegel des to-

nalen Anteils, (ii) durch Hinzufügen eines Obertons, (iii) mit Zunahme der Pegelschwankungsfrequenz und (iv) mit Zunahme der Modulationstiefe. Wesentliche Aspekte der Daten konnten u.a. durch den ECMA 74 Standard [19] vorhergesagt werden. In [20] wurde untersucht, wie das Hinzufügen von Subharmonischen der hörbaren tonalen Komponente die Tonhaltigkeit beeinflusst. Das Hinzufügen von Subharmonischen wurde in [21] und [22] zur Verbesserung der Geräuschqualität von Fahrzeuginnengeräuschen bei elektrifizierten Antrieben vorgeschlagen. Wie aus den Messungen mit stationären Geräuschen (siehe Abschnitt 2) und dem Ergebnis von [18] bzgl. des Hinzufügens eines Obertons (s.o.) zu erwarten war, steigt die Tonhaltigkeit der Geräusche auch durch das Hinzufügen der Subharmonischen an.

5. Zusammenhang zwischen Tonhaltigkeit und Angenehmheit

Das wesentliche Ziel der DIN 45681 [4] ist es, eine Möglichkeit zu bieten, die höhere Lästigkeit von Geräuschen mit hörbaren tonalen Komponenten bei der Lärmbewertung zu berücksichtigen. Um diese höhere Lästigkeit von Geräuschen, die tonale Komponenten enthalten, zu quantifizieren, werden Tonzuschläge für Signale mit hörbaren tonalen Komponenten vergeben [4]. Diese Tonzuschläge werden auf den gemessenen Pegel des Geräusches addiert. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein Geräusch ohne die tonalen Komponenten einen um diesen Tonzuschlag höheren Pegel haben darf, um eine gleiche Lästigkeit zu erzielen.

Der Frage der erhöhten Lästigkeit bzw. Angenehmheit von Geräuschen mit tonalen Komponenten wurde in [23] experimentell nachgegangen. In dieser Studie wurde der Pegelunterschied bei gleicher Angenehmheit zwischen einem Rauschen mit und einem Rauschen ohne tonale Komponente untersucht. Als Rauschsignal diente ein gleichmäßig anregendes Rauschen, als tonale Komponenten wurden Reintöne mit Frequenzen von 350, 700 und 1400 Hz verwendet. Die Messung wurde bei einem Referenzrauschpegel von 60 dB SPL und Tonpegeln von 5, 10 und 15 dB oberhalb der individuellen Mithörschwelle durchgeführt. Für die 1400-Hz Töne stimmen die gemessenen Pegelunterschiede bei gleicher Angenehmheit im Mittel mit den durch die Norm vergebenen Tonzuschlägen überein. Die Ergebnisse der tieferen Tonfrequenzen liegen leicht darunter. Diese Frequenzabhängigkeit wird durch die Norm nicht abgedeckt. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung der Ergebnisse liefern die Tonzuschläge für die mittlere gemessene Frequenz eine gute Abschätzung der Angenehmheit und damit auch der Lästigkeit. Für höhere Frequenzen wird die durch die tonalen Komponenten verursachte Reduktion der Angenehmheit durch die Norm eher unterschätzt.

Wie im vorherigem Abschnitt 5 beschrieben wurde bereits von [21] und [22] der Ansatz verfolgt, für Fahrzeuginnengeräusche die Geräuschqualität durch das Hinzufügen von Subharmonischen zu verbessern. In [20] wurde daher neben der Tonhaltigkeit für verschiedene Arten von hinzugefügten Subharmonischen auch die Angenehmheit der Geräusche bestimmt. Die Addition von Subharmonischen führte bei einer Art zu einer signifikanten Verbesserung der Angenehmheit und das, obwohl die Tonhaltigkeit ebenfalls zunahm. Dieses Ergebnis stellt die generelle Annahme der DIN 45681 [4] einer Erhöhung der Lästigkeit bei Erhöhung der Tonhaltigkeit in Frage. Es ist allerdings möglich, dass bei der Angenehmheitsbewertung eine bisher nicht beachtete Empfindungsgröße, die Tonhöhe, eine Rolle spielt. Schon für Einzeltöne wurde in [23] gezeigt, dass eine gewisse Frequenzabhängigkeit (für den Ton also die Tonhöhe) mit einer erhöhten Lästigkeit zu höheren Frequenzen in der Norm nicht berücksichtigt wird.

Für die Signale in [20] wird die Tonhöhe durch Addition der Subharmonischen reduziert. Angenommen, dass tiefere Töne eher angenehm sind als hohe Töne, wäre die Erhöhung der Angenehmheit auf die Reduktion der Tonhöhe zurückzuführen.

6. Zusammenfassung

Dieser Beitrag fasst verschiedene Aspekte der Tonhaltigkeit zusammen. So hängt die Tonhaltigkeit von vielen Signalparametern ab, die nicht ausreichend in der entsprechenden DIN 45681 berücksichtigt werden. Auch eine Schwerhörigkeit kann die Tonhaltigkeit beeinflussen. Es wurde darüber hinaus gezeigt, dass nicht immer ein direkter Zusammenhang zwischen Tonhaltigkeit und Lästigkeit/Angenehmheit bestehen muss. Die eigenen Daten deuten darauf hin, dass für die Bestimmung der Angenehmheit auch die Tonhöhe des tonalen Anteils eine Rolle spielen könnte.

Literatur

- [1] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (2022) Ausstieg Verbrennungsmotor: Wann wird welcher Hersteller elektrisch? Abgerufen auf <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/auto/ausstieg-verbrennungsmotor/>, am 07.06.2023
- [2] Doleschal F, Badel GT, Verhey JL (2022) Rumbling, humming, booming – Perception of vehicle interior noise at low engine speeds, *Applied Acoustics* 197. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108915>
- [3] Doleschal F, Verhey JL (2023) Modeling the perceptions of Rumbling, humming and booming in the context of vehicle interior sounds, *Applied Acoustics* 210. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.20223.109441>
- [4] DIN 45681 (2005) Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen, Berlin, Germany: Beuth.
- [5] Fastl H, Zwicker E (2007) *Psychoacoustics - Facts and Models*, Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68888-4>
- [6] Statistisches Bundesamt (2022) Population of Germany as of December 31, 2021, by age group, abgerufen auf <https://www.statista.com/statistics/454349/population-by-age-group-germany/> am 30.05.2022
- [7] Statistisches Bundesamt (2022) Share of the population in Germany aged 65 years and older in 2021, by federal state, abgerufen auf <https://www.statista.com/statistics/1127858/population-aged-65-years-and-older-by-federal-state-germany/> am 30.05.2023
- [8] Statistisches Amt der europäischen Union (2020) Elderly population across EU regions, abgerufen auf <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200402-1> am 30.05.2023

- [9] Statistisches Bundesamt (2022) Older people in Germany and the EU, abgerufen auf <https://www.bmfsfj.de/resource/blob/113952/83dbe067b083c7e8475309a88da89721/aeltere-menschen-in-deutschland-und-in-der-eu-englisch-data.pdf> am 30.05.2023
- [10] DIN EN ISO 7029 (2017) Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht (ISO 7029:2017); Deutsche Fassung EN ISO 7029:2017, Berlin, Germany: Beuth.
- [11] von Gablenz P, Hoffmann E, Holube I (2020) Gender-specific hearing loss in German adults aged 18 to 84 years compared to US-American and current European studies, PLOS ONE 15(4): e0231632. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231632>
- [12] World Health Organization (2023) Deafness and hearing loss, abgerufen auf <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss> am 30.05.2023
- [13] Kraftfahrt-Bundesamt (2022) Durchschnittsalter der privaten Halter bei Neuzulassungen von Personenkraftwagen in Deutschland von 2000 bis 2021, abgerufen auf <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/215576/umfrage/durchschnittsalter-von-neuwagenkaeufnern/> am 30.05.2023
- [14] Badel GT, Hots J, Verhey JL (2018) Wahrnehmung von Tönen im Geräusch, X. Symposium Motor- und Aggregate-Akustik, Magdeburg, Germany, ISBN 978-3-944722-72-6, pp. 50-61, Otto-von-Guericke-Universität, IMS-EMA, Magdeburg.
- [15] Vormann M, Verhey JL, Mellert V, Schick A (2000) Ein adaptives Verfahren zur Bestimmung der subjektiven Tonhaltigkeit, Fortschritte der Akustik - DAGA 2000, Oldenburg, Germany, pp. 304–5, Dega e.V., Berlin.
- [16] Hots J, Ashraf Vaghefi S, Verhey JL (2022) The effect of sensorineural hearing loss on suprathreshold perception of tonal components in noise, JASA Express Lett 1 August 2022; 2(8): 084401. <https://doi.org/10.1121/10.0013352>
- [17] Horbach M, Verhey JL, Hots J (2018) On the pitch strength of bandpass noise in normal-hearing and hearing-impaired listeners, Trends in Hearing 22. <https://doi.org/10.1177/2331216518787067>
- [18] Doleschal F, Rottengruber H, Verhey JL (2021) Influence parameters on the perceived magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds, Applied Acoustics 181. doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108155
- [19] Ecma International, “Standard ECMA-74 - Measurement of Airborne Noise emitted by Information Technology and Telecommunications Equipment, 17th Edition / December 2019,” Ecma International, Geneva, Switzerland, 2019.

- [20] Doleschal F, Verhey JL (2022) Pleasantness and magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds containing subharmonics, *Applied Acoustics* 185 <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108442>
- [21] Gwak DY, Yoon K, Seong Y, Lee S. (2014) Application of subharmonics for active sound design of electric vehicles, *J Acoust Soc Am* 2014;136(6): EL391–397. <https://doi.org/10.1121/1.4898742>
- [22] Sun Y, Yongji Z, Yifei H, Zhufang Y (2018) The reseach of improving the sound quality of electric vehicles by using subharmonics, *Proceedings of InterNoise/ASME NCAD Noise Control and Acoustics Division Conference - 2018: presented at InterNoise/ASME 2018, August 26-29, 2018, Chicago, Illinois,pp. 1468-1475, 2018.*
- [23] Hots J, Verhey JL (2015) *Experimentelle Erfassung von Tonzuschlägen*, DAGA 2015, Nürnberg, Germany, ISBN: 978-3-939296-08-9, pp. 906-908, Dega e.V., Berlin.