

Bewertung der Lästigkeit von Geräuschen während des stationären Ladens batterieelektrischer Fahrzeuge

Fleming Kohlenberg¹, Uwe Letens²

¹ *Fachgebiet Technische Akustik, TU Berlin, Deutschland, Email: fkohlenberg@gmail.com*

² *Daimler AG, 71059 Sindelfingen, Deutschland, Email: uwe.letens@daimler.com*

Einleitung

Im Zuge der Elektrifizierung des Straßenverkehrs treten neben reinen Fahrgeräuschen zusätzlich unerwünschte Geräusche im und am Fahrzeug an der Ladestation auf. Um eine begründete Aussage zu treffen, ob dieser Lärm eine relevante akustische Störquelle darstellt, wurde dieser im Rahmen einer Bachelorarbeit[1] exemplarisch an sieben Elektrofahrzeugen gemessen und analysiert. Die Arbeit entstand im Winter 2016/17 bei der Daimler AG in Sindelfingen und wurde durch das Fachgebiet Technische Akustik der Technischen Universität Berlin betreut.

Als Geräuschquellen ließen sich einerseits Komponenten des Kühlkreislaufes, welche die am Innenwiderstand der Batterie entstehende Wärme abführen, sowie der Leistungselektronik während der Gleichrichtung und der Umspannung identifizieren. Es wurden akustische Messungen des Ladevorgangs unter realen Bedingungen an Ladestationen durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Fahrzeuge sowohl mit Wechselstrom als auch mit Gleichstrom mit unterschiedlicher Ladeleistung geladen. Aufbauend auf den gewonnenen Messdaten wurde untersucht, wie auftretende Geräusche hinsichtlich spektraler Auffälligkeiten, Dauer sowie Stärke der Lärmbelastung bewertet werden können. Zusätzlich wurde in einem Hörversuch die Toleranzschwelle als Indikator für die Lästigkeit dieser Störgeräusche ermittelt.

Die Lästigkeit ist im Gegensatz zu psychoakustischen Größen wie Lautheit (DIN 45631), Schärfe (DIN 45692), Rauigkeit, oder Tonhaltigkeit (DIN 45681), welche sich zumindest im Normungsprozess befinden, keine feststehende messbare Größe. Die Lästigkeit von Geräuschen ist sowohl personen- als auch situationsabhängig und somit stark subjektiv. Wer Geräuschen bspw. nicht ausweichen kann, empfindet diese als störender.[2] Für Sinamari und Sentpali[3] ist die Lästigkeit nicht klar definierbar und auch nicht per Messung bestimmbar. Sie ist abhängig von der Frequenzverteilung, der Zeitdauer der Einwirkung, dem Pegelverlauf über der Zeit, der seelischen Verfassung des Belästigten, seiner persönlichen Beziehung zum Geräusch sowie weiteren unbekanntem Faktoren. Zusätzlich hängt die Lästigkeit von der zeitlichen Struktur der Signale also bspw. auch von Größen wie der Rauigkeit und Impulshaftigkeit ab. In dieser Arbeit wird die Lästigkeit nicht direkt über Verfahren wie die psychoacoustic annoyance von Fastl und Zwicker[4] berechnet, sondern versucht, diese über eine Geräuschtoleranz der Ladegeräusche in einem Hörversuch abzuschätzen.

Geräuschquellen: Leistungselektronik

Während des üblichen Ladevorganges (AC, mit Wechselstrom) muss eine Um- und Gleichrichtung der Netzspannung auf das Niveau der Fahrzeugbatterie erfolgen. Beim Schnellladen bzw. DC-Laden erfolgt diese Gleichrichtung außerhalb des Fahrzeugs in der Ladesäule. Grundsätzlich lässt sich Elektrostriktion, eine Verformung von Dielektrika in elektrischen Feldern für Geräuschquellen in der Leistungselektronik ausmachen. Durch die Periodizität des Wechselstroms wird eine oszillierende Längenänderung der Kondensatoren hervorgerufen. Analog können auch bspw. stromdurchflossene elektrischen Leitungen per Magnetostraktion Bleche zu Schallabstrahlung anregen.

Als weitere Geräuschquelle innerhalb der Leistungselektronik lassen sich Halbleiterbauelemente wie Thyristoren identifizieren, welche durch elektrische Taktung per Pulsweitenmodulation zu hochfrequenten Schwingungen angeregt werden. Eine Luftschallabstrahlung erfolgt bei beiden Mechanismen durch die beteiligten Bauteile, wodurch eine genaue Lokalisierung der Schallquellen erschwert wird.

Geräuschquellen: Kältekreislauf

In der heutigen Fahrzeugentwicklung werden fast ausschließlich Elektrofahrzeuge mit Lithium-Ionen-Technologie produziert. Werden derartige Akkumulatoren unter hohen Ladeströmen nicht ausreichend gekühlt, kommt es zu Kapazitätsverlusten durch Abscheidung von metallischem Lithium. Für einen langzeitstabilen Betrieb des Lithium-Ionen-Akkus muss somit eine Abführung der Wärme gewährleistet sein. Die Wärmeentwicklung wird in erster Näherung proportional zur Ladeleistung angesehen.

Es existieren verschiedene Ansätze zur Batteriekühlung. Alle Ansätze haben einen Kühlkreislauf mit Kompressor, Drossel, Kondensator und Lüfter gemeinsam. Diese Komponenten können hörbaren Schall produzieren, dominant sind insbesondere der Kompressor und der Lüfter. Die Geräuschquellen eines Lüfters sind hauptsächlich in Strömungsgeräuschen und Druckwechselimpulsen am Lüfterblatt, Störgeräuschen vom Antriebsmotor sowie Körperschallübertragung und -abstrahlung an der Lüfterzarge auszumachen.[3] Die tonalen Anteile bestehen aus den Vielfachen (Ordnungen) des Drehklanges der Lüfterblätter. Grundsätzlich gilt es

im Sinne der Lästigkeit den Drehklang zu minimieren, um ein möglichst breitbandiges Spektrum zu erhalten. Der breitbandige turbulente Wirbellärm entsteht durch Verwirbelungen an den Flügelspitzen des Ventilators und skaliert stark mit der Drehzahl.

In Elektrofahrzeugen ist üblicherweise ein Scrollverdichter im Einsatz. Die Verdichtung erfolgt durch zwei ineinander greifende identische Spiralen, von denen eine beweglich und die andere starr angeordnet ist. Die Berührungspunkte beider Spiralen wandern bei der Drehung von innen nach außen, wodurch der Kompressionsraum verkleinert und das Kältemittel zum Auslass im Mittelpunkt verdichtet wird.[5]

Durch die Berührungen der beiden Spiralen wird Körperschall induziert, welcher sich in den Leitungen des Kältemittels ausbreitet. Durch das Scrollverdichterprinzip ohne Zylinder wird insbesondere die Grundfrequenz angeregt. Diese berechnet sich aus der Drehzahl des Verdichters. Es können prinzipiell alle Vielfachen der Grundfrequenz dominant im Spektrogramm eines Scrollverdichters auftreten. Durch die taumelnde Bewegung sowie nichtlineare Effekte können zusätzlich auch Seitenbänder zu jeder Ordnung in Erscheinung treten, womit sich ein komplexes akustisches Erscheinungsbild für den Verdichtungsprozess des Kältemittels ergeben kann.

Geräuschmessungen

Die Fahrzeugauswahl ist in Tabelle 1 dargestellt. Es handelt sich um zum Stand der Arbeit auf dem Markt verfügbare Elektrofahrzeuge verschiedener Hersteller. Fahrzeug A und B wurden im Akustikprüfstand vermessen, der Rest an Schnellladestationen im Freien. Zusätzlich wurde Fahrzeug G bei einer definierten Temperatur von 40° C geladen um zu erforschen, inwiefern auch geringe Ladeleistungen den Kältekreislauf aktivieren können. Der verwendete Messaufbau ist in der Ab-

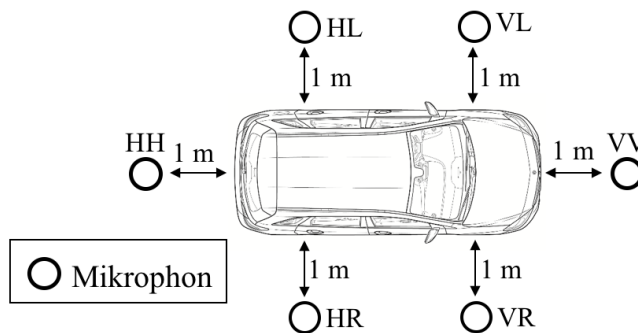


Abbildung 1: Messaufbau mit Kennzeichnung relativ zum Radstand bzw. Mitte des Fahrzeuges in einer Höhe von 1,5 m.

Ergebnisse

Die Fahrzeuge A und B wurden mit Wechselstrom im Akustikprüfstand mit einem Ruhepegel von 17 dB(A) geladen. Fahrzeug A emittierte bei einer Ladeleistung von 3,7 kW sehr stationär zwar tonale, aber mit 25 dB(A) sehr geringe Schalldrücke. Für Fahrzeug B mit 7,4 kW ergab sich sogar ein leicht geringerer mittlerer Schalldruckpegel von rund 23 dB(A) und ein ähnlicher tonaler Verlauf.

Auf allen anderen Aufnahmen der DC-Ladevorgänge sind viele Störgeräuschspitzen durch vorbeifahrende Fahrzeuge enthalten, welche nicht Bestandteil des Ladergeräuschs sind und Störgeräusche bis 3 kHz zumindest verdecken sowie den Gesamtschalldruckpegel verfälschen. Der Frequenzanteil um 150 Hz ist ebenfalls nicht den Messobjekten zuzuordnen. Ladegeräusche bilden in den folgenden Abbildungen eher die horizontalen und weniger die vertikalen spektralen Auffälligkeiten.

Sehr stationär aber durch eine Lüfteraktivität geprägt ist das Ladeverhalten von Fahrzeug C in Abbildung 2. Akustisch verhält es sich breitbandig mit starken Frequenzanteilen um 115 Hz, 290 Hz und 590 Hz sowie einem gemittelten Schalldruckpegel von 58 dB(A).

Tabelle 1: Übersicht über die gemessenen Fahrzeuge

Elektrofahrzeug	Ladeleistung in kW
A	3,3 (AC)
B	7,4 (AC)
C	50 (DC)
D	50 (DC)
E	50 (DC)
F	50 (DC)
G	11 (AC) & 110 (DC)

bildung 1 dargestellt, wobei generell nur vorne (V) und nur bei Fahrzeug D hinten (H) gemessen wurde. Da der Ladestrom abhängig vom Ladezustand ist, wurden alle Fahrzeuge vor jeder Messung auf einen so gering Ladezustand wie möglich gebracht. Die Signalaufnahme erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 44,1 kHz, einem Hochpass bei 22 Hz sowie einer Auflösung von 24 bit. Die Datenerfassung wurde über ein kalibriertes binaurales Messsystem realisiert, um den anschließenden Hörversuch pegelrichtig durchführen zu können.

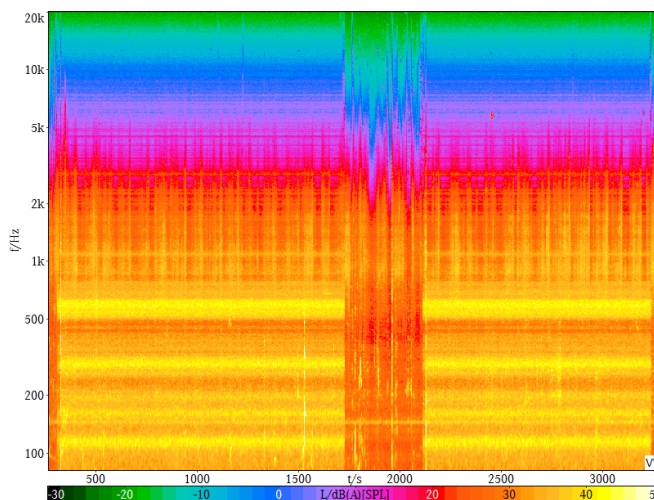


Abbildung 2: Gesamtansicht des sehr stationären Ladevorgangs des Fahrzeugs C an der Position VV. Eine Ausnahme bildet die Fehlfunktion der Ladesäule zwischen 1750 s bis 2130 s.

Das Spektrum über der Zeit für Fahrzeug D ist in Abbildung 3 dargestellt. In der unteren Ellipse ist ein Hochlauf einer Komponente, vermutlich eines Lüfters, ab 600s bis zum Ende der Messung markiert. Ein vermuteter Klimakompressor mit vielen Harmonischen emittiert von 900s bis 1300s Schall (mittlere Ellipse). Anhand des durch die vertikale Ellipse markierten Bereichs ist eindeutig erkennbar, dass es sich um verschiedene von einander unabhängige Komponenten handelt. Der Schalldruckpegel des aufgezeichneten Signals im Abschnitt 810s bis 1290s mit relativ deutlichen Ladegeräusches liegt bei etwa 53 dB(A). Zusätzlich sind Geräuschanteile in hohen Frequenzlagen am oberen rechten Rand der Graphik markiert. Die Ladegeräusche setzen sich somit aus mehreren dominanten Quellen zusammen. In Abbildung 4 ist der gesamte Schnelllade-

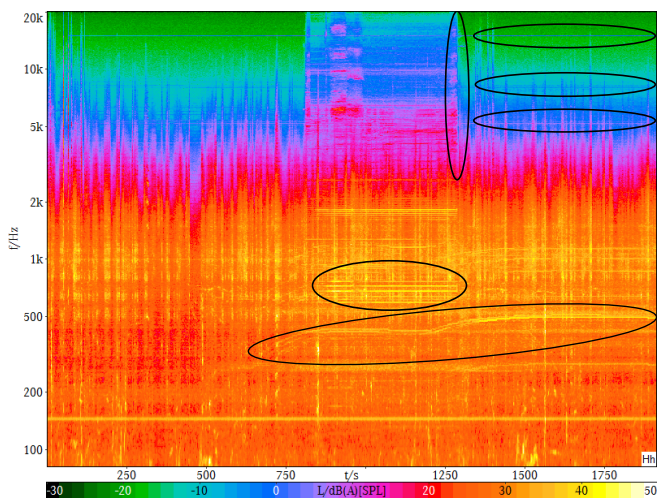


Abbildung 3: Gesamtansicht des Ladevorgangs des Fzgs. D an der Position HH. Neben den hohen Störgeräuschen sind nur undeutlich Ladegeräusche erkennbar und wurden deshalb schwarz markiert.

vorgang mit 110 kW des Fzgs. G akustisch dargestellt und lässt sich grob in vier Abschnitte einteilen, welche in der Graphik durch kleine schwarze Balken an der Zeitachse markiert sind. Im linken markierten Bereich fängt vermutlich ein Lüfter mit mehreren Ordnungen an, erst seine Drehzahl zu erhöhen, auf einem Plateau zu variieren und anschließend wieder abzusenken. Zwischen 950s bis 2300s dominiert der vermutete Scrollverdichter, welcher seine Drehzahl stufenweise über einen Zeitraum von 400s bis 1060s, also über einen Zeitraum von zehn Minuten, erhöht. Nach Erreichen des Plateaus emittiert der Kompressor stationär Schall zwischen 1000s und 2080s, also knapp 20 Minuten lang, mit einer Grundfrequenz von 140 Hz was einer Drehzahl von 8400 rpm entspricht. Obwohl Kompressor und Lüfter mit einer ähnlichen Grundfrequenz Schall zu emittieren scheinen, ist beispielsweise im rechten markierten Bereich deutlicher erkennbar, dass es sich um zwei unabhängige Komponenten handeln muss. In diesem Abschnitt wird ein Schalldruckpegel von 58 dB(A) emittiert.

Der anschließende Nachlauf des Kompressors dauert von 2050s bis 2300s also fast drei Minuten. Bei Fzg. G lärmten ebenfalls Komponenten des Kühlkreislaufes, als

es mit Wechselstrom unter hohen Temperaturen geladen wurde.

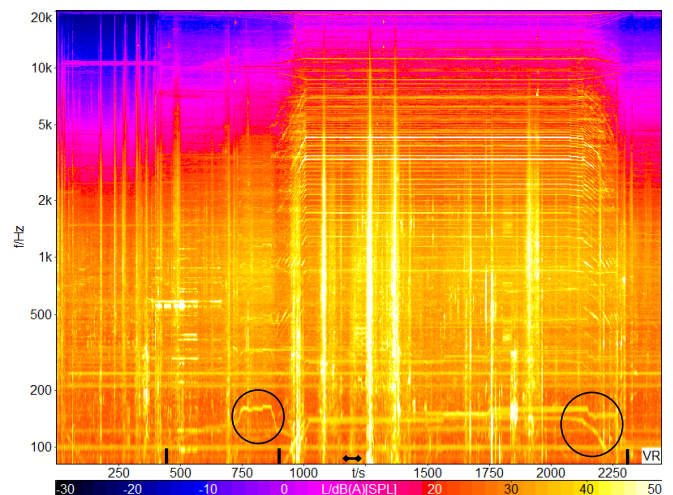


Abbildung 4: Gesamtansicht des Ladevorgangs des Fzgs. G an der Position VR. Schwarz markiert sind die Unterteilungen der Abschnitte, der Zeitraum des näher betrachteten Ausschnitts sowie Auffälligkeiten im Drehzahlverhalten zweier Komponenten.

Zusammenfassend konnten große Unterschiede der Geräuschsignatur bei den betrachteten Fahrzeugen festgestellt werden. Während einige Elektroautos (Fzg. E, Fzg. F) akustisch kaum relevant mit bis zu 50 kW laden konnten, wurde bei Fzg. G eine deutlich wahrnehmbare Geräuschsignatur aufgezeichnet. Es zeigte sich allerdings, dass bei den meisten Fahrzeugen über den Ladezyklus üblicherweise die Komponenten des Kältekreislaufes nicht ständig aktiv waren und somit verschiedene Pegel zu beobachten waren.

Hörversuch

Das Szenario des Hörversuchs kann als „Ladendes Fahrzeug vor einem offenen Wohnungsfenster in einer Sommernacht“ umrissen werden. Das Elektroauto lädt zum Beispiel vor der Garage oder direkt am Bürgersteig vor dem eigenen Schlafzimmer oder dem eines Nachbarn. Beim stationären Laden sind keine Maskierungen vorhanden und die Ladegeräusche können prinzipiell direkt wahrgenommen werden. Im Gegensatz zum konventionellen Tanken findet ein elektrischer Ladevorgang auch vor der eigenen Wohnung statt. Obwohl heutzutage noch nicht in Wohngebieten schnellgeladen wird, ist dies durch erwartbar höhere Akkukapazitäten in Zukunft durchaus zu erwarten. Ziel des Hörversuchs ist die Bestimmung der Toleranzschwelle für das Ladegeräusch in kritischer Umgebung während des Einschlafens potentiell betroffener Personen. Das aufgenommene Ladegeräusch wurde in sechs Abstufungen im Abstand von 3 dB im Pegel abgesenkt und mit Abendgeräuschen einer ruhigen Wohnggend gemischt. Durch letzteres und weitere Maßnahmen sollte das Einfühlungsvermögen der Probanden in die Situation erleichtert werden. Aus der Absenkung der noch zu tolerierenden Variante wird indirekt ein Rückschluss

auf die Bewertung der Lästigkeit ermöglicht.

Im Laufe eines Vortests stellte sich heraus, dass die aufgenommenen Ladegeräusche im Vorfeld deutlich abgesenkt werden müssen um überhaupt durch die Abstufungen in einen tolerablen Bereich zu kommen.

Den insgesamt 24 Probanden mit vorwiegend akustischer Fachkompetenz wurden vier verschiedene Ladesituationen mit jeweils sechs Abstufungen des Ladegeräusches vorgespielt. Konkret sollte die Fragestellung: „Folgende Geräuschsituation ist für mich tolerierbar“ angekreuzt werden. Auf dem interaktiven Bildschirm konnte sich jeder Proband zu jedem Fahrzeug die sechs verschiedenen Varianten in beliebiger Reihenfolge auswählen. Die Probanden kannten weder die Fahrzeuge noch wussten sie, dass es sich um Abstufungen handelt. Die Charakteristika der Stimuli sind in der Reihenfolge des Hörversuchs in Tabelle 2 dargestellt. Die Datengrundlage bilden eigene gemessene DC-Ladegeräusche, sowie eigene abends aufgenommene Hintergrundgeräusche der Abendstimmung. Die Auswahl des Hintergrundgeräusches stellt neben Maskierungseffekten auch eine Referenz für die Probanden im Zusammenhang mit dem Ladegeräusch dar und beeinflusst somit das Ergebnis.

Tabelle 2: Übersicht über die im Hörversuch getesteten Ladegeräusche

Fahrzeug	Charakteristik
C	Kompressor dominant
G	Lüfter und Kompressor dominant
D	Lüfter dominant
G	instationärer Nachlauf

Aufbauend auf den gewonnenen Messdaten wurde die minimale Toleranzschwelle als Indikator für die Lästigkeit dieser Störgeräusche ermittelt. Die meisten Probanden konnten ihre Toleranzschwelle in den präsentierten Varianten wiederfinden. Es zeigte sich, dass für eine Toleranz der Geräusche im kritischsten Falle im Mittel eine Absenkung von Fahrzeug C und D um 18 dB und bei Fahrzeug G im stationären Fall bis zu 30 dB bzw. sogar um 33 dB in der instationären Variante notwendig wäre. Die ermittelte benötigte Absenkung soll hierbei weniger als absolute Zahl, sondern vielmehr als Indikator auf eine hohe Lästigkeit verstanden werden. Die statistischen Ergebnisse entsprechen oftmals den geäußerten subjektiven Eindrücken der Probanden, es lassen sich aber auch gegensätzliche Tendenzen ausmachen. Uneinig waren sich die Probanden unter anderem darüber, ob die Toleranzschwelle bei mehrmaliger Aussetzung steigen (Gewöhnung) oder sinken (mentale Fokussierung auf das Ladegeräusch) würde. Das Geräusch des Fahrzeuges C etwa wurde von einigen Probanden ähnlich dem eines Kühlschranks, in welchem ebenfalls ein Kältekreislauf implementiert ist, oder einer Wärmepumpe empfunden. Das Klangbild des Fahrzeuges D wurde von einigen Teilnehmern als entferntes Rauschen einer Heizung oder gar einer Autobahn wahrgenommen. In diesem Zusammenhang wurden bereits bekannte beziehungsweise gewohn-

te Geräusche als weniger lästig empfunden. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen des Fragebogens. Zudem wurde der generelle Eindruck der Abhängigkeit der Toleranz von der Tonhaltigkeit der Klänge geäußert. Da die Toleranzschwelle sehr niedrig für alle getesteten Fahrzeuge im Hörversuch ist, kann die Lästigkeit der Ladegeräusche bei den hier untersuchten elektrischen Fahrzeugen abschließend als sehr hoch bewertet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit thematisiert eine Bewertung der Lästigkeit der Ladegeräusche von aktuellen Elektrofahrzeugen und soll nur einen ersten Stand dieser Thematik darstellen. Ein großes Problem stellten die externen Störgeräusche während der DC-Messung dar. Diese sollten in einem Akustikprüfstand wiederholt werden. Außerdem erscheint es insbesondere beim Schnellladen sinnvoll, auch die Ladegeräusche im Innenraum zu betrachten, da möglicherweise ein Fahrer für die Ladedauer im Auto bleiben möchte, um konzentriert zu arbeiten. Während der Messungen zeigte sich, dass auch die Ladesäule eine nicht zu unterschätzende Emissionsquelle darstellt. Für ein geräuscharmes Laden sind somit nicht nur die Fahrzeug- sondern darüber hinaus die Ladepunkthersteller gefragt. Die Ladegeräusche bei elektrischen Fahrzeugen werden ohne Gegenmaßnahmen zusätzlich sowohl stärker (mehr Ladeleistung) als häufiger (z.B. DC-Schnellladen in Wohngebieten) auftreten. Sollen Elektrofahrzeuge in Zukunft zur Netzstabilisierung im Sinne eines Smart Grids eingesetzt werden, treten Ladegeräusche öfter und auch nachts auf. Diese Geräuscentwicklung vor dem eigenen Grundstück geschieht ohne Interaktion mit dem Nutzer, ist somit unerwartet und dürfte psychoakustisch deutlich kritischer bewertet werden. In Zukunft wird die Relevanz der Thematik demnach deutlich steigen. Mit den Fahrzeugen E und F sind aber auch Beispiele vorhanden, in denen Ladegeräusche anscheinend zumindest für aktuelle Ladeleistungen weitestgehend vermieden werden können.

Literatur

- [1] Kohlenberg, F.: Bewertung der Lästigkeit von Geräuschen während des stationären Ladens batterieelektrischer Fahrzeuge. Bachelorarbeit TU Berlin, 2017
- [2] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich - Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer, Berlin, 2010
- [3] Sinambari, Sentpali: Ingenieurakustik - Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014
- [4] Fastl H. and Zwicker E.: Psychoacoustics Facts and Models, Springer, Berlin, 2007
- [5] Steinberg, P.: Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs V, expert verlag, Renningen, 2006