

# Je tonhaltiger, desto unangenehmer?!“ - Aktive Verbesserung des Fahrzeuginnengeräuschs mittels Subharmonischen und Rauschen

Florian Doleschal<sup>1</sup>, Jesko Verhey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Abteilung für Experimentelle Audiologie, 39120 Magdeburg  
E-Mail: [florian.doleschal@med.ovgu.de](mailto:florian.doleschal@med.ovgu.de)

<sup>2</sup> Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Abteilung für Experimentelle Audiologie, 39120 Magdeburg  
E-Mail: [jesko.verhey@med.ovgu.de](mailto:jesko.verhey@med.ovgu.de)

## Einleitung

Der Pegel im Innenraum von Elektrofahrzeugen ist erheblich niedriger als im Innenraum von Verbrennerfahrzeugen. Der Wegfall des breitbandig verdeckenden Verbrennungsmotors erhöht die Hörbarkeit ansonsten verdeckter, tonaler Störgeräusche, welche den akustischen Komfort stark reduzieren können [1]. Zahlreiche Studien [2, 3, 4] und Normen [5, 6] postulieren einen negativen Zusammenhang zwischen den Größen Angenehmheit und Tonhaltigkeit. Dabei wird jedoch der Einfluss der Tonhöhe auf die Wahrnehmung tonaler Komponenten in den Normen nicht berücksichtigt. Västfjäll, 2013 [7] zeigte, dass insbesondere die Manipulation des Grundtonpegels einen signifikanten Einfluss auf die Lästigkeit von Flugzeuginnengeräuschen hat. Im Gegensatz dazu hatte die Pegelmanipulation der 1. höheren Harmonischen keinen signifikanten Einfluss auf die wahrgenommene Lästigkeit. Die vorliegende Studie untersucht für synthetische Innengeräusche von Elektrofahrzeugen, ob durch die Veränderung der Tonhöhe die Angenehmheit verbessert werden kann.

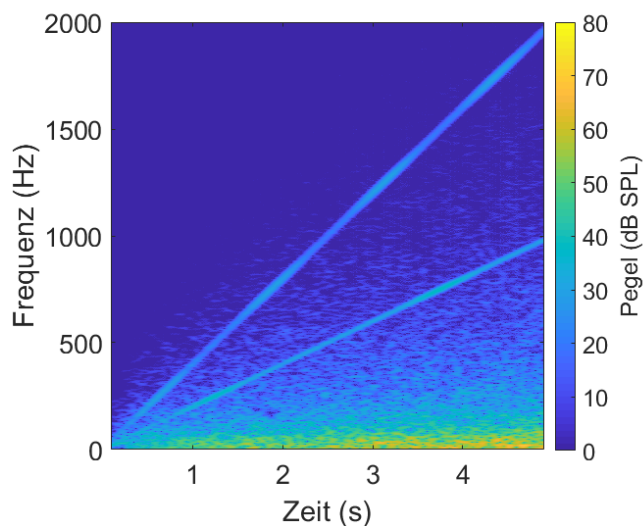
Eine solche Maßnahme zur aktiven Verbesserung der Geräuschqualität im Fahrzeuginnenraum wird häufig als „Active Sound Design“ bezeichnet. Bodden und Belschner, 2016 [8] entwarfen spezielle Kriterien, die dem Fahrzeuginnengeräusch hinzugefügte künstliche Geräuschkomponenten erfüllen sollten. Hierzu gehört die Authentizität: Hinzugefügte Komponenten sollen den Eindruck erwecken, dass sie vom Fahrzeug stammen, sodass die dynamischen Charakteristika der Fahrsituation bei der Entwicklung der Komponenten berücksichtigt werden müssen. Ein weiteres Kriterium ist die langfristige Anwendbarkeit: Die Fahrzeuginsassen sind den Geräuschen langfristig ausgesetzt, sodass die Geräuschkomponenten auch nach längerer Zeit nicht störend wirken dürfen. Zudem sollten die Geräusche deutlich von denen von Verbrennerfahrzeugen unterscheidbar sein.

Mögliche Ansätze, die die genannten Kriterien erfüllen, sind die Hinzufügung von Subharmonischen und Rauschen. So zeigten Gwak et al., 2014 [9] und Sun et al., 2018 [10], dass die Hinzufügung von Subharmonischen grundsätzlich geeignet ist, die Angenehmheit von Fahrzeuginnengeräuschen zu verbessern, obwohl diese die wahrgenommene Tonhaltigkeit erhöhen könnten. Dieser Ansatz wird auch in der vorliegenden Studie verfolgt. Geräusche in realen Fahrsituationen enthalten jedoch neben den tonalen Komponenten auch rauschhafte

Geräuschkomponenten, die ebenfalls einen Einfluss auf die Größen Tonhaltigkeit und Angenehmheit haben können.

Die vorliegende Studie untersucht daher sowohl den Einfluss von Subharmonischen als auch den des Rauschens auf die wahrgenommene Angenehmheit und die Tonhaltigkeit. Zur gezielten Variation der Signalparameter wurden synthetische Geräusche entwickelt, die die wesentlichen Eigenschaften von realen Fahrzeuginnengeräuschen besitzen. Anschließend wurden mit Hilfe eines Hörversuchs die beiden Größen (Angenehmheit, Tonhaltigkeit) nacheinander gemessen, die Ergebnisse analysiert und miteinander verglichen. Hieraus konnten Schlussfolgerungen gezogen werden, welchen Einfluss die Hinzufügung von Subharmonischen und Rauschen auf diese Größen haben und inwiefern eine höhere Tonhaltigkeit grundsätzlich zu einer geringeren Angenehmheit führt.

## Methode



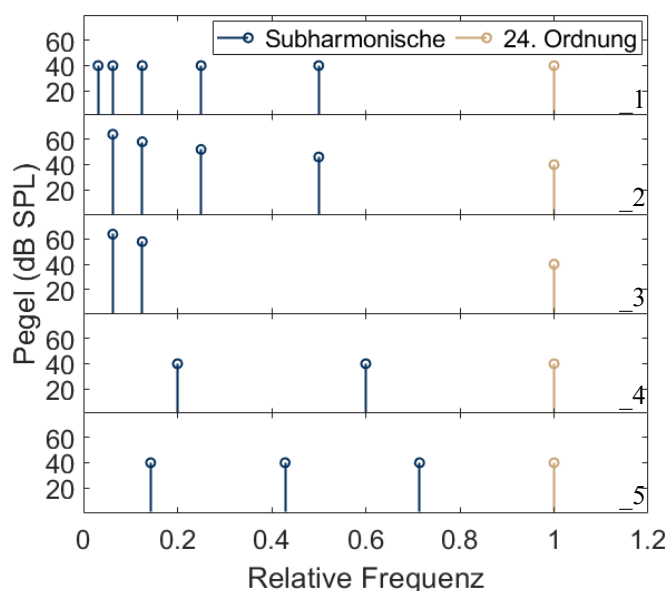
**Abbildung 1:** Spektrogramm eines simulierten Hochlaufgeräuschs (*ru\_2\_67\_0*) von 0-30 km/h, das die 24. und 48. Ordnungen des Elektromotors enthält. Der Pegel der rauschhaften Komponente steigt von 27 auf 67 dB SPL an.

Für den Hörversuch wurden Stimuli mit einer Dauer von fünf Sekunden generiert, die typische tonale Komponenten enthalten. Hierzu zählen die 24. sowie die 48. Ordnung des Elektromotors [11]. Für den Versuch wurde ein HochlaufszENARIO (*ru*) von 0-30 km/h zu Grunde gelegt

(erster Parameter der Geräuschbezeichnung), wobei die beiden Ordnungen durch lineare Frequenzsweeps von 0-1000 Hz bzw. 0-2000 Hz simuliert wurden. Die eine Hälfte der im Versuch verwendeten Geräusche enthielt nur die 24. Ordnung ( $_1$ ), die andere sowohl die 24., als auch die 48. Ordnung ( $_2$ ), dargestellt durch den zweiten Parameter in der Geräuschbezeichnung. Die in realen Geräuschaufnahmen hörbaren Strukturresonanzen wurden mit Hilfe von aufgeprägten Amplitudenmodulationen gemäß Doleschal et al., 2021 [12] berücksichtigt.

Die in typischen Geräuschaufnahmen enthaltenen Reifen- und Windgeräusche wurden mittels eines Tiefpassrauschen mit einer Grenzfrequenz von 40 Hz und einem Abfall von 12 dB je Oktave approximiert. Der Pegel des Rauschens stieg von 27 dB SPL für die eine Hälfte der Geräusche auf 67 dB SPL ( $_67$ ) an, für die andere auf 77 dB SPL ( $_77$ ), dargestellt durch den dritten Geräuschparameter. Dieses Rauschen wurde auch in Doleschal et al., 2021 [12] verwendet. Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein Spektrogramm eines Geräuschs, das die 24. und 48. Ordnungen des Elektromotors enthält, wobei der Pegel der rauschhaften Komponente von 27 auf 67 dB SPL ansteigt.

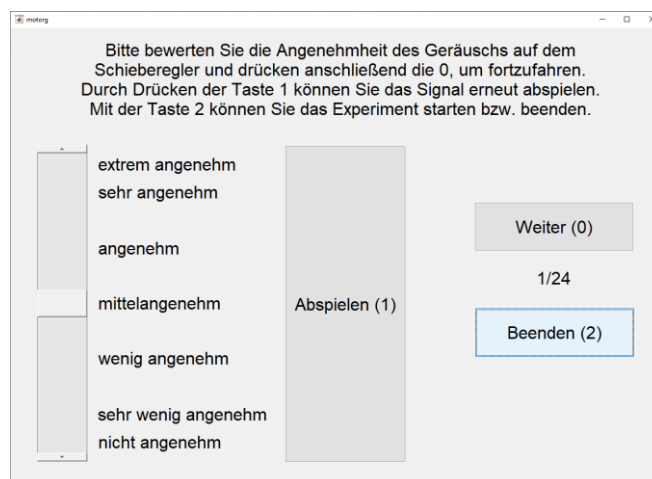
Den Geräuschen wurden anschließend Subharmonische hinzugefügt (siehe Abbildung 2). Die relativen Frequenzen der Subharmonischen beziehen sich jeweils auf die Frequenz der 24. Ordnung, wobei die Spektren  $_1$  bis  $_5$  (vierter Geräuschparameter) nach Gwak et al., 2014 [9] verwendet wurden. Geräusche mit dem Spektrum  $_0$  enthalten keine Subharmonischen und dienen als Referenz, um den Einfluss von Subharmonischen zu quantifizieren.



**Abbildung 2:** Spektren der tonalen Komponenten mit additiven Subharmonischen (in blau) entsprechend Gwak et al., 2014 [9]; die Frequenzen wurden jeweils relativ zur Frequenz der 24. Ordnung (in braun) angegeben.

Durch die Kombination der Parameter Ordnungen, Maximalpegel der rauschhaften Komponente und Spektrum der Subharmonischen ergeben sich insgesamt 24 Geräusche,

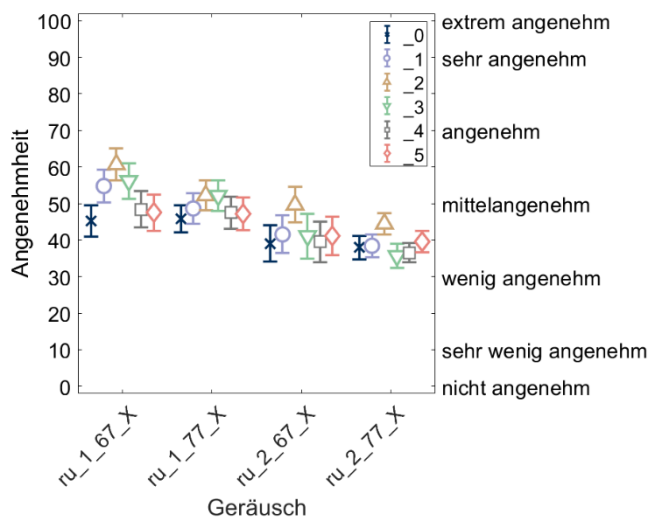
deren Angenehmheit und Tonhaltigkeit jeweils nacheinander in separaten Versuchen bewertet wurden. Die Geräusche wurden nacheinander in zufälliger Reihenfolge abgespielt, wobei jedes Geräusch insgesamt dreimal bewertet wurde. Jedes Geräusch wurde erst dann erneut bewertet, nachdem alle 24 Geräusche zuvor bewertet worden sind. Die Aufgabe bestand darin, mit Hilfe eines mechanischen stufenlosen Schiebereglers die jeweilige Größe zu bewerten: So sollte die Angenehmheit von „nicht angenehm“ bis „extrem angenehm“ bewertet werden. Die abgegebenen Bewertungen wurden intern in einen Zahlenwert zwischen 0 (nicht angenehm) und 100 (extrem angenehm) umgerechnet. Zur Unterstützung wurde die Skala mit weiteren Zwischenkategorien versehen, deren Bezeichnungen an die der Methode der kategorialen Lautheitsskalierung [13] angelehnt sind; die Zwischenkategorien „sehr wenig angenehm“, „wenig angenehm“, „mittelangenehm“, „angenehm“ und „sehr angenehm“ entsprechen den Zahlenwerten 10, 30, 50, 70 und 90. Ein mehrfaches Anhören der Geräusche und eine Korrektur der abgegebenen Bewertung war möglich, bevor die Versuchsperson sich das nächste Geräusch angehört hat. Nach der Bewertung der Angenehmheit führten die Versuchspersonen denselben Versuch für die Größe Tonhaltigkeit durch, wobei die Tonhaltigkeit jedes Geräuschs ebenfalls je dreimal bewertet wurde. Abbildung 3 zeigt die Versuchsmaske, wie sie für die Bewertung der Angenehmheit eingesetzt wurde. Für die Bewertung der Tonhaltigkeit wurden die Begriffe „Angenehmheit“ und „angenehm“ durch „Tonhaltigkeit“ bzw. „tonhaltig“ ersetzt.



**Abbildung 3:** Versuchsmaske für die Erhebung der Größe Angenehmheit.

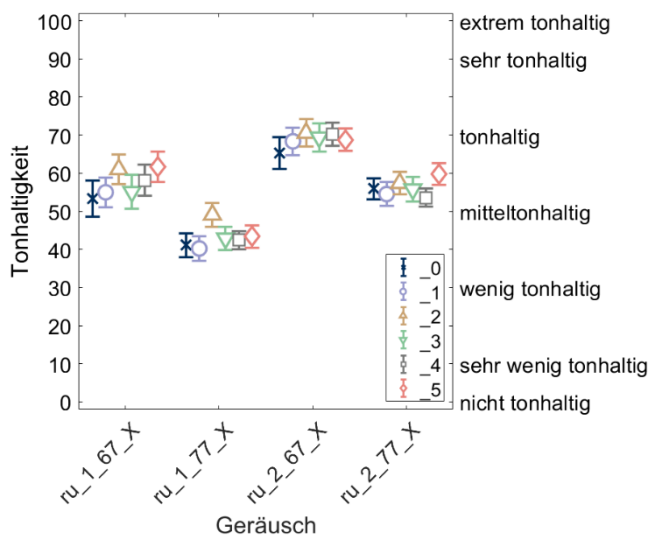
Insgesamt nahmen 20 normalhörende Versuchspersonen an dem Versuch teil, deren Ruheshwellen im Frequenzbereich von 125 bis 8000 Hz nicht höher als 20 dB HL waren. Die Versuchspersonen führten den Versuch in einer schallisolierten Hörkabine durch, wobei die Geräusche mit Hilfe des Kopfhörers Sennheiser HD 650 wiedergegeben wurden. Alle Geräusche wurden mit einem von-Hann-Fenster mit einer Dauer von je 100 ms weich ein- und ausgeschaltet.

## Ergebnisse



**Abbildung 4:** Mittelwerte und interindividuelle Standardfehler der Angenehmheit. Die Geräusche sind anhand ihrer Eigenschaften „Anzahl der Ordnungen“ und Maximalpegel der rauschhaften Komponente gruppiert (für Details, siehe Abschnitt Methode).

Abbildung 4 zeigt die Mittelwerte sowie die interindividuellen Standardfehler der Angenehmheit der 24 Geräusche. Mit einer mittleren Angenehmheit von 50.5 wurden die Geräusche, die nur die 24. Ordnung enthalten, als angenehmer als die Geräusche bewertet, die beide Ordnungen enthalten (40.4). Die Geräusche mit dem niedrigeren Maximalpegel der rauschhaften Komponente von 67 dB SPL wurden mit 47.1 als angenehmer als die Geräusche mit dem höheren Maximalpegel (77 dB SPL) bewertet (43.8). Geräusche mit Subharmonischen wurden im Mittel als angenehmer als solche ohne (42.0) bewertet. Deutlich bevorzugt wurden die Geräusche, die zu niedrigeren Frequenzen im Pegel ansteigende Subharmonische gemäß Spektrum 2 enthalten (51.8), gefolgt von denen mit den Spektren 3 (46.3), 1 (45.9), 5 (43.8), und 4 (43.0).



**Abbildung 5:** Mittelwerte und interindividuelle Standardfehler der Tonalität. Darstellung analog zu Abb. 4.

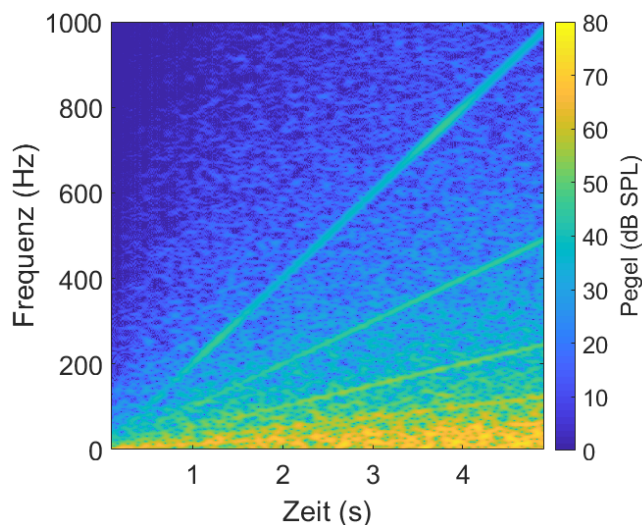
Abbildung 5 zeigt die Mittelwerte sowie die Standardfehler für die wahrgenommene Tonalität. Die Tonalität von Geräuschen, die beide Ordnungen enthalten, unterscheidet sich dabei deutlich von denen, die nur die 24. Ordnung enthalten. Geräusche, die beide Ordnungen enthalten, werden als deutlich tonhaltiger (62.5) wahrgenommen als solche, die nur die 24. Ordnung enthalten (50.3). Im Vergleich zu den Geräuschen ohne Subharmonische (53.9) erhöht sich im Mittel die wahrgenommene Tonalität bei Geräuschen mit Subharmonischen. Die Geräusche mit den Subharmonischen gemäß Spektrum 2 wurden dabei als am tonhaltigsten wahrgenommen (59.5), gefolgt von denen mit den Spektren 5 (58.4), 4 (56.1), 3 (55.8) und 1 (54.5). Auch der Maximalpegel der rauschhaften Komponente spielt eine große Rolle für die Tonalität: Geräusche, deren Pegel der rauschhaften Komponente auf 67 dB SPL ansteigt, werden als tonhaltiger wahrgenommen (63.1) als solche, bei denen der Rauschpegel auf 77 dB SPL ansteigt (49.7).

## Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass sich für den betrachteten Anwendungsfall ein direkter Zusammenhang zwischen Angenehmheit und Tonalität nicht feststellen lässt: Der Rangkorrelationskoeffizient nach Kendall beträgt  $-0,13$ . Die Größen zeigen einen entgegengesetzten Trend beim Vergleich der Ergebnisse von Geräuschen ohne und mit der 48. Motorordnung. Vergleicht man die beiden Größen für Geräusche, bei denen der Maximalpegel der rauschhaften Komponente niedriger bzw. höher ist, so korrelieren die beiden Größen jedoch positiv. Dies gilt ebenfalls bei der Betrachtung der Subharmonischen: Geräusche mit Subharmonischen werden sowohl als tonhaltiger, als auch als angenehmer als Geräusche ohne Subharmonische empfunden. Dabei werden Geräusche bevorzugt, deren Subharmonische zu niedrigeren Frequenzen hin im Pegel ansteigen (Spektrum 2), obwohl diese als am tonhaltigsten bewertet worden sind.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass für die Angenehmheit neben der Tonalität auch die Wahrnehmung der Tonhöhe der tonalen Komponente eine Rolle spielt, wobei eine niedrigere Tonhöhe als angenehmer wahrgenommen wird. Hierfür spricht insbesondere die Tatsache, dass die Unterschiede in der Angenehmheit zwischen Geräuschen mit und ohne Subharmonischen als geringer wahrgenommen werden, wenn der Maximalpegel der rauschhaften Komponente höher ist. Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein Spektrogramm eines solchen Geräuschs (*ru\_1\_77\_2*). Durch den höheren Rauschpegel werden die unteren Subharmonischen wahrscheinlich verdeckt, sodass diese nicht mehr wahrgenommen werden können. Hierdurch erhöht sich die Tonhöhe der tonalen Komponente, was wegen der höheren Tonhöhe zu einer geringeren Angenehmheit führt. Darüber hinaus trägt der

Lautheitsanstieg durch den höheren Rauschpegel zu einer Reduktion der Angenehmheit bei. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich aus der Studie von Lennström et al., 2019 [14]: Diese stellte fest, dass erst ab einer Frequenz von 600 Hz eine stärkere Hörbarkeit der tonalen Komponente (analog zur Tonhaltigkeit in dieser Studie) zu einer Reduktion der Angenehmheit führt.



**Abbildung 6:** Spektrogramm des Geräuschs *ru\_1\_77\_2*, das nur die 24. Ordnung sowie Subharmonische entsprechend des Spektrums *\_2* enthält. Der Pegel der rauschhaften Komponente steigt von 27 auf 77 dB SPL an.

## Fazit

Insgesamt wurde in der Studie gezeigt, dass eine höhere Tonhaltigkeit nicht unbedingt zu einer geringeren Angenehmheit führt. Der Einsatz von Subharmonischen zur Verbesserung des Fahrzeuginnengeräuschs als Teil eines Active Sound Design-Konzepts kann daher auch dann sinnvoll sein, wenn sich die Tonhaltigkeit erhöht. Die Erhöhung der Angenehmheit zeigt, dass sogar die Reduktion der Angenehmheit durch den unvermeidlichen Anstieg der Lautheit überkompensiert wird. Dahingegen erscheint der Einsatz von rauschhaften Komponenten zur gezielten Verdeckung tonaler Komponenten nicht sinnvoll, da neben einem starken Anstieg der Lautheit der gezielte Einsatz von Subharmonischen erschwert wird. Weitere Experimente in anderen Fahrsituationen sowie mit anderen Spektren von Subharmonischen sind erforderlich, um festzustellen, in wie weit diese Erkenntnisse generalisierbar sind.

## Literatur

- [1] F. Koch, M. Kellner, C. Petersen und B. Queck, „Vergleich des NVH-Verhaltens von Elektrofahrzeugen,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 120 (7), pp. 12-17, 2018.
- [2] D. Lennström, T. Lindbom und A. Nykänen, „Prominence of tones in electric vehicle interior noise,“ in *Noise control for quality of life: 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering* 2013 (INTER-NOISE 2013), Innsbruck, Austrian Noise Abatement Association, 2013.
- [3] E. Zwicker und H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and models*, Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [4] M. Yonemura, H. Lee und S. Sakamoto, „Subjective Evaluation on the Annoyance of Environmental Noise Containing Low-Frequency Tonal Components,“ *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (13), p. 7127, 2021.
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 45681 Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen,“ Beuth, Berlin, 2003.
- [6] International Organization of Standardization, „Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels,“ International Organization of Standardization, Genf, 2007.
- [7] D. Västfjäll, „Emotional Reactions to Tonal and Noise Components of Environmental Sounds,“ *Psychology* 4 (12), pp. 1051-1058, 2013.
- [8] M. Bodden und T. Belschner, „Principles of Active Sound Design for electric vehicles,“ *Proceedings of the Inter-Noise 2016 : 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering : towards a quieter future: August 21-24, 2016*, pp. 1693-1697, 2016.
- [9] D. Y. Gwak, K. Yoon, Y. Seong und S. Lee, „Application of subharmonics for active sound design of electric vehicles,“ *The Journal of the Acoustical Society of America* 136 (6), pp. EL391-EL397, 2014.
- [10] S. Yaxuan, Y. Zhao, H. Yifei und Y. Zhufang, „The research 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.
- [11] Q. Kang, P. Gu und S. Zuo, „Test and Analysis of Electromagnetic Noise of an Electric Motor in a Pure Electric Car,“ *SAE Technical Paper 2019-01-1492*, 2019.
- [12] F. Doleschal, H. Rottengruber und J. L. Verhey, „Influence parameters on the perceived magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds,“ *Applied Acoustics* 181, 2021.
- [13] T. Brand und V. Hohmann, „An adaptive procedure for categorical loudness scaling,“ *The Journal of the Acoustical Society of America* 112 (4), pp. 1597-1604, 2002.
- [14] D. Lennström, A. Gutierrez Meilan, A. Nykänen und R. Sottek, „Perception of tones below 1 kHz in electric vehicles,“ *Noise control for a better environment : proceedings of INTERNOISE 2019 : the 48th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, pp. 6984-6994, 2019.