

Wie unterscheidet sich die Reaktion von Passanten bei Vorhandensein oder Fehlen eines Stationär-Geräuschs?

Lisa Steinbach, M. Ercan Altinsoy

Lehrstuhl für Akustik und Haptik, TU Dresden, 01062 Dresden Deutschland

Email: lisa.steinbach@tu-dresden.de

Einleitung

Bei der Generierung von synthetischen Geräuschen für elektrisch angetriebene Fahrzeuge spielt neben der Ästhetik der Sicherheitsaspekt die größte Rolle. Die Detektionsfähigkeit eines Warngeräusches aus einem Hintergrundgeräusch ist für die Funktionserfüllung eines solchen Geräusches essentiell. Die EU-Verordnung [1] erlaubt eine freiwillige Einführung eines stationären Geräusches, welches aus Sicht der Blindenverbände jedoch bei weitem nicht ausreichend ist, um die Sicherheit für gefährdete Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten.

Ziel des Projektes ist die Erarbeitung von Aussagen über den Einfluss eines künstlich erzeugten Stationär-Geräuschs von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auf die Sicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern.

Diese Arbeit analysiert die Fragestellungen, ob künstlich erzeugte Stationär-Geräusche, die über ein AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) abgestrahlt werden, die Sicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern in einer sicherheitskritischen Situation - wie auf einem Parkplatz - beeinflussen. In einer Verkehrssituation, in welcher es für Fußgänger mit Seheinschränkungen sicherheitsrelevant ist, den Betriebszustand eines Fahrzeuges auditiv zu erkennen, werden unterschiedliche Stationär-Geräusche ($AVAS_{stat}$) in Verbindung mit einem Fahrgeräusch ($AVAS_{drive}$) auf ihre Wahrnehmbarkeit getestet.

Stimuli

Um geeignete Stimuli für den Hörversuch zu generieren, werden drei Geräuschklassen gebildet: Hintergrundgeräusch, Fahrgeräusch, Stationär-Geräusch. Dabei bezeichnet das Hintergrundgeräusch ein Geräusch, welches im Hintergrund zu hören ist. In dieser Studie ist es ein natürliches Umweltgeräusch einer Stadt (Bundesstraße, 55 dB(A)). Das Fahrgeräusch bezeichnet das Fahrzeugaußenegeräusch, welches von einem Fahrzeug während des Fahrzyklus ($v > 0$ km/h) abgestrahlt wird. Das Stationär-Geräusch beschreibt ein Geräusch, welches dem Leerlaufgeräusch eines herkömmlichen Verbrennungsfahrzeugs entspricht. Es macht darauf aufmerksam, dass sich ein Fahrzeug im Stand ($v = 0$ km/h) befindet, bei dem der Motor in Betrieb ist. Dazu wurde ein allgemeines Grundgeräusch erzeugt, welches den jeweiligen Anforderungen und Regulierungen entspricht. Das UN-konforme Fahrgeräusch besteht aus drei tonalen Motorordnungen bei 240, 270 und 300 Hz bei 0 km/h. Da höhere Motorordnungen meist einen geringeren Pegel haben, wurde die mittlere Motorordnung um 6 dB und die höchste um 12 dB bedämpft. Die geschwindigkeitsabhängige Fre-

quenzänderung des Fahrgeräuschs beträgt 3%.

Für die Stationär-Geräusche wurde das Fahrgeräusch als Basis herangezogen und einige Parameter variiert. Die Parameter wurden zuvor in einem Workshop mit Vertretern des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), einiger deutscher Automobilhersteller, der europäischen Blindenverbände, Anwohnern und Vertretern des Verbandes der Automobilindustrie festgelegt.

Pegelstufen: Die Geräusche wurden 9 dB über dem Mindestpegel der Regelung [2] (als Pegelstufe 1) erzeugt. Um eine Pegelverschiebung zu erzeugen, wurden die Geräusche ebenfalls 15 dB über dem Mindestpegel der Regelung (Pegelstufe 2) erzeugt. Diese Pegelstufen wurden kombiniert, sodass die folgenden Pegelunterschiede vorlagen:

- $AVAS_{drive}$: 9 dB \rightarrow $AVAS_{stat}$: 9 dB (Pegelstufe 1 (PS01))
- $AVAS_{drive}$: 15 dB \rightarrow $AVAS_{stat}$: 9 dB (Pegelsprung (PSP))
- $AVAS_{drive}$: 15 dB \rightarrow $AVAS_{stat}$: 15 dB (Pegelstufe 2 (PS02))

Für beide Pegelstufen wurden auch zwei Geräusche ohne Stationär-Geräusch verwendet:

- $AVAS_{drive}$: 9 dB kein $AVAS_{stat}$ (ohne $AVAS_{stat}$ _PS01)
- $AVAS_{drive}$: 15 dB kein $AVAS_{stat}$ (ohne $AVAS_{stat}$ _PS02)

Frequenzsprung: Ein Frequenzsprung wurde durch eine prozentuale Frequenzänderung erzeugt. Die Frequenzen von $AVAS_{stat}$ wurden zu niedrigeren Frequenzen verschoben (immer in Bezug auf die Mittenfrequenz) um einen Prozentsatz der Mittenfrequenz (vgl. Abb. 1). Die drei tonalen Komponenten von $AVAS_{drive}$ liegen jeweils 30 Hz auseinander. Sind die Frequenzen bei $AVAS_{stat}$ ebenfalls 30 Hz auseinander entspricht dies einem Sprung von 0%.

- kein Frequenzsprung (0%): gleiche Frequenzen von $AVAS_{drive}$ und $AVAS_{stat}$
- mittlerer Frequenzsprung (50%): Frequenzen von $AVAS_{stat}$ wurden 15 Hz zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben
- großer Frequenzsprung (100%): Frequenzen von $AVAS_{stat}$ wurden 30 Hz zu niedrigeren Frequenzen verschoben

Rauigkeitsänderung: Eine Rauigkeitsänderung wurde durch die Veränderung der Frequenzabstände zwischen den tonalen Komponenten erzeugt. Die Rauigkeit hängt vom Frequenzabstand der Töne ab, sodass sie für $AVAS_{stat}$ variiert wurden, um im Vergleich zum $AVAS_{drive}$ eine andere Rauigkeit zu erzeugen:

- keine Rauigkeitsänderung: $AVAS_{drive}$: 30 Hz, $AVAS_{stat}$: 30 Hz
- mittlere Rauigkeitsänderung: $AVAS_{drive}$: 30 Hz, $AVAS_{stat}$: 20 Hz
- große Rauigkeitsänderung: $AVAS_{drive}$: 30 Hz, $AVAS_{stat}$: 10 Hz

Die Rauigkeitsänderung wurde immer in Bezug auf die Mittenfrequenz durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Mittenfrequenz zwischen $AVAS_{drive}$ und $AVAS_{stat}$ konstant gehalten wurde und der Abstand zu der oberen und unteren Frequenz von $AVAS_{stat}$ variiert wurde (siehe Abb.1).

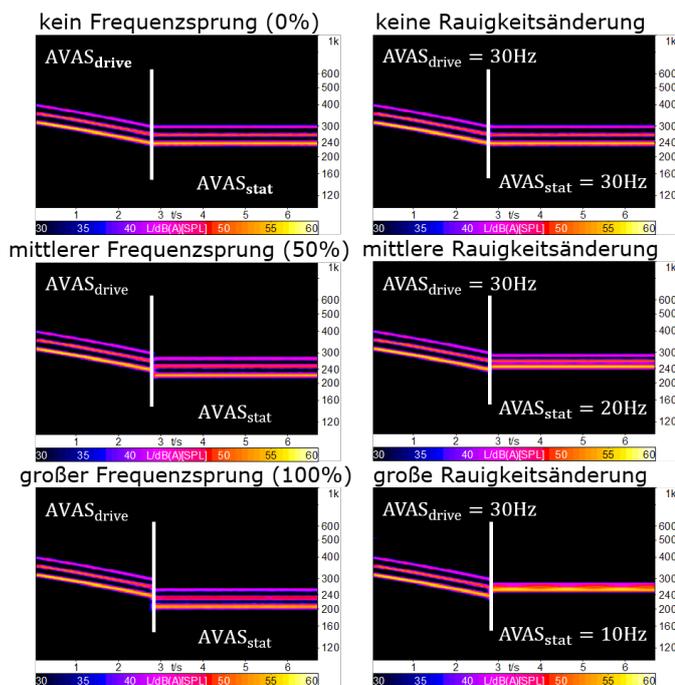


Abbildung 1: Übersicht über die Parametervariationen der Stimuli zwischen Fahrgeräusch und Stationär-Geräusch

Die Übertragungsfunktionen des Soundgenerators (hier Delphi) wurden bei der Erzeugung der synthetischen Sounds als Wiedergabefilter implementiert, so dass sie die gleichen Richtcharakteristiken aufweisen wie das Originalfahrzeug mit AVAS-System. Die resultierenden Fahrzeuggeräusch- und Positionsdaten wurden zur Verwendung im Wellenfeldsynthese-System (WFS) exportiert. Die WFS ist ein räumliches Audiowiedergabeverfahren mit dem Ziel, virtuelle akustische Umgebungen zu schaffen. Schließlich wurde das variable Zusatzgeräusch mit aufgezeichneten Reifenrollgeräuschen überlagert und ergab somit das gesamte Fahrzeuggeräusch.

Versuchsdurchführung

Die Hörversuche wurden im Multimodalen Messlabor (MMM) der TU Dresden durchgeführt. Das MMM umfasst eine Fläche von 4 m Breite x 6 m Länge und ist umlaufend mit 468 Lautsprechern ausgestattet. Die Anlage wurde benutzt, um das 55 dB(A)-Hintergrundgeräusch sowie die erforderlichen Fahrzeuggeräuschquellen darzubieten. Das Hintergrundgeräusch wurde allseitig als ebene Wellen abgestrahlt, wodurch sich die Versuchspersonen auditiv in eine Verkehrsszene hineinversetzt fühlen, ohne dass das Hintergrundgeräusch ortbar ist (vgl. Abb.2).

Versuchsbeschreibung

Auf Parkplätzen sind die Abstände zwischen Fahrzeugen und Passanten besonders gering, weshalb es häufig zu sicherheitskritischen Situationen kommt. In diesen Situationen sind besonders Fußgänger darauf angewiesen, anführende Fahrzeuge schnell zu lokalisieren. Bei diesem Versuch werden alle Fahr- und Stationär-Geräusche mit einem Hintergrundgeräusch präsentiert. Dabei werden randomisierte Verzögerungszeiten zwischen 2 und 4 s bis zum Einsetzen des Geräusches genutzt. In diesem Parkplatzversuch wird das Rückwärtsfahren eines Elektrofahrzeugs untersucht, da dieses den „Worst-Case“ darstellt und somit die Vorwärtsausparksituation mit abdeckt. Ziel des Experimentes ist die Messung der Reaktionszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf das Geräusch eines ausparkenden Fahrzeugs gegenüber einem Hintergrundgeräusch zu reagieren. Die Versuchspersonen reagieren auf die Erkennung des wahrgenommenen Fahrzeuggeräusches per Mausclick. Bei diesem Versuch werden während der Fahrt verschiedene geschwindigkeitsabhängige Geräusche erzeugt. Im Stillstand verbleibt das Fahrzeug in Ruhe oder es wird ein Stationär-Geräusch abgestrahlt. Des Weiteren sollen die Versuchspersonen die Fahrzeuge orten, indem Sie die Frage beantworten: „Welches Fahrzeug parkt aus?“ (vgl. Abb. 2). Die gemessenen Reaktionszeiten werden in einer Excel-Tabelle abgelegt. Dem eigentlichen Hörversuch wird ein Training vorangestellt, in dem verschiedene Situationen dargeboten werden. Die Probanden können sich mittels der Trainingsstimuli gut „einhören“ und erhalten zusätzlich vom Versuchsleiter Erläuterungen zur gehörten Verkehrsszene. Bei diesem Versuch werden sowohl die Wiedergabereihenfolge der Paarungen aus Fahrzeug- und Hintergrundgeräusch, als auch die Anfahrzeitpunkte der Fahrzeuge randomisiert dargeboten.

Probanden

Insgesamt wurden für die Hörversuche 41 Versuchspersonen rekrutiert. Davon waren 21 normalsehend und 20 blind bzw. sehbeeinträchtigt. Des Weiteren ist das Geschlecht der Versuchspersonen nahezu gleichverteilt (19 Frauen, 22 Männer) und die Altersspanne umfasst 20 bis 70 Jahre. Hörschädigungen wurden als Dropouts aus der Studie ausgeschlossen.

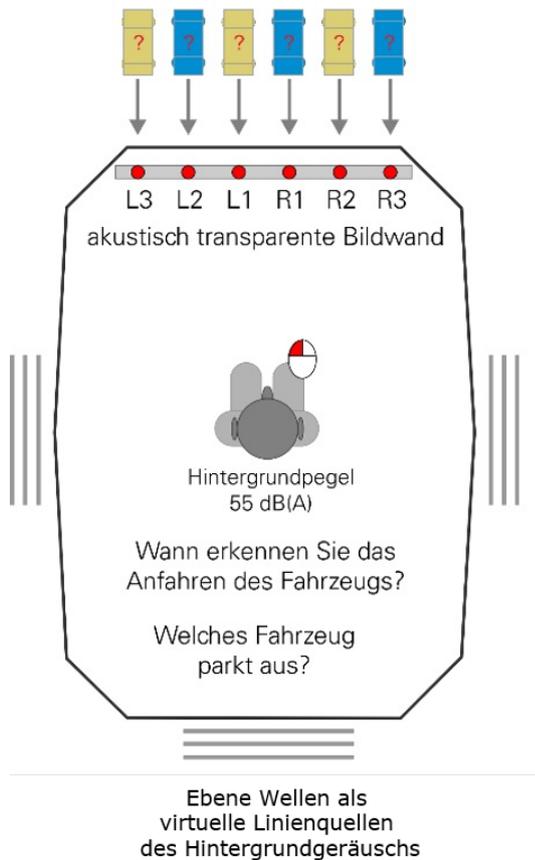


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung des Versuchsaufbaus für ein anfahrendes Fahrzeug

Ergebnisse

Die Mediane der Reaktionszeiten sind für die UN-Geräusche für alle Parklücken gemittelt in Abbildung 3 aufgetragen, da sich zwischen den Parklücken keine signifikanten Unterschiede zeigen. Dabei sind zusätzlich die Konfidenzintervalle angegeben.

Bei den UN-konformen Geräuschen zeigen sich statistisch signifikante Unterschiede in den Haupteffekten: Pegelstufen ($F(1.6,62.75)=320.26$, $p=0.000$), Frequenzsprung ($F(1.7,66.21)=19.66$, $p=0.000$) und Rauigkeit ($F(2,78)=126.97$, $p=0.000$):

- Geräusche mit Pegelstufe 1 sind signifikant später detektierbar als Geräusche mit einem Pegelsprung ($p<0,0005$) oder Pegelstufe 2 ($p<0,0005$)
- Geräusche mit Frequenzsprung 0% sind signifikant später detektierbar als Geräusche mit Frequenzsprung 50 % ($p=0,015$) und 100% ($p<0,0005$)
- Geräusche mit Frequenzsprung 50% sind signifikant später detektierbar als Geräusche mit Frequenzsprung 100% ($p<0,0005$)
- Geräusche mit Rauigkeit 30 Hz sind signifikant früher detektierbar als Geräusche mit Rauigkeit 20 Hz ($p<0,0005$) und Rauigkeit 10 Hz ($p<0,0005$)

Zusätzlich zu den Haupteffekten treten noch Interaktionen auf:

- Interaktion Parklücke und Pegel ($F(4,156)=15.23$, $p=0.000$)
- Interaktion Pegel und Frequenzsprung ($F(4,156)=7.08$, $p=0.000$)
- Interaktion Parklücke, Pegel und Frequenzsprung ($F(8,312)=2.59$, $p=0.009$)
- Interaktion Parklücke und Rauigkeit ($F(3.25,126.77)=3.14$, $p=0.024$)
- Interaktion Pegel und Rauigkeit ($F(4,156)=196.86$, $p=0.000$)
- Interaktion Frequenzsprung und Rauigkeit ($F(4,156)=24.17$, $p=0.000$)
- Interaktion Pegel, Frequenzsprung und Rauigkeit ($F(8,312)=20.93$, $p=0.000$)

In einem zweiten Schritt wurden die Geräusche mit Stationär-Geräusch mit den jeweiligen Geräuschen des gleichen Pegels aber ohne $AVAS_{stat}$ miteinander verglichen. Anhand der Tabelle 1 zeigt sich, dass sowohl Stationär-Geräusche mit Frequenzsprung 0% und Rauigkeit 10 Hz, als auch Geräusche mit Frequenzsprung 50% und Rauigkeit 10 Hz signifikant später detektiert werden als das Geräusch ohne $AVAS_{stat}$ bei der entsprechenden Pegelstufe. Des Weiteren werden die Geräusche mit $AVAS_{stat}$ und Rauigkeit 30 Hz (Frequenzsprung 0%, 50% und 100%) und auch Geräusche mit Frequenzsprung 100% sowie Rauigkeit 10 Hz signifikant früher detektiert als Geräusche ohne $AVAS_{stat}$.

Tabelle 1: Paarweise Vergleiche zwischen UN-Geräuschen ohne Stationär-Geräusch und den einzelnen Parametervariationen

	Geräusche mit $AVAS_{stat}$	Signifikanz
Frequenzsprung 0%	Rauigkeit 30 Hz	0,004
	Rauigkeit 20 Hz	0,540
	Rauigkeit 10 Hz	0,016
Frequenzsprung 50%	Rauigkeit 30 Hz	0,000
	Rauigkeit 20 Hz	0,815
	Rauigkeit 10 Hz	0,005
Frequenzsprung 100%	Rauigkeit 30 Hz	0,000
	Rauigkeit 20 Hz	0,966
	Rauigkeit 10 Hz	0,000

Die Reaktionszeiten der UN-Geräusche zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen blinden und sehenden Probanden und auch nicht zwischen weiblichen und männlichen Probanden.

Diskussion und Zusammenfassung

Diese Studie liefert einen Beitrag zum Verständnis des Zusammenhangs zwischen Stationär-Geräuschen und deren Wahrnehmbarkeit im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Fußgängern. Ziel war die Fragestellung, ob ein zusätzliches Stationär-Geräusch für die Sicherheit und für die Erkennung eines elektrisch angetriebenen

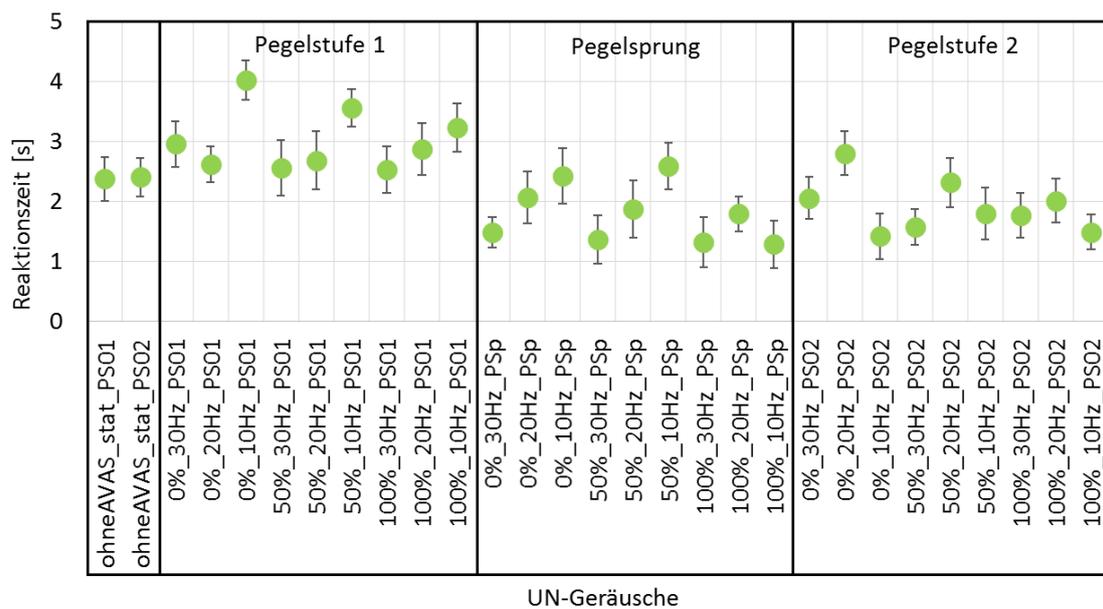


Abbildung 3: Mediane der Detektionszeiten für die UN-konformen Geräusche

Fahrzeugs hilfreich ist und die Klärung welche notwendigen Geräuscheigenschaften dieser Stationär-Geräusche vorteilhaft bei der Erkennung sind. Fahrzeuge mit elektrischen Antriebskomponenten können ohne zusätzlich abgestrahlte Außengeräusche beim rein elektrischen Fahren sehr leise sein. Eine Vielzahl an Studien unter Labor- und praktischen Verkehrsbedingungen belegt die deutlich verringerte Hörbarkeit solcher Fahrzeuge. Für die Frage, ob ein Stationär-Geräusch die Sicherheit im Straßenverkehr besonders für schwächere Verkehrsteilnehmer verbessern würde, wurde bisher noch kaum behandelt. In einer Studie von den Autoren wurde bereits die Verkehrssituation "Fußgängerüberweg" mit Anhalte- und Anfahrvorgang hinsichtlich dem Einfluss von Stationär-Geräuschen untersucht.[3]

In der hier vorliegenden Untersuchung wurde eine bislang wenig betrachtete Verkehrssituation (Parkplatz) untersucht. Einige Stationär-Geräusche zeigen sowohl bei Normalsehenden als auch bei blinden und sehbeeinträchtigten Personen signifikante Effekte bezüglich der Detektionsfähigkeit. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass nicht generell jedes Stationär-Geräusch zu einer besseren Detektion führt. Es hat sich gezeigt, dass es Stationär-Geräusch-Kombinationen gibt, die eine frühere Detektion ermöglichen. So zeigt sich, dass ein höherer Pegel bzw. ein Pegelsprung, ein höherer Frequenzsprung und eine Rauigkeitsänderung von 30 Hz vorteilhaft für die Detektion eines Fahrzeuges sind. Im direkten Vergleich ohne Stationär-Geräusch können Geräusche mit Rauigkeitsänderung 30 Hz und Frequenzsprung (0%, 50% und 100%) als auch die Kombination Frequenzsprung 100% mit Rauigkeitsänderung 10 Hz früher detektiert werden. Das UN-Geräusch mit Pegelsprung, Frequenzsprung 100% und Rauigkeitsänderung 10 Hz (100%_10Hz_PSp) konnte im Mittel 1,11 s früher detektiert werden, als das Geräusch mit dem entsprechenden Pegel ohne Stationär-Geräusch (ohneAVAS_stat_PS02).

Deutliche Unterschiede zwischen Fahr- und Stationär-Geräusch z.B. durch Pegelsprung oder Frequenzsprung kann die Detektionsfähigkeit begünstigen.

Des Weiteren kann ein ungeeignetes Stationär-Geräusch auch zu einer späteren Detektion führen, da es eine Änderung des Hintergrundgeräusches verursachen kann. Diese Aspekte und deren Einfluss auf die Verkehrssicherheit und die Lärmbelastigung werden in weiteren Studien untersucht.

Dieser Veröffentlichung liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 82.0665/2016 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Literatur

- [1] Verordnung (EU) Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 70/157/EWG Text von Bedeutung für den EWR
- [2] UNECE: Proposal for a new Regulation concerning the approval of quiet road transport vehicles (QRTV), (2016), ECE/TRANS/WP. 29/2016/26. Geneva
- [3] Steinbach, L. and Altinsoy, M. E.: Influence of an artificially produced stationary sound of electrically powered vehicles on the safety of visually impaired pedestrians. Applied Acoustics, 2020, 165. Jg., S. 107290.